

**Einfluß von Stabilisatoren auf  
die Porenstruktur und die  
Dauerhaftigkeit von Beton**

**T 3004**

**T 3004**

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

Im Originalmanuskript enthaltene Farbvorlagen, wie z.B. Farbfotos, können nur in Grautönen wiedergegeben werden. Liegen dem Fraunhofer IRB Verlag die Originalabbildungen vor, können gegen Berechnung Farbkopien angefertigt werden. Richten Sie Ihre Anfrage bitte an die untenstehende Adresse.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2003, ISBN 3-8167-6507-6

Vervielfältigung, auch auszugsweise,  
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

**Fraunhofer IRB Verlag**

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

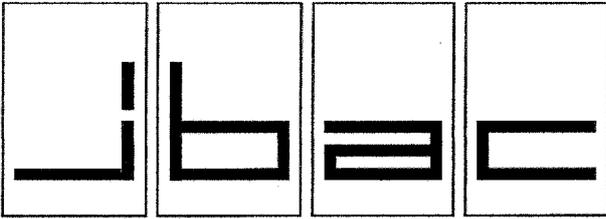
Postfach 80 04 69  
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12  
70569 Stuttgart

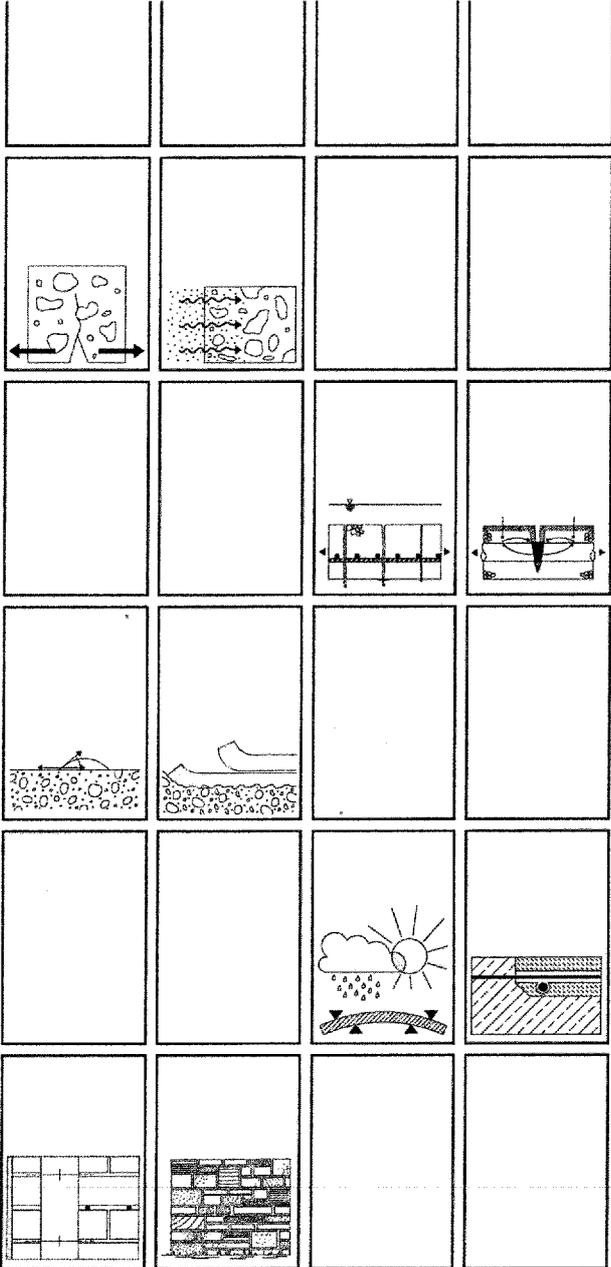
Telefon (07 11) 9 70 - 25 00  
Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

e-mail [info@irb.fhg.de](mailto:info@irb.fhg.de)

URL <http://www.IRBbuch.de>



**Institut für Bauforschung Aachen**  
**Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule**



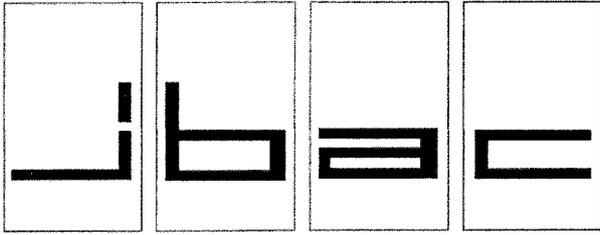
## **Forschungsbericht**

### **F 816**

Einfluß von Stabilisatoren auf die Porenstruktur und die Dauerhaftigkeit von Beton

**Baustoff · Bauteil · Bauwerk**

**Forschung · Entwicklung**  
**Überwachung**  
**Prüfung · Beratung**



# INSTITUT FÜR BAUFORSCHUNG

Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen

Leitung: Professor Dr.-Ing. W. Brameshuber  
Professor Dr.-Ing. M. Raupach

Postfach, D-52056 Aachen  
Schinkelstraße 3, D-52062 Aachen

Telefon (02 41) 80-9 51 00 · Telefax (02 41) 80-9 21 39 · www.ibac.rwth-aachen.de

Pi/Fk

3. Ausfertigung

## THEMA

Einfluß von Stabilisatoren auf die Porenstruktur und die Dauerhaftigkeit von Beton

## ABSCHLUSSBERICHT

Forschungsbericht Nr.

F 816  
vom 13.01.2003

Projektbearbeitung

Prof. Dr.-Ing. W. Brameshuber

Dipl.-Min. R. Pierkes

Auftraggeber/  
Förderer

Deutsches Institut für Bautechnik  
Kolonnenstr. 30 L

10829 Berlin

Auftragsdatum

21.06.2001

Aktenzeichen

P 32-5-7.206-999/01

Dieser Bericht umfaßt 59 Seiten, davon 41 Textseiten.

Soweit Versuchsmaterial nicht verbraucht ist, wird es nach 4 Wochen vernichtet.

Eine längere Aufbewahrung bedarf einer schriftlichen Vereinbarung.

Die auszugsweise Veröffentlichung dieses Berichtes, seine Verwendung für Werbezwecke sowie die inhaltliche Übernahme in Literaturdatenbanken bedürfen der Genehmigung des ibac.

<b><u>INHALTSVERZEICHNIS</u></b>		<b>Seite</b>
1	KURZFASSUNGEN.....	1
1.1	Kurzfassung .....	1
1.2	Abstract.....	2
1.3	Resumée.....	3
2	EINLEITUNG .....	4
2.1	Allgemeines .....	4
2.2	Problemstellung .....	5
3	VORGEHENSWEISE.....	7
3.1	Auswahl der Stabilisierer.....	7
3.2	Versuchsprogramm.....	8
3.2.1	Mörteluntersuchungen .....	9
3.2.2	Betonuntersuchungen .....	10
4	ERGEBNISSE DER MÖRTELUNTERSUCHUNGEN .....	14
4.1	Frischmörtel.....	14
4.2	Festigkeit .....	14
4.3	Wasseraufnahme.....	16
4.4	Porenstrukturkennwerte.....	17
4.5	Zusammenfassung der Mörtelversuche.....	19
5	ERGEBNISSE DER BETONUNTERSUCHUNGEN .....	20
5.1	Frischbeton .....	21
5.2	Druckfestigkeit .....	22
5.3	Wasseraufnahme.....	23
5.4	Porenstruktur .....	24

		Seite
5.5	Frost-Tauwechselwiderstand.....	27
5.5.1	Luftporenkennwerte.....	27
5.5.2	VDZ-Würfelprüfverfahren .....	29
5.6	Karbonatisierung .....	31
5.7	Chlorid-Eindringwiderstand .....	32
5.8	Elektrolytischer Widerstand (WENNER-Sonde).....	33
5.9	Zusammenfassung der Betonversuche .....	34
6	GESAMTZUSAMMENFASSUNG.....	35
7	LITERATUR.....	37
TABELLEN.....		A1-A8
BILDER.....		B1-B10

## **1 KURZFASSUNGEN**

### **1.1 Kurzfassung**

Stabilisierer werden in der Betontechnologie überwiegend für Unterwasserbeton und pumpfähige Mischungen eingesetzt. In der jüngeren Zeit stellen selbstverdichtende Betone zusätzliche Anwendungen dar. Aus der Literatur ist bekannt, daß der Einsatz dieser Zusatzmittel zu einer erhöhten Porosität und veränderten Porenstruktur von Mörteln und Betonen führen kann.

In Deutschland ist im Rahmen von bauaufsichtlichen Zulassungen lediglich die Wirksamkeit, die Verträglichkeit mit den Prüfzementen sowie die Unschädlichkeit im Hinblick auf eine mögliche Bewehrungskorrosion nachzuweisen. Auswirkungen einer veränderten Porenstruktur auf Dauerhaftigkeitskennwerte werden nicht betrachtet. Diese Einflüsse sollen in dem vom DIBt geförderten Forschungsvorhabens mit dem Ziel untersucht werden, Vorschläge für ggf. notwendige Erweiterungen in den Prüfplänen für Zulassungsversuche an Stabilisierern abzuleiten.

Für das Projekt wurde eine Auswahl von Stabilisierern getroffen, die die wesentlichen Wirkstoffgruppen dieses Zusatzmittel-Typen repräsentieren. Im ersten Versuchsteil wurden Mörtel unter Verwendung eines Portlandzementes hergestellt. Neben den Frischmörteleigenschaften wurden am erhärteten Mörtel Kennwerte wie die Festigkeit, Rohdichte, Wasseraufnahme und Gaspermeabilität ermittelt. Die Porenstruktur wurde mittels Hg-Druckporosimetrie aufgezeichnet. Stabilisierer, die auffällige Veränderungen in ihren Mörteleigenschaften aufwiesen, wurden nachfolgend Betonuntersuchungen unterzogen. An den Betonen wurden dieselben Kennwerte wie am Mörtel ermittelt. Zusätzlich wurden Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit in Form von Frost-Tauwechsel-Versuchen (Würfel-Verfahren), Bestimmung der Luftporenkennwerte, der Karbonatisierungsfortschritt und die Chlorid-Migration durchgeführt.

Die Untersuchungsergebnisse zeigen, daß auch bei erhöhtem Eintrag von Luft in den Beton, der durch einige Stabilisierer hervorgerufen wird, keine Verschlechterung von Dauerhaftigkeitseigenschaften auftreten. Die zusätzlich eingetragene Luft findet sich überwiegend als Luftporen mit Radien  $> 300 \mu\text{m}$  und ist somit nicht kapillar aktiv. Auch Eigenschaften wie die Chlorid-Migration oder die Karbonatisierung zeigen keine Abhängigkeit von der erhöhten Porosität. Da Einflüsse auf die Verarbeitbarkeit und die Festigkeiten im bedarfsfall ohnehin im Rahmen von Eignungsprüfungen zu untersuchen sind, brauchen erweiterte Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit im Rahmen von bauaufsichtlichen Zulassungen für Stabilisierer nicht gefordert zu werden.

## 1.2 Abstract

In concrete technology viscosity agents are mainly used for underwater concrete and particularly pumpable mixtures. In the recent time an expanding field of application are the self compacting concretes. From the literature it is well-known that using these products may lead to additional porosity and change of the pore structure in mortars and concretes.

In Germany for technical approvals of viscosity agents only the effectiveness, the compatibility with binders and the harmlessness with respect to reinforcement corrosion are usually improved. Aspects of the changed pore structure and from this possible resulting influences on the durability are not taken into account. The aim of the research project sponsored by DIBt was to examine the durability-relevant effects through the change of the porosity caused by the use of viscosity agents and to define whether for technical approvals possibly additional investigations must be recommended.

For the test program a selection of viscosity agents was arranged to cover the representatives of the substantial groups. In the first part of the tests mortars were casted with an ordinary portland cement. Apart from the fresh mortar properties characteristic values of the hardened mortar were determined such as strength, bulk density, water absorption as well as gas permeability. The pore structure was investigated by means of mercury intrusion porosimetry.

Products showing remarkable changes in their mortar properties were examined in concrete tests. The characterisation of these concretes was done in the same manner as testing the mortars. Additionally investigations with respect to durability were carried out such as freeze-thaw tests (cube test), measurements of the air void characteristics, the progress of carbonation as well as the chloride migration.

The test results indicate that the additional air contents in concretes made by using special viscosity agents do not lead to a decrease in durability. Additionally entrained air consists mostly of air voids larger than 300  $\mu\text{m}$  with no capillary activity. Aspects like chloride migration or carbonation do not depend on the additional porosity. Effects on workability and strength shall be tested in each individual combination with cement and other admixtures if required. Extended durability testing for getting technical approvals seem not to be necessary.

### 1.3 Resumée

Des additifs stabilisants sont utilisés dans la technologie du béton principalement pour le béton immergé et les mélanges pompeables. Tout récemment, les bétons autoplanages représentent des applications supplémentaires. On sait de la littérature, que l'application de ces additifs peut conduire à une porosité élevée et modifier la structure des pores des mortiers et des bétons.

En Allemagne, au cadre des permissions de surveillance des chantiers, seulement l'efficacité, la compatibilité avec les ciments et l'innocuité à l'égard à une possible corrosion d'armature sont à prouver. Mais les conséquences d'une structure modifiée des pores sur les propriétés physiques et la durabilité ne sont pas considérées. Ceci doivent être examinées d'un projet de recherche encouragé par DIBt (Deutsches Institut für Bautechnik) avec le but de dériver des propositions pour des élargissements éventuel nécessaires dans les plans d'épreuve pour les experiments du permission aux additifs stabilisants.

Un choix par les additifs stabilisants que les groupes d'agents essentiels de ce type d'additifs représentent a été fait pour le projet. Dans la première phase expérimentale, les mortiers ont été fabriqués au moyen d'un ciment Portland CEM I. À côté des propriétés des mortiers fraîches ont été encore déterminées des propriétés physiques au mortier solide, comme la stabilité, la densité brute, l'absorption d'eau et la perméabilité du gaz. La structure des pores a été notée au moyen du MIP. Des additifs stabilisants avec modifications frappantes dans leurs qualités du mortier ont été après soumis aux examinations du béton pour déterminer les mêmes propriétés physiques qu'au mortier. On a fait en plus des examinations à l'égard de la durabilité (essai gel-dégel alternatif, propriétés des occlusions d'air, carbonation, migration de chlorure).

Les résultats des recherches montrent que, aussi avec l'introduction élevée de l'air dans le béton traité avec quelques additifs stabilisants, une aggravation des qualités du durabilité n'a pas eu lieu. L'air occlusé en plus se trouve principalement comme pores d'air avec des rayons  $> 300 \mu\text{m}$  et n'est pas ainsi capillaire actif. Aussi des propriétés comme la migration de chlorure ou le carbonation ne montrent pas une dépendance à la porosité élevée. Puisqu'il faut au besoin du reste examiner des influences sur l'usinabilité et les stabilités au cadre des tests d'aptitude, des examinations étendues à l'égard de la durabilité n'ont pas besoin d'être exigées au cadre des permissions de surveillance des chantiers pour des additifs stabilisants.

## 2 EINLEITUNG

### 2.1 Allgemeines

Betonzusatzmittel der Wirkstoffgruppe „Stabilisierer“ werden eingesetzt, um die Entmischungsneigung von Frischbeton, die aufgrund der in der Regel unterschiedlichen Dichten von Zementleim und Zuschlag gegeben ist, zu verringern. Hierdurch soll ein Absinken (Sedimentieren) der Zuschläge bzw. ein oberflächliches Wasserabsondern (Bluten) vermieden werden.

Im konventionellen Betonbau werden heute Rezepturen eingesetzt, bei denen die Gefahr des Entmischens in der Regel nicht besteht. Die zunehmende Verwendung weicher bis fließfähiger oder auch pumpfähiger Betone führt schon eher zum Einsatz der konsistenzregelnden Zusatzmittel. Ein weiteres Verwendungsgebiet für Stabilisierer ist der Unterwasserbeton, bei dem eine Auswaschung der Betonmatrix im Kontaktbereich zum umgebenden Wasser verhindert werden soll.

Seit einigen Jahren gewinnt weltweit die Thematik des selbstverdichtenden Betons (SVB) an Bedeutung. Diese Betone zeichnen sich durch eine sehr hohe Fließfähigkeit sowie die Entlüftung durch ihr Eigengewicht aus. Erreicht werden diese Eigenschaften auf unterschiedliche Art und Weise. Nach dem japanischen Mischungskonzept werden die Zuschläge durch hohe Leimgehalte stabilisiert, die auf der Basis von Mehlkorngelaten von bis zu mehr als  $600 \text{ kg/m}^3$  unter Verwendung von Hochleistungsfließmitteln realisiert werden (Mehlkorn-Typ). Ein anderer Ansatz sieht mehlkornärmere Mischungen vor (etwa  $450$  bis  $500 \text{ kg/m}^3$ ), die ihre rheologischen Eigenschaften über die Zusatzmittel-Kombinationen aus Fließmittel und Stabilisierer einstellen (Stabilisierer-Typ). In der praktischen Anwendung finden sich weiterhin bezüglich der Robustheit optimierte Kombinationstypen aus stabilisierten Mehlkorn-Typen.

Seitens der Zusatzmittelindustrie werden verschiedene Typen von Stabilisierern angeboten, die in grober Zuordnung folgenden Stoffklassen entstammen:

- natürliche Polymere (z. B. Stärke, natürliche Gummimodifikationen),
- halbsynthetische Polymere (z. B. Cellulose-Derivate),
- synthetische Polymere (z. B. Polyethylen-Oxid, Polyacrylate),
- feinkörnige anorganische Substanzen mit hohen spezifischen Oberflächen.

Die Wirkmechanismen reichen von der Erhöhung des Wasseranspruches durch hohe Oberflächen der eingebrachten feinstkörnigen Feststoffpartikel über sterische Effekte langkettiger organischer Moleküle bis hin zur zwischenzeitigen Wasserbindung. Die im Handel befindlichen Produkte beinhalten in der Regel einen oder mehrere der genannten Wirkstoffe und darüber hinaus Füllstoffe, Trägersubstanzen, Konservierungsstoffe und Entschäumer. Teilweise werden die Präparate als Pulver, teilweise als wässrige Lösung oder Suspension angeboten.

In Deutschland ist die Verwendung von Zusatzmitteln in Beton nach DIN 1045 07/88 /1/ bzw. der neuen Normengeneration EN 206 /2/ und DIN 1045-2 07/01 /3/ über die Erteilung einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung durch das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) geregelt. Grundlage hierzu ist die Durchführung einer Erstprüfung der Produkte durch eine Zertifizierungsstelle sowie die kontinuierliche Eigen- und Fremdüberwachung. Die bestehende Regelung wird voraussichtlich im Jahr 2003 durch die Einführung der harmonisierten europäischen Zusatzmittelnorm EN 934 /4/ abgelöst.

Der Prüfumfang für die nach wie vor notwendige Erstprüfung wird national zur Zeit in den „Grundsätzen für die Erteilung von Zulassungen für Betonzusatzmittel (Zulassungsgrundsätze)“ /5/ geregelt. Bei den Prüfungen für Zusatzmittel der Wirkstoffgruppe „Stabilisierer“ werden neben der Wirksamkeit an je einem Beton und Zementmörtel in erster Linie die Verträglichkeit mit den Prüfzementen und daraus hergestellten Mörteln untersucht. Diese umfaßt das Erstarrungsverhalten und die Raumbeständigkeit. Letztlich werden Halogen- und Alkaligehalte sowie die Korrosion fördernde Wirkung auf Stahl als Kriterien für eventuelle Anwendungsbeschränkungen herangezogen.

## **2.2 Problemstellung**

Die Porenstruktur des Betons nimmt in der Bewertung seiner Dauerhaftigkeit bekanntlich eine zentrale Stellung ein, da sie direkt oder indirekt nahezu jede Form der Betonkorrosion beeinflusst. Zunächst einmal stellt sie den Pfad für alle Stofftransportvorgänge. Dementsprechend sind Eindringwiderstände gegen (stahl)betonschädliche Ionen wie Chlorid oder Sulfat ebenso direkt mit der Porenstruktur verknüpft wie das Eindringverhalten von Flüssigkeiten oder Gasen (z. B. Karbonatisierung). Besondere Bedeutung gewinnt die Verteilung der Porengrößen und Verbindung der Poren untereinander beim Frost- und Frost-Taumittelwiderstand, da die Hohlräume hier nicht nur als Transportweg, sondern auch als Ausweichraum für überschüssiges Eisvolumen fungieren. Letztlich wirkt sich die Porosität auf die mechanischen Kennwerte des Betons aus.

In der internationalen Fachliteratur wird festgestellt, daß verschiedene Stabilisierer neben ihrer Zieleigenschaft den Nebeneffekt aufweisen, die Porenstruktur des Betons zu verändern (z. B. /6, 7/). Hierbei kommt es zur Erhöhung der Gesamt- und Luftporengehalte oder zu Verschiebungen in der Porenradienverteilung hin zu erhöhten Anteilen von Kapillarporen. Dies beruht möglicherweise auf Veränderung an der Oberflächenspannung und auf geringere Verdichtungswilligkeit. Darüber hinaus kann es, wie bei anderen Zusatzmitteln auch, durch chemisch-physikalische Unverträglichkeiten mit den Klinkerphasen vereinzelt zur Behinderung der Hydratation des Bindemittels oder beim Einsatz weiterer Zusatzmittel (z. B. Fließmittel, LP-Bildner) zur Beeinträchtigung von deren Leistungsfähigkeit kommen /8/. Eigene Tastversuche, bei denen die Porengrößenverteilung an Zementmörteln mit unterschiedlichen Stabilisierer-Zusätzen ermittelt wurden, bestätigen die Beobachtungen /9/. In Abhängigkeit von der eingesetzten Betonmischung führen die vorgenannten Einflüsse zu teilweise veränderten Materialkennwerten wie verminderter Druckfestigkeit oder Matrixdichte.

In den Betonnormen wird eine ausreichende Dauerhaftigkeit von Beton durch Anforderungen an die Mischungszusammensetzung angestrebt. Unplanmäßige Einflüsse, z. B. die unkontrollierte Veränderung der Porenstruktur durch Zusatzmittel, finden darin keine Berücksichtigung. Im Rahmen der Bauüberwachung findet beim Einsatz von normgerechten Betonen in der Regel keine Überprüfung dauerhaftigkeitsrelevanter Kenngrößen statt, sondern allenfalls eine Eignungsprüfung im Hinblick auf die Konsistenz und Druckfestigkeit. Somit bleiben Mängel ggf. ohne Beachtung und können langfristig zu Schädigungen am Bauwerk führen.

Im Rahmen der Zusatzmittelprüfungen nach den „Zulassungsgrundsätzen“ des DIBt /5/ sind solche Überprüfungen zur Zeit ebenfalls nicht verankert (vgl. Kapitel 1.1). Das DIBt hat im Einvernehmen mit dem zuständigen Sachverständigenausschuß jedoch angeregt, daß Stabilisierer, die zu einer signifikanten Erhöhung des Luftgehaltes in den Prüfmörteln (Grenzwert: + 2 Vol.-% im Vergleich zur zusatzmittelfreien Referenzprobe) führen, einen Warnhinweis auf den Produktdatenblättern und der Verpackung aufweisen sollen. Eine entsprechende Regelung findet auch Eingang in die EN 934.

Ziel dieses vom DIBt finanzierten Forschungsvorhabens ist es, die praxisrelevanten Einflüsse verschiedener Typen von Stabilisierern auf das Porengefüge und damit auf mechanische Kennwerte und Dauerhaftigkeitseigenschaften von Beton zu erarbeiten. Hieraus sollen Erkenntnisse abgeleitet werden, ob in Zulassungsverfahren für die Zusatzmittel ergänzende Untersuchungen gefordert bzw. weitere Einschränkungen im Anwendungsbereich berücksichtigt werden sollen. Dabei ist zu beachten, daß der Effekt des zusätzlichen Lufteintrages

außer von den stabilisierenden Wirkstoffen maßgeblich auch von der Eignung anderer Additive wie z. B. Entschäumern abhängig ist. Daher sollen die ausgewählten Produkte (vgl. Kapitel 2.1) hier nicht individuell bewertet werden, sondern stellen Vertreter für Stabilisierer verschiedener Hauptwirkstoffe dar, die in Kombination mit nur einem ausgewählten Zement geprüft werden. Die erzielten Ergebnisse lassen daher weder Rückschlüsse auf das Verhalten des einzelnen Produktes in beliebiger Kombination mit anderen Bindemitteln noch auf das generelle Verhalten von Produkten mit einem gleichartigen Wirkstoff zu. Zur Neutralisierung der Darstellung wird in diesem Bericht auf die detaillierte Benennung der Produkte verzichtet.

An dieser Stelle sei allen Firmen gedankt, die Ihre Produkte für das Projekt zur Verfügung gestellt haben.

### **3 VORGEHENSWEISE**

#### **3.1 Auswahl der Stabilisierer**

Da aufgrund der nur beschränkt zur Verfügung stehenden Mittel eine enge Auswahl an Stabilisierern getroffen werden mußte, wurden folgende Kriterien herangezogen:

- Aus den in Kapitel 1.1 benannten vier Hauptstoffgruppen sollte jeweils mindestens ein Produkt in das Prüfprogramm aufgenommen werden.
- Die vorgesehenen Stabilisierer sollen möglichst nur eine Wirksubstanz enthalten.
- Bei den Stabilisierern sollte es sich möglichst um zugelassene oder zum Zeitpunkt des Projektbeginns im Zulassungsverfahren befindliche Produkte verschiedener Hersteller handeln.
- Soweit aus den Zulassungs- oder Überwachungsuntersuchungen bekannt, sollen bevorzugt Produkte gewählt werden, bei denen sich signifikante Erhöhungen der Porosität einstellen.
- Im Hinblick auf die wachsende Bedeutung von SVB soll mindestens ein Produkt in die Prüfmatrix aufgenommen werden, das speziell für diese Anwendung angeboten wird.

Bei der letztendlichen Auswahl von Produkten konnte nicht allen Kriterien in vollem Umfang entsprochen werden. In Absprache mit der Beratergruppe wurden zusätzlich zu der ursprünglich vorgesehenen Anzahl von sechs im Markt befindlichen Produkten noch eine bisher nicht als Zusatzmittel lieferbare Ausgangssubstanz sowie drei Wirkstoffe, die aus verschiedenen Wirksubstanzen ohne weitere Zusätze bestehen, in die erste Versuchsphase (Mörtelprüfungen) übernommen. Letztere sollen Erkenntnisse liefern, inwieweit die Wirksubstanzen selbst einen Lufteintrag hervorrufen oder ob die Effekte eher anderen Additiven in den kommerziellen Produkten zuzuordnen sind. Die Zubereitungen wurden dem Projekt dankenswerterweise von der Firma MC-Bauchemie Müller GmbH & Co zur Verfügung gestellt. Die Zusammenstellung der eingesetzten Produkte findet sich in Tabelle 1.

**Tabelle 1:** Auflistung der im Forschungsprojekt eingesetzten Stabilisierer

Probe	Status <sup>1)</sup> der Zulassung	Wirkstoff <sup>2)</sup>	Aggregatzustand	Dichte <sup>3)</sup> g/cm <sup>3</sup>	zugel. Maximaldosierung Zement-M.-%
1	2	3	4	5	7
M	zugel.	kolloidale Kieselsäure	flüssig	1,10	5,0
W		Nanosilica (kolloidal)		1,30	5,0
L		org. Polymer (SVB)		1,02	1,5
F		Stärke-Basis		1,07	1,0
T		Celluloseether		0,98	0,7
A	o. Z.	Polyethylen-Oxid	pulverig	1,05	0,6
D		Welan-Gummi		n.b.	-
S		Zubereitung Stärke		0,30	-
C		Zubereitung Cellulose		n.b.	-
P	-	Zubereitung Polyacrylat	flüssig	1,03	-

- 1) zugel. = allg. bauaufsichtlich zugelassen; o. Z. = ohne Zulassung
- 2) nach Herstellerangaben
- 3) bei Feststoffen Schüttdichte

### 3.2 Versuchsprogramm

Ausgehend vom beantragten Forschungsprogramm und in Abstimmung mit der Beratergruppe des Projektes wurden an Mörteln und Betonen Untersuchungen zu den Auswirkungen der Stabilisierer auf die Porositätskennwerte und Dauerhaftigkeitseigenschaften durchgeführt. Ein Nachweis der Wirksamkeit der Zusatzmittel ist hier nicht von Interesse. Daher wurde lediglich bei der Frischbetonprüfung die Blutwassermenge der Betone erfaßt.

### 3.2.1 Mörteluntersuchungen

Die erste Projektphase umfaßte Untersuchungen an Mörteln, die in Anlehnung an die DIN EN 196-1 /10/ unter Verwendung eines handelsüblichen CEM I 32,5 R, Normensandes und den in Kapitel 2.1 spezifizierten Stabilisierern hergestellt wurden. Aus Vorversuchen wurde die Notwendigkeit abgeleitet, die Mörtel abweichend von der Norm mit einem Wasserzementwert von 0,60 herzustellen, um auch bei allen Mischungen mit Stabilisierern eine ausreichende Verarbeitbarkeit zu erreichen.

Die Produkte mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung wurden mit der in der Zulassung angegebenen Maximaldosierung eingesetzt. Die übrigen Substanzen und Vorprodukte wurden so dosiert, daß sich im Frischmörtel ein vergleichbares Ausbreitmaß zu den vorgenannten Mischungen einstellte. Als Referenzmischung diente ein Mörtel ohne Zugabe von Zusatzmitteln, der ebenfalls mit einem Wasserzementwert von 0,60 angesetzt wurde. Eine Übersicht über die Mischungen ist in Tabelle A1 im Anhang A gegeben.

#### Frishmörteluntersuchungen

Die Mörtel wurden nach den Vorgaben der DIN EN 196-1 gemischt. Unmittelbar nach dem Mischende wurden das Ausbreitmaß und der Luftgehalt bestimmt.

#### Festmörteluntersuchungen

Als Probekörper für die Festmörteluntersuchungen wurden Normprismen (40 · 40 · 160 mm) hergestellt, nach 24 Stunden Feuchtschranklagerung ausgeschalt und unter Wasser bei 20 °C bis zur Prüfung bzw. Prüfungsvorbereitung gelagert. An den Mörtelprismen wurde die zeitliche Entwicklung der Druck- und Biegezugfestigkeit nach DIN EN 196 geprüft, um mögliche Einflüsse der durch die Stabilisierer veränderten Porenstruktur auf die mechanischen Kennwerte abzuleiten.

#### Porenstrukturkennwerte

An den Normprismen wurden im Alter von 28 und 180 Tagen direkte und indirekte Untersuchungen zur Charakterisierung der Porenstruktur durchgeführt. Um einen dem jeweiligen Hydratationsgrad entsprechenden Zustand der Proben zu konservieren, wurde bei Erreichen des Prüfaltes der Hydratationsprozeß durch Zugabe von Isopropanol und Trocknung bei 65°C gestoppt. Danach wurden die Proben unter Luftabschluß bis zur Prüfung gelagert.

An abgespaltenen Probestücken von etwa 40 · 40 · 40 mm wurde die kapillare Wasseraufnahme, die Wasseraufnahme unter einem Druck von 150 bar und als Quotient aus den beiden Meßwerten die kapillare Sättigung bestimmt. Als weitere Information aus der Tauchwägung wurde die Feuchtrohdichte berechnet.

An Prüfkörpern von etwa 10 · 10 · 20 mm wurde in Doppelbestimmung die Porengrößenverteilung mittels Hg-Druckporosimetrie (Autopore 2000 der Fa. Micromeritics) ermittelt. In Relation zum eingesetzten Größtkorn liefert diese Probengröße bei Mörteln noch befriedigend reproduzierbare Meßwerte auch in der absoluten Meßgröße „Porosität“ und den mittelbar und unmittelbar dazu in Bezug stehenden abgeleiteten Kennwerten „innere Oberfläche“, „Rohdichte“ und „Medianradius“. Letzterer gibt den Radius an, bei dem 50 % der insgesamt in der Probe aufgenommenen Quecksilbermenge intrudiert sind. Neben der Verteilung der Poreneingangsradien und der Lage ihrer Maxima wurde zudem der Grenzradius bestimmt. Bei diesem Radius dringt erstmalig eine größere Menge Quecksilber in die Probe ein, weshalb er als Kennwert für den Beginn eines zusammenhängenden Porensystems gilt.

An Probestücken von etwa 40 · 40 · 30 mm wurde der Gaspermeationskoeffizient (Stickstoff) auf Basis der Gesetzmäßigkeiten laminar strömender Gase nach Darcy bestimmt.

Um Erkenntnisse zu gewinnen, ob sich Wechselwirkungen der eingesetzten Stabilisierer mit dem Zement ergeben, die die Hydratation verzögern, erfolgten an den bei 105 °C getrockneten Mörtel im Alter von 7 Tagen thermogravimetrische Untersuchungen. Hierbei wurde der  $\text{Ca(OH)}_2$ -Gehalt sowie die gesamte bzw. die in CSH-Phasen gebundene Wassermenge bestimmt.

### **3.2.2 Betonuntersuchungen**

Für die zweite Versuchsphase waren gemäß des Forschungsantrages Untersuchungen an Betonen mit einer Auswahl an Stabilisierern vorgesehen. Sowohl die Auswahl der weiter zu untersuchenden Zusatzmittel als auch Versuchsumfang wurden auf Basis der Ergebnisse aus den Mörteluntersuchungen bis zum Alter von 28 Tagen in Abstimmung mit der Beratergruppe des Projektes festgelegt. Die wesentlichen Auswahlkriterien der Stabilisierer für die Betonversuche waren:

- ein erhöhter Lufteintrag im Mörtel,
- eine Veränderung der Porenradienverteilung,
- speziell für SVB konzipierte Produkte.

Insbesondere der Einfluß auf die Porenstruktur und die Dauerhaftigkeitseigenschaften standen gemäß der Aufgabe des Forschungsprojektes im Mittelpunkt des Interesses für die zweite Versuchsphase. Eine Übersicht über den Prüfplan findet sich in Tabelle 2.

**Tabelle 2:** Prüfmatrix für die Betonuntersuchungen  
(Kennzeichnung in Klammern: nicht zu allen Prüfterminen geprüft)

Prüfverfahren		Stabilisierer										
		<sup>-1)</sup>	M	W	L	F	T	A	D	C	S	P
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Frischbeton	Ausbreitmaß	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Luftgehalt	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Rohdichte	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Blutneigung	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Festbeton	Trockenrohichte	x	x	x	x	x	x	-	-	-	-	-
	Feuchtrohdichte	x	x	x	x	x	x	-	-	-	-	-
	Druckfestigkeit	x	x	x	(x)	x	x	-	-	-	-	-
	Wasseraufnahme	x	x	x	x	x	x	-	-	-	-	-
	Hg-Druckporosimetrie	x	x	x	x	x	x	-	-	-	-	-
	Gaspermeabilität	x	x	x	(x)	x	x	-	-	-	-	-
	Karbonatisierung	x	x	x	x	x	x	-	-	-	-	-
	Chlorid-Migration	x	x	x	x	x	x	-	-	-	-	-
	elektrolyt. Widerstand	x	x	x	(x)	x	x	-	-	-	-	-
	Frostwiderstand (VDZ)	x	x	x	x	x	x	-	-	-	-	-
Luftporenkennwerte	x	x	x	-	x	<sup>-2)</sup>	-	-	-	-	-	

1) Referenzbeton

2) Untersuchung vorgesehen, aber Probe unbrauchbar

Die Festbetonuntersuchungen erfolgten bis auf die Bestimmung des Chloridmigrationskoeffizienten, des Frostwiderstandes und der Luftporenkennwerte jeweils im Alter von 28 und 90 Tagen. Da Beton ZB-L erst zu einem späteren Zeitpunkt in die Betonuntersuchungen aufgenommen wurde, konnten einige Kennwerte dieses Betons nur im Alter von 28 Tagen untersucht werden.

Als Ausgangsrezeptur für den Beton, der als zusatzmittelfreie Mischung den Referenzbeton darstellt, wurde ein Prüfbeton nach den Zulassungsgrundsätzen für Betonzusatzmittel des DIBt /5/ herangezogen. Abweichend von der darin angegebenen Zuschlagsieblinie B16 wurde eine Sieblinie A/B16 verwendet, um den Wasseranspruch der Gesteinskörnung zu senken. Die Dosierung der Stabilisierer erfolgte bei den Produkten mit bauaufsichtlicher Zulassung mit der angegebenen zulässigen Höchstdosierung. Bei den anderen Produkten wurde die Dosierung angewendet, die in den Mörteluntersuchungen im Hinblick auf ein Ausbreitmaß gleicher Größenordnung ermittelt worden war. Der eingesetzte Zement stammt aus derselben Produktionscharge wie der Zement aus der ersten Versuchsphase. Die Zusammensetzung der geprüften Betone findet sich in Tabelle A2.

### Frischbetonuntersuchungen

Die Prüfungen am Frischbeton wurden gemäß DIN 1048-1 /11/ durchgeführt und umfaßten die Bestimmung des Ausbreitmaßes, der Rohdichte und des Luftgehaltes. Um Hinweise auf eine ggf. rücksteifende Wirkung der Zusatzmittel zu erhalten, wurden die Kennwerte unmittelbar nach dem Mischen sowie etwa 45 Minuten nach Mischende ermittelt. Ergänzend wurde die Blutwassermenge gemessen.

### Festbetonuntersuchungen

Zur Kontrolle der Betonmischungen und zur Abschätzung des Einflusses der veränderten Porosität wurde an den Betonen (Würfel mit 150 mm Kantenlänge) die Entwicklung der Druckfestigkeit nach DIN 1048-5 /12/ ermittelt.

### Porenstrukturkennwerte

An den Betonprüfkörpern wurden im Prinzip die gleichen Strukturuntersuchungen durchgeführt wie in der ersten Projektphase an den Mörtelproben (vgl. Abschnitt 2.2.1). Soweit möglich, wurde dabei durch die Bearbeitung größerer Proben dem erheblich größeren Größtkorn des Betons Rechnung getragen. So wurden die Prüfkörper für die Wasseraufnahme in einer Größe von etwa 80 · 80 · 60 mm aus einem Betonwürfel geschnitten, die Proben für die Permeabilitätsmessung bestanden aus einem etwa 50 mm hohen, mittig gesägten Scheibe eines Betonzylinders mit einem Durchmesser von 150 mm.

Ein Problem stellt die Beprobung für die Messung der Porengrößenverteilung mittels Hg-Druckporosimetrie dar. Da die Aufnahmekapazität der Meßkammern auf wenige Kubikzentimeter begrenzt ist, erfolgt eine subjektive und selektive Beprobung durch Kernbohrung mit dem Ziel, möglichst hohe Matrixanteile zu erreichen. Demgemäß sind die ermittelten absoluten Meßdaten wie „Porosität“ und die daraus abgeleiteten Kenngrößen nur begrenzt interpretationsfähig. Der Schwerpunkt der Auswertung liegt daher auf der Betrachtung von relativen Verschiebungen in den Porengrößenverteilungen.

### Dauerhaftigkeitsuntersuchungen

Die zentrale Fragestellung des Forschungsvorhabens liegt in den Auswirkungen der Stabilisierer auf Dauerhaftigkeitseigenschaften von Beton. Ein wesentlicher Aspekt ist dabei die Untersuchung des Frostwiderstandes, der von den Veränderungen in der Porenstruktur besonders betroffen sein könnte. Demnach wurden Versuche zur Frostbelastung nach dem Würfelverfahren (VDZ-Verfahren) durchgeführt. Das Verfahren ist als Prüfverfahren in E DIN EN 12390-9 05.02 /13/ aufgeführt und beschrieben.

Ergänzend wurden an einigen für die Frostprüfung vorgesehenen Betonmischungen die Luftporenkennwerte nach DIN EN 480-11 /14, 15/ ermittelt. Dabei kam ein vollautomatisches Bildanalyzesystem (SIS-Pro) zum Einsatz, bei dem das Sehnenmeßverfahren der Norm in eine Meßroutine umgesetzt ist.

Als weiterer für den Frostwiderstand, aber auch indirekt für die Bewehrungskorrosion in Stahlbeton maßgeblicher Kennwert wird die Karbonatisierungstiefe nach /16/ bestimmt. Die Möglichkeit, eine Karbonatisierungsgeschwindigkeit abzuleiten, besteht aufgrund der im begrenzten Untersuchungszeitraum nur gering fortschreitenden Karbonatisierung nicht.

Ebenfalls im Hinblick auf die Bewehrungskorrosion wird an den Betonen der Chlorid-Migrationskoeffizient nach dem Verfahren von Tang und Nilsson /17, 18/ gemessen. Die Werte können zudem zur groben Abschätzung des Eindringwiderstandes gegenüber anderen beton-schädlichen Anionen (z. B. Sulfat) herangezogen werden, deren Diffusionsgeschwindigkeit aufgrund der kurzen Bearbeitungszeit nicht gemessen werden kann.

Weitere Kennwerte für eine allgemeine Beschreibung der Dichtheit der Betone als maßgeblicher Faktor für eine hohe Dauerhaftigkeit ist die Messung des Elektrolytwiderstandes in der nicht karbonatisierten Betonrandzone wassergelagerter Prüfkörper mit der Wenner-Sonde.

## **4 ERGEBNISSE DER MÖRTELUNTERSUCHUNGEN**

### **4.1 Frischmörtel**

Die Frischmörtelkennwerte (Tabelle A1) bestätigen im wesentlichen die Ergebnisse der Voruntersuchungen. Die Mörtel mit Stabilisierern zeigen durchgehend einen höheren Luftgehalt als die Referenzprobe. Bei der Mehrzahl der Proben beträgt die Erhöhung allerdings weniger als 1 Vol.-%. Drei der zugelassenen Produkte führen jedoch bei Maximaldosierung zu einer deutlichen (ZM-W, ZM-F), in einem Fall (ZM-T auf Cellulose-Basis) sogar drastischen Zunahme des Luftgehaltes auf über 15 Vol.-%. Dieser Wert wurde durch Wiederholungen der Messung bestätigt. In einer ergänzenden Versuchsreihe wurde der Luftgehalt im Frischmörtel bei der Verwendung des Stabilisierers „T“ in Kombination mit anderen Portlandzementen (CEM I 32,5) geprüft. Auch hier stellten sich deutlich erhöhte Werte zwischen 8 und 12 Vol.-% ein. Bei der Prüfung der drei reinen Wirkstoffe fällt auf, daß auch hier durch das Cellulose-Präparat (ZM-C) der vergleichsweise höchste Lufteintrag in den Mörtel erfolgt.

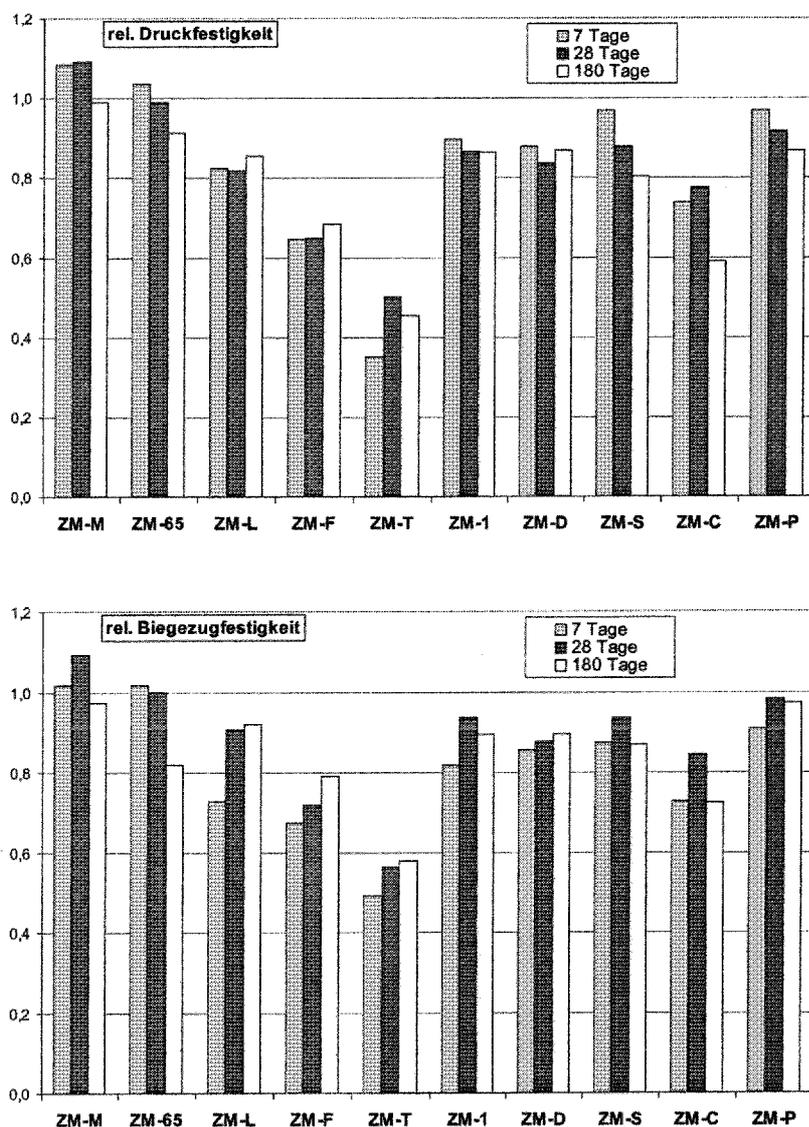
Alle zusatzmittelhaltigen Mörtel zeigen zudem ein geringeres Ausbreitmaß als der Referenzmörtel, liegen dabei allerdings in einem relativ engen Konsistenzbereich. Dies wurde genutzt, um zu einer indirekten Abschätzung der Dosierungen der diesbezüglich nicht definierten Wirkstoffe zu gelangen, indem die Mörtel unter Einsatz dieser Zusatzmittel auf dieselbe Konsistenz eingestellt wurden. Die hierzu notwendigen geringen Dosierungen deuten an, daß die Wirkstoffe in den kommerziellen Produkten durch andere Zusätze deutlich verdünnt vorliegen. Eine signifikante Beeinflussung des Ausbreitmaßes durch die teilweise hohen Luftgehalte ist nicht zu verzeichnen.

### **4.2 Festigkeit**

Im ersten Ansatz spiegeln sich die Luftgehalte im Frischmörtel in den Daten der Rohdichte der ausgehärteten Mörtel wieder und beeinflussen die Festigkeitswerten (Bild 1, Tabellen A3 und A4).

Alle Mörtel mit organischen Stabilisierer-Wirkstoffen und nur geringfügig erhöhter Porosität zeigen deutliche Festigkeitseinbußen von etwa 10 bis 20 % gegenüber der Referenzprobe. Diese Relation gilt bei ZM-L, ZM-A und ZM-D unabhängig vom Prüfalter, während die Mörtel mit den reinen Wirkstoffen „Stärke“ und „Polyacrylat“ ausgehend von einer mit der Referenzmischung nahezu identischen 7-Tage-Festigkeit eine geringere Nacherhärtung aufweisen. Die poröseren Mörtel mit organischen Stabilisierer-Wirkstoffen (ZM-F, ZM-T, ZM-C) fallen in ihrer Druckfestigkeit sehr deutlich gegenüber dem Vergleichsmörtel ab.

Nach der Größenordnung der Festigkeitsverluste ist nicht auszuschließen, daß über die Porosität hinaus weitere Einflüsse der Zusatzmittel eventuell auf Hydratationsvorgänge im Zementstein zu verzeichnen sind. Tastversuche mittels Thermogravimetrie, bei denen der durch die Zementhydratation gebildete Gehalt an  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  sowie die in Hydratationsphasen gebundene Wassermenge in den Mörteln nach 7 Tagen Hydratationsdauer gemessen wurde, zeigen zwar Unterschiede zwischen den Mörteln, aber keine eindeutigen Anzeichen von verzögernden Wirkungen auf die Hydratation. Der Fragestellung kann im Rahmen dieses Forschungsvorhabens aber nicht detaillierter nachgegangen werden.



**Bild 1:** Relative Druck- (oben) und Biegezugfestigkeiten (unten) der Mörtel mit Stabilisierern im Vergleich zum zusatzmittelfreien Referenzmörtel

Eine Sonderstellung nehmen die Stabilisierer auf Basis anorganischer Wirkstoffe mit großer Oberfläche ein. Da es sich bei den Wirkstoffen „kolloidale Kieselsäure“ (ZM-M) bzw. „Nanosilika“ (ZM-W) um feinstkörnige puzzolanische Substanzen handelt, weisen die Mörtel in jungem Alter trotz zum Teil signifikant erhöhter Porosität größere Druckfestigkeiten als der Referenzmörtel auf. Neben der aufgrund der extrem geringen Korngröße früh einsetzenden puzzolanischen Reaktion wirken die Feststoffbestandteile dieser Zusatzmittel vermutlich als Mikrofüller und als Kristallisationskeime für Zementhydratphasen. Wie jedoch von Betonen und Mörteln unter Verwendung von z. B. Silikastaub als Zusatzstoff bekannt ist, verliert sich der Festigkeitsvorsprung bis zum Prüfalter von 180 Tagen wieder (Bild 1).

Im Hinblick auf die Biegezugfestigkeit sind dieselben Tendenzen wie bei der Druckfestigkeit zu erkennen. Auch hier zeigen nach 180 Tagen alle zusatzmittelhaltigen Mörtel geringere Festigkeiten als die Referenzmischung, was aber nur bei den höher porösen Systemen sehr deutlich hervortritt. Die puzzolanhaltigen Mörtel sind im jungen Alter geringfügig fester als die Bezugsmischung. Die Abnahme der relativen Druck- und vor allem der Biegezugfestigkeiten der puzzolanhaltigen Mörtel ZM-W und ZM-M zum späteren Prüfalter beruht in erster Linie auf dem Hydratationsfortschritt der Referenzmischung. Bei den Stabilisierern mit organischen Wirkstoffen kommt es dagegen mit zunehmendem Prüfalter zu einer Steigerung der relativen Biegezugfestigkeit.

### **4.3 Wasseraufnahme**

Die unter Druck erreichbare Wasseraufnahme der Mörtel nach 28 Tagen (Tabelle A5) steht in guter Übereinstimmung zu den Luftgehalten der Frischmörtel, ebenso die im Zuge dieser Untersuchung ermittelten Rohdichtewerte. Die absoluten Porositätsdifferenzen sind jedoch geringer als bei der Messung des Luftgehaltes im Frischmörtel.

Die kapillare Wasseraufnahme aller Proben liegt hingegen in einem engem Werteband, was zu relativ geringen Sättigungsgraden der porösen Mörtel führt. Sie scheint in keinem signifikanten Zusammenhang zu den übrigen Porenstrukturkennwerten zu stehen. Hier ist interessant, inwieweit sich dieses Verhalten im Beton wiederfindet, und ob die durch das Zusatzmittel eingetragenen Poren ggf. sogar kapillarbrechend oder wie gezielt eingebrachte Luftporen als Ausweichräume für Eisvolumina unter einer Frostbelastung wirken.

Die zeitliche Entwicklung der druckbedingten und der kapillaren Wasseraufnahme verläuft uneinheitlich. Bei den meisten Mörteln nimmt im Vergleich der Prüffalter von 28 und 180 Tagen die Wasseraufnahme zu, bei einigen wurden aber auch niedrigere Werte festgestellt (Tabellen A5, A6). Die in den meisten Fällen zu beiden Prüffaltern nahezu identischen Werte für die Rohdichte und die kapillare Sättigung relativieren diese Änderungen und weisen auf Einflüsse aus der Prüfstreuung hin.. Dementsprechend sind auch die scheinbare Verdichtung der Probe ZM-T sowie die zunehmende Porosität von ZM-L mit Vorsicht zu werten. Die Veränderung bei ZM-L steht dabei im Widerspruch zu seiner Festigkeitsentwicklung, bei ZM-T ist eventuell ein verstärktes Schwinden möglich, versuchstechnisch aber nicht nachgewiesen..

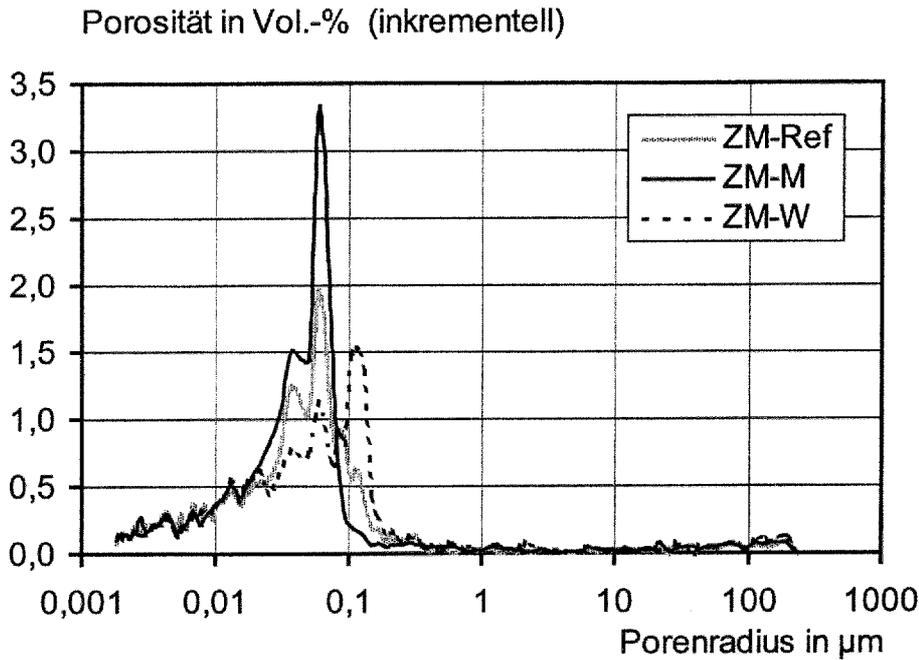
Die Beobachtung aus den Festigkeitsuntersuchungen, daß die Hydratation und somit die Strukturentwicklung der Mörtel erwartungsgemäß nach 28 Tagen noch nicht als abgeschlossen betrachtet werden kann, wird bestätigt.

#### 4.4 Porenstrukturkennwerte

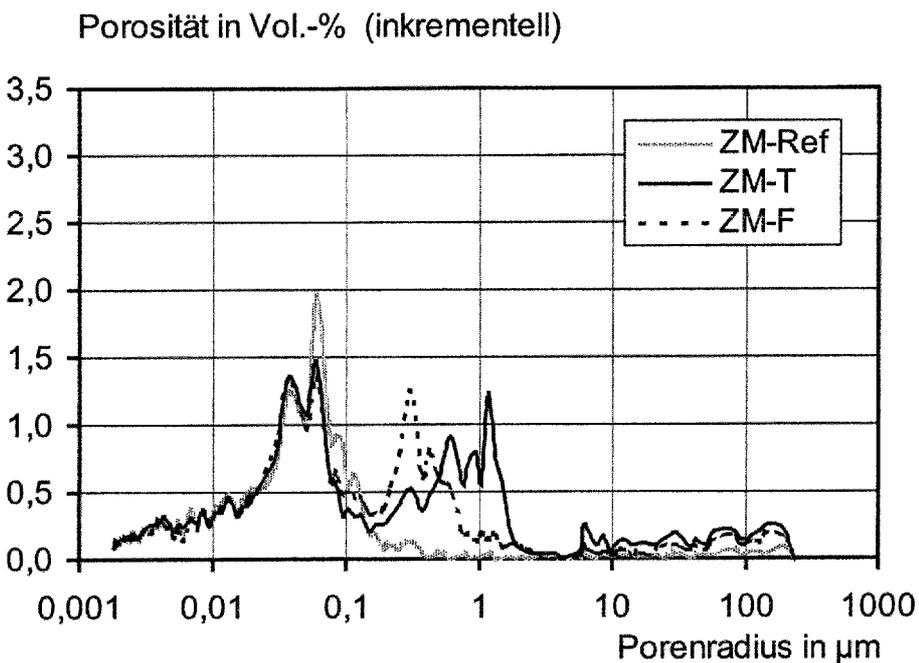
Die Anwendung der Hg-Druckporosimetrie zur Ermittlung absoluter Porositätskennwerte ist mit den beschriebenen Vorbehalten zu sehen (vgl. Kapitel 2.2.2) und in den Absolutwerten nicht unmittelbar mit den Ergebnissen anderer Porositätsuntersuchungen wie Wasseraufnahme unter Druck zu vergleichen. Der unmittelbare Vergleich der gleichartig hergestellten Mischungen liefert aber dennoch interpretierbare Erkenntnisse.

Die graphische Darstellung der Porenradienverteilungen, jeweils in Relation zum Referenzmörtel, findet sich in den Bildern B1 bis B20 im Anhang B. Die Auflistung der aus den Meßergebnissen abgeleiteten Kennwerte erfolgt in den Tabellen A7 und A8.

Die aus dem gesamt inkrementierten Hg-Volumen abgeleiteten Porositäten korrelieren zumindest bis zum Prüffalter von 28 Tagen mit den Luftgehalten im Frischmörtel bzw. den Rohdichten im Festmörtel. Die durchschnittliche Porengröße (Medianradius) bewegt sich bei den meisten Mörteln auf dem Niveau der Referenzmischung, ist jedoch bei den poröseren Mörteln deutlich höher. Die erhöhte Porosität von ZM-W zeigt sich als diskretes Maximum im Radienbereich von 0,1 bis 0,2  $\mu\text{m}$  (Bild 2). ZM-F weist ein noch ausgeprägteres Maximum in derselben Lage auf, während das zweite Hauptmaximum von ZM-T im Radienbereich von 0,3 bis 0,8  $\mu\text{m}$  liegt (Bild 3).



**Bild 2:** Porengrößenverteilung in den Mörteln ZM-Ref, ZM-M und ZM-W im Prüfalter von 28 Tagen



**Bild 3:** Porengrößenverteilung in den Mörteln ZM-Ref, ZM-T und ZM-F im Prüfalter von 28 Tagen

Generell spiegeln die bei nahezu allen Mörteln höheren Grenzradien eine etwas breitere Porengrößenverteilung wider. Die teilweise sehr großen Unterschiede im Grenzradius werden außer bei der Probe ZM-T durch eine stetige, meist aber nur gering ausgeprägte Zunahme des Intrusionsvolumens in den groben Porenradienbereichen bedingt. Im Gegensatz dazu fällt der extrem steile Anstieg der Porenverteilung bei ZM-M auf, der zu einem reduzierten Grenzradius führt (Bild 2). Dieser Effekt ist insbesondere von Intrusionsmessungen von Mörteln mit puzzolanischen Zusatzstoffen bekannt. Er beruht vermutlich auf der Verengung spezifischer Porenradien durch einwachsende Hydratationsprodukte der Puzzolane. Der dahinterliegende, eventuell durchaus gröbere Porenraum wird bei dem Meßverfahren aber dem kleinen Eingangsradius zugeschlagen (Flaschenhalseffekt). Die leicht erhöhte spezifische Oberfläche bei ZM-M dürfte ebenfalls mit dem ultrafeinen Wirkstoff, die bei ZM-T mit der größeren erfaßten Gesamtporosität in Verbindung stehen. Eine mögliche Erklärung für die niedrigen Oberflächenwerte von ZM-L ergibt sich in Verbindung mit der reduzierten Festigkeit, die auf einen verlangsamten Hydratationsfortschritt deutet. In den thermogravimetrischen Untersuchungen war dieser Effekt aber nicht nachzuvollziehen.

Die Permeabilitätskoeffizienten ( $N_2$ ) der Mörtelmischungen (Tabellen A5 und A6) streuen nach 28 Tagen in einem engen Wertebereich in der Größenordnung von 1 bis  $2 \cdot 10^{-16}$ . Die Werte für ZM-T liegen eine Größenordnung höher, ansonsten findet sich kein enger Zusammenhang mit den gemessenen Porositäten. Auffällig ist die relativ hohe Permeabilität von ZM-L. Bei der Untersuchung nach 180 Tagen liegen die Permeabilitätskoeffizienten etwa um den Faktor 5 bis 10 niedriger, was wiederum für eine länger anhaltende Strukturentwicklung und Hydratation der Mörtel spricht. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Meßwerten sind im Alter von 180 Tagen größer als nach 28 Tagen, ohne daß sich systematische Tendenzen erkennen lassen.

#### **4.5 Zusammenfassung der Mörtelversuche**

Die Ergebnisse der ersten Versuchsphase bestätigen den Ansatz des Forschungsprojektes, daß durch die Verwendung einzelner, auch bauaufsichtlich zugelassener Stabilisierer-Produkte Veränderungen in der Porosität bzw. Porenstruktur in Zementmörteln auftreten können. Die Einflüsse reichen von unwesentlichen bis hin zu extrem deutlichen Zunahmen des Luftgehaltes sowie zu Verschiebungen in der Porenradienverteilung. Da dieselben Effekte auch beim Einsatz der reinen Wirkstoffe auftreten, können die zusätzlichen Additive der kommerziellen Produkte als maßgebliche Faktoren mit hoher Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden.

Die Mörtel unter Zugabe von Stabilisierern weisen zudem erwartungsgemäß ein niedrigeres Ausbreitmaß auf als die Referenzprobe.

Es findet sich eine Korrelation zwischen den Luftgehalten in den Frischmörteln und den ermittelten mechanischen und den meisten Porenstrukturkennwerten. Die Festigkeiten einiger Mörtel sind dabei aber stärker reduziert als aufgrund der Porosität zu erwarten wäre, so daß Einflüsse der Zusatzmittel auf den Hydratationsverlauf vermutet werden. Die Stabilisierer auf Basis von feinstkörnigem Silika führen zumindest anfänglich zu höheren Festigkeiten. Die relativen Festigkeiten der meisten Mörtel mit organischen Stabilisierern nehmen mit dem Prüfalter tendentiell zu.

Die kapillare Wasseraufnahme aller Proben liegt in einem engen Wertebereich. Aufgrund der unterschiedlichen Gesamtporosität ergeben sich daraus deutlich variierende Werte der kapillaren Sättigung. Dies ist als Hinweis auf den Eintrag zumindest teilweise isolierten Luftporen zu werten.

Die Porenstruktur ist bei fast allen Mörteln gleichartig ausgebildet. Das Hauptmaximum der Porenverteilung wird bei den Mörteln mit Stabilisierern tendentiell etwas breiter (Ausnahme: Mörtel mit Stabilisierer auf Basis kolloidaler Kieselsäure), und es treten gelegentlich Nebenmaxima auf. Deutlich erhöhte Anteile auch an gröberen Poren sind lediglich in der Probe ZM-T mit den extremen Luftgehalten zu beobachten.

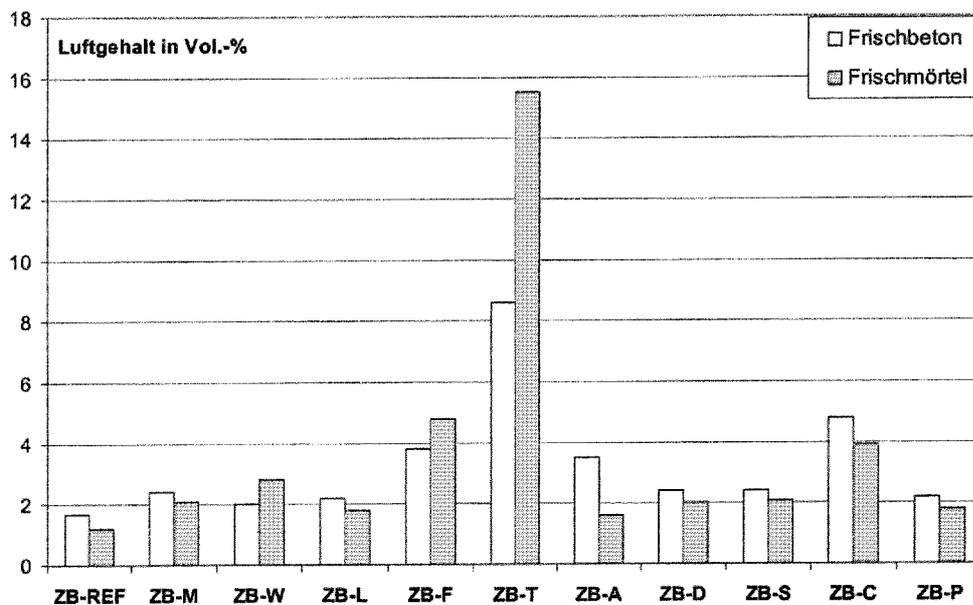
Die beschriebenen Korrelationen zwischen Frisch- und Festmörtelkennwerten sind im Prüfalter von 28 Tagen deutlicher ausgeprägt als nach 180 Tagen. Offensichtlich findet eine länger anhaltende Veränderung der Zementsteinstruktur statt, wodurch die anfänglichen Abhängigkeiten teilweise wieder aufgehoben werden.

## **5 ERGEBNISSE DER BETONUNTERSUCHUNGEN**

Die grundsätzlichen Mischungszusammensetzungen waren durch die Wahl der Betonrezeptur aus der Zulassungsrichtlinie sowie die in den Zulassungen definierten Maximaldosierungen der Stabilisierer gegeben; sie sind in Tabelle A2 aufgeführt.

### 5.1 Frischbeton

Von wesentlichem Interesse bei den Frischbetonuntersuchungen ist, inwieweit sich die im Mörtel zu verzeichnenden Unterschiede im Luftgehalt auch im Beton wiederfinden. Aus diesem Grund wurden die Frischbetonkennwerte aller Stabilisierer und Zubereitungen geprüft, für die Ergebnisse aus den Mörteluntersuchungen vorliegen. In der Regel verhalten sich dabei dieselben Produkte wie in der ersten Versuchsphase auffällig, auch wenn der absolute Lufteintrag bei den höher porösen Mischungen aufgrund des geringeren Leimvolumens deutlich niedriger ausfällt (Bild 4). Als extrem muß wiederum der Luftgehalt der Mischung ZB-T mit 8 bis 9 Vol.-% bewertet werden. ZB-A zeigt im Vergleich zum Mörtel im Beton einen erhöhten Luftgehalt, bei ZB-W ist hingegen anders als im Mörtel kein signifikant erhöhter Lufteintrag mehr zu verzeichnen.



**Bild 4:** Vergleich der Luftgehalte im Frischmörtel bzw. Frischbeton

Ähnlich wie bei den Mörtelversuchen verursacht die Verwendung der Stabilisierer eine Verringerung des Ausbreitmaßes (Tabelle A9). Bei den Zusatzmittelbetonen mit moderatem Luftgehalt (ZB-M, ZB-W, ZB-L) ist dies deutlicher zu erkennen als bei den höher porösen Betonen. Hier scheint die zunehmende Steifigkeit durch die konsistenzverbessernde Wirkung des hohen Luftgehaltes (u. a. Erhöhung des Matrixvolumens) kompensiert zu werden. Eine Tendenz zum Rücksteifen nach 45 Minuten ist lediglich bei den Mischungen ZB-F sowie ZB-S auf Stärkebasis zu erkennen.

Die Festlegung der Dosierung der Stabilisierer-Grundstoffe aus den Mörtelversuchen erweist sich durch die Betonversuche als zu ungenau. Bis auf die Mischung ZB-C, die auch einen erhöhten Luftgehalt aufweist, sind die Betone mit diesen Zusatzmitteln deutlich steifer als die übrigen Mischungen. Besonders auffällig ist der Effekt bei ZB-D zu erkennen.

Die Werte der Frischbetonrohichten sind unauffällig. Als Zusatzuntersuchung wurde die Blutwassermenge bestimmt, wobei allein schon die von der Prüfvorschrift abweichende Betonrezeptur eine Bewertung verbietet. Bis auf das speziell für selbstverdichtenden Beton konzipierte Produkt L sowie einige isolierte Wirkstoffe reduzieren die eingesetzten Stabilisierer das Wasserabsondern im Vergleich zum Referenzbeton. Dabei bestehen Unterschiede in der Effektivität der Zusatzmittel (Tabelle A9).

## 5.2 Druckfestigkeit

Die Entwicklung der Druckfestigkeit korreliert mit den entsprechenden Prüfwerten der Mörtelversuche. Die Festigkeiten der gewählten Betonmischungen liegt in der Regel geringfügig höher als beim Mörtel. Lediglich bei der Mischung ZB-F ist ein deutlich höheres Festigkeitsniveau im Beton zu beobachten (Bild 6 und Tabelle A10). Die Abhängigkeit der Prüfwerte vom Luftgehalt des Frischbetons ist wiederum gegeben. Der überschlägliche Ansatz nach Meyer /19/, der die Reduzierung der Druckfestigkeit in Abhängigkeit vom Luftporengehalt beschreibt (Bild 5), führt lediglich bei ZB-L zu einer Unterschreitung des zu erwartenden Wertes. Hier wäre zu untersuchen, ob das Zusatzmittel einen Einfluß auf die Hydratation des Bindemittels im Beton ausübt. Die beiden Produkte, die feinstkörnige Silikapartikel enthalten, erhöhen aufgrund ihrer physikalischen und puzzolanischen Wirkung die Druckfestigkeit. Anders als bei den Mörteluntersuchungen bleiben die Werte der relativen Druckfestigkeit zum Referenzbeton im Prüfalter von 90 Tagen konstant. Ein Festigkeitsverlust, der auf die Bildung von z. B. Mikrorissen hindeutet, ist nicht feststellbar. Die Betone ZB-T und ZB-F zeigen hingegen ähnlich wie beim Mörtel eine kontinuierliche Zunahme der relativen Druckfestigkeiten.

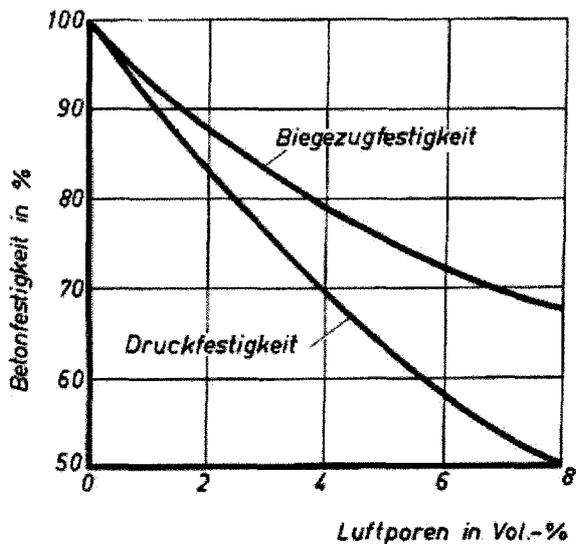


Bild 5: Festigkeiten von Beton in Abhängigkeit vom Luftporengehalt /19/

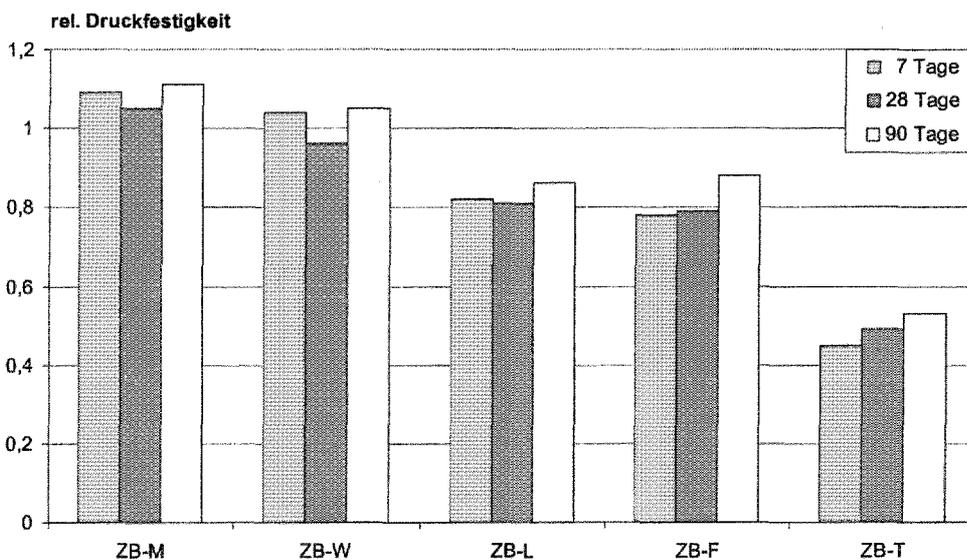
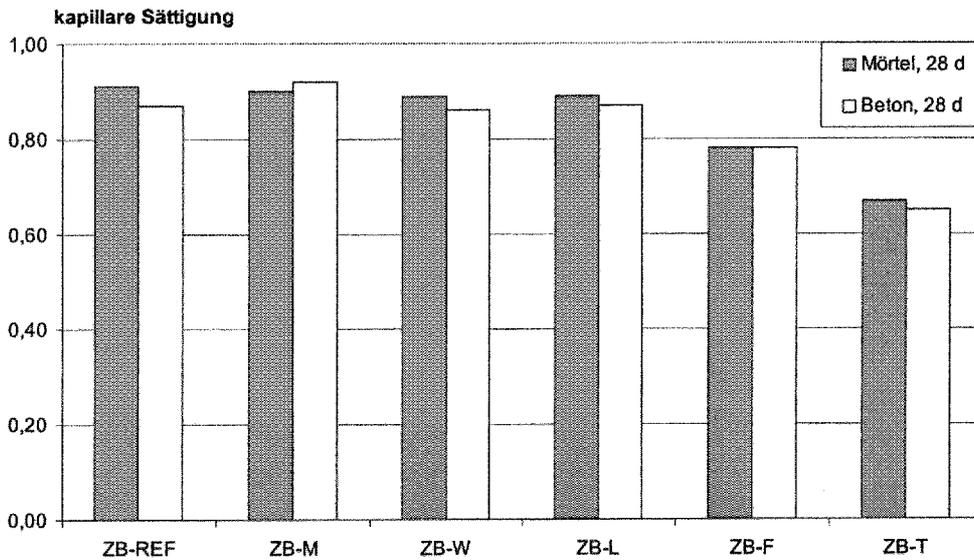


Bild 6: Druckfestigkeit der Betone mit Stabilisierern in Relation zur Referenzmischung

### 5.3 Wasseraufnahme

Entsprechend des geringeren Leimvolumens liegen die Werte für die kapillare Wasseraufnahme sowie die Wasseraufnahme unter Druck auf einem niedrigeren Niveau als bei den Mörteln (Tabellen A11 und A12).



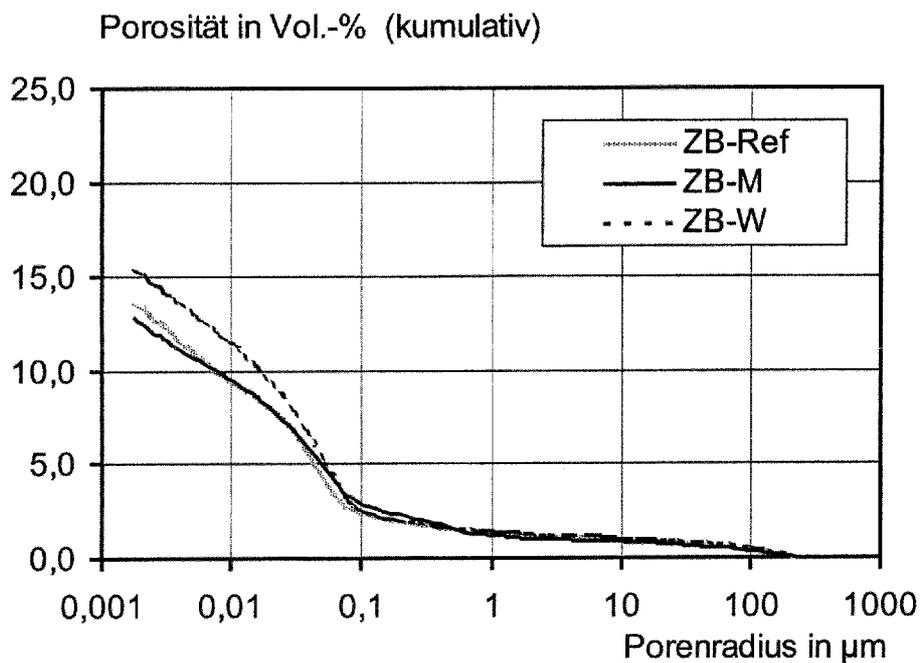
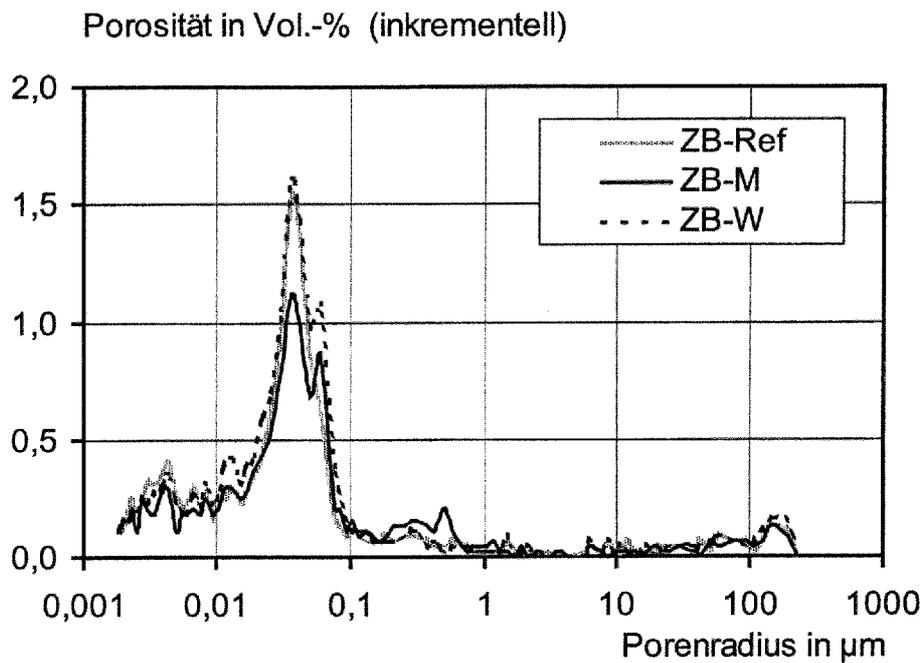
**Bild 7:** Vergleich der kapillaren Sättigung der Mörtel und Betone im Prüfalalter von 28 Tagen

Die kapillare Sättigung der Betone als Quotient aus den beiden Kennwerten ist nahezu identisch mit den Werten aus den Mörtelmischungen (Bild 7). Auffällig sind somit die poröseren Betone ZB-T und ZB-F mit erhöhten Porositäten und relativ geringen Sättigungsgraden. Im Prüfalalter von 90 Tagen relativiert sich diese Aussage für Beton ZB-F wieder, während das Sättigungsniveau von ZB-T weiterhin bei sehr geringen Werten liegt.

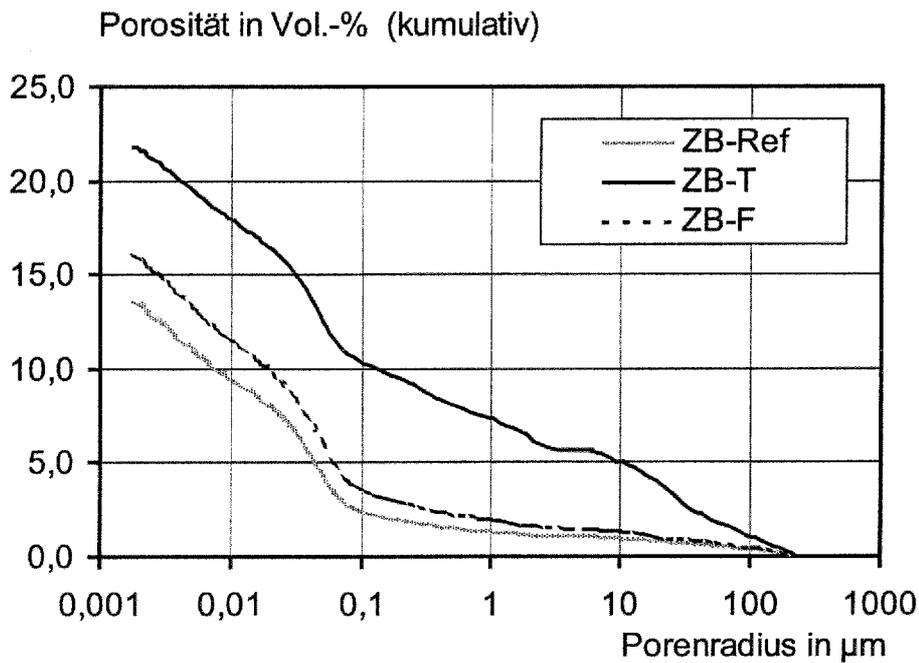
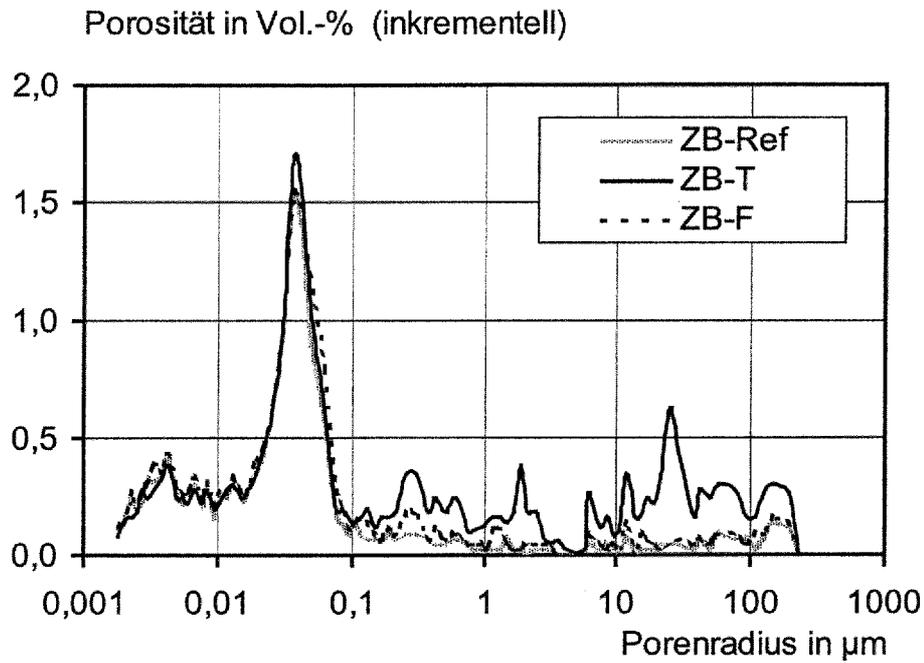
## 5.4 Porenstruktur

Die über die Hg-Druckporosimetrie erfaßte Porosität differenziert wieder die porösen Betone ZB-T und ZB-F vom Referenzbeton. Anders als beim Mörtel finden sich beim Beton jedoch vereinzelt höhere Porositätswerte als bei der Wasseraufnahme unter Druck (Tabelle A13). Dies ist auf die aufgrund der verarbeitbaren Probengröße notwendige selektive Probenahme an den Betonprüfkörpern zurückzuführen, bei der der als gefügedicht geltende Grobzuschlag möglichst ausgespart bleibt.

Die Maxima der Porenverteilung im meßbaren Radienbereich zwischen 0,02 und 230  $\mu\text{m}$  und die Medianradien liegen bei tendentiell kleineren Werten als beim Mörtel. Als mögliche Ursache kann das unterschiedliche Matrix/Zuschlag-Verhältnis und der im Relation zum Mörtel geringere Anteil an Feinzuschlag im Beton herangezogen werden, der zu einem relativ reduzierten Volumen an Kontaktporosität führt. Mit Ausnahme des Betons ZB-T ist der Anteil an Kapillarporen bei allen Betonen ähnlich gering, was die in etwa in gleichem Umfang stattfindende kapillare Wasseraufnahme erklärt (Bilder 8 und 9).



**Bild 8:** Porengrößenverteilung in den Betonen ZB-Ref, ZB-M und ZB-W im Prüfalter von 28 Tagen (oben = inkrementelle, unten = kumulative Verteilung)



**Bild 9:** Porengrößenverteilung in den Betonen ZB-Ref, ZB-F und ZB-T im Prüfalter von 28 Tagen (oben = inkrementelle, unten = kumulative Verteilung)

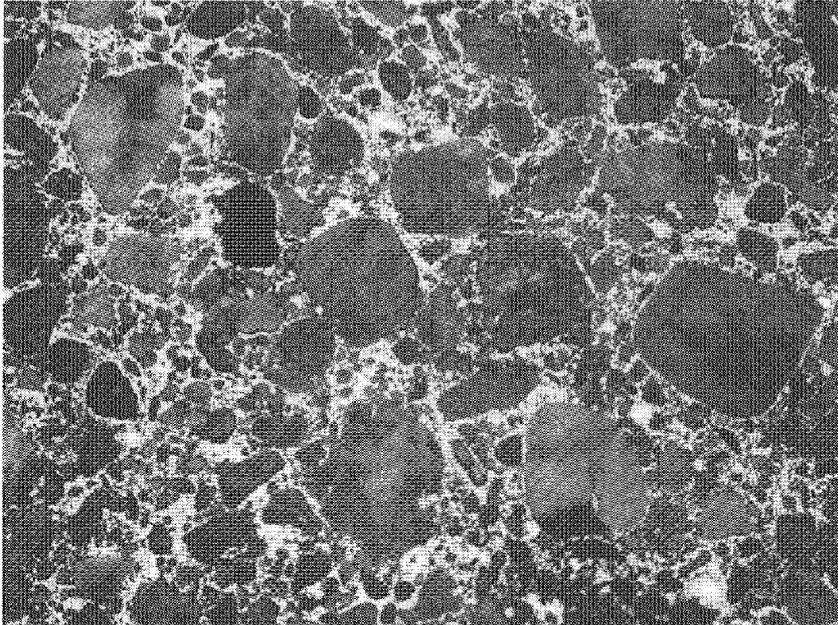
Die Grensradien sind vereinzelt aufgrund eines geringen, aber stetig über den Kapillar- und Grobporenbereich verteilten Porengehaltes relativ groß. Signifikant macht sich dies aber nur bei der als extrem einzustufenden Mischung ZB-T auch im Hinblick auf z. B. die Permeabilität bemerkbar, die bis zu einer Größenordnung über den Werten der übrigen Betone liegt. Prinzipiell liegen die Permeabilitäten der Betone nach 28 Tagen in der gleichen Größenordnung wie die der jeweiligen Mörtelmischungen. Erhöhte Werte sind jedoch bei ZB-W zu verzeichnen. Anders als bei den Mörteln ist im Beton jedoch keine einheitliche Verringerung der Permeabilität bei fortgeschrittenem Prüfalter festzustellen (Tabelle A13).

Die spezifische Oberfläche erreicht trotz niedrigerer erfaßter Porosität nach 28 Tagen annähernd dieselben Absolutwerte wie im Mörtel, nimmt dann im weiteren Verlauf der Probeklagerung jedoch nicht mehr signifikant zu. Dieser Kennwert wird im wesentlichen durch die Feinstporenanteile (etwa < 50 nm) bestimmt. Die Unterschiede in den Porositäten sind somit auf die gröberen Porenanteile zurückzuführen. Dies zeigt sich ansatzweise auch in der graphischen Darstellung der inkrementellen und kumulativen Porengrößenverteilungen (Bilder 7 und 8).

## **5.5 Frost-Tauwechselwiderstand**

### **5.5.1 Luftporenkennwerte**

An einigen für die Frostuntersuchungen vorgesehenen Proben wurden die Luftporenkennwerte gemäß DIN EN 480-11 /14/ mikroskopisch ermittelt. Dies erfolgte für die Betone ZB-REF, ZB-M, ZB-W und ZB-F. Die Ergebnisse der Messungen sind in Tabelle A14 aufgeführt. Für die zunächst ebenfalls vorgesehene Probe ZB-T konnten keine Kennwerte gemessen werden, weil sich im Zuge der für das Verfahren notwendigen Schliffpräparation Probleme einstellten. Aufgrund der hohen Porosität der Matrix erfolgte der Materialabtrag beim Schleifen so ungleichmäßig, daß ein starkes Chagrain (Unebenheit der Oberfläche) zwischen den quarzitäen Zuschlagkörnern und der Matrix entstand (Bild 10). Bei der abschließenden Füllung der Porenräume mittels weißer Kontrastpaste wurden daher großflächige Bereiche der Probe als „Pore“ markiert, so daß die Präparate unbrauchbar waren.



**Bild 10:** Schleifchagrain in der Probenoberfläche von ZB-T  
(untere Bildkante etwa 13 cm)

Die an den Betonen ermittelten Luftporenkennwerte zeigen, daß die durch die Stabilisierer eingetragenen Luftgehalte überwiegend als Poren der Radienfraktion  $> 300 \mu\text{m}$  auftreten, da die Werte für den  $L_{300}$  weitgehend unabhängig von der erfaßten Gesamtporosität in einem relativ engen Bereich liegen. Dadurch wird erklärlich, weshalb über die Hg-Druckporosimetrie, die im Radienbereich größer  $250 \mu\text{m}$  keine Daten erfaßt, die Unterschiede in den Luftgehalten der Betone nicht vollständig nachvollzogen werden konnten.

Die mikroskopisch erfaßbare Porosität liegt teilweise deutlich über den im Frischbeton gemessenen Werten. Dieses auch aus anderen Messungen /20/ bekannte Phänomen ist unter anderem auf die nachfolgend skizzierten Gründe zurückzuführen:

- zusätzliche, frei Porenräume im Beton durch Austrocknen des Überschußwassers,
- präparationsbedingte Ausweitung der vorliegenden Porenstrukturen durch Kantenbrüche an Porenrandungen,
- Verwendung der oberen Sehnenklassengrenzen in der Porenradienverteilung als Ausgangswert für die Berechnung des Porenvolumens (nach Vorgabe DIN EN 480-11).

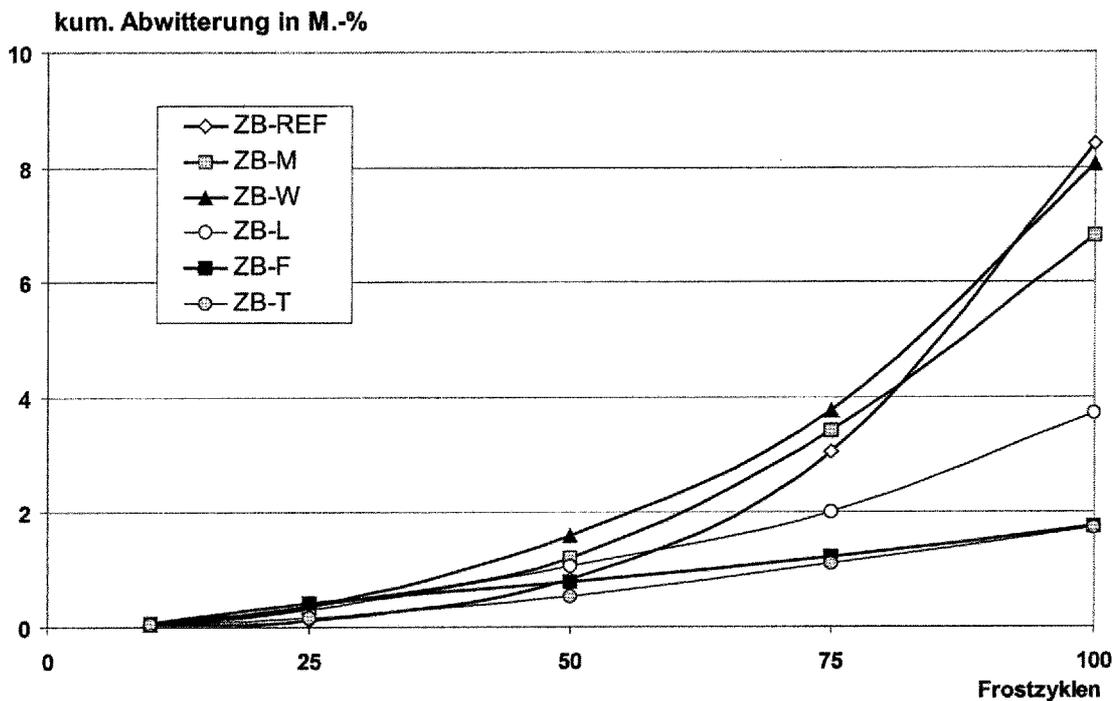
Die Bewertung der Luftporenkennwerte in Bezug auf die definierten Grenzwerte für Luftporenbetone zeigt, daß die weniger porösen Betone ZB-REF und ZB-M insbesondere im  $L_{300}$ -Wert in der Nähe bzw. unterhalb des geforderten Gehaltes von 1,8 Vol.-% liegen. ZB-M zeigt zudem einen zu hohen Abstandsfaktor (AF). Die übrigen Betone halten die Grenzwerte ein. Bei ZB-F fällt die sehr hohe Gesamtporosität im Vergleich zu den Frischbetonwerten auf. Dies ist unter anderem auch auf den bei ZB-T beschriebenen Effekt zurückzuführen, daß bei der Präparation der geringer festen Matrix Ausbrüche an Porenrändern nicht zu vermeiden sind.

### 5.5.2 VDZ-Würfelprüfverfahren

Die Untersuchung des Frost-Tauwechselwiderstandes erfolgte nach dem VDZ-Würfelprüfverfahren an den Betonen ZB-REF, ZB-M, ZB-W, ZB-F, ZB-T und ZB-L. Da die Betone mit einem Wassorzementwert von 0,60 und ohne gezielte Anwendung eines Luftporenbildners hergestellt wurden, entsprechen sie nicht den Anforderungen an frostbeständige Betone unter hoher Wassersättigung (XF3 nach DIN 1045-2 /3/). Dementsprechend ist zu erwarten, daß im angewendeten Prüfverfahren die Kriterien für frostbeständige Betone nicht eingehalten werden können.

Die kumulativen Abwitterungen aus bis zu 100 Frost-Tauwechsel sind in der Tabelle A15 aufgeführt und in Bild 11 dargestellt. Der Referenzbeton erweist sich als nur bedingt frostbeständig. Nach einer moderaten Abfrosthung während der ersten 50 Frost-Tauzyklen (FTW) steigen die Abfrosthungen bis zu 100 FTW progressiv an und erreichen einen kumulierten Wert von über 8 M.-%. Die Bewertung deckt sich mit den Ergebnissen aus der Bestimmung der Luftporenkennwerte, bei denen ein grenzwertiger Mikroluftporengehalt beobachtet wurde.

Ein sehr ähnlicher Abwitterungsverlauf ist ebenfalls bei ZB-M und ZB-W zu beobachten. Diese Betone zeichnen sich durch eine nur geringfügig erhöhte Porosität gegenüber der Referenzprobe aus. Eine anhand der Luftporenkennwerte zu erwartende Differenzierung findet sich im Laborprüfverfahren nicht wieder. Geringfügige Schwankungen in den Werten für die kapillare Sättigung oder die Gaspermeabilität wirken sich kaum auf das Abwitterungsverhalten aus.

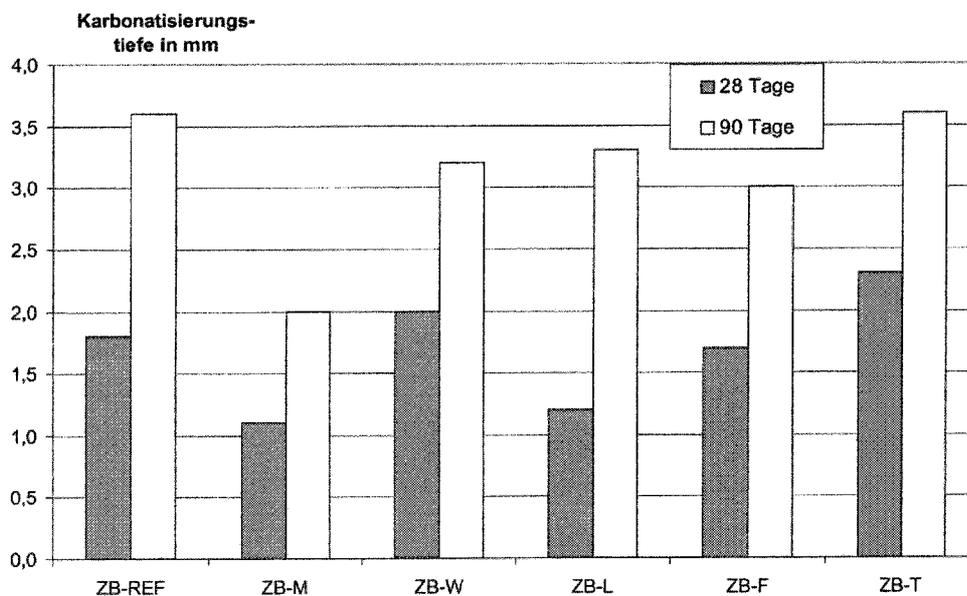


**Bild 11:** Kumulative Abwitterung der untersuchten Betone über 100 FTW des VDZ-Würfelprüfverfahrens

Die bezüglich der Porosität und der physikalisch-mechanischen Kennwerte als ungünstig bewerteten Betone ZB-F und vor allem ZB-T weisen ein anderes Abwitterungsverhalten aus. Über die komplette Prüfdauer hinweg findet eine nahezu lineare, jedoch sehr geringfügige Zunahme der Abwitterung statt, so daß bei 100 FTW aufsummierte Masseverluste von deutlich unter 2 M.-% zu verzeichnen sind. Ein solches Verhalten ist typisch für frostbeständige Luftporenbetone. Man kann folglich davon ausgehen, daß die durch die Stabilisierer eingebrachten Luftgehalte in Form von isolierten, also zumindest nicht kapillar verbundener Luftporen vorliegen. Als solche steigern sie den Frostwiderstand der Betone trotz der geringeren Festigkeitswerte deutlich, indem sie Ausweichvolumina für das zusätzliche Eisvolumen zur Verfügung stellen und zudem die kapillare Wasseraufnahme behindern. Allerdings sollten diese Zusatzmittel nicht mit herkömmlichen Luftporenbildnern verglichen werden, da für die beschriebene Wirkung teilweise überproportional hohe Luftgehalte in Kauf genommen werden müssen.

## 5.6 Karbonatisierung

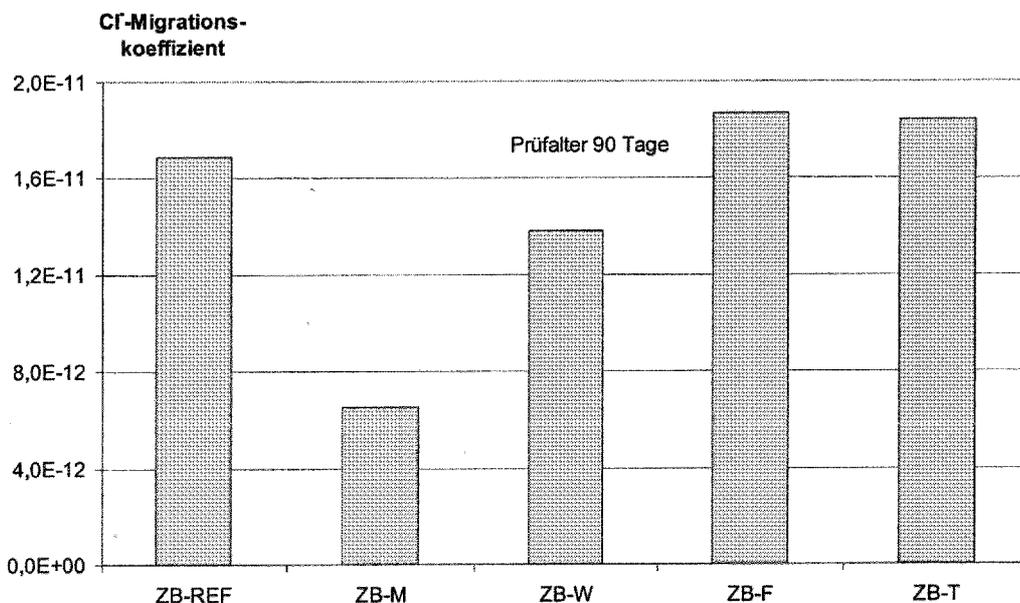
Die nach 90 Tagen gemessenen Karbonatisierungstiefen der Betone (Bild 12 und Tabelle A16) zeigen aufgrund der insgesamt kleinen Meßwerte im Bereich von 2 bis 4 mm auch nur geringe Differenzierungen. Auffällig sind allein die zu beiden Prüfterminen niedrigsten Meßwerte für ZB-M, die für eine tendentiell höhere Dichtheit dieses Betons sprechen, was aber anhand der Prüfergebnisse aus den anderen Untersuchungen nicht schlüssig nachweisbar ist.. Belastbare Aussagen oder gar die Extrapolation von Karbonatisierungsgeschwindigkeiten wären bei den gegebenen Randbedingung der Prüfung (Lagerung in Laborklima) erst zu späteren Zeitpunkten möglich.



**Bild 12:** Karbonatisierungstiefe der Betone nach 28 und 90 Tagen

### 5.7 Chlorid-Eindringwiderstand

Die nach der Methode von Tang und Nilsson /17, 18/ ermittelten Migrationskoeffizienten für Chlorid sind in Tabelle A16 aufgeführt. Zwischen dem Referenzbeton und den Betonen mit den organischen Stabilisierern „F“ und „T“ bestehen praktisch keine Unterschiede in den Meßwerten. Die signifikant höheren Porositäten der Betone ZB-F und ZB-T wirken sich somit praktisch nicht auf den Eindringwiderstand gegenüber Chloridionen aus. Wie bereits aus den Ergebnissen der Wasseraufnahme abgeleitet, stehen die zusätzlichen Porenräume offensichtlich in keiner kapillar wirksamen, aber offensichtlich auch keiner die Diffusion oder die Migration fördernden Verbindung untereinander. Dieselben Zusammenhänge lassen sich auch für andere betonschädliche Ionen wie z. B. Sulfat erwarten. Erst unter Aufwendung von äußerem Druck sind höhere Durchlässigkeiten zu erzielen, wie die Ergebnisse der Wasseraufnahme unter Druck oder der Permeabilitätsmessung zeigen.

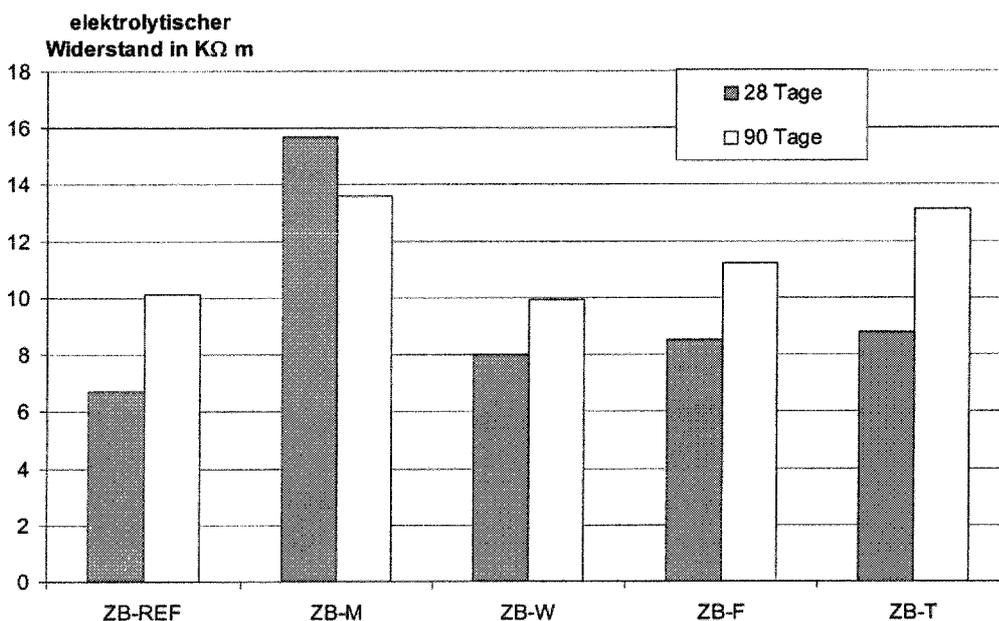


**Bild 13:** Chlorid-Migrationskoeffizient der Betone im Prüfalalter von 90 Tagen

Bei den Betonen unter Verwendung der silikahaltigen Stabilisierer zeigen sich tendentiell (ZB-W) bis deutlich (ZB-M) niedrigere Migrationskoeffizienten (Bild 13). Dieser Effekt ist im Rahmen früherer Untersuchungen an Betonen mit puzzolanischen Zusatzstoffen (Steinkohlenflugasche und vor allem Silikastaub) ebenfalls beobachtet worden /21, 22/. Er wird auf eine Verdichtung der Porenstruktur, aber auch auf eine erhöhte Bindekapazität für die eindringenden Chloridionen durch die  $\text{SiO}_2$ -reichen Hydratationsprodukte der Puzzolane zurückgeführt /23/. Die Wirksamkeit der Zusatzstoffe ist daher unter anderem von der spezifischen Oberfläche und der Reaktivität der Puzzolane abhängig. Hierdurch könnte der höhere Eindringwiderstand des Betons ZB-M mit dem Stabilisierer auf Basis der kolloidalen Kieselsäure begründet sein.

## 5.8 Elektrolytischer Widerstand (WENNER-Sonde)

Die Messung des elektrolytischen Widerstandes der Betone im Alter von 28 und 90 Tagen liefert ähnlich wie die Chloridmigrationskoeffizienten keine deutliche Differenzierung der Betone (Bild 14 und Tabelle A16).



**Bild 14:** Elektrolytischer Widerstand der Betone nach 28 und 90 Tagen

Die tendentielle Zunahme der gemessenen Widerstände vom ersten zum zweiten Prüftermin belegt ähnlich wie die Festigkeitsentwicklung eine langsam fortschreitende Strukturentwicklung des Betongefüges über das Bemessungsalter von 28 Tagen hinaus, die aber auf die ermittelten Porenstrukturkennwerte keinen signifikanten Einfluß ausübt. Beton ZB-M bildet insofern eine Ausnahme, daß er nach 28 Tagen einen deutlich, nach 90 Tagen jedoch aufgrund eher reduzierter Meßwerte nur noch einen geringfügig höheren Elektrolytwiderstand als die übrigen Betone aufweist. Ein höheres Niveau der Widerstandswerte ist in wesentlich ausgeprägterem Maß von Betonen mit Hochofenzement oder mit puzzolanischen Zusatzstoffen bekannt, die aufgrund einer größeren Dichtheit der Ionenbewegung einen höheren Widerstand entgegensetzen. Aufgrund der großen Oberfläche der puzzolanischen, kolloidalen Kieselsäure reagiert Produkt „M“ offensichtlich frühzeitig und umfassend, so daß in höheren Prüfaltern kein zusätzlicher Effekt mehr zu verzeichnen ist.

## 5.9 Zusammenfassung der Betonversuche

Beim Einsatz der ausgewählten Stabilisierer im Beton zeigt sich eine prinzipielle Übertragbarkeit der bei den Mörteluntersuchungen beobachteten Auswirkungen. Auch hier wiesen einige der Mischungen erhöhte Luftgehalte auf, bei denen die Absolutwerte der Porosität aufgrund der leimärmeren Mischungsproportionen aber niedriger ausfallen. Einige Betone zeigen jedoch auch höhere Luftgehalte als die zugehörigen Mörtel. Die Neigung zu einer im Vergleich zur zusatzmittelfreien Referenzmischung steiferen Konsistenz wird bei den luftreichen Betonen kompensiert. Ein Rücksteifen zeigen allein die Betone mit Stabilisierern auf Basis von Stärke. Die Wirksamkeit der Produkte im Hinblick auf die Vermeidung der Blutneigung zeigt deutliche Unterschiede.

Durch die eingetragenen Luftgehalte wird die Druckfestigkeit der Betone im Rahmen der bekannten Abhängigkeiten reduziert. Auch im Beton bewirkt die Verwendung der silikahaltigen Stabilisierer Festigkeitssteigerungen, die anders als bei den Mörtelversuchen auch im höheren Prüfalter erhalten bleiben.

Die Untersuchung der Porenstrukturkennwerte führt bei den Betonen zu weniger deutlichen Differenzierungen als beim Mörtel. Nahezu identisch sind die Ergebnisse der Wasseraufnahmeversuche. Auch im Beton ist die kapillare Wasseraufnahme aller Proben so ähnlich, so daß die differierende Wasseraufnahme unter Druck zu deutlich verschiedenen kapillaren Sättigungsgraden führt. Bei den Untersuchungen mit dem Hg-Druckporosimeter zeigen sich in dem mit dieser Meßtechnik erfaßbaren Porenradienbereich und unter Berücksichtigung

der beschränkten Reproduzierbarkeit bei der Probenahme kaum signifikante Unterschiede, ebenso bei den Gaspermeation. Jeweils ist lediglich der Beton ZB-T mit seinen extremen Luftgehalten auffällig. Die wesentlichen Unterschiede in der Gesamtporosität liegen nach den lichtmikroskopischen Untersuchungen der Luftporenkennwerte im Radienbereich  $> 300 \mu\text{m}$ .

Die durchgeführten Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit der Betone zeigen in ihren Ergebnissen nur geringe Abhängigkeiten von den eingetragenen Luftgehalten. Bei den Untersuchungen des Elektrolytwiderstandes und der Chlorid-Migrationskoeffizienten, die beide die Beweglichkeit von in Lösung befindlichen Ionen beschreiben, wirken sich lediglich die puzzolanischen Bestandteile der silikahaltigen Produkte aus, indem sie eine Verdichtung der Porenstruktur belegen. Dieselbe Beobachtung ist beim Karbonatisierungsfortschritt zu machen. Als generelle Tendenz kann also festgehalten werden, daß sich durch die Verwendung der Stabilisierer im Beton die für Transportmechanismen maßgeblichen Porositätsanteile nicht wesentlich verändern.

Eine mögliche Beeinflussung der Frostepfindlichkeit der Betone, die maßgeblich über deren Porenstruktur bestimmt wird, wurde im Vorfeld als die eventuelle kritischste Auswirkung des durch die Stabilisierer bedingten Luftporeneintrages angesehen. Wie es sich bei der lichtmikroskopischen Untersuchung der Luftporenkennwerte aber bereits andeutete, zeigten die Frost-Tauwechselversuche nach dem VDZ-Würfelverfahren den gegenteiligen Effekt. Während der Referenzbeton und die anderen Betone mit nur geringfügig erhöhter Porosität im Verlauf des Versuches progressiv zunehmende Schädigungen zeigten und sich allenfalls als bedingt frostbeständig erwiesen, schnitten die höher porösen Betone günstiger ab. Die eingeschlossene, kapillar nicht vernetzte Luft wirkt ähnlich wie gezielt eingebrachte Luftporen, wodurch sich eine nur geringfügige, linear ansteigende Abwitterung einstellt und der Frostwiderstand dieser Betone als deutlich höher bewertet werden muß.

## 6 GESAMTZUSAMMENFASSUNG

Aus Zulassungsversuchen für Zusatzmittel der Wirkstoffgruppe „Stabilisierer“ sowie aus der Fachliteratur ist bekannt, daß die Verwendung von Stabilisierern im Beton zum Eintrag höherer Luftgehalte führen kann. Da dieser Effekt im Rahmen von Zulassungsversuchen nicht detailliert untersucht und bewertet wird, sollte im Rahmen dieses vom Deutschen Institut für Bautechnik geförderten Forschungsvorhabens mögliche Auswirkungen dieser Veränderung der Porenstruktur auf die Dauerhaftigkeit von Betonen ermittelt werden. Hieraus soll abgeleitet werden, ob und welche Erweiterungen in den Zulassungsversuchen zur Unschädlichkeit dieser Zusatzmittelgruppe notwendig sind.

Die Auswahl der Stabilisierer für dieses Forschungsvorhaben sowie deren Anwendung auf Mörtel- und Betonrezepturen führen wie geplant zu erhöhten Lufteinträgen durch einige der Produkte. Dabei zeigen die reinen Wirkstoffe dieselben Effekte wie die auf Basis dieser Grundstoffe formulierten kommerziellen Produkte. Die im Rahmen der Mörteluntersuchungen aufgezeigten Auswirkungen auf die Luftgehalte, Festigkeiten und Porenstrukturkennwerte führten zur Auswahl von einigen Stabilisierern für die Betonversuche und finden sich dort prinzipiell wieder, auch wenn die Veränderungen der Eigenschaften weniger deutlich hervortreten.

Die zum Teil sehr deutlich erhöhten Luftgehalte, die durch die Anwendung der zugelassenen Maximaldosierungen der Stabilisierer in den Frisch- und Festbeton eingetragen werden, zeigen sehr deutliche Auswirkungen auf die Druckfestigkeit sowie vereinzelt auf Verarbeitungseigenschaften. Diese Kennwerte werden jedoch bei der Herstellung von Betonen mit besonderen Eigenschaften, bei denen Stabilisierer überhaupt erst zum Einsatz kommen, im Zuge der Eignungsprüfung ermittelt, so daß ungünstige Kombinationen aus Binde- und Zusatzmitteln von vornherein verworfen werden könnten. Da die Auswirkungen in der Regel maximal im Bereich der vom Beton mit gezieltem Eintrag von Luftporen bekannten Zusammenhänge auftreten, dürfte sich auch bei anderen mechanischen Eigenschaften kein prinzipiell abweichendes Verhalten einstellen, das eine tiefergehende Untersuchung bemesungsrelevanter Kennwerte notwendig machen würde.

Bei den untersuchten Dauerhaftigkeitseigenschaften erweisen sich die höheren Porositäten als nicht schädlich, da sie nicht im transportrelevanten Kapillarporenbereich, sondern überwiegend im Meso- und vor allem Makroporenbereich auftreten. Dementsprechend zeigen sich keine Zusammenhänge zwischen Porosität und Gas- oder Iontentransportkennwerten. Bei den Untersuchungen zum Frostwiderstand erweisen sich die erhöhten Porositäten ähnlich wie gezielt eingebrachte Luftporen sogar als förderlich.

Die Stabilisierer auf Basis feinstkörnigen Silikas (kolloidale Kieselsäure, Nanosilika) deuten bei verschiedenen Untersuchungen eine puzzolanische Aktivität an. Hier wäre durch ergänzende Untersuchungen festzustellen, ob die über den Stabilisierer eingebrachten Feststoffgehalte auf die maximal zulässigen Dosierungen an puzzolanischen Zusatzstoffen angerechnet werden müssen, um eine ausreichende Alkalitätsreserve zu gewährleisten.

Zusammenfassend können die Untersuchungsergebnisse dahingehend gewertet werden, daß an der bestehenden Praxis, die im Rahmen der Mörtelversuche bei der Zulassung auffälligen Produkte mit einem Warnhinweis zu versehen, keine Änderungen notwendig sind. Prinzipielle Forderungen nach weitergehenden Untersuchungen zum Nachweis der Unschädlichkeit im Hinblick auf Dauerhaftigkeitseigenschaften erscheinen als nicht notwendig.

## 7 LITERATUR

- /1/ DIN 1045 07.88. Tragwerke aus Beton; Stahlbeton und Spannbeton
- /2/ DIN EN 206 07.01. Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität
- /3/ DIN 1045-2 07.01. Tragwerke aus Beton; Stahlbeton und Spannbeton – Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1
- /4/ DIN EN 934 02.02. Zusatzmittel für Beton, Mörtel und Einpreßmörtel
- /5/ DIBt: Grundsätze für die Erteilung von Zulassungen für Betonzusatzmittel (Zulassungsgrundsätze) -Fassung März 2002“. In: „Zulassungs- und Überwachungsgrundsätze Betonzusatzmittel – Fassung März 2002“ Berlin, Schriften des Deutschen Institutes für Bautechnik, Reihe B, Heft 10
- /6/ Beupre, D. ; Lacombe, P. ; Khayat, K.H.: Laboratory Investigation of Rheological Properties and Scaling Resistance of Air Entrained Self-Consolidating Concrete. In: Materials and Structures 32 (1999), Nr. 217, S. 235-240
- /7/ Khayat, K.H.: Frost Durability of Concrete Containing Viscosity-Modifying Admixtures. Ottawa : CANMET, 1994. - In: Third CANMET/ACI National Conference on Durability of Concrete, Nice France, May 22-28, 1994, (Malhotra, V.M. (Ed.)), S. 109-131 siehe auch In: ACI Materials Journal 92 (1995), Nr. 6, S. 625-633
- /8/ Hewlett, P.C. ; Lea, F.M.: Lea's Chemistry of Cement and Concrete. 4. Edition, London : Arnold, 1998
- /9/ Pierkes, R.: Tastversuche zur Beeinflussung der Porenstruktur durch den Einsatz von Stabilisierern. Institut für Bauforschung, (2000) F 6001, unveröffentlicht
- /10/ DIN EN 196-1 05.95. Prüfverfahren für Zement – Bestimmung der Festigkeit
- /11/ DIN 1048-1 06.91. Prüfverfahren für Beton – Frischbeton
- /12/ DIN 1048-5 06.91. Prüfverfahren für Beton – Festbeton, gesondert hergestellte Prüfkörper
- /13/ E DIN EN 12390-9 05.02. Prüfung von Festbeton – Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand, Abwitterung
- /14/ DIN EN 480-11 02.99. Zusatzmittel für Beton, Mörtel und Einpreßmörtel – Prüfverfahren, Teil 11: Bestimmung von Luftporenkennwerten im Festbeton. Deutsche Fassung der EN 480-11 11.98

- /15/ Bonzel, J. ; Siebel, E. ; VDZ ; Forschungsinstitut der Zementindustrie: Bestimmung von Luftporenkennwerten am Festbeton : Anleitung für die Bestimmung von Luftporenkennwerten am Festbeton Mikroskopische Luftporenuntersuchung (Fassung 1981). In: Beton 31 (1981), Nr. 12, S. 459-466
- /16/ Bunke, N.: Prüfung von Beton : Empfehlungen und Hinweise als Ergänzung zu DIN 1048.beton Berlin : Beuth. - In: Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (1991), Nr. 422
- /17/ Tang, L. ; Nilsson, L.-O.: A Rapid Method for Measuring Chloride Difusivity by Using an Electrical Field - Theorety and Current Experience. Göteborg : Chalmers University of Technoloy, 1993. - Publ.-Nr. P-93:1 In: Chloride Penetration into Concrete Structures : Nordic Miniseminar, January 1993, S. 26-35
- /18/ Tang, L. ; Nilsson, L.-O.: Accelerated Tests for Chloride Diffusivity and their Application in Prediction of Chloride Penetration. Boston : MRS Fall Meeting, 1995
- /19/ Meyer, A: Beton mit hoher Frühfestigkeit. In: Betonsteinzeitung 33 (1967), Nr. 5, S. 212-219, zitiert in Wesche, K.: Baustoffe für tragende Bauteile – Teil 2 Beton und Mauerwerk. Berlin, Bauverlag GmbH, 3. Auflage 1993, S. 186
- /20/ Gast, R.: Vergleich des Luftporengehalts am frischen und erhärteten Beton. Bonn : Bundesminister für Verkehr. - In: Reihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik (1980), Nr. 312, S. 1-64
- /21/ Brameshuber, W. ; Schröder, P.: Auswirkung der gemeinsamen Anrechnung von Silicastaub und Flugasche auf Festbetoneigenschaften. Aachen : Institut für Bauforschung, 2002. - Forschungsbericht Nr. F 758
- /22/ Wiens, U. ; Schröder, P. ; Müller, Ch.: Verwendung von Steinkohlenflugasche in Hochleistungsbetonen. Aachen : Institut für Bauforschung, 1999. – Forschungsbericht Nr. F 521
- /23/ Schießl, P. ; Wiens, U.: Einfluß von Steinkohlenflugasche auf die chloridinduzierte Korrosion von Stahl in Beton. Aachen : Institut für Bauforschung, 1995. – Forschungsbericht Nr. F 436

**Tabelle A1: Mörtelzusammensetzung und Frischmörtelkennwerte**

Mörtel mit Stabilisierer	Zement	Einwaage			w/z-Wert	Ausbreitmaß	Luftgehalt	$\Delta$ -IP <sup>1)</sup>
		z	w	ST				
-	-	g			-	mm	Vol.-%	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
ZM-REF	CEM I 32,5 R	450	270	-	0,60	237	1,2	-
ZM-M			252	22,5		206	2,1	0,9
ZM-W			252	22,5		198	2,8	1,6
ZM-L			263,3	6,7		210	1,8	0,6
ZM-F			265,5	4,5		213	4,8	3,6
ZM-T			270	3,15		206	15,5	14,3
ZM-A			270	2,7		225	1,6	0,4
ZM-D			270	0,08		196	2,0	0,8
ZM-S			270	1,0 <sup>2)</sup>		187	2,1	0,9
ZM-C			270	0,6 <sup>2)3)</sup>		211	3,9	2,7
ZM-P			269,8	0,4 <sup>2)</sup>		195	1,8	0,6

1) Differenz im Luftgehalt im Vergleich zum Referenzmörtel

2) Dosierung gewählt zum Einstellen eines Ausbreitmaßes von etwa 200 mm

3) Vorquellen (5 min) des Stabilisierers mit einem Teil des Anmachwasser lt. Vorgabe des Herstellers

**Tabelle A2: Betonzusammensetzungen der zweiten Versuchsphase**

Beton mit Stabilisierer	Zement	Einwaage				w/z-Wert
		Zement	Wasser	Zuschlag <sup>1)</sup>	Stabilisierer	
-	-	kg/m <sup>3</sup>				-
1	2	3	4	5	6	7
ZB-REF	CEM I 32,5 R	300	180	1867	-	0,60
ZB-M			168	1840	15,00	
ZB-W			168	1840	15,00	
ZB-L			176	1859	4,50	
ZB-F			178	1861	3,00	
ZB-T			180	1863	2,10	
ZB-A			180	1864	1,80	
ZB-D			180	1867	0,054	
ZB-S			180	1866	0,66	
ZB-C			180	1866	0,39	
ZB-P			180	1866	0,27	

1) Rheinkies, Sieblinie A16/B16 nach DIN 1045-2

Tabelle A3: Rohdichte, absolute und relative Druckfestigkeiten der Mörtel

Stabilisierer	Feucht-Rohdichte	Druckfestigkeit			relative Druckfestigkeit		
		7 d	28 d	180 d	7 d	28 d	180 d
-	kg/m <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>			-		
1	2	3	4	5	6	7	8
ZM-REF	2250	26,5	35,7	44,9	-	-	-
ZM-M	2260	28,7	38,9	44,4	1,08	1,09	0,99
ZM-W	2290	27,4	35,3	40,9	1,03	0,99	0,91
ZM-L	2230	21,8	29,1	38,3	0,82	0,82	0,85
ZM-F	2150	17,1	23,1	30,7	0,65	0,65	0,68
ZM-T	2040	9,3	17,9	20,4	0,35	0,50	0,45
ZM-A	2240	23,7	30,9	38,7	0,89	0,87	0,86
ZM-D	2270	23,2	29,8	38,9	0,87	0,83	0,87
ZM-S	2260	25,6	31,3	36,0	0,97	0,88	0,80
ZM-C	2200	19,5	27,6	26,5	0,74	0,77	0,59
ZM-P	2230	25,6	32,7	38,9	0,97	0,92	0,87

Tabelle A4: Absolute und relative Biegezugfestigkeiten der Mörtel

Stabilisierer	Biegezugfestigkeit			relative Biegezugfestigkeit		
	7 d	28 d	180 d	7 d	28 d	180 d
-	N/mm <sup>2</sup>			-		
1	2	3	4	5	6	7
ZM-REF	5,5	6,4	7,6	-	-	-
ZM-M	5,6	7,0	7,4	1,02	1,09	0,97
ZM-W	5,6	6,4	6,22	1,02	1,00	0,82
ZM-L	4,0	5,8	7,0	0,73	0,91	0,92
ZM-F	3,7	4,6	6,0	0,67	0,72	0,79
ZM-T	2,7	3,6	4,4	0,49	0,56	0,58
ZM-A	4,5	6,0	6,8	0,82	0,94	0,89
ZM-D	4,7	5,6	6,8	0,85	0,88	0,89
ZM-S	4,8	6,0	6,6	0,87	0,94	0,87
ZM-C	4,0	5,4	5,5	0,73	0,84	0,72
ZM-P	5,0	6,3	7,4	0,91	0,98	0,97

Tabelle A5: Rohdichte, Wasseraufnahme und Permeabilität der Mörtel nach 28 d

Mischung	Rohdichte	Wasseraufnahme			Permeationskoeffizient
		kapillar	150 bar	Sättigung	
-	kg/m <sup>3</sup>	Vol.-%		-	-
1	2	3	4	5	6
ZM-REF	2085	19,0	20,8	0,91	$1,6 \cdot 10^{-16}$
ZM-M	2030	18,4	20,6	0,90	$2,1 \cdot 10^{-16}$
ZM-W	2005	19,8	22,3	0,89	$1,3 \cdot 10^{-16}$
ZM-L	2045	18,8	20,9	0,89	$5,0 \cdot 10^{-16}$
ZM-F	1930	19,8	25,0	0,78	$3,3 \cdot 10^{-16}$
ZM-T	1710	20,1	29,9	0,67	$1,0 \cdot 10^{-15}$
ZM-A	2040	19,7	23,2	0,85	$1,2 \cdot 10^{-16}$
ZM-D	2050	18,6	21,0	0,90	$2,9 \cdot 10^{-16}$
ZM-S	2035	19,2	23,0	0,84	$1,0 \cdot 10^{-16}$
ZM-C	1955	19,8	26,2	0,76	$1,9 \cdot 10^{-16}$
ZM-P	2045	19,4	22,8	0,85	$1,8 \cdot 10^{-16}$

Tabelle A6: Rohdichte, Wasseraufnahme und Permeabilität der Mörtel nach 180 d

Mischung	Rohdichte	Wasseraufnahme			Permeationskoeffizient
		kapillar	150 bar	Sättigung	
-	kg/m <sup>3</sup>	Vol.-%		-	-
1	2	3	4	5	6
ZM-REF	2080	20,7	21,6	0,96	$< 1,0 \cdot 10^{-17}$
ZM-M	2020	21,3	23,1	0,92	$3,9 \cdot 10^{-17}$
ZM-W	2000	21,7	24,3	0,89	$1,9 \cdot 10^{-17}$
ZM-L	2010	21,8	24,2	0,90	$2,1 \cdot 10^{-17}$
ZM-F	1930	21,1	26,8	0,79	$4,7 \cdot 10^{-17}$
ZM-T	1910	20,6	27,7	0,75	$8,5 \cdot 10^{-17}$
ZM-A	2050	17,9	21,4	0,84	$4,7 \cdot 10^{-17}$
ZM-D	2030	21,1	23,6	0,90	$4,3 \cdot 10^{-17}$
ZM-S	2060	17,7	20,7	0,86	$5,3 \cdot 10^{-17}$
ZM-C	1970	18,8	24,2	0,78	$6,6 \cdot 10^{-17}$
ZM-P	2050	18,3	21,1	0,86	n. b.

Tabelle A7: Porositätskennwerte der Mörtel nach 28 d (Hg-Druckporosimetrie)

Mischung	Hg-Druckporosimetrie				
	Porosität	$r_{\text{mean}}^{1)}$	$r_{\text{max1}}/r_{\text{max2}}^{2)}$	$r_{\text{grenz}}^{3)}$	spez.Of.
-	Vol.-%	$\mu\text{m}$			$\text{m}^2/\text{g}$
1	2	3	4	5	6
ZM-REF	18,3	0,048	~ 0,05 / -	0,15	12,3
ZM-M	19,9	0,046	~ 0,06	0,10	13,2
ZM-W	20,1	0,069	~ 0,10 / 0,05	0,15	12,0
ZM-L	19,6	0,052	~ 0,05	~ 0,75 <sup>4)</sup>	11,2
ZM-F	24,2	0,083	~ 0,25 / 0,05	1,2	12,8
ZM-T	28,1	0,122	~ 1,02 / 0,05	1,6	15,1
ZM-A	19,2	0,043	~ 0,06	0,15	15,0
ZM-D	19,5	0,053	~ 0,05	0,30	11,9
ZM-S	19,3	0,044	~ 0,06	0,12	15,6
ZM-C	23,9	0,098	~ 0,11 / 0,06	~ 2,0 <sup>4)</sup>	15,8
ZM-P	20,0	0,039	~ 0,05	~ 2,0 <sup>4)</sup>	16,2

Tabelle A8: Porositätskennwerte der Mörtel nach 180 d (Hg-Druckporosimetrie)

Mischung	Hg-Druckporosimetrie				
	Porosität	$r_{\text{mean}}^{1)}$	$r_{\text{max1}}/r_{\text{max2}}^{2)}$	$r_{\text{grenz}}^{3)}$	spez.Of.
-	Vol.-%	$\mu\text{m}$			$\text{m}^2/\text{g}$
1	2	3	4	5	6
ZM-REF	18,9	0,039	~ 0,3 / 0,06 / 0,04	0,40	32,0
ZM-M	19,2	0,026	~ 0,06 / 0,03	0,10	20,6
ZM-W	18,0	0,031	~ 0,06 / 0,03	0,11	17,0
ZM-L	24,0	0,034	~ 0,06 / 0,04	~ 40 <sup>4)</sup>	17,7
ZM-F	23,0	0,038	~ 0,06 / 0,04	1,6	20,7
ZM-T	24,2	0,053	~ 3,0 / 0,11 / 0,06	~ 100 <sup>4)</sup>	19,3
ZM-D	21,0	0,033	~ 0,06 / 0,04	0,10	16,7
ZM-S	18,4	0,058	~ 0,11 / 0,06	0,12	11,3

- 1) Radius, bei dem 50 % der insgesamt eingedrungenen Hg-Menge eingedrungen sind)
- 2) Radienbereich(e), in denen die inkrementelle Intrusionskurven signifikante Maxima zeigt
- 3) Grenzradius, bei dem auf ein verbundenes Porensystem geschlossen werden kann
- 4) kontinuierliche Hg-Aufnahme im Grobporenbereich, daher Festlegung des „Grenzradius“ kritisch

Tabelle A9: Frischbetonkennwerte der Betone

Mischung	Ausbreitmaß		Luftgehalt		Rohdichte		Bluten
	10 min	45 min	10 min	45 min	10 min	45 min	45 min
-	mm		Vol.-%		kg/m <sup>3</sup>		ml
1	2	3	4	5	6	7	8
ZB-REF	460	450	1,4	1,7	2360	2350	22
ZB-M	415	420	2,0	2,4	2310	2310	5
ZB-W	410	400	1,7	2,0	2240	2300	3
ZB-L	415	405	2,1	2,2	2290	2300	28
ZB-F	445	420	3,4	3,8	2300	2280	12
ZB-T	450	450	8,5	8,6	2140	2130	0
ZB-A	450	445	3,5	n. b.	2260	n. b.	8
ZB-D	360	360	2,4	n. b.	2310	n. b.	0
ZB-S	400	365	2,4	n. b.	2330	n. b.	19
ZB-C	440	425	4,8	n. b.	2220	n. b.	n. b.
ZB-P	390	395	2,2	2,3	2330	2330	43

n. b. = nicht bestimmt

Tabelle A10: Rohdichte, absolute und relative Druckfestigkeiten der Betone

Mischung	Feucht-Rohdichte	Druckfestigkeit			relative Druckfestigkeit		
		7 d	28 d	180 d	7 d	28 d	180 d
-	kg/m <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>			-		
1	2	3	4	5	6	7	8
ZB-REF	2360	28,2	38,2	40,7	1,00	1,00	1,00
ZB-M	2360	30,6	40,1	45,2	1,09	1,05	1,11
ZB-W	2330	29,4	36,8	42,6	1,04	0,96	1,05
ZB-L	2340	23,1	31,0	35,2	0,82	0,81	0,86
ZB-F	2330	21,9	30,3	35,9	0,78	0,79	0,88
ZB-T	2180	12,8	18,6	21,4	0,45	0,49	0,53

Tabelle A11: Rohdichte, Wasseraufnahme und Permeabilität der Betone nach 28 d

Mischung	Rohdichte	Wasseraufnahme			Permeationskoeffizient
		kapillar	150 bar	Sättigung	
-	kg/m <sup>3</sup>	Vol.-%		-	-
1	2	3	4	5	6
ZB-REF	2260	12,1	14,0	0,87	$2,3 \cdot 10^{-16}$
ZB-M	2250	13,6	14,7	0,92	$2,1 \cdot 10^{-16}$
ZB-W	2240	13,0	15,0	0,86	$7,2 \cdot 10^{-16}$
ZB-L	2220	13,1	15,1	0,87	$2,9 \cdot 10^{-16}$
ZB-F	2260	11,0	14,0	0,78	$4,1 \cdot 10^{-16}$
ZB-T	2120	11,9	18,3	0,65	$1,6 \cdot 10^{-15}$

Tabelle A12: Rohdichte, Wasseraufnahme und Permeabilität der Betone nach 90 d

Mischung	Rohdichte	Wasseraufnahme			Permeationskoeffizient
		kapillar	150 bar	Sättigung	
-	kg/m <sup>3</sup>	Vol.-%		-	-
1	2	3	4	5	6
ZB-REF	2240	13,2	14,1	0,93	$3,4 \cdot 10^{-16}$
ZB-M	2250	13,1	15,0	0,87	$2,4 \cdot 10^{-16}$
ZB-W	2260	13,0	14,8	0,88	$5,9 \cdot 10^{-16}$
ZB-L	2260	12,3	14,5	0,85	n. b.
ZB-F	2220	12,7	14,3	0,90	$5,3 \cdot 10^{-16}$
ZB-T	2040	12,8	22,8	0,56	$9,0 \cdot 10^{-16}$

**Tabelle A13: Porositätskennwerte der Betone nach 28 d (Hg-Druckporosimetrie)**

Mischung	Hg-Druckporosimetrie				spez.Of. m <sup>2</sup> /g
	Porosität Vol.-%	$r_{\text{mean}}^{1)}$	$r_{\text{max1}}/r_{\text{max2}}^{2)}$	$r_{\text{grenz}}^{3)}$	
-	µm				-
1	2	3	4	5	6
ZM-REF	13,6	0,022	~ 0,04	0,08	12,0
ZM-M	12,8	0,034	~ 0,056	0,08 / 1,0	10,0
ZM-W	15,4	0,033	~ 0,05	0,09	12,0
ZM-L	16,6	0,039	~ 0,08	0,7	12,7
ZM-F	16,0	0,035	~ 0,04	0,08	13,4
ZM-T	21,8	0,072	~ 0,04 / 0,25 - 25	~ 75 <sup>4)</sup>	12,9

- 1) Radius, bei dem 50 % der insgesamt eingedrungenen Hg-Menge eingedrungen sind)
- 2) Radienbereich(e), in denen die inkrementelle Intrusionskurven signifikante Maxima zeigt
- 3) Grenzradius, bei dem auf ein verbundenes Porensystem geschlossen werden kann
- 4) kontinuierliche Hg-Aufnahme im Grobporenbereich, daher Festlegung des „Grenzradius“ kritisch

**Tabelle A14: Luftporenkennwerte ausgewählter Betonmischungen**

Beton	Luftporenkennwerte		
	Porosität Vol.-%	$L_{300}^{1)}$	AF <sup>2)</sup>
-	-		
1	2	3	4
Anforderung	-	≥ 1,80	≤ 0,20
ZB-REF	3,62	1,84	0,09
ZB-M	5,08	1,51	0,21
ZB-W	6,56	2,67	0,13
ZB-F	9,37	2,40	0,16
ZB-T	nicht bestimmbar		

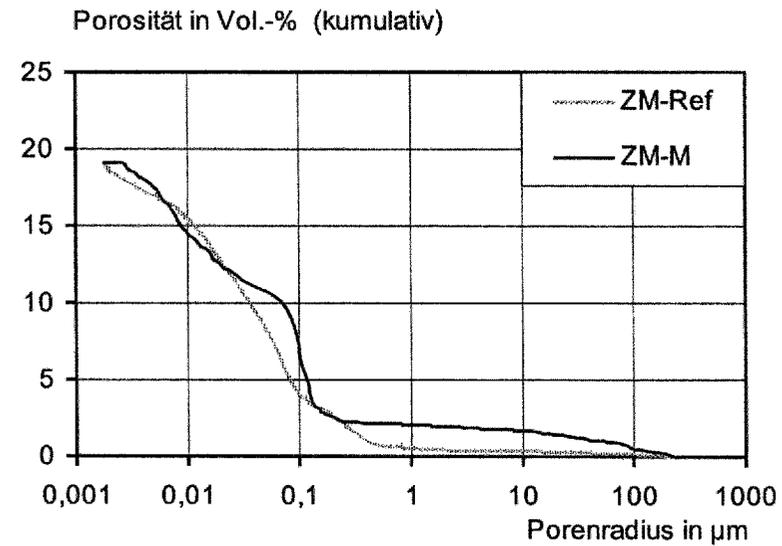
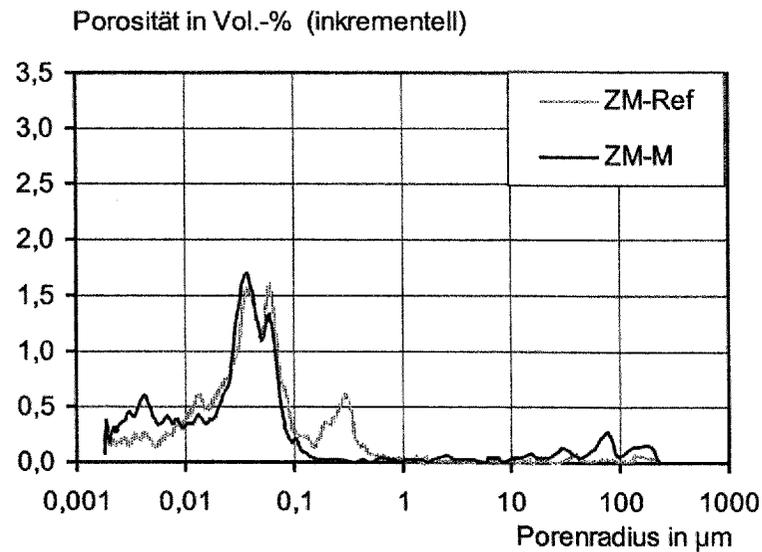
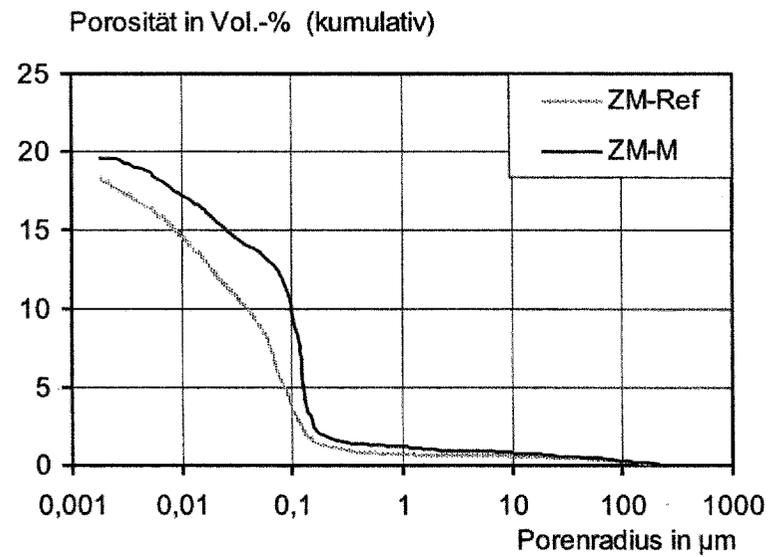
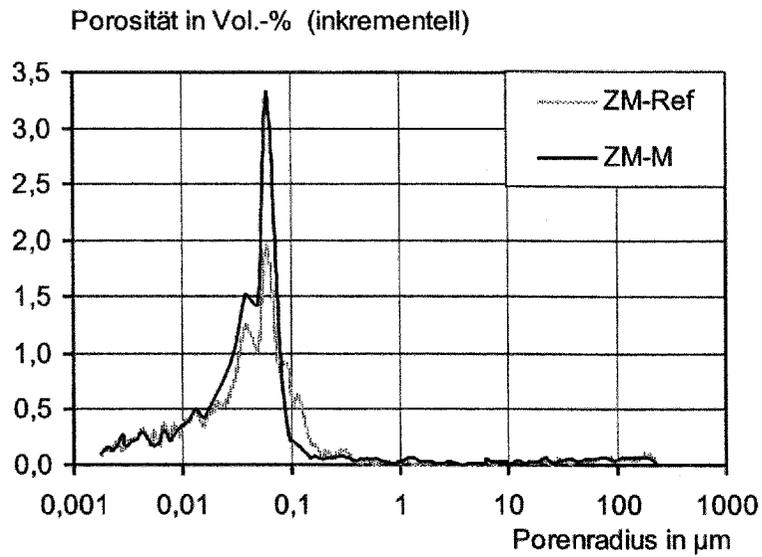
- 1) Mikroluftporengehalt < 300 µm
- 2) Abstandsfaktor

**Tabelle A15:** Frostabwitterungen der Betone im Würfelprüfverfahren

Stabilisierer	aufsummierte Abwitterung nach				
	10	25	50	75	100
Frost-Tauwechselln					
M.-%					
1	2	3	4	5	6
ZM-REF	0,04	0,12	0,84	3,04	8,40
ZM-M	0,07	0,38	1,21	3,42	6,82
ZM-65	0,05	0,34	1,60	3,76	8,06
ZM-L	0,05	0,29	1,07	2,01	n.b.
ZM-F	0,07	0,41	0,78	1,22	1,75
ZM-T	0,04	0,17	0,52	1,11	1,74

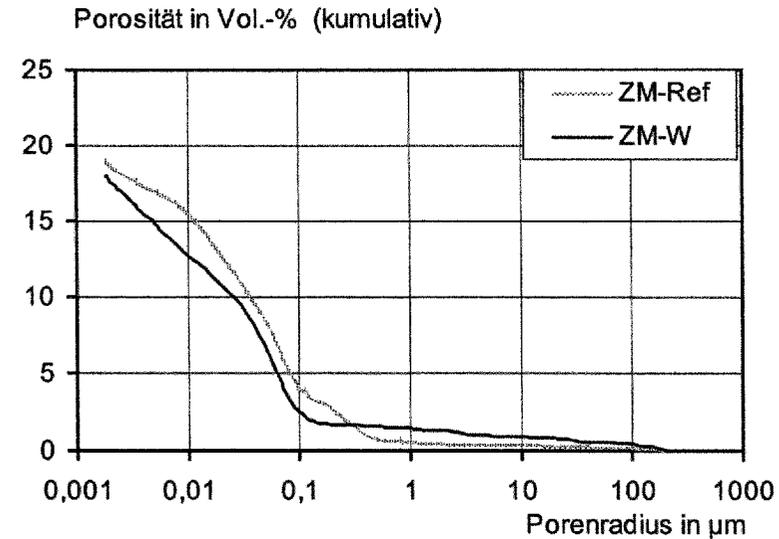
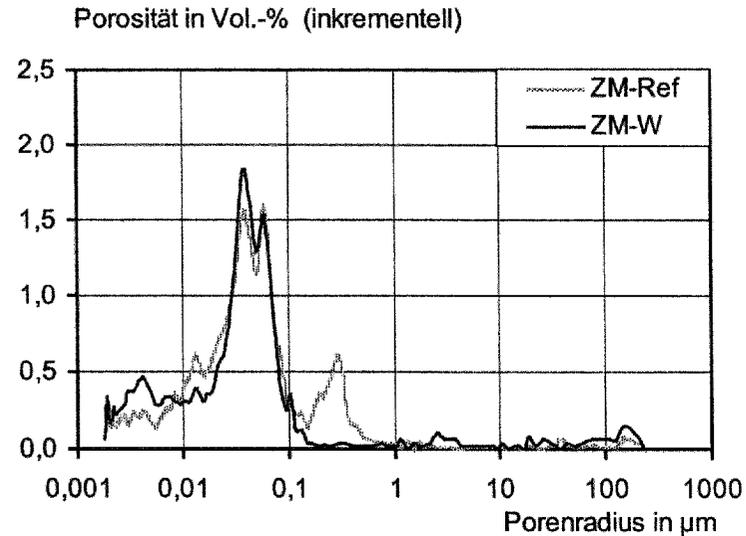
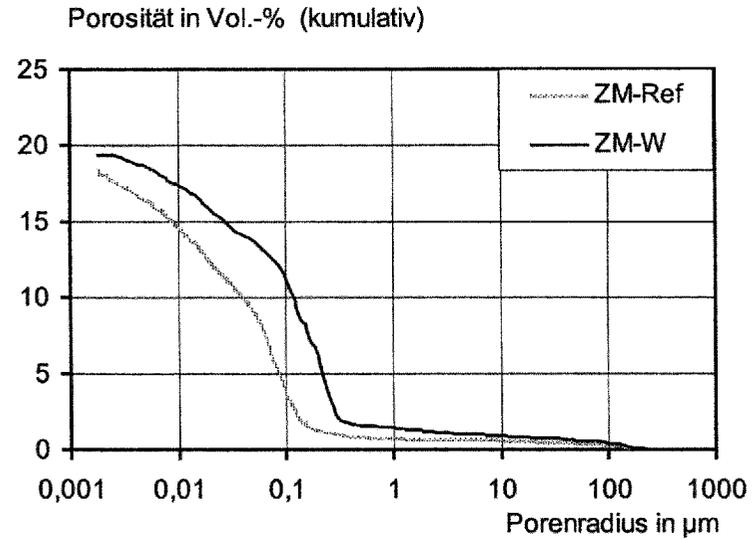
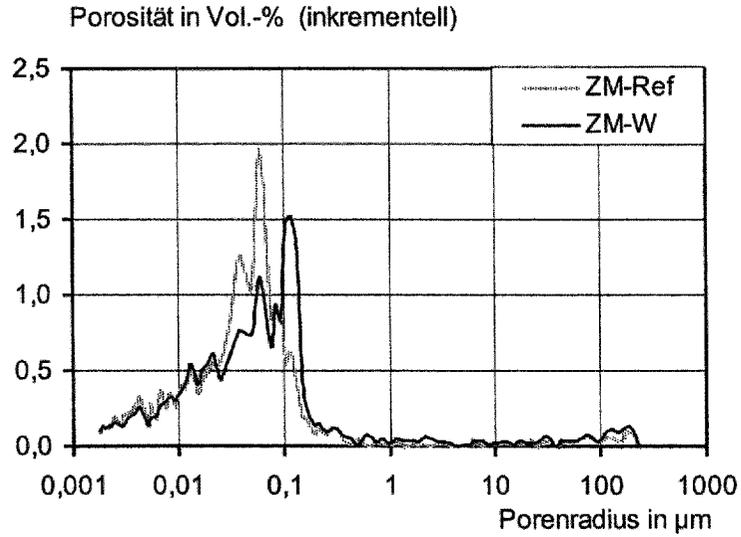
**Tabelle A16:** Dauerhaftigkeitskennwerte der Betone

Mischung	Karbonatisierungstiefe		Cl <sup>-</sup> -Migrationskoeffizient im Alter von	Elektrolytwiderstand	
	28	90		28	90
mm					
-					
d					
-					
Ω·cm					
1	2	3	4	5	6
ZB-REF	1,8	3,6	$1,69 \cdot 10^{-11}$	6,7	10,1
ZB-M	1,1	2,0	$6,50 \cdot 10^{-12}$	15,7	13,6
ZB-W	2,0	3,2	$1,38 \cdot 10^{-11}$	8,0	9,9
ZB-L	1,2	3,3	n. b.	n. b.	
ZB-F	1,7	3,0	$1,87 \cdot 10^{-11}$	8,5	11,2
ZB-T	2,3	3,6	$1,84 \cdot 10^{-11}$	8,8	13,1



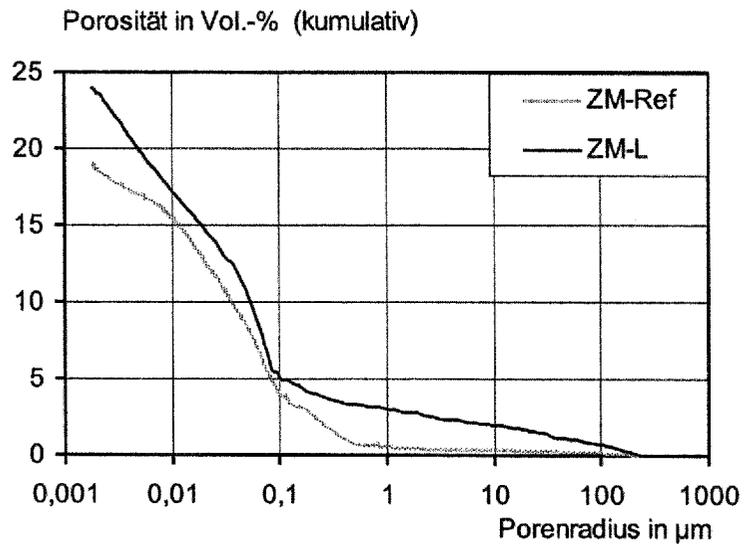
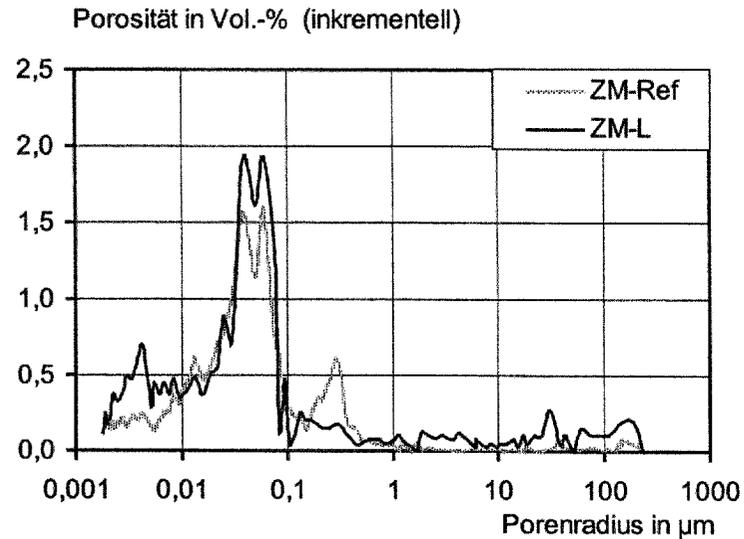
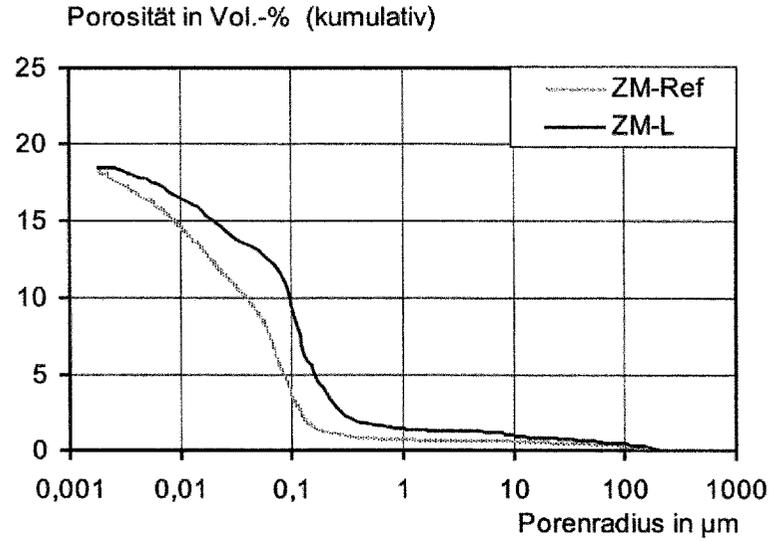
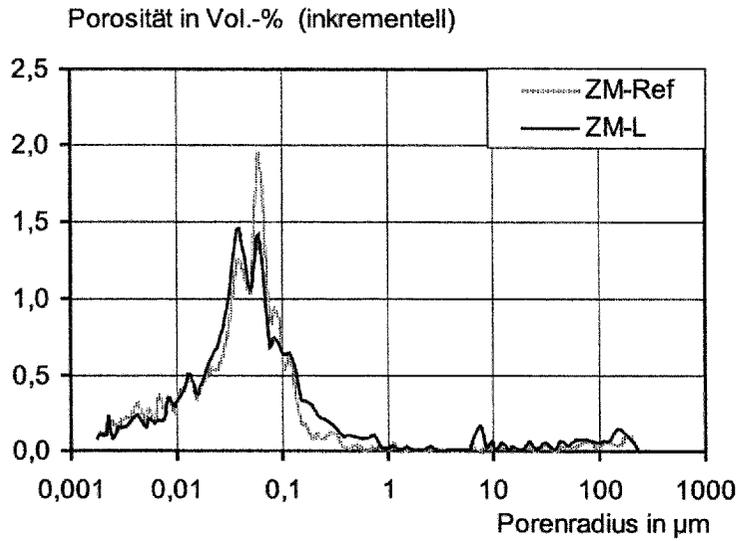
**Bild B1:** Porengrößenverteilung des Mörtels ZM-M im Vergleich zu ZM-Ref (oben 28 d, unten 180 d)

**Bild B2:** Kumulative Porengrößenverteilung des Mörtels ZM-M im Vergleich zu ZM-Ref (oben 28 d, unten 180 d)



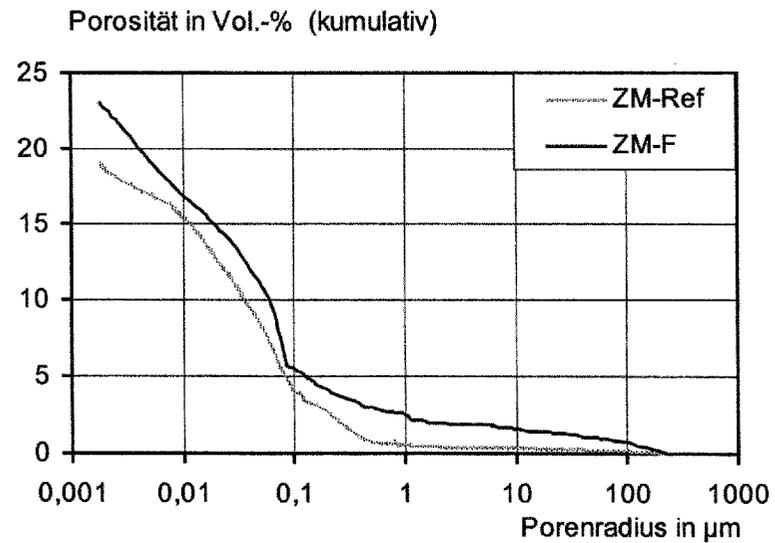
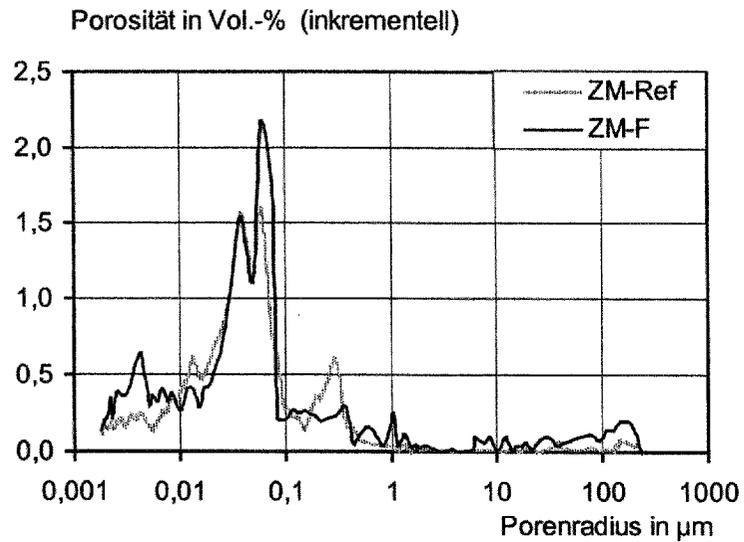
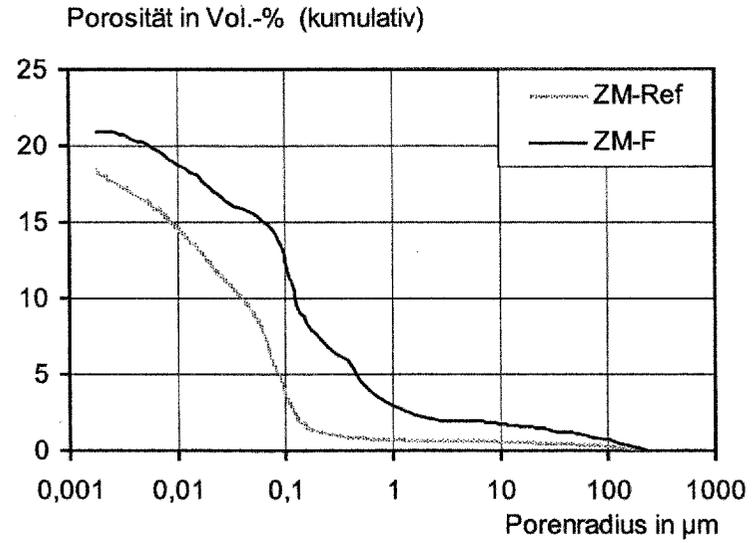
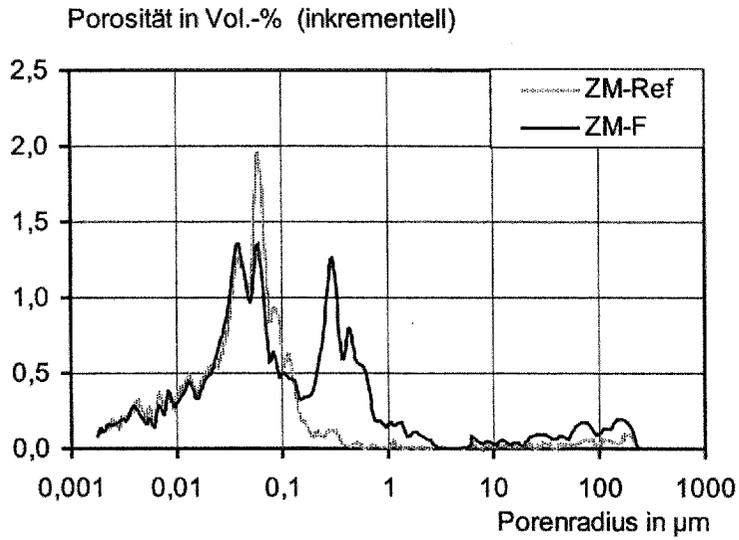
**Bild B3:** Porengrößenverteilung des Mörtels ZM-W im Vergleich zu ZM-Ref (oben 28 d, unten 180 d)

**Bild B4:** Kumulative Porengrößenverteilung des Mörtels ZM-W im Vergleich zu ZM-Ref (oben 28 d, unten 180 d)



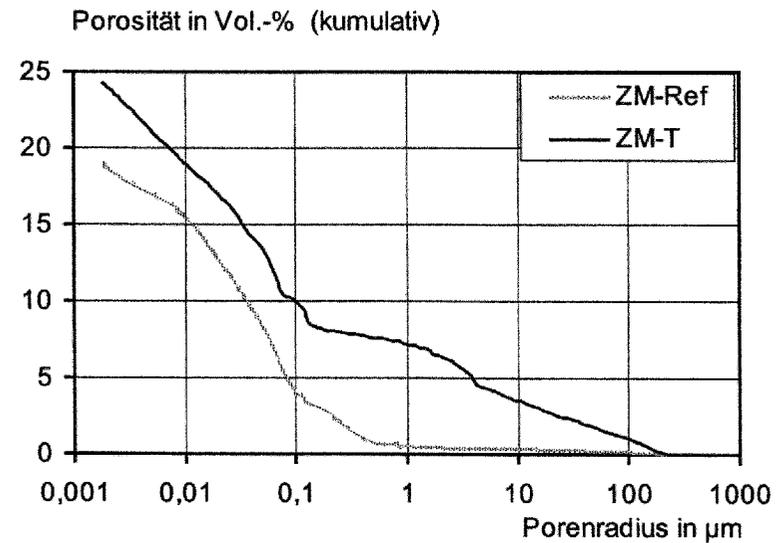
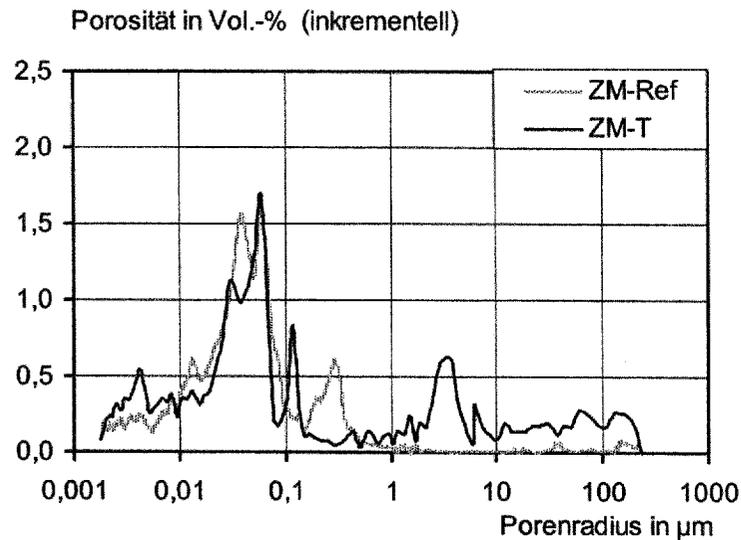
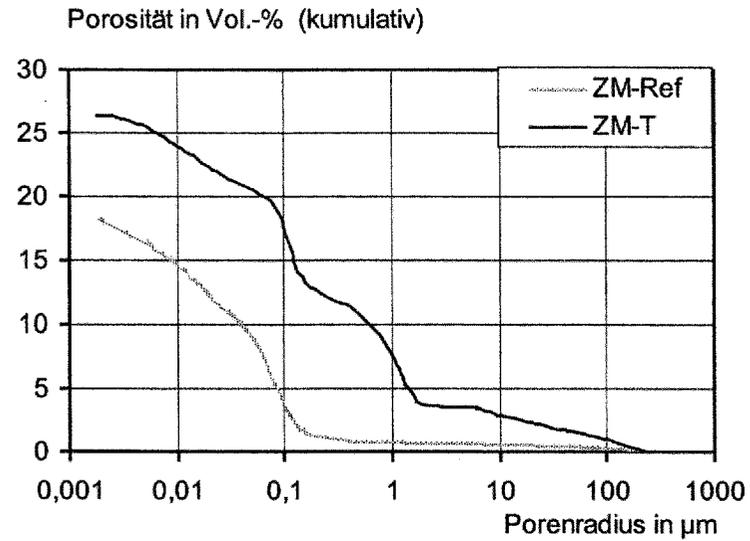
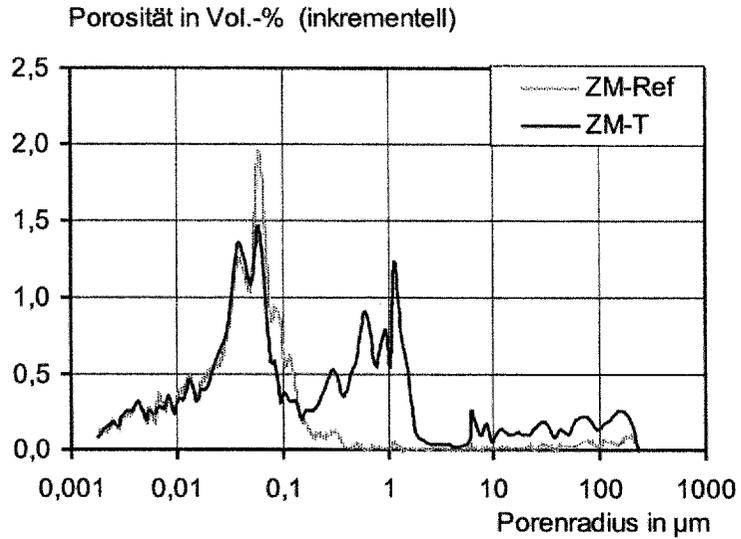
**Bild B5:** Porengrößenverteilung des Mörtels ZM-L im Vergleich zu ZM-Ref (oben 28 d, unten 180 d)

**Bild B6:** Kumulative Porengrößenverteilung des Mörtels ZM-L im Vergleich zu ZM-Ref (oben 28 d, unten 180 d)



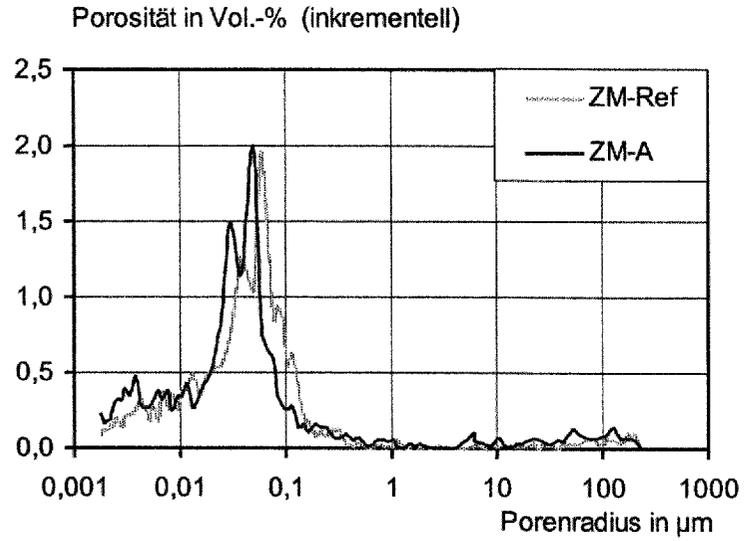
**Bild B7:** Porengrößenverteilung des Mörtels ZM-F im Vergleich zu ZM-Ref (oben 28 d, unten 180 d)

**Bild B8:** Porengrößenverteilung des Mörtels ZM-F im Vergleich zu ZM-Ref (oben 28 d, unten 180 d)

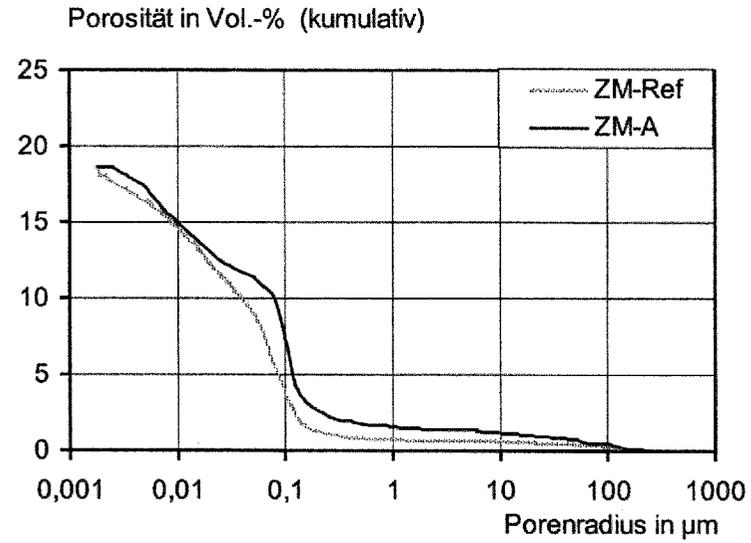


**Bild B9:** Porengrößenverteilung des Mörtels ZM-T im Vergleich zu ZM-Ref (oben 28 d, unten 180 d)

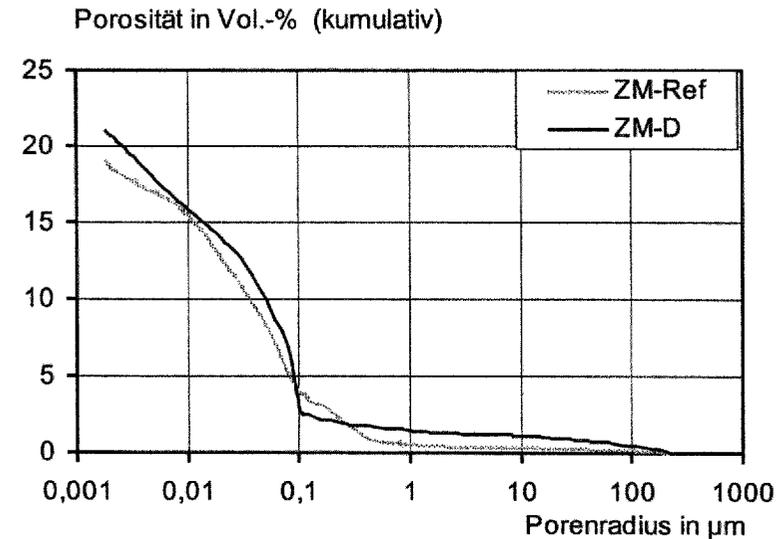
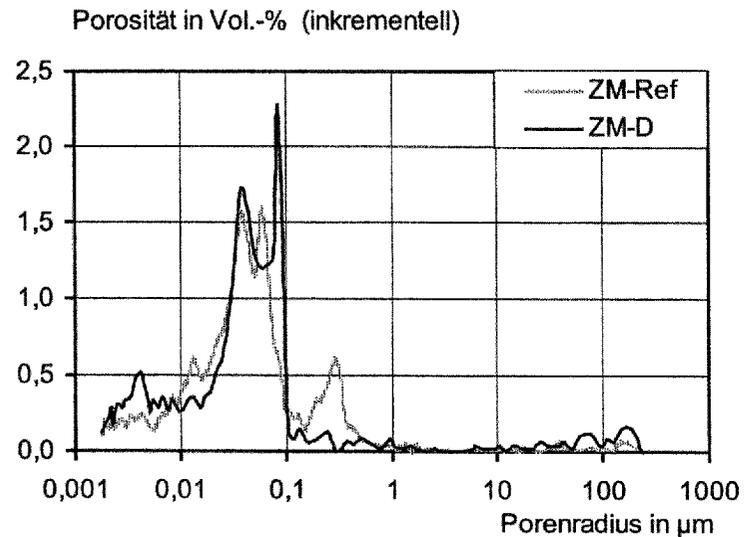
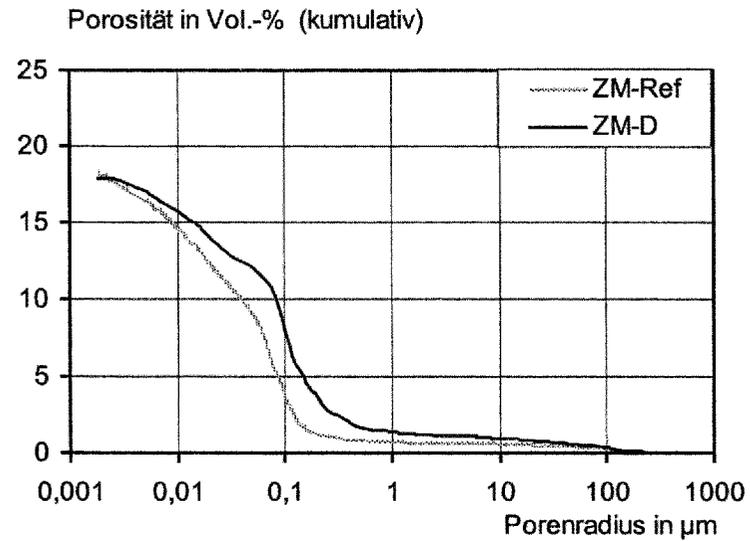
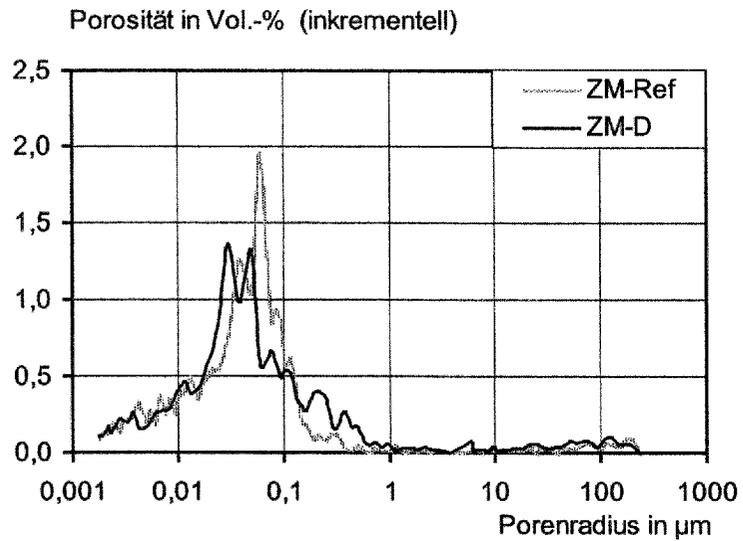
**Bild B10:** Porengrößenverteilung des Mörtels ZM-T im Vergleich zu ZM-Ref (oben 28 d, unten 180 d)



**Bild B11:** Porengrößenverteilung des Mörtels ZM-A im Vergleich zu ZM-Ref (28 d)

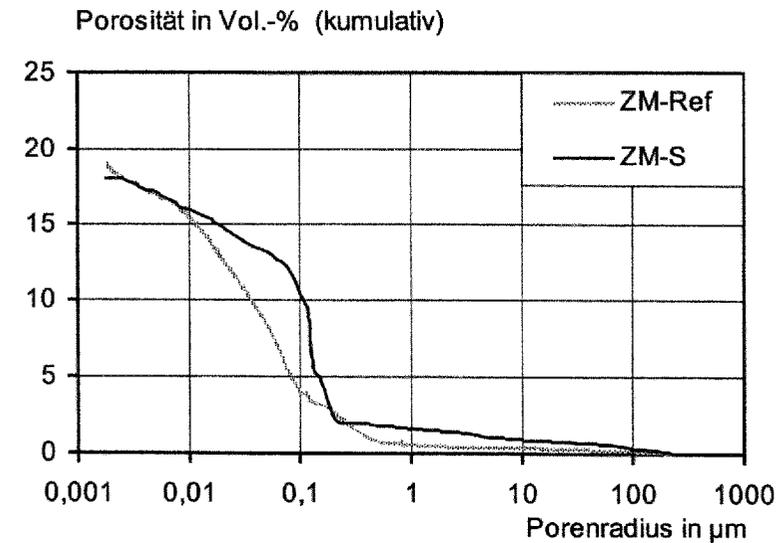
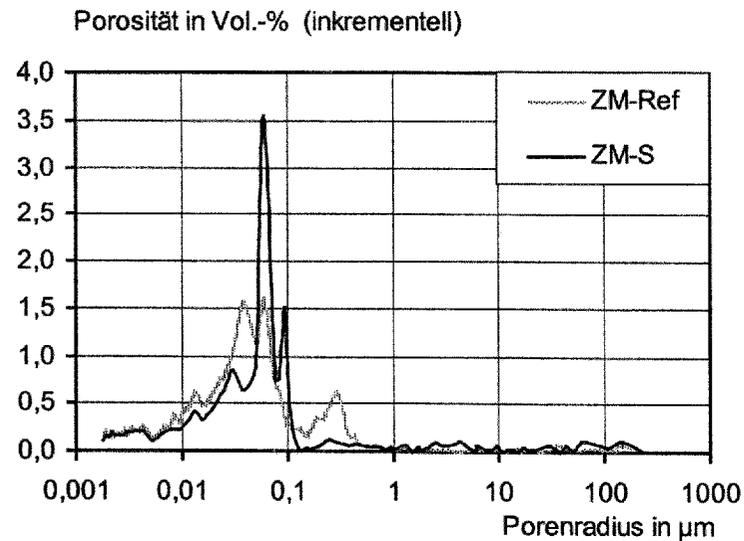
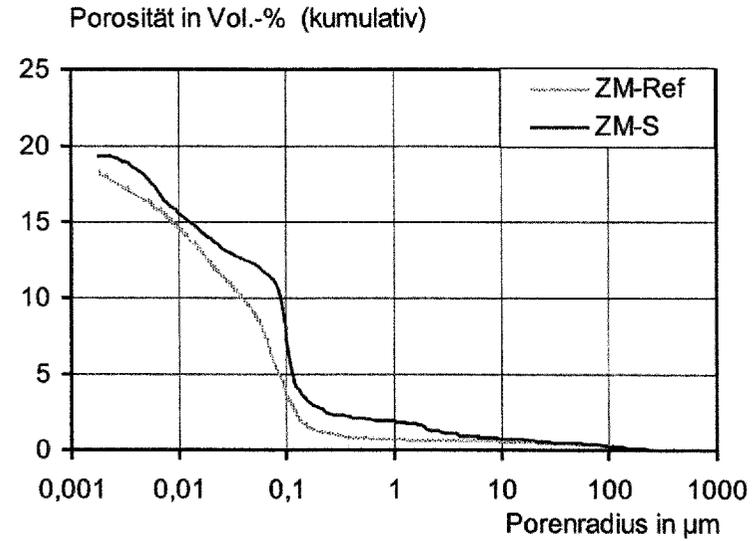
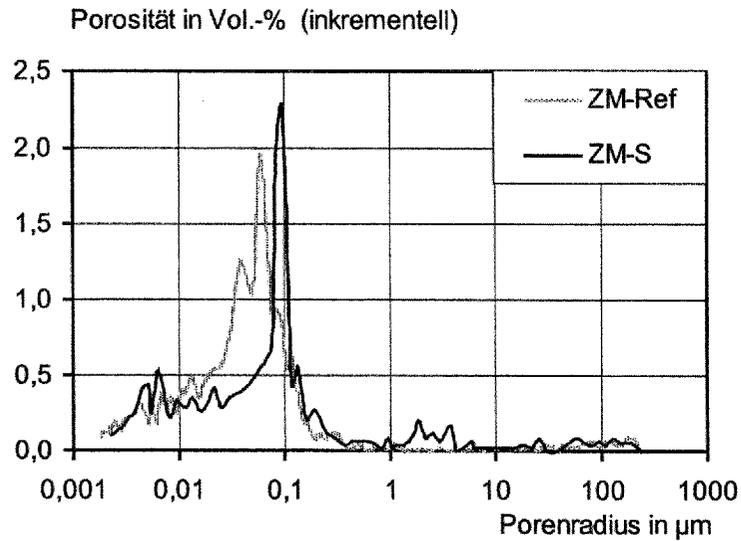


**Bild B12:** Porengrößenverteilung des Mörtels ZM-A im Vergleich zu ZM-Ref (28 d)



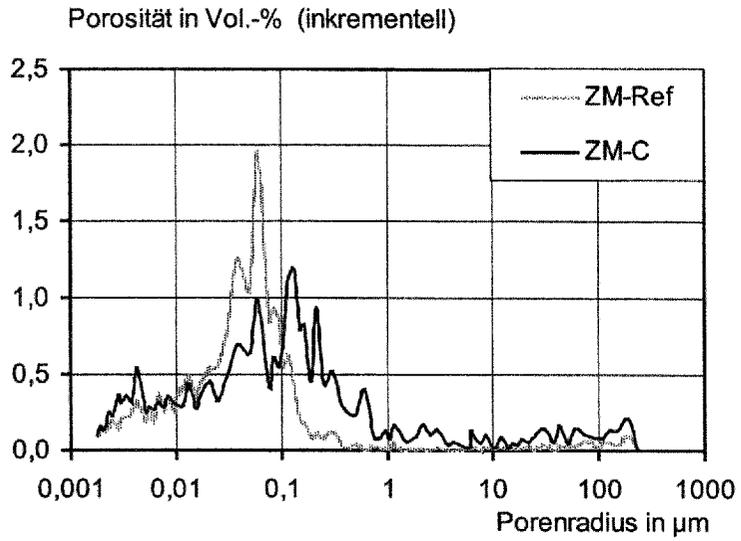
**Bild B13:** Porengrößenverteilung des Mörtels ZM-D im Vergleich zu ZM-Ref (oben 28 d, unten 180 d)

**Bild B14:** Porengrößenverteilung des Mörtels ZM-D im Vergleich zu ZM-Ref (oben 28 d, unten 180 d)

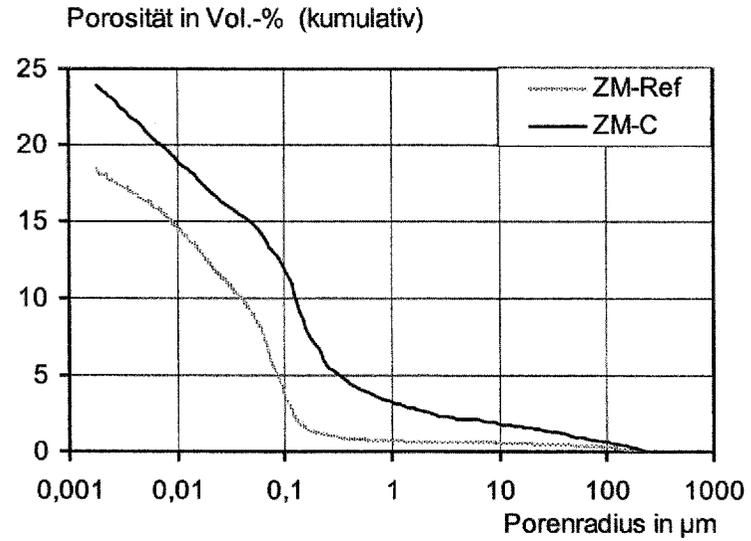


**Bild B15:** Porengrößenverteilung des Mörtels ZM-S im Vergleich zu ZM-Ref (oben 28 d, unten 180 d)

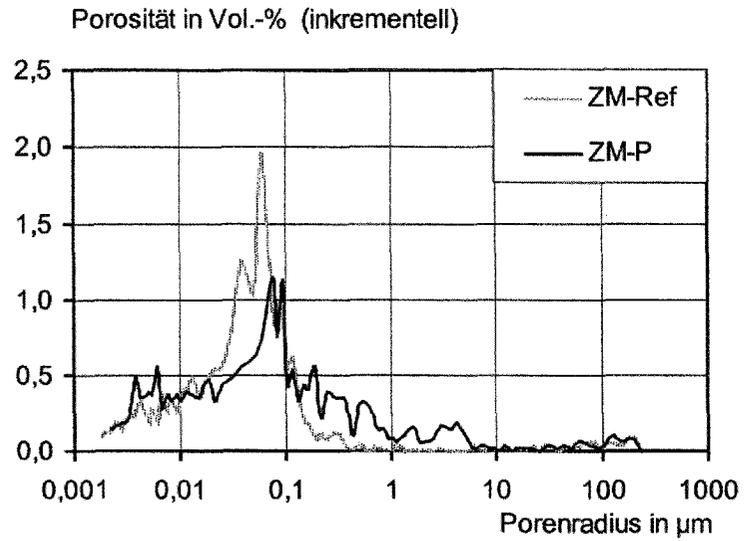
**Bild B16:** Porengrößenverteilung des Mörtels ZM-S im Vergleich zu ZM-Ref (oben 28 d, unten 180 d)



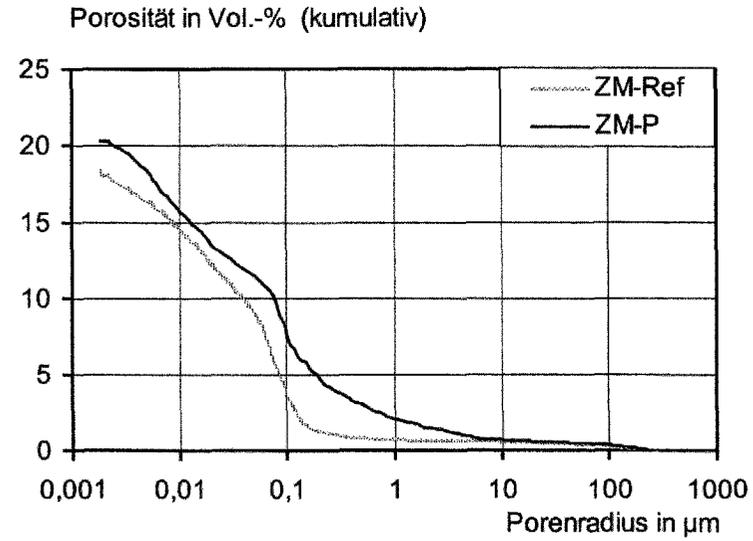
**Bild B17:** Porengrößenverteilung des Mörtels ZM-C im Vergleich zu ZM-Ref (oben 28 d, unten 180 d)



**Bild B18:** Porengrößenverteilung des Mörtels ZM-C im Vergleich zu ZM-Ref (oben 28 d, unten 180 d)



**Bild B19:** Porengrößenverteilung des Mörtels ZM-P im Vergleich zu ZM-Ref (oben 28 d, unten 180 d)



**Bild B20:** Porengrößenverteilung des Mörtels ZM-P im Vergleich zu ZM-Ref (oben 28 d, unten 180 d)

# Bauforschung für die Praxis

- Brandschutzkosten im Wohnungsbau**  
Karl Deters  
Band 59, 2001, 245 S., Abb., Tab., kart.,  
ISBN 3-8167-4258-0  
€ 50,- | sFr 86,-
- Gemeinschaftliches Wohnen im Alter**  
R. Weeber, G. Wölfle, V. Rösner  
Band 58, 2001, 175 S., Abb., Tab., kart.,  
ISBN 3-8167-4257-2  
€ 46,- | sFr 79,-
- Entwicklung eines Bewertungssystems für ökonomisches und ökologisches Bauen und gesundes Wohnen**  
C.J. Diederichs, P. Getto, S. Streck  
Band 57, 2002, 230 S., mit CD-ROM, Abb., Tab., kart., ISBN 3-8167-4256-4  
€ 50,- | sFr 86,-
- Vergabeverfahren und Baukosten**  
Hannes Weeber, Simone Bosch  
Band 56, 2001, 192 S., Abb., Tab., kart.,  
ISBN 3-8167-4255-6  
€ 50,- | sFr 86,-
- Konzepte für die praxisorientierte Instandhaltungsplanung im Wohnungsbau**  
Ralf Spilker, Rainer Oswald  
Band 55, 2000, 71 S., 5 Abb., zahlr. Tab., kart., ISBN 3-8167-4254-8  
€ 22,- | sFr 39,50
- Bewährung innen wärmedämmter Fachwerkbauten**  
Problemstellung und daraus abgeleitete Konstruktionsempfehlungen  
Reinhard Lamers, Daniel Rosenzweig, Ruth Abel  
Band 54, 2000, 173 S., 123 Abb., kart.,  
ISBN 3-8167-4253-X  
€ 25,- | sFr 44,-
- Überprüfbarkeit und Nachbesserbarkeit von Bauteilen - untersucht am Beispiel der genutzten Flachdächer**  
Rainer Oswald, Ralf Spilker, Klaus Wilmes  
Band 53, 1999, 133 S., 49 Abb., 4 Tab., kart.,  
ISBN 3-8167-4252-1  
€ 37,- | sFr 63,-
- Bauschadensfibel für den privaten Bauherrn und Hauskäufer**  
Rainer Oswald, Ruth Abel, Volker Schnapauff  
Band 52, 1999, 140 S., 19 Abb., 3 Tab., fester Einband, ISBN 3-8167-4251-3  
€ 25,- | sFr 44,-
- Balkone, kostengünstig und funktionsgerecht**  
Hannes Weeber, Margit Lindner  
Band 51, 1999, 146 S., 102 Abb., 26 Tab., kart., ISBN 3-8167-4250-5  
€ 38,- | sFr 65,-
- Kostenfaktor Erschließungsanlagen**  
Hannes Weeber, Michael Rees  
Band 50, 1999, 226 S., 107 Abb., 15 Tab., kart., ISBN 3-8167-4249-1  
€ 50,- | sFr 86,-
- Eigenleistung beim Bauen**  
Wie Eigentümer und Mieter sich am Bau ihrer Wohnung beteiligen können  
R. Weeber, H. Weeber, S. Kleebaur, H. Gerth, W. Pohrt  
Band 49, 1999, 154 S., 25 Abb., 12 Tab.,  
ISBN 3-8167-4248-3  
€ 22,- | sFr 39,50
- Kosteneinsparung durch Bauzeitverkürzung**  
Barbara Bredenbals, Heinz Hullmann  
Band 48, 1999, 174 S., 38 Abb., 36 Tab.,  
ISBN 3-8167-4247-5  
€ 37,- | sFr 64,-
- Das wärme- und feuchteschutztechnische Verhalten von stählernen Fassadendurchdringungen**  
Lutz Franke, Gernod Deckelmann  
Band 47, 1998, 74 S., 38 Abb., 13 Tab., kart.,  
ISBN 3-8167-4246-7  
€ 15,- | sFr 26,-
- Kostengünstige bauliche Maßnahmen zur Reduzierung des Energieverbrauchs im Wohnungsbestand**  
R. Oswald, R. Lamers, V. Schnapauff, R. Spilker, K. Wilmes  
Band 46, 1998, 100 S., 57 Abb., kart.,  
ISBN 3-8167-4245-9  
€ 17,- | sFr 30,50
- Sicherung des baulichen Holzschutzes**  
Horst Schulze  
Band 45, 1998, 168 S., 136 Abb., 10 Tab., kart., ISBN 3-8167-4244-0  
€ 22,- | sFr 39,50
- Luftdichtigkeit von industriell errichteten Wohngebäuden in den neuen Bundesländern**  
Wolfgang Richter, Dirk Reichel  
Band 44, 1998, 88 S., 34 Abb., 15 Tab., kart.,  
ISBN 3-8167-4243-2  
€ 15,- | sFr 26,-
- Leitfaden Kostendämpfung im Geschoßwohnungsbau**  
Karl Deters, Joachim Arlt  
Band 43, 1998, 162 S., 135 Abb., 34 Tab., kart., ISBN 3-8167-4242-4  
€ 22,- | sFr 39,50
- Langzeitbewährung und Entwicklungstendenzen von Kunststoff-Bauprodukten im Wohnungsbau**  
Dieter Arlt, Rainer Weltring  
Band 42, 1998, 137 S., 90 Abb., 7 Graph., kart., ISBN 3-8167-4241-6  
€ 20,- | sFr 35,-
- Ausschreibungshilfen für recyclinggerechte Wohnbauten**  
Barbara Bredenbals, Wolfgang Willkomm  
Band 41, 1998, 172 S., 28 Abb., kart.,  
ISBN 3-8167-4240-8  
€ 22,- | sFr 39,50
- Gebrauchsanweisung für Häuser**  
Volker Schnapauff, Silke Richter-Engel  
Band 40, 1997, 116 S., 4 Abb., 7 Tab., kart.,  
ISBN 3-8167-4239-4  
€ 19,- | sFr 34,-
- Ergänzender Neubau in bestehenden Wohnsiedlungen**  
H. Weeber, R. Weeber, M. Lindner, u. a.  
Band 39, 1997, 194 S., 230 Abb., kart.,  
ISBN 3-8167-4238-6  
€ 25,- | sFr 44,-
- Lüftung in industriell errichteten Wohnhäusern**  
Wilfried Jank  
Band 37, 1997, 66 S., 17 Abb., 12 Tab., 13 Tafeln, kart., ISBN 3-8167-4236-X  
€ 15,- | sFr 26,-
- Auswirkungen der neuen Wärmeschutzverordnung auf den Schallschutz von Gebäuden**  
Siegfried Koch, Werner Scholl  
Band 36, 1997, 72 S., 33 Abb., 2 Tab., kart.,  
ISBN 3-8167-4235-1  
€ 15,- | sFr 26,-
- Baukostensenkung durch gesicherte Schadensbeurteilung an haufwerksporigen Leichtbetonelementen der industriell errichteten Wohnbauten der ehemaligen DDR**  
Mirko Neumann, Mathias Reuschel  
Band 35, 1997, 320 S., 227 Abb., 105 Tab., kart., ISBN 3-8167-4234-3  
€ 41,- | sFr 70,-
- Verhinderung von Emissionen aus Baustoffen durch Beschichtungen**  
Lutz Franke, Martin Wessellmann  
Band 34, 1997, 68 S., 11 Abb., 9 Tab., kart.,  
ISBN 3-8167-4233-5  
€ 15,- | sFr 26,-
- Wärmedämmverbundsysteme (WDVS) im Wohnungsbau**  
Institut für Bauforschung e.V., Hannover  
Band 32, 1997, 250 S., 128 Abb., 20 Tab., kart., ISBN 3-8167-4231-9  
€ 30,- | sFr 51,50

## BESTELLSCHEIN

☒ **Titel ankreuzen und im Umschlag oder per Fax (07 11) 970 - 25 08 oder -25 07 senden an:**

### Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum  
Raum und Bau IRB

☒ **Postfach 80 04 69, D-70504 Stuttgart**  
☒ **Telefon (07 11) 970 - 25 00**  
☒ **E-Mail: info@irb.fhg.de**  
☒ **URL: http://www.IRBbuch.de**

☒ **Absender** .....

☒ .....

☒ .....

☒ **Straße/PF** .....

☒ **PLZ/Ort** .....

☒ **Datum** .....

☒ **Unterschrift** .....

- Niedrigenergiehäuser unter Verwendung des Dämmstoffes Styropor**  
Teil 1, Konstruktionsempfehlungen und optimierte Anschlusssituationen (Details)  
W.-H. Pohl, S. Horschler, R. Pohl  
Teil 2, Quantitative Darstellung der Wirkung von Wärmebrücken  
Gerd Hauser, Horst Stiegel  
Band 31, 1997, 294 S., 169 Abb., kart., ISBN 3-8167-4230-0  
€ 14,- | sFr 25,-
- Fenster - Sanierung und Modernisierung**  
Hans-Rudolf Neumann  
Band 30, 1997, 134 S., 90 Abb., 11 Tab., kart., ISBN 3-8167-4229-7  
€ 20,- | sFr 35,-
- Schäden an nicht industriell hergestellten Wohnbauten der neuen Bundesländer**  
R. Oswald, R. Spilker, V. Schnapauff, u. a.  
Band 29, 1996, 116 S., 66 Abb., 30 Tab., kart., ISBN 3-8167-4228-9  
€ 17,- | sFr 30,50
- Parkierungsanlagen im verdichteten Wohnungsbau**  
Hannes Weeber, Rotraut Weeber  
Band 28, 1997, 156 S., 60 Abb., 28 Tab., kart., ISBN 3-8167-4227-0  
€ 22,- | sFr 39,50
- Möglichkeiten der Einsparung von Wohnkosten durch Mieterbeteiligung**  
M. Efff, K. Goldt, B. Harms, u. a.  
Band 27, 1997, 157 S., 3 Abb., 8 Tab., kart., ISBN 3-8167-4226-2  
€ 22,- | sFr 39,50
- Die Berechnung von Flachdecken über Zustands- und Einflußflächen**  
Max Baerschneider  
Band 26, 1996, 380 S., 196 Tab., kart., zweibändig, ISBN 3-8167-4225-4  
€ 49,- | sFr 83,50
- Feuchttransportvorgänge in Stein und Mauerwerk - Messung und Berechnung**  
M. Krus, H.-M. Künzel, K. Kießl  
Band 25, 1996, 75 S., 31 Abb., 2 Tab., kart., ISBN 3-8167-4224-6  
€ 15,- | sFr 26,-
- Wohngebäudesanierung und Privatisierung**  
Hannes Weeber, Michael Rees  
Band 24, 1996, 107 S., 51 Abb., 17 Tab., kart., ISBN 3-8167-4223-8  
€ 20,- | sFr 35,-
- Der Feuchtehaushalt von Holz-Fachwerkwänden**  
Helmut Künzel  
Band 23, 1996, 85 S., 32 Abb., 10 Tab., kart., ISBN 3-8167-4222-X  
€ 15,- | sFr 26,-
- Neue Konstruktionsalternativen für recyclingfähige Wohngebäude**  
Barbara Bredenbals, Wolfgang Willkomm  
Band 22, 1996, 110 S., 26 Abb., 3 Tab., kart., ISBN 3-8167-4221-1  
€ 17,- | sFr 30,50
- Standsicherheit der Wohnbauten in Fertigteilbauweise in den neuen Bundesländern**  
E. Cziebiński, N. Fouad, F.-U. Vogdt  
Band 21, 1996, 226 S., 71 Abb., kart., ISBN 3-8167-4220-3  
€ 30,- | sFr 51,50
- Sicherheit von Glasfassaden**  
X. Shen, H. Techen, J. D. Wörner  
Band 20, 1996, 38 S., 26 Abb., 4 Tab., kart., ISBN 3-8167-4219-X  
€ 12,- | sFr 21,50
- Kostengünstige Umnutzung aufgegebener militärischer Einrichtungen für Wohnzwecke, Wohnergängungseinrichtungen und andere Nutzungen**  
B. Jacobs, J. Kirchhoff, J. Mezler  
Band 19, 1996, 204 S., zahlreiche Abb., kart., ISBN 3-8167-4218-1  
€ 28,- | sFr 47,50
- Holztafelbauweise im mehrgeschossigen Wohnungsbau**  
Barbara Bredenbals, Heinz Hullmann  
Band 18, 1996, 237 S., 116 Abb., 23 Tab., kart., ISBN 3-8167-4217-3  
€ 30,- | sFr 51,50
- Gefährdungspotentiale asbesthaltiger Massenbaustoffe in den neuen Bundesländern**  
Klaus Bergner, unter Mitarbeit von Franka Stodollik und Hans-Otto Eckler  
Band 17, 1996, 75 S., 26 Abb., 9 Tab., kart., ISBN 3-8167-4216-5  
€ 15,- | sFr 26,-
- Transparent gedämmte Altbauten**  
G. H. Bondzio, K. Brandstetter, P. Sulzer, S. Al Bosta, u. a.  
Band 15, 1996, 130 S., 44 Abb., 7 Tab., kart., ISBN 3-8167-4214-9  
€ 22,- | sFr 39,50
- Kosten und Techniken für das "Überwintern" erhaltenswerter Bausubstanz**  
Michael Rees, Hannes Weeber  
Band 14, 1995, 190 S., zahlreiche Abb., kart., ISBN 3-8167-4213-0  
€ 25,- | sFr 44,-
- Menschengerechte Raumklimatisierung durch Quelllüftung und Flächenkühlung**  
Erhard Mayer (Hrsg.)  
Band 13, 1995, 190 S., zahlreiche Abb., kart., ISBN 3-8167-4212-2  
€ 25,- | sFr 44,-
- Zusätzliche Wärmedämmsysteme bei Fertigteilbauten**  
Typenserie P2  
P. Bauer, B. Loeser, H. Schwarzgig, T. Spengler  
Band 12, 1995, 118 S., zahlreiche Abb., kart., ISBN 3-8167-4211-4  
€ 20,- | sFr 35,-
- Körperschalldämmung von Sanitärräumen**  
Karl Gösele, Volker Engel  
Band 11, 1995, 76 S., zahlreiche Abb., kart., ISBN 3-8167-4210-6  
€ 15,- | sFr 26,-
- Bauschäden an Holzbalkendecken in Feuchtraumbereichen**  
Gertraud Hofmeister  
Band 9, 1995, 210 S., zahlreiche Abb., kart., ISBN 3-8167-4208-4  
€ 25,- | sFr 44,-
- Ökologische Auswirkungen von Hochhäusern**  
Band 8, 1995, 418 S., 114 Abb., kart., ISBN 3-8167-4207-6  
€ 50,- | sFr 86,-
- Wohnhochhäuser heute**  
H. Weeber, R. Weeber, M. Hasenmaier, u. a.  
Band 7, 1995, 165 S., zahlreiche Abb., kart., ISBN 3-8167-4206-8  
€ 25,- | sFr 44,-
- Abfallvermeidung in der Bauproduktion**  
Barbara Bredenbals, Wolfgang Willkomm  
Band 6, 1994, 198 S., 75 Abb., 16 Tab., kart., ISBN 3-8167-4205-X  
€ 25,- | sFr 44,-
- Barrierefreie Erschließungssysteme von Wohngebäuden**  
R. Weeber, M. Rees, H. Weeber  
Band 5, 1994, 64 S., 52 Abb., 6 Tab., kart., ISBN 3-8167-4204-1  
€ 12,- | sFr 21,50
- Die Ausführung des Umkehrdaches bei erhöhten Anforderungen an den Wärmeschutz**  
Lutz Franke, Gernod Deckelmann  
Band 4, 1994, 80 S., zahlreiche Abb. und Tab., kart., ISBN 3-8167-4203-3  
€ 20,- | sFr 35,-
- Niveaugleiche Türschwellen bei Feuchträumen und Dachterrassen**  
R. Oswald, A. Klein, K. Wilmes  
Band 3, 1994, 56 S., 48 Abb., kart., ISBN 3-8167-4202-5  
€ 12,- | sFr 21,50
- Wohnbauten in Fertigteilbauweise in den neuen Bundesländern**  
R. Oswald, V. Schnapauff, R. Lamers, u. a.  
Band 2, 1995, 333 S., 515 Abb., kart., ISBN 3-8167-4201-7  
€ 40,- | sFr 69,50
- Heizung und Lüftung im Niedrigenergiehaus**  
Gerhard Hausladen, Peter Springl  
Band 1, 1994, 214 S., 74 Abb., 17 Tab., kart., ISBN 3-8167-4200-9  
€ 25,- | sFr 44,-
- Informieren Sie mich bitte laufend über neue **Fachbücher**

## BESTELLSCHEIN

Titel ankreuzen und im Umschlag oder per Fax (07 11) 970 - 2508 oder -2507 senden an:

**Fraunhofer IRB Verlag**

Fraunhofer-Informationszentrum  
Raum und Bau IRB

Postfach 80 04 69, D-70504 Stuttgart

Telefon (07 11) 970 - 2500

E-Mail: [info@irb.fhg.de](mailto:info@irb.fhg.de)

URL: <http://www.IRBbuch.de>

Absender .....

.....

.....

.....

Straße/PF .....

.....

PLZ/Ort .....

.....

Datum .....

.....

Unterschrift .....

# Schadenfreies Bauen

Herausgegeben von Professor Günter Zimmermann

- Schadenfreies Bauen**  
**Gesamtausgabe Bände 1 – 26**  
 2002, alle Bände mit festem Einband  
 ISBN 3-8167-5796-0  
 € 1037,- | sFr 1744,-  
 Bei Abnahme der Gesamtausgabe  
 sparen Sie € 115,-
- Schäden an polymeren Beschichtungen**  
 Robert Engelfried  
 Band 26: 2001, 146 S., 94 Abb., 14 Tab.,  
 ISBN 3-8167-5795-2  
 € 40,- | sFr 68,50
- Schäden an Belägen und Bekleidungen mit Keramik- und Werksteinplatten**  
 Günter Zimmermann  
 Band 25: 2001, 200 S., 175 Abb., 16 Tab.,  
 ISBN 3-8167-5791-X  
 € 48,- | sFr 82,50
- Schäden an Installationsanlagen**  
 Heizungs- und Raumluftechnische Anlagen,  
 Trinkwasser-, Abwasser- und Gasinstallations-  
 anlagen  
 Heinz Wirth, Stefan Wirth  
 Band 24: 2001, 270 S., 114 Abb., 33 Tab.,  
 ISBN 3-8167-5790-1  
 € 57,- | sFr 96,-
- Schäden an Türen und Toren**  
 Ralf Schumacher  
 Band 23: 2001, 372 S., 291 Abb., 32 Tab.,  
 ISBN 3-8167-4169-X  
 € 71,- | sFr 118,-
- Schäden an elastischen und textilen Bodenbelägen**  
 Hans-Joachim Scheewe  
 Band 22: 2001, 232 S., 80 überw. farb. Abb.,  
 50 Tab.,  
 ISBN 3-8167-4168-1  
 € 50,- | sFr 86,-
- Schäden an Glasfassaden und -dächern**  
 Peter Küffner, Oliver Lummertzheim  
 Band 21: 2000, 132 S., 106 z.T. farb. Abb.,  
 6 Tab.,  
 ISBN 3-8167-4165-7  
 € 40,- | sFr 68,50
- Schäden an Wärmedämm-Verbundsystemen**  
 Erich Cziesielski, Frank Ulrich Vogdt  
 Band 20: 2000, 202 S., 75 Konstruktionsskiz-  
 zen, 28 Tab. u. Diagramme, 98 Fotos,  
 ISBN 3-8167-4164-9  
 € 50,- | sFr 86,-
- Schäden an Außenwänden aus Mehrschicht-Betonplatten**  
 Ralf Ruhnau, Nabil Fouad  
 Band 19: 1998, 104 S., 61 Abb., 7 Tab.,  
 ISBN 3-8167-4160-6  
 € 35,- | sFr 60,50
- Schäden an Deckenbekleidungen und abgehängten Decken**  
 Hubert Satzger  
 Band 18: 1998, 78 S., 59 Abb., 5 Tab.,  
 ISBN 3-8167-4159-2  
 € 23,- | sFr 40,50
- Schäden an Dränanlagen**  
 Wilfried Muth  
 Band 17: 1997, 114 S., 128 Abb., 10 Tab.,  
 ISBN 3-8167-4154-1  
 € 35,- | sFr 60,50
- Tauwasserschäden**  
 Richard Jenisch  
 Band 16: 2. überarb. Aufl., 2001, 129 S.,  
 66 Abb., 6 Tab., ISBN 3-8167-5792-8  
 € 37,- | sFr 62,50
- Schäden an Estrichen**  
 Klaus G. Aurnhammer  
 Band 15: 2., erg. Aufl., 1999, 216 S., 44 Abb.;  
 17 Tab.,  
 ISBN 3-8167-4162-2  
 € 46,- | sFr 78,-
- Schäden an Tragwerken aus Stahlbeton**  
 Bernhard Brand, Gerhard Glatz  
 Band 14: 1996, 217 S., 129 Abb., 24 Tab.,  
 ISBN 3-8167-4153-3  
 € 46,- | sFr 78,-
- Schäden an Außenwänden aus Ziegel- und Kalksandstein-Verblendmauerwerk**  
 Helmut Klaas, Erich Schulz  
 Band 13: 1995, 224 S., 162 Abb., 13 Tab.,  
 ISBN 3-8167-4152-5  
 € 46,- | sFr 78,-
- Schäden an Metallfassaden und -dachdeckungen**  
 Franz Lubinski, Fritz Röbber, Uwe Nagel, u. a.  
 Band 12: 2. erw. Aufl., 2001, 415 S., 303  
 Abb., 22 Tab.,  
 ISBN 3-8167-4166-5  
 € 76,- | sFr 127,-
- Schäden an Außenmauerwerk aus Naturstein**  
 Martin Sauder, Renate Schloenbach  
 Band 11: 1995, 274 S., 95 Abb., 31 Tab.,  
 ISBN 3-8167-4150-9  
 € 50,- | sFr 86,-
- Schäden an Außenwänden mit Asbestzement-, Faserzement- und Schieferplatten**  
 Klaus W. Liersch  
 Band 10: 1995, 146 S., 86 Abb., 20 Tab.,  
 ISBN 3-8167-4149-5  
 € 38,- | sFr 65,-
- Schäden an Fassadenputzen**  
 Helmut Künzel  
 Band 9: 2. erw. Aufl., 2000, 142 S., mit zahlr.  
 Abb. und Tab.,  
 ISBN 3-8167-4167-3  
 € 38,- | sFr 65,-
- Schäden an Abdichtungen in Innenräumen**  
 Erich Cziesielski, Michael Bonk  
 Band 8: 1994, 112 S., 55 Abb., 4 Tab.,  
 ISBN 3-8167-4147-9  
 € 33,- | sFr 57,-
- Risschäden an Mauerwerk**  
 Ursachen erkennen - Risschäden vermeiden.  
 Werner Pfefferkorn  
 Band 7: 3. überarb. Aufl., 2002, 292 S.,  
 290 Abb., 18 Tab.,  
 ISBN 3-8167-5793-6  
 € 53,- | sFr 89,-
- Schäden an Fenstern**  
 Wolfgang Klein  
 Band 6: 1994, 154 S., 92 Abb., 2 Tab.,  
 ISBN 3-8167-4145-2  
 € 37,- | sFr 64,-
- Schäden an Wänden und Decken in Holzbauart**  
 Horst Schulze  
 Band 5: 1993, 158 S., 140 Abb.,  
 ISBN 3-8167-4144-4  
 € 37,- | sFr 64,-
- Schäden an Industrieböden**  
 Erich Cziesielski, Thomas Schrepfer  
 Band 4: 2., erw. Aufl., 1999, 169 S., 69 Abb.,  
 33 Tab.,  
 ISBN 3-8167-4163-0  
 € 46,- | sFr 78,-
- Schäden an Sichtbetonflächen**  
 Heinz Klopfer  
 Band 3: 1993, 123 S., 77 Abb., 9 Tab.,  
 ISBN 3-8167-4142-8  
 € 35,- | sFr 60,50
- Schäden an Flachdächern und Wannenaus wasserundurchlässigem Beton**  
 Gottfried C.O. Lohmeyer  
 Band 2: 3. neu bearb. Aufl., 2001, 272 S.,  
 171 Abb., 28 Tab.,  
 ISBN 3-8167-5794-4  
 € 50,- | sFr 86,-
- Schäden an Außenwandfugen im Beton- und Mauerwerksbau**  
 Ralf Ruhnau  
 Band 1: 1992, 132 S., 87 Abb.,  
 ISBN 3-8167-4140-1  
 € 35,- | sFr 60,50

## BESTELLSCHEIN

☒ Titel ankreuzen und im Umschlag oder  
 ☒ per Fax (07 11) 970 - 25 08 oder -25 07  
 ☒ senden an:

### Fraunhofer IRB Verlag

☒ Fraunhofer-Informationszentrum  
 ☒ Raum und Bau IRB

☒ Postfach 80 04 69, D-70504 Stuttgart  
 ☒ Telefon (07 11) 970 - 25 00  
 ☒ E-Mail: [info@irb.fhg.de](mailto:info@irb.fhg.de)  
 ☒ URL: <http://www.IRBbuch.de>

☒ Absender .....

☒ .....

☒ .....

☒ .....

☒ Straße/PF .....

☒ PLZ/Ort .....

☒ Datum .....

☒ Unterschrift .....

# Die »Bauschäden-Sammlung« in 13 Bänden

Herausgegeben von Professor Günter Zimmermann



In der Fachwelt hat diese Zusammenstellung von typischen Bauschadensfällen als wichtiger Beitrag zur Verbesserung der Bau- und Planungsleistungen großes Ansehen erlangt.

Die 13 Bände mit dem Untertitel »Sachverhalt - Ursachen - Sanierung« enthalten Schadensberichte aus allen baukonstruktiven Bereichen und sind durch Themen- und Sachregister erschlossen.

Der Nutzer kann so auf Anhieb feststellen,

- ob ein gleicher oder ähnlicher Schaden bereits dokumentiert ist,
- welche Schäden für ein bestimmtes Bauteil typisch sind,
- wie diese Schäden vermieden werden können oder welche Maßnahmen zu ihrer Behebung in Frage kommen.

Seit 3 Jahrzehnten ist die »Bauschäden-Sammlung« eine ständige Rubrik des »Deutschen Architektenblattes«.

## Bauschäden-Sammlung, Band 13 Sachverhalt - Ursachen - Sanierung

2001, 184 Seiten,  
zahlreiche, überwiegend farbige  
Abbildungen, fester Einband,  
ISBN 3-8167-4185-1  
€ 27,- | sFr 44,-

Der Herausgeber

Professor Günter Zimmermann, ein bekannter Bausachverständiger mit langjähriger Erfahrung, betreut seit 3 Jahrzehnten die »Bauschäden-Sammlung« im »Deutschen Architektenblatt« und ist auch für die Herausgabe der Buchausgabe verantwortlich.

## BESTELLSCHEIN

- Band 1: 168 Seiten  
€ 27,- | sFr 44,-
- Band 2: 168 Seiten  
€ 27,- | sFr 44,-
- Band 3: 168 Seiten  
€ 27,- | sFr 44,-
- Band 4: 168 Seiten  
€ 27,- | sFr 44,-
- Band 5: 168 Seiten  
€ 27,- | sFr 44,-
- Band 6: 168 Seiten  
€ 27,- | sFr 44,-
- Band 7: 168 Seiten  
€ 27,- | sFr 44,-
- Band 8: 168 Seiten  
€ 27,- | sFr 44,-
- Band 9: 184 Seiten  
€ 27,- | sFr 44,-
- Band 10: 184 Seiten  
€ 27,- | sFr 44,-
- Band 11: 184 Seiten  
€ 27,- | sFr 44,-
- Band 12: 184 Seiten  
€ 27,- | sFr 44,-
- Band 13: 184 Seiten  
€ 27,- | sFr 44,-

### Sie sparen € 36,- bei Abnahme der

- Bände 1-13 komplett:  
€ 315,- | sFr 476,-

Alle Bände im Format A 5 quer, mit zahlreichen, zum Teil farbigen Abbildungen, festem Einband und Fadenheftung

**Titel ankreuzen und im Umschlag oder per Fax (07 11) 970 - 25 08 oder -25 07 senden an:**

### Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum  
Raum und Bau IRB

Postfach 80 04 69, D-70504 Stuttgart  
Telefon (07 11) 9 70 - 25 00  
E-Mail: [info@irb.fhg.de](mailto:info@irb.fhg.de)  
URL: <http://www.IRBbuch.de>

Absender .....

.....

.....

Straße/PF .....

PLZ/Ort .....

Datum .....

Unterschrift .....

Abb. 3: Starke Ausblühungen unterhalb von durchfeuchteten Fassadenbereichen.

Abb. 4: Durchfeuchtung mit Ausblühung unter einer Fensterbank.

Abb. 5: Fehlstellen und undichte Fugen in den Fensterbänken.

Abb. 3

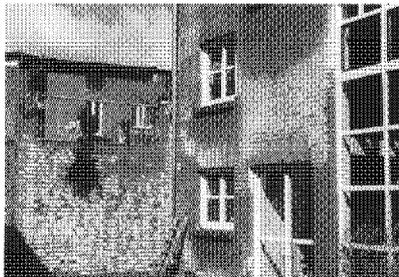


Abb. 4



Abb. 5