

# **Verbesserung der Dichtigkeit und Festigkeit von Mörtel/Beton durch Polymere**

DISSERTATION  
zur Erlangung des Grades eines Doktors  
der Naturwissenschaften

vorgelegt von  
Dipl.-Chem. Anke Reinschmidt  
aus Neunkirchen

eingereicht beim Fachbereich 8  
der Universität-Gesamthochschule Siegen  
Siegen 2000

---

Eingereicht:	14. August 2000
Tag der mündlichen Prüfung:	14. November 2000
Gutachter:	Prof. Dr. D. Knöfel Prof. Dr. W. Brameshuber

## **Danksagung**

Die vorliegende Arbeit wurde im Labor für Bau- und Werkstoffchemie der Universität-Gesamthochschule Siegen unter der Leitung von Herrn Prof. Dr. Knöfel durchgeführt. Ihm danke ich für die Vergabe des interessanten Themas, seine Diskussionsbereitschaft und die fachliche Betreuung.

Herrn Prof. Dr. Brameshuber und Herrn Prof. Dr. Haeuseler danke ich für Ihre Mitwirkung in der Prüfungskommission.

Frau A. Born, Frau B. Dörr, Frau F. Doostdar, Frau I. Hommel, Frau C. Urban, Frau M. Helmus, Herrn M. Behlke, Herrn M. Kraft, Herrn C. Kühr und Herrn M. Becker danke ich für die gute Zusammenarbeit und für Ihre Mithilfe beim praktischen Teil der Arbeit.

Den Mitarbeitern des Labors für Bau- und Werkstoffchemie danke ich für die gute Zusammenarbeit und das gute Arbeitsklima, insbesondere Herrn Dr. K. G. Böttger, Herrn S. Deckers, Herrn K. Exner und Herrn J. Lenz für die anregenden Diskussionen.

Den Mitarbeitern des Baustofftechnologie-Labors Hr. Zart und Hr. Wunderlich danke ich für ihre Hilfe bei der Betonherstellung.

Der Fa. Bayer AG, Leverkusen danke ich für die finanzielle Unterstützung dieser Arbeit.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr. J. Mazanek und Herrn Dr. H. J. Laas von der Firma Bayer AG, Leverkusen für die Ratschläge und Anregungen.

---

1	Einleitung .....	7
1.1	Ziel der Arbeit.....	7
1.2	Literaturübersicht.....	8
1.2.1	Einleitung .....	8
1.2.1	Hydratation von Portlandzement.....	9
1.2.2	Einfluß von Zusatzmitteln auf die Hydratation von Portlandzement .....	14
1.2.2.1	Fließmittel.....	14
1.2.2.2	Polymer .....	16
1.2.2.3	Einfluß niedriger w/z-Werte .....	17
1.2.3	Einfluß von Zusatzstoffen auf die Hydratation von Portlandzement .....	19
2	Untersuchungsmethoden .....	24
2.1	Charakterisierung der Ausgangsstoffe .....	24
2.1.1	Chemische Zusammensetzung .....	24
2.1.2	Reindichte.....	24
2.1.3	Spezifische Oberfläche nach BLAINE .....	24
2.1.4	Bestimmung des Freikalkgehaltes.....	24
2.1.5	Korngrößenverteilung .....	24
2.1.6	Sieblinie der Zuschläge .....	25
2.1.7	Kornrohddichte der Zuschläge .....	25
2.1.8	Abschlämmbare Bestandteile des Zuschlags.....	25
2.1.9	Frost-Tauwiderstand des Zuschlags .....	25
2.1.10	Teilchengrößenverteilung.....	25
2.2	Frismörteluntersuchungen.....	26
2.2.1	Wasser/Zementwert und Wasseranspruch.....	26
2.2.2	Verarbeitbarkeitszeit .....	26
2.2.3	Frismörtelrohddichte .....	26

---

2.2.4	Luftporengehalt .....	26
2.2.5	Wasserrückhaltevermögen .....	27
2.2.6	Erstarrungszeit .....	27
2.2.7	Wasserausfällung .....	27
2.3	Festmörteluntersuchungen .....	27
2.3.1	Mechanische Kennwerte .....	27
2.3.1.1	Dynamischer Elastizitätsmodul .....	27
2.3.1.2	Biegezugfestigkeit.....	28
2.3.1.3	Druckfestigkeit.....	28
2.3.2	Hygrische Kennwerte .....	28
2.3.2.1	Schwinden und Quellen .....	28
2.3.2.2	Wasserdampfdiffusionswiderstand .....	29
2.3.3	Chemisch-physikalische Untersuchungsmethoden .....	29
2.3.3.1	Qualitative Phasenanalyse mittels Röntgenbeugung .....	29
2.3.3.2	Infrarotspektroskopie (IR-Spektroskopie) .....	29
2.3.3.3	<sup>29</sup> Si - NMR - Spektroskopie.....	30
2.3.3.4	Differentialthermoanalyse.....	31
2.3.3.5	Thermogravimetrie .....	32
2.3.3.6	Kalorimetrie .....	32
2.3.3.7	Leitfähigkeit.....	33
2.3.3.8	Rasterelektronenmikroskopie .....	33
2.3.3.9	Quecksilberdruckporosimetrie.....	33
2.3.4	Untersuchung der Widerstandsfähigkeit .....	34
2.3.4.1	Frost-Tausalz-Widerstand.....	34
2.3.4.2	Sulfatwiderstand .....	35
2.3.4.3	Carbonatisierungstiefe .....	35
2.3.4.4	Ausblühverhalten .....	35
2.3.4.5	UV-Beständigkeit .....	35
2.3.4.6	Verseifungsbeständigkeit.....	36

---

2.4 Frischbetonuntersuchungen .....	36
2.4.1 Wasser/Zement-Wert und Wasseranspruch .....	36
2.4.2 Verarbeitbarkeit.....	37
2.4.3 Frischbetontemperatur.....	37
2.4.4 Frischbetonrohddichte .....	37
2.4.5 Luftgehalt .....	37
2.5 Festbetonuntersuchungen.....	38
2.5.1 Mechanische Kennwerte .....	38
2.5.1.1 Dynamischer Elastizitätsmodul .....	38
2.5.1.2 Statischer Elastizitätsmodul.....	38
2.5.1.3 Biegezugfestigkeit.....	38
2.5.1.4 Druckfestigkeit.....	39
2.5.1.5 Spaltzugfestigkeit.....	39
2.5.2 Hygrische Kennwerte .....	39
2.5.2.1 Wasserundurchlässigkeit .....	39
2.5.2.2 Quellen und Schwinden.....	39
2.5.3 Untersuchung der Widerstandsfähigkeit .....	40
2.5.3.1 Eindringverhalten organischer Flüssigkeiten.....	40
2.5.3.2 Verschleißwiderstand.....	42
2.5.3.3 Frost-Tausalz-Widerstand.....	43
2.5.4 Hohlraumgehalt.....	44
3 Polymerauswahl .....	45
3.1 Chemische Grundlagen.....	45
3.2 Auswahl der Polymere.....	49
3.2.1 Verwendete Materialien .....	50
3.2.1.1 Bindemittel.....	50
3.2.1.2 Zuschlag.....	50
3.2.1.3 Zusatzmittel .....	50
3.2.1.4 Mörtelherstellung und -lagerung.....	51

---

3.2.2	Charakterisierung der Polymere .....	51
3.2.3	Frischmörteleigenschaften.....	51
3.2.4	Festmörteleigenschaften.....	53
3.2.5	Verarbeitungseigenschaften .....	62
3.2.6	Teilchengrößenverteilung.....	62
3.2.7	Dauerhaftigkeit.....	62
3.3	Zusammenfassung .....	63
4	Optimierung der Mörtelzusammensetzung .....	65
4.1	Verwendete Materialien.....	65
4.1.1	Bindemittel .....	65
4.1.2	Zusatzmittel.....	67
4.1.3	Zusatzstoffe .....	67
4.1.4	Zuschlag .....	68
4.2	Probenherstellung und -lagerung .....	68
4.3	Variation des Bindemittels .....	68
4.3.1	Frischmörteleigenschaften.....	68
4.3.2	Festmörteleigenschaften.....	73
4.4	Einfluß von Zusatzstoffen.....	78
4.4.1	Frischmörteleigenschaften.....	78
4.4.2	Festmörteleigenschaften.....	79
4.5	Einfluß der Polymerkonzentration.....	83
4.5.1	Frischmörteleigenschaften.....	84
4.5.2	Festmörteleigenschaften.....	85
4.6	Diskussion der Ergebnisse .....	88
4.7	Zusammenfassung .....	91

---

5 Praktische Anwendungen.....	93
5.1 Hochleistungsbeton.....	93
5.1.1 Verwendete Materialien .....	108
5.1.1.1 Bindemittel.....	108
5.1.1.2 Zuschlag.....	108
5.1.1.3 Sieblinie .....	109
5.1.1.4 Zusatzstoff .....	110
5.1.1.5 Zusatzmittel .....	110
5.1.1.6 Betonherstellung .....	111
5.1.1.7 Nachbehandlung .....	111
5.1.1.8 Versuchsprogramm.....	112
5.1.2 Frischbetonuntersuchungen.....	113
5.1.3 Festbetonuntersuchungen .....	114
5.1.3.1 Mechanische Eigenschaften.....	114
5.1.3.2 Hygrische Kennwerte.....	121
5.1.3.3 Untersuchung der Widerstandsfähigkeit.....	122
5.1.4 Diskussion der Ergebnisse .....	127
5.1.5 Zusammenfassung .....	130
5.2 Dränbeton .....	132
5.2.1 Verwendete Materialien .....	133
5.2.1.1 Bindemittel.....	133
5.2.1.2 Zuschlag.....	133
5.2.1.3 Zusatzmittel .....	134
5.2.1.4 Betonherstellung .....	134
5.2.1.5 Nachbehandlung .....	134
5.2.1.6 Versuchsprogramm.....	134
5.2.2 Frischbetonuntersuchungen.....	135
5.2.3 Festbetonuntersuchungen .....	135
5.2.4 Zusammenfassung .....	136

Inhaltsverzeichnis	6
--------------------	---

---

6 Zusammenfassung.....	139
------------------------	-----

7 Literaturverzeichnis.....	145
-----------------------------	-----

8 Anhang .....	166
----------------	-----

## 1 Einleitung

Mit Betonzusatzmitteln lassen sich die Eigenschaften von Mörteln und Betonen gezielt verändern. Nach Schätzungen werden derzeit 80 ... 90 % aller Betone mit Zusatzmitteln hergestellt. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Verwendung von Fließmitteln und Verflüssigern. Diese dienen der Verminderung des Wasseranspruchs und/oder der Verbesserung der Verarbeitbarkeit. In der Bundesrepublik Deutschland dürfen wasserreduzierende Zusätze einem Beton nach DIN 1045 oder den Straßenbauvorschriften nur zugefügt werden, wenn sie ein Prüfzeichen des Instituts für Bautechnik besitzen und einer Überwachung, bestehend aus Eigen- und Fremdüberwachung, unterliegen. Die Entwicklung von sehr leistungsfähigen Fließmitteln in den letzten 20 Jahren erlaubte die Herstellung von Hochleistungsbeton, der sich, auf Grund seines niedrigen Wassergehaltes ( $w/z$ -Wert  $< 0.30$ ), durch ein dichtes Gefüge und eine hohe Festigkeit auszeichnet. Hierdurch haben sich die Anwendungsmöglichkeiten des Baustoffs Beton zunehmend erweitert, beispielsweise im Hoch-, Tief- und Umweltschutzbau. Hochleistungsbeton wird u. a. eingesetzt für den Bau von Brücken, Ölplattformen, Hochhäusern, Kraftwerken und Tanktassen.

### 1.1 Ziel der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines bauaufsichtlich zugelassenen Fließmittels bzw. Verflüssigers auf Polyetherpolyurethanbasis. Neben der Verflüssigung sollte das Polymer zu guten Verarbeitungseigenschaften des Betons führen und weitgehend unabhängig auf unterschiedliche Bindemittel und Zusatzstoffe reagieren. Die durchgeführten Untersuchungen gliedern sich in drei Teile. In einer Screening-Phase, Abschnitt 1 der Arbeit, wird die chemische Zusammensetzung der Polyurethane systematisch variiert und der Einfluß auf die Frisch- und Festmörteleigenschaften untersucht. Diese Ergebnisse dienen der Auswahl der Polymere für weiterführende Untersuchungen, wobei wirtschaftliche Aspekte ebenfalls eine Rolle spielen. Im zweiten Teil erfolgt eine Optimierung der Mörtelzusammensetzung im Hinblick auf eine hohe Festigkeit und Dichtigkeit. Hierzu werden verschiedene Zusatzstoffe und Zemente in die Untersuchungen einbezogen und die Polymerkonzentration variiert. Gegenstand des dritten Teils der Arbeit ist die Entwicklung von polymermodifizier-

ten Hochleistungs- und Dränbetonen. Die Ergebnisse aus den vorangehenden Abschnitten und von Literaturbetrachtungen werden berücksichtigt. Ein wichtiger Aspekt ist die Prüfung der Dichtigkeit und damit der Dauerhaftigkeit der entwickelten Betone.

## 1.2 Literaturübersicht

### 1.2.1 Einleitung

Der Einsatz von Polyurethanen als Zusatzmittel in zementgebundenen Systemen ist an verschiedenen Stellen in der Literatur beschrieben. Probleme bereitet dabei die gleichmäßige Einarbeitung der in der Regel hydrophoben Polyurethane in das anorganische Bindemittel, eine Grundvoraussetzung für die Bildung eines homogenen Polymergerüsts (DE-A 924 468, EP-A 23 579, EP-A 181 261 ). Um eine geringe Mischbarkeit zu erzielen, sind entweder spezielle Mischaggregate (Hochgeschwindigkeitsrührer) oder organische Lösungsmittel notwendig. Eine weitere Möglichkeit stellt der in dem Patent DE-A 2 359 genannte Einbau von Salzgruppen in das Polymer dar. Nachteilig wirkt sich hier die geringe Lagerstabilität des Produktes aus. Ziel dieser Arbeit ist deswegen die Entwicklung eines Polyetherpolyurethans, daß gering dosiert, neben einer guten verflüssigenden Wirkung und einer Verbesserung der Beständigkeit des Mörtels bzw. Betons praxisgerechte Verarbeitungseigenschaften aufweist (EP 0 850 896 A1).

Fließmittel bzw. Verflüssiger werden in der Praxis eingesetzt um den Wasseranspruch von Mörteln und Betonen zu vermindern und/oder die Verarbeitbarkeit zu verbessern. Sie unterscheiden sich lediglich in der Intensität ihrer verflüssigenden Wirkung. Die Entwicklung begann Ende der 60-er, Anfang der 70-er Jahre in Japan und Deutschland (MALHOTRA 1997). Im allgemeinen werden als Hauptbestandteile Stoffe auf der Basis von Melamin-, Naphthalin- und Ligninsulfonaten eingesetzt. Zunehmend an Bedeutung gewinnen Polyacrylate und Polycarboxylate. Melaminharze sind Kondensationsprodukte aus Melamin und Formaldehyd mit einer charakteristischen Sulfonsäuregruppe. Ihre volle Wirksamkeit entfalten sie bei einer Dosierung von etwa 1 M.-% bezogen auf den Zementgehalt. Sie haben keine verzögernde Wirkung, in manchen Fällen wird die Zementhydratation geringfügig beschleunigt.

Naphtalinsulfonsäurekondensate zeichnen sich durch eine gute Verflüssigung bei niedrigen Einsatzmengen, 0.2 ... 0.5 M.-%, aus. Die Reaktionen des Zementes werden kaum beeinflusst. Ligninsulfonate entstehen beim Sulfit-Aufschluß von Lignin bei der Celluloseherstellung. Sie neigen wegen ihres Gehaltes an grenzflächenaktiven Bestandteilen zum Eintrag von Luftporen und verzögern die Zementhydratation. Die Dosierung beträgt üblicherweise 0.2 ... 0.5 % vom Zementgewicht. Polyacrylate und -carboxylate besitzen eine lang andauernde verflüssigende Wirkung (SCHNABL 1991). Kunststoffdispersionen werden üblicherweise in Anteilen von 5 ... 20 M.-% (k/z-Wert: 0.02 ... 0.2) des Zementgewichtes in Mörteln und Betonen eingesetzt. Sie bewirken häufig neben einer Erniedrigung des Wasseranspruchs eine bessere Verarbeitbarkeit des Frischbetons sowie einen erhöhten Widerstand gegenüber angreifenden, schädlichen Gasen und Flüssigkeiten. Änderungen des Festigkeits- und Verformungsverhaltens sind wesentlich von der Art und der Zugabemenge der Dispersion abhängig und können nicht verallgemeinert werden. Bei der Anwendung von Kunststoffen im Beton wird nach GROBKURTH 1989a unterschieden zwischen PCC (Polymer Cement Concrete), PIC (Polymer Impregnated Concrete) und PC (Polymer Concrete).

### 1.2.1 Hydratation von Portlandzement

Die Erhärtung von Portlandzement beruht auf der Umsetzung der vier Klinkerphasen Alit, Belit, Tricalciumaluminat und Tetracalciumaluminatferrit mit Wasser in Gegenwart von Sulfatträger. Grundlegende Arbeiten zur Aufklärung des Mechanismus wurden von LOCHER 1976 durchgeführt. Ein handelsüblicher Portlandzement besitzt folgende durchschnittliche Zusammensetzung (KEIL 1971):

45 ... 65 %	Alit
10 ... 30 %	Belit
5 ... 15 %	Aluminat
5 ... 12 %	Ferrit

Einflußgrößen auf die Hydratation sind die Phasenzusammensetzung und der Gehalt an Fremdionen im Zement, die Mahlfeinheit des Zementes, der w/z-Wert, die Lagerungsbedingungen sowie chemische Zusätze. Nachfolgend werden die Reaktionen

der einzelnen Klinkerphasen bei der Umsetzung mit Wasser beschrieben (TAYLOR 1990).

▪ *Alit*

Im Gegensatz zu der reinen Klinkerphase Tricalciumsilikat ( $C_3S$ ) enthält Alit noch ca. 3 ... 4 %  $Fe_2O_3$ ,  $MgO$  oder  $Al_2O_3$ . Alit verleiht dem Zement seine hohe Anfangsfestigkeit. Die Hydratation des  $C_3S$  ist noch nicht vollständig aufgeklärt. Es bildet sich amorphes Calcium-Silikat-Hydrat (C-S-H) mit einem  $CaO/SiO_2$ -Verhältnis  $< 3$  und Calciumhydroxid. Etwa 70 % reagieren innerhalb von 28 Tagen, nach 1 Jahr ist die Phase praktisch vollständig hydratisiert. Innerhalb der ersten Minuten nach dem Kontakt mit dem Wasser bildet sich an der Oberfläche des  $C_3S$  eine Schicht aus C-S-H-Phasen deren Bildungsgeschwindigkeit von der  $Ca(OH)_2$ -Konzentration in der Lösung bestimmt wird. Die C-S-H-Phasen behindern die Weiterreaktion des noch unhydratisierten Kerns. Anschließend kommt die Reaktion fast zum Stillstand. Im weiteren Verlauf ändert sich die Zusammensetzung der C-S-H-Phasen entweder durch Phasenumwandlung oder Alterung. Dadurch wird sie durchlässiger und die Hydratation beginnt von neuem. Der Vernetzungsgrad der C-S-H-Phasen nimmt dabei kontinuierlich zu.

▪ *Belit*

Belit enthält ebenso wie Alit Fremdionen. Die reine Phase ist das Dicalciumsilikat ( $C_2S$ ). Vom  $C_2S$  sind wie vom Belit fünf kristallographisch verschiedene Modifikationen bekannt, drei orthorhombische, eine hexagonale und eine monokline. Der Reaktionsmechanismus und die gebildeten C-S-H-Phasen sind ähnlich den beim Alit beschriebenen. Die Reaktion verläuft nur langsamer und die Menge an gebildetem  $Ca(OH)_2$  ist niedriger. Es erhärtet ebenso wie das Tricalciumsilikat hydraulisch und erreicht die gleichen oder sogar noch höhere Festigkeiten. Nach 28 Tagen haben sich ca. 30 % des Dicalciumsilikats umgesetzt, nach 1 Jahr ca. 90 %.

▪ *Tricalciumaluminat ( $C_3A$ )*

Tricalciumaluminat kommt in 3 verschiedenen Modifikationen vor, einer kubischen einer orthorhombischen und einer monoklinen. In der Hauptsache entsteht bei der Hydratation in Gegenwart von Sulfat Ettringit  $C_3AC\bar{S}_3H_{32}$ , neben Monosulfat  $C_4AC\bar{S}H_{12}$  und  $C_4AH_{19}$ . Diese Anfangsreaktion verläuft stark exotherm. Sie endet bis die Sulfatkonzentration für eine weitere Ettringitbildung nicht mehr ausreicht. Die

Ursache für die sich anschließende Ruheperiode ist nicht geklärt. Vermutet wird auch hier, daß der Ettringit an der Oberfläche des  $C_3A$  die Weiterreaktion verzögert. Nach MEHTA 1976 ist die Dichte der Ettringitschicht allerdings zu niedrig, als das dadurch die Hydratation behindert würde. Weitere Theorien werden von FELDMAN 1966 und PLOWMAN 1984 genannt. Die Ruhephase endet mit der Umwandlung des Ettringits und nicht reagiertem  $C_3A$  in Monosulfat. Tricalciumaluminat leistet kaum einen Beitrag zur Festigkeit.

▪ *Calciumaluminatferrit ( $C_2(A,F)$ )*

Calciumaluminatferrit ist eine Mischkristallverbindung, in der sich  $Al_2O_3$  und  $Fe_2O_3$  vertreten können. Bei der Erhärtung des Portlandzementes entsteht  $C_6(A,F)C\bar{S}_3H_{32}$ , daß sich anschließend zum entsprechenden Monosulfat  $C_4(A,F)C\bar{S}H_{12}$  umwandelt. Calciumaluminatferrit hat praktisch keinen Anteil an der Zementfestigkeit.

Die Hydratation des Zementes läßt sich nach den oben beschriebenen Reaktionen der Klinkerphasen in verschiedene Stadien einteilen (siehe Abbildung 1-1).

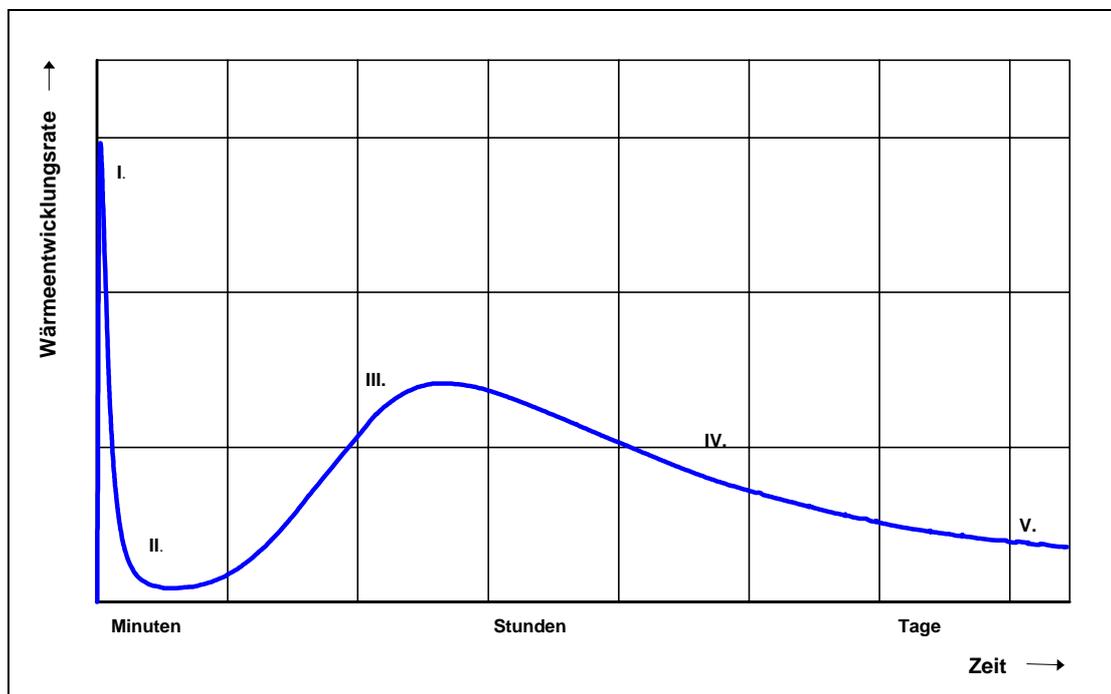


Abbildung 1-1. Stadien der Hydratation (VERNET 1992a)

Die freiwerdende Wärme in der *Anfangsphase I* ist zurückzuführen auf die Benetzungs- und Reaktionswärme, die sich durch den ersten Kontakt des Zementes mit Wasser ergibt. Tricalciumaluminat, Calciumaluminatferrit, Tricalciumsilikat, Calciumsulfat und im Zement vorliegende Alkalisulfate gehen in Lösung. Ca. 5 ... 25 % des  $C_3A$  hydratisiert in diesem Stadium. Die Leitfähigkeit einer Zementsuspension steigt kontinuierlich an. Es bilden sich C-S-H-Phasen an der Oberfläche der Zementpartikel ebenso wie Ettringit. Eine schnelle Weiterreaktion wird somit verhindert und die Wärmeentwicklung nimmt ab. Dicalciumsilikat reagiert in diesem Stadium nur zu einem geringen Teil. Mit steigender Mahlfeinheit des Zementes nimmt die freiwerdende Hydratationswärme zu. Die *Induktionsperiode II* zeichnet sich durch eine niedrige Wärmeentwicklung aus. In erster Linie findet eine Anreicherung der Lösung mit  $Ca^{2+}$ -Ionen statt. Sie endet mit der Ausfällung von  $Ca(OH)_2$  aus der Lösung in Form von Portlandit. Dies bewirkt wiederum eine Absenkung der Leitfähigkeit. In der *Beschleunigungsphase III*, erkennbar an einem zweiten exothermen Effekt, findet die eigentliche Hydratation der Calciumsilikate, sowohl des Alits als auch des Belits, statt und die Festigkeitsentwicklung setzt ein.

Die *Verzögerungsphase IV* ist gekennzeichnet durch ein diffusionskontrolliertes Abklingen der Hydratationsreaktionen und damit der Wärmeentwicklung. Gebildeter Ettringit wandelt sich mit noch vorhandenem  $C_3A$  oder  $C_2(A, F)$  um in Monosulfat. Die Leitfähigkeit nimmt weiter ab. Danach setzt die Alterung des hydratisierten Materials ein (*Endphase V*). Sie wird charakterisiert durch eine andauernde Polykondensation der  $SiO_4$ -Tetraeder. Dadurch steigt die Kettenlänge in den C-S-H-Phasen an, die Endfestigkeit wird erreicht (ODLER 1998). Dieser Nachweis erfolgt mit Hilfe der  $^{29}Si$ -NMR-Spektroskopie, die eine gute Möglichkeit darstellt, die schlecht-kristallinen C-S-H-Phasen zu charakterisieren. Änderungen in der Verknüpfungszahl der  $SiO_4$ -Tetraeder äußern sich in Verschiebungsdifferenzen von ca. 10 ppm (GRIMMER 1996). Tabelle 1-1 gibt den Anteil der einzelnen Klinkerphasen an der freigesetzten Hydratationswärme von Portlandzement wieder (WÄCHTLER 1984).

Tabelle 1-1. Anteil der einzelnen Klinkerphasen an der Gesamthydratationswärme von Portlandzement

Klinkerphase	Hydratationswärme J/g Klinkerphase	Anteil im Portlandzement %	Hydratationswärme J/g Zement
C <sub>3</sub> S	500	45 ... 65	225 ... 325
C <sub>2</sub> S	250	10 ... 30	25 ... 75
C <sub>3</sub> A	1340	5 ... 15	67 ... 201
C <sub>2</sub> (A, F)	420	5 ... 12	21 ... 50

Alkalien gelangen über die Rohstoffe, vorwiegend Tonminerale und Feldspäte, in den Zement. Dabei ist der K<sub>2</sub>O-Gehalt in europäischen Rohstoffen in der Regel drei- bis zehnmal so hoch wie der Na<sub>2</sub>O-Gehalt. Zum Einfluß von Alkalien auf die Zementhydratation liegen eine Vielzahl von Untersuchungen vor (ODLER 1983, BILLHARDT 1971). Im Zementklinker wird Na<sub>2</sub>O und K<sub>2</sub>O entweder in die Klinkerphasen eingebaut, bei Abwesenheit von SO<sub>3</sub> bevorzugt in die Aluminatphase, oder liegt in Abhängigkeit vom Sulfatgehalt als wasserlösliches Natrium- bzw. Kaliumsulfat vor. Durch den Alkalieinbau in das Kristallgitter des C<sub>3</sub>A wird die orthorhombische Modifikation des C<sub>3</sub>A stabilisiert, während das alkalifreie kubisch kristallisiert und so die Reaktionsfähigkeit verändert.

Das Gefüge des Zementsteins verändert sich mit fortschreitender Hydratation. Dabei nimmt die Dichtigkeit und Festigkeit des Gefüges zu. Verantwortlich für die Gefügebildung sind die Korngröße und Form der Hydratationsprodukte, der Volumenanteil der Poren und ihre Größenverteilung. Die Porosität des Zementsteins, d. h. das Gesamtporenvolumen und die Porengrößenverteilung, sind maßgeblich für die Festigkeit und die Widerstandsfähigkeit verantwortlich. Es wird unterschieden zwischen (SMOLCYK 1961):

▪ *Luft- und Verdichtungsporen* ( $r > 10 \mu\text{m}$ )

Sie verbleiben in der Folge unvollständigen Verdichtens im Zementleim, Mörtel oder Beton. Zur Erhöhung des Frostwiderstandes werden gezielt Luftporen durch Luftporenbildner in den Frischbeton eingebracht.

▪ *Kapillarporen* ( $r = 10 \mu\text{m} \dots 0.01 \mu\text{m}$ )

Sie entstehen durch überschüssiges Wasser, daß nicht an der Hydratation beteiligt war und nicht physikalisch in den Gelporen gebunden ist. Bei niedrigen Feuchte-

gehalten der Luft, < 65 % r. L., trocknen sie aus. Die Kapillarporen bilden ein zum Teil vernetztes Porensystem, daß von wichtiger Bedeutung ist für die Transportphänomene im Zementstein.

▪ *Gelporen* ( $r < 0.01 \mu\text{m}$ )

Sie stellen mit Porenwasser gefüllte Zwischenräume zwischen und in den Kristallen der Hydratationsprodukte dar. Bei einer mittleren Luftfeuchtigkeit von ca. 80 % in Mitteleuropa sind sie praktisch immer mit Porenwasser gefüllt und deshalb für Gase und Flüssigkeiten undurchlässig.

## 1.2.2 Einfluß von Zusatzmitteln auf die Hydratation von Portlandzement

### 1.2.2.1 Fließmittel

Zum Einfluß von Fließmitteln auf die Zementhydratation und über deren Wirkungsweise liegen eine Vielzahl von Untersuchungen vor. Ebenso vielfältig sind die Ergebnisse. Dies ist zum einen zurückzuführen auf die unterschiedliche chemische Zusammensetzung der Verflüssiger und eingesetzten Zemente, zum anderen auf unterschiedliche äußere Einflußgrößen wie w/z-Wert, Lagerungsart, Probenherstellung und Untersuchungsmethoden. Die verflüssigende Wirkung wird erklärt mit (RAMACHANDRAN 1984, AİTCIN 1994):

- Erniedrigung der Oberflächenspannung des Wassers
- Bildung von Schmierfilmen an den Oberflächen der Zementpartikel
- elektrostatischen Abstoßungskräften
- sterische Abstoßungskräfte durch die an den Zementpartikeln angelagerten Zusatzmittelmolekülen
- Behinderung der Hydratation an den Oberflächen der Zementpartikel
- Änderungen der Morphologie der Hydratationsprodukte

Als sicher gilt, daß Fließmittel, häufig in mehreren Schichten, an der Oberfläche der Zementteilchen oder der ersten Hydratationsprodukte adsorbiert werden. Diese Anlagerung ist für die Verflüssigung notwendig. Innerhalb weniger Minuten bis zu einigen Stunden werden 30 ... 100 % der Zusatzmittel am Zement sorbiert und tragen zu einer Dispergierung der Zementpartikel bei (SPANKA 1995). Ursachen dafür sind der

Anstieg des zeta-Potentials, bei gleicher Oberflächenladung stoßen sich die Partikel ab, die Affinität der Teilchen zur flüssigen Phase auf Grund der gegenseitigen Abstoßung und aus Gründen sterischer Hinderung. Ein allgemein anerkanntes Modell, daß die dispergierenden Eigenschaften von Fließmitteln im einzelnen beschreibt, beruht auf folgender Vorstellung: In einer Suspension ohne Zusatzmittel reagieren freie Calciumionen mit den negativ geladenen OH- bzw.  $\text{SiO}_4$ -Ionen der Calciumsilikathydrate, die bis zu 90 % der Suspension ausmachen. Ein Calciumion kann dabei die Silanolgruppen zweier Calciumsilikatteilchen binden. Durch diese Verknüpfung bildet sich ein Netzwerk aus koagulierten Zementteilchen mit darin eingeschlossenem Wasser aus. Um die Fließeigenschaften zu verbessern, muß dieses Netzwerk aufgebrochen werden. Bei der Zugabe von Fließmittel lagern sich die Polyanionen z. B. von Calciumlignin-, Natriummelamin- und Natriumnaphthalin-sulfonaten auf der Oberfläche der hydratisierten Zementkörner an und umhüllen sie. Nähern sich zwei Zementkörner, stoßen sie sich auf Grund der negativen Ladung ab. Das Netzwerk bricht auf, das eingeschlossene Wasser wird freigesetzt und die Beweglichkeit der unvernetzten Zementpartikel erhöht. Mit zunehmender Fließmitteldosierung nimmt dieser Effekt zu bis zu einer Sättigungskonzentration. Darüber hinaus tritt keine weitere Verflüssigung ein. Längere Molekülketten haben einen stärkeren dispergierenden Effekt. Eine besserer Verteilung des Zementes führt zu einer effizienteren Hydratation, höheren Frühfestigkeiten und einer feineren Porenstruktur (UMLAUF 1997). Die verflüssigende Wirkung ist größer, wenn die Anlagerung an die Hydratationsprodukte, insbesondere an die C-S-H-Phasen, Monosulfat oder Calciumhydroxid, erfolgt. Der optimale Zugabezeitpunkt für Fließmittel ist deswegen einige Minuten nach Beginn des Mischvorgangs, zu Beginn der Induktionsperiode (CHICCHIO 1985). Ansonsten wird das Fließmittel in das  $\text{C}_3\text{A}$ -Gips-System eingebaut und es steht weniger Material für die Dispergierung der Phasen Alit und Belit zur Verfügung.

In vielen Fällen wird neben einer verflüssigenden eine verzögernde Wirkung beobachtet. SINGH 1989 stellt im frühen Stadium der Hydratation bei der Untersuchung von Melaminharzen mit steigender Dosierung einen Anstieg der Erstarrungszeiten, eine Abnahme der Leitfähigkeit und niedrigere  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Gehalte fest, im Vergleich zu einer unmodifizierten Probe. Grund dafür ist eine Adsorption von Melment an der Oberfläche der Zementkörner die verhindert, daß sich ein Niederschlag aus  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  bildet. Zu einem ähnlichen Ergebnis kommt RAMACHANDRAN 1995, der den Einfluß

von Melaminsulfonaten auf einzelne Klinkerphasen des Zementes untersucht. Die Umsetzung des  $C_3A$  und  $C_3S$  wird verzögert, hingegen läuft die Ettringitbildung beschleunigt ab. Im Gegensatz dazu nimmt die Geschwindigkeit der gleichen Reaktion mit Produkten auf Lignin- und Naphtalinsulfonatbasis ab (MASSAZZA 1980).

AÏTCIN 1987a findet einen Zusammenhang zwischen der Partikelgröße des Zementes und der Verzögerung. Die sehr feine Fraktion,  $< 4 \mu\text{m}$ , reagiert kaum verzögert. Der Einfluß macht sich deutlich bemerkbar auf das Verhalten der Zementteilchen mit einer Größe von  $4 \dots 30 \mu\text{m}$ . Einen weiteren Einfluß auf die Verflüssigung übt der Sulfatträger des Zementes aus. RANC 1990 beschreibt einen Fall wo ein Zement mit Gips und Anhydrit als Sulfatträger ohne Fließmittel ein gutes Fließverhalten aufweist. Nach der Zugabe eines Polynaphtalinsulfonats tritt eine deutliche Verschlechterung ein. Er sieht die Ursache in einer Fließmittel-Sulfatträger-Wechselwirkung. VERNET 1992b kann nachweisen, daß das Fließmittel, ebenfalls ein Polynaphtalinsulfonat, in die Calciumaluminhydrat eingebaut wird, wenn nicht genügend leicht lösliches Sulfat für die Reaktion mit dem  $C_3A$  zur Verfügung steht. In allen Fällen tritt eine Störung der Ettringitbildung ein. Häufig wird als Ursache für eine Verflüssigung die Herabsetzung der Oberflächenspannung des Wassers angegeben. RAUEN 1976 weist nach, daß dies für Melaminharze nur zu einem geringen Teil richtig ist. Die Untersuchungen beruhen auf der Beobachtung, daß beim Mischen von Calciumsalzlösungen mit Melaminharzlösung schwerlösliche, "schmierige" Verbindungen entstehen. Es wird vermutet, daß diese weichen, gallertartigen Reaktionsprodukte die Oberfläche der hydratisierenden Zementpartikel überziehen und so ein leichteres Gleiten gegeneinander ermöglichen und eine Agglomeration der Zementkörner verhindern.

### 1.2.2.2 Polymer

Organische Zusätze werden bereits seit Jahrhunderten in Kombination mit anorganischen Bindemitteln eingesetzt, um deren Eigenschaften zu verbessern. Dabei handelte es sich in frühester Zeit um Naturprodukte wie Proteine und Kohlehydrate, die als Luftporenbildner wirkten oder zu einer Verbesserung der Verarbeitung beitrugen (CHANDRA 1995). Im konstruktiven Anwendungsbereich von Beton setzen sich in neuerer Zeit zunehmend wäßrige Dispersionen auf Styrolacrylat- oder Styrobutadien-

basis durch (SCHIEBL 1996). Sie haben bei einer Zugabemenge von mehr als 5 % einen abdichtenden Effekt, der zu einer höheren Widerstandsfähigkeit des Betons führt (siehe Kapitel 5.1). Ihre Dosierung liegt üblicherweise zwischen 5 ... 20 M.-% und gehören damit im eigentlichen Sinn zu den Zusatzstoffen. Die Durchmesser der Polymerteilchen in einer solchen Dispersion liegen zwischen 0.05 ... 0.5  $\mu\text{m}$ . Zur Stabilisierung dient ein komplexes Dispergiersystem, daß aus Emulgatoren und/oder Schutzkolloiden aufgebaut ist. Es ermöglicht zum einen eine Herabsetzung der Oberflächenspannung und somit eine gute Benetzbarkeit der Polymerteilchen im Wasser, zum anderen wird deren Agglomeration verhindert. Die Filmbildung verläuft in einem dreistufigen Prozeß. Mit dem Entweichen des Dispersionswassers durch die einsetzende Zementhydratation nimmt die freie Weglänge der Kunststoffteilchen ab, so daß sich die Polymerpartikel berühren. Durch den Entzug des Restwassers steigt der Kapillardruck in den verbliebenen Hohlräumen an. Liegt die Umgebungstemperatur oberhalb der Glasübergangstemperatur, bildet sich durch Verschmelzung der Polymerteilchen ein homogener Film aus (GROBKURTH 1989b). Es gibt verschiedene Modellvorstellungen darüber, wie sich der Kunststoffilm in einem mineralischen Bindemittel anordnet. KOLONKO 1977 geht davon aus, daß lokal begrenzte Polymerdomänen entstehen, die das Gefüge auflockern. Hingegen verfilmen die Polymere nach OHAMA 1984 zu einem membranartigen Faltenwerk. Es durchsetzt die Bindemittelmatrix in Form von Gleitebenen und verkittet die Kornoberflächen des Zuschlags mit dem Zementstein.

Der Kunststoff wirkt nicht festigkeitssteigernd in den anorganischen Bindemittelsystemen, sondern kann die Druckfestigkeit sogar mindern. Nur durch eine Verflüssigung und die damit verbundene Absenkung des w/z-Wertes steigen die Festigkeiten an (SCHORN 1990). Die abdichtende Wirkung des Kunststoffs beruht auf einer Verkleinerung des Porenraums und gegebenenfalls quillt das Polymer unter der Einwirkung von eindringenden organischen Flüssigkeiten (SCHIEBL 1993b).

### **1.2.2.3 Einfluß niedriger w/z-Werte**

Hochleistungsbetone werden mit w/z-Werten  $< 0.30$  hergestellt. Der Einfluß der niedrigen Wassergehalte auf die Zementhydratation und damit verbundene mögliche Langzeitschäden für die Bauwerke werden in der Literatur kontrovers diskutiert.

Nach POWERS 1947 und HANSEN 1986 sind zur vollständigen Hydratation des Portlandzementes w/z-Werte von 0.35 bzw. 0.36 erforderlich. Das gebildete Gel füllt den Platz der ursprünglichen Zementpartikel und des Wassers vollständig aus, so daß praktisch keine Kapillarporen verbleiben. Wird der Wassergehalt weiter abgesenkt, verbleiben unhydratisierte Zementkörner im Zementstein (SPRINGENSCHMID 1993). DIAMOND 1996 findet bei der quantitativen Auswertung mittels Phasenanalyse in der fließmittelhaltigen Probe mit einem w/z-Wert von 0.35 deutlich mehr nichthydratisierte Klinkerbestandteile als in der Probe mit gleichem w/z-Wert ohne Zusatz. Der Wassergehalt hat einen bedeutenden Einfluß auf die Mikrostruktur von Zementpasten und Betonen (TENOUTASSE 1990, BABAQI 1991). Ein niedriger Wassergehalt führt zur Ausbildung von vergleichsweise dünnen, nadelförmigen C-S-H-Phasen sowie einer dichten Gefügestruktur mit nichthydratisierten Klinkeranteilen. Mit steigendem Wassergehalt wird das Gefüge lockerer strukturiert, der Anteil an nicht-hydratisiertem Klinker nimmt ab und die C-S-H-Phasen werden grobkristalliner ausgebildet. XU 1993 entwickelt, aufbauend auf eigenen Untersuchungen, ein Modell, daß die Strukturverhältnisse in zementgebundenen Systemen mit niedrigen w/z-Werten wiedergibt. Er berechnet eine Abnahme der Langzeitfestigkeiten durch Volumenausdehnungen später gebildeter Hydratationsprodukte um das ungefähr 2-fache.

Im Vergleich zu normalfesten Betonen neigen Hochleistungsbetone verstärkt zur Rißbildung, die auf eine schnelle Anfangshydratation zurückzuführen ist. Die schnelle Abdichtung des erhärtenden Betons bewirkt, daß von außen nicht genügend Wasser zur Hydratation nachtransportiert werden kann. Der Zementstein schrumpft infolge der Selbstaustrocknung (Chemisches Schwinden) auch bei optimaler Nachbehandlung und es werden Eigenspannungen erzeugt, die zur Mikrorißbildung führen (SCHRAGE 1994). SCHMELTER 1995 zeigt in seinen Untersuchungen, daß sich das Schwinden verdoppelt, wenn der w/z-Wert bei gleichbleibender Betonzusammensetzung von 0.35 auf 0.25 sinkt. In Langzeitversuchen über einen Zeitraum von 4 Jahren stellt STARK 1996 bei Betonen mit niedrigen Wassergehalten deutliche Treibererscheinungen infolge sekundärer Ettringitbildung fest. Als Ursache hierfür ist der niedrige bzw. fehlende Kapillarporenraum anzusehen. Wärmebehandelte Betone bei 60, 75 und 90 °C mit niedrigen w/z-Werten erweisen sich als besonders empfindlich.

### 1.2.3 Einfluß von Zusatzstoffen auf die Hydratation von Portlandzement

Für die Herstellung von hochdichten und hochfesten Mörteln und Betonen werden häufig Zusatzstoffe, in der Regel Steinkohlenflugasche und Silicastaub, eingesetzt. Sie gehören zur Gruppe der Puzzolane. Dazu zählen alle natürlichen und künstlichen silikatischen Stoffe, die als wesentliches Merkmal reaktionsfähige Kieselsäure enthalten. Zur hydraulischen Erhärtung benötigen sie Calciumhydroxid.

#### ▪ *Silicastaub*

Silicastaub (Mikrosilica) fällt als Nebenprodukt bei der Herstellung von Silicium und Siliciumlegierungen (Ferrosilicium, Calciumsilicium) an. Zur Gewinnung von Silicium wird Quarz in Elektroöfen mit Kohle zusammen aufgeschmolzen. Die Kohle dient dabei als Reduktionsmittel für den Quarz. Bei Legierungen wird das entsprechende Legierungsmaterial wie z. B. Eisen dazugegeben. Unter der Einwirkung hoher Temperaturen werden Silicium oder Silicium-Legierungen gewonnen, wobei Silicastaub als Abfallprodukt in den Filtern aufgefangen wird. Die chemische Zusammensetzung richtet sich nach der Herstellung des jeweiligen Produktes. Der Siliciumdioxidgehalt liegt im allgemeinen zwischen 80 und 98 M.-%. Daneben enthält das Produkt  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MnO}$ , Schwefel und Kohlenstoff. Die höchsten  $\text{SiO}_2$ -Gehalte fallen bei der Herstellung von reinem Silicium an. Mikrosilica besteht aus glasigen, kugelförmigen Partikeln, mit einer mittleren Korngröße von 0.1 ... 0.2  $\mu\text{m}$ . Weiterhin gibt es synthetisch hergestellte Kieselsäure (Nanosilica), die zu 100 % aus  $\text{SiO}_2$  besteht. Die mittlere Partikelgröße liegt bei 0.015  $\mu\text{m}$  (BECHTHOLD 1996).

Die Wirkung von Silicatzusätzen in portlandzementgebundenen Systemen beruht auf drei Effekten, dem Füllereffekt, der puzzolanischen Reaktion und der Verbesserung der Kontaktzone zwischen Zementstein und Zuschlag. Der Füllereffekt ist bedingt durch den 100 bzw. 1000 mal kleineren Korndurchmesser der Silicastaubpartikel im Vergleich zu den Zementteilchen. Dadurch werden die Zwischenräume zwischen den Zementkörnern ausgefüllt und die Packungsdichte erhöht. Die hohe Oberfläche des Silicastaubs führt zu einem Anstieg des Wasseranspruchs des Mörtels bzw. Betons, der in der Praxis durch Fließmittel ausgeglichen wird. Nachfolgend wird die puzzolanische Reaktion des Silicastaubs beschrieben. Nach URHAN 1987 führt der Kontakt von Silicateilchen mit einem Zement-Wasser-Gemisch zu einer Adsorption von  $\text{OH}^-$

$\text{Ca}^{2+}$ -,  $\text{Na}^+$ - und  $\text{K}^+$ -Ionen an die Oberfläche der Silicapartikel. Dabei werden die  $\text{Ca}^{2+}$ -Ionen am stärksten adsorbiert. Diese reagieren mit den sich auflösenden Siliceteilchen zu C-S-H-Phasen. Als erstes lösen sich ganz feine Partikel, die sich dann aus der übersättigten Lösung an der Oberfläche der größeren Silicapartikel als silicareiche, calciumarme Schichten abscheiden. Die Abscheidung erfolgt innerhalb der ersten 5 ... 15 Minuten. Die Schichten gehen teilweise wieder in Lösung oder dienen als Substrat für die Bildung weiterer C-S-H-Phasen. Das C/S-Verhältnis in den Hydratphasen des Silicastaubs wird in der Literatur mit 1.1 bzw. 1.2 angegeben (TRAETTEBERG 1978, SELLEVOLD 1982). Im Vergleich dazu beträgt das Verhältnis bei den Hydratationsprodukten des Portlandzementes 1.8 d. h. mit steigendem  $\text{SiO}_2$ -Angebot wird weniger CaO in die Hydratphasen eingebaut (REGOURD 1983). Mit der Bildung der C-S-H-Phasen zwischen den Zementpartikeln läßt sich die hohe Frühfestigkeit silicastaubhaltiger Mörtel und Betone erklären. Da das Gel leicht wieder Wasser abgeben kann, wird das Schwinden erhöht.

Untersuchungen von LI 1985 bestätigen die Vermutung, daß Silicastaub auf Grund der hohen Feinheit und des hohen Anteils an amorphem  $\text{SiO}_2$  sehr reaktiv ist. Nach 1 Tag waren bereits über 50 % des Silicastaubs hydratisiert und nach 3 Tagen ca. 66 %. Wegen des niedrigeren Wassergehaltes verläuft die puzzolanische Reaktion des Silicastaubs bei hochfesten Betonen langsamer als im Normalbeton (AÏTCIN 1987b). Die Hydratationswärmeentwicklung nimmt mit zunehmender Silicastaubkonzentration zu, wie die Ergebnisse von FELDMAN 1985 zeigen, der Versuche mit Zementleimen ohne sowie mit 10, 20 und 30 % Silicastaub durchführte. STEVELS 1964 stellt eine Beschleunigung der Hydratation des Tricalciumsilikats in Gegenwart von Silicastaub fest. Als Begründung gibt er an, daß die Umwandlung der C-S-H-Phasen in weniger dichte Hydrate zu Beginn der Induktionsperiode auf Grund der Reduzierung der  $\text{Ca}^{2+}$ - und  $\text{OH}^-$ -Ionenkonzentration beschleunigt wird (vgl. Kapitel 1.1.1). YOUNG 1984 erklärt die Beschleunigung mit der großen Oberfläche der Siliceteilchen, die zur Abscheidung von C-S-H-Phasen führt, die wiederum als Kristallisationskeime wirken. Calciumhydroxid, das bei der Hydratation der Calciumsilikate gebildet wird, ist im Beton von besonderer Bedeutung für den Schutz der Bewehrung vor Korrosion. Wird Silicastaub bei der Betonherstellung eingesetzt, ist eine Reduktion des Calciumhydroxidgehaltes zu erwarten. SELLEVOLD 1982 führte dazu Untersuchungen an Zementstein ohne und mit 12 % Silicastaub durch. Nach einem Tag ergab sich im silicahaltigen Zementstein wegen der beschleunigten Zementhydratation ein etwas

höherer  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Gehalt als im silicafreien Zementstein. Bis zum 7. Tag stieg der Calciumhydroxidgehalt kontinuierlich an und nahm mit dem Einsetzen der puzzolanischen Reaktion ab in Abhängigkeit vom Silicastaubgehalt. Im Zementstein ohne Silicazusatz verlief die  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Entwicklung deutlich schneller. Sie erreichte nach ca. 14 Tagen ein Maximum und blieb dann konstant. Berechnungen zeigen, daß bei etwa 24 % Silicastaub das Calciumhydroxid verbraucht ist. Mit der Füllerwirkung von Silicastaub und dessen puzzolanischer Reaktion ist ein verbesserter Kontakt zwischen dem Zementstein und dem Zuschlag verbunden. Zum einen werden feine Zwickel in dieser Kontaktzone verfüllt, zum anderen reagiert der Silicastaub mit dem in dieser Zone bevorzugt freigesetzten Calciumhydroxid zu festigkeitsbildenden C-S-H-Phasen. Dieses Ergebnis beeinflußt die Festigkeit und die Porosität des Mörtels bzw. Betons und damit auch die Dichtigkeit (BENTUR 1987).

▪ *Steinkohlenflugasche*

Steinkohlenflugasche (SFA) ist ein Abfallprodukt, daß bei der Verbrennung von Steinkohle in Kraftwerken mit Staubfeuerungen anfällt. Je nach Staubfeuerungstyp, Hochtemperatur-Schmelzfeuerung, Trockenfeuerung, Wirbelschichtfeuerung, und damit der Feuerungstemperatur variiert der Gehalt an glasigen Bestandteilen von 60 % bis 89 %. Die Abscheidung aus den Abgasen erfolgt entweder elektrostatisch oder mechanisch (SCHOLZ 1986). Nachfolgende Tabelle 1-2 gibt eine Übersicht über die chemische Zusammensetzung von Steinkohlenflugaschen.

Tabelle 1-2. Bereiche der chemischen Zusammensetzung von Steinkohlenflugaschen (HERMANN 1995)

Oxide	Anteile M.-%
$\text{SiO}_2$	42.6 ... 56.3
$\text{Al}_2\text{O}_3$	23.7 ... 31.1
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	4.83 ... 15.3
$\text{CaO}$	0.67 ... 6.84
$\text{MgO}$	1.19 ... 4.91
$\text{K}_2\text{O}$	2.92 ... 5.20
$\text{Na}_2\text{O}$	0.36 ... 1.43
$\text{SO}_3$	0.09 ... 1.71

Wesentliche Bedeutung für die Wirkung haben die mineralogischen und granulometrischen Eigenschaften der Steinkohlenflugaschen. Die Hauptbestandteile sind Mullit ( $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ), Quarz ( $\text{SiO}_2$ ), Magnetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), Hämatit ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), Anhydrit ( $\text{CaSO}_4$ ) sowie die Glasmatrix, die verantwortlich ist für die puzzolanische Reaktivität. Die Feinheit der SFA ist vergleichbar mit der von Zement, wobei das Kornverteilungsband deutlich breiter ist. Form und Größe der Flugaschepartikel können stark variieren, in der Regel handelt es sich um glasige Kugeln oder Hohlkugeln mit Durchmessern von  $< 0.001$  mm bis  $> 1$  mm (HÄRDTL 1995). Die Wirkung in Mörteln bzw. Betonen beruht im wesentlichen auf den gleichen Effekten wie beim Mikrosilica. Eine wichtige Rolle spielen der Füllereffekt sowie die puzzolanische Reaktion der SFA mit dem Calciumhydroxid. Der Einfluß von Flugasche auf die Zementhydratation wird in der Literatur unterschiedlich beurteilt (WESCHE 1991). Die Aussagen reichen von einer Beschleunigung bis zu einer Verzögerung der Zementreaktion. Die Beschleunigung wird zum einen damit erklärt, daß SFA als Reaktionskeim wirkt, zum anderen beeinflussen leicht lösliche Beläge auf der Oberfläche der Flugaschepartikel wie z. B. Alkalisulfate die Hydratation (CARLES-GIBERGUES 1973). Nach TAYLOR 1985 wird der Reaktionsgrad von flugaschehaltigen Mischungen durch einen größeren  $\text{C}_3\text{S}$ -Verbrauch erhöht im Vergleich zu SFA-freien Mischungen. Der höhere  $\text{C}_3\text{S}$ -Umsatz setzt 16 Stunden nach dem Anmachen ein d. h. zu einem Zeitpunkt zu dem noch keine puzzolanische Reaktion der SFA vorliegt. Die Reaktion des Klinkerminerals  $\text{C}_2\text{S}$  wird zu Beginn der Hydratation durch die Flugasche kaum beeinflusst, zu späteren Zeitpunkten findet eine Abnahme des Reaktionsgrades statt. Ursache dafür ist der niedrigere Calciumhydroxidgehalt durch die puzzolanische Reaktion der SFA, wodurch die Hydratation des im Vergleich zu  $\text{C}_3\text{S}$  CaO-ärmeren  $\text{C}_2\text{S}$  eingeschränkt wird (LUKAS 1976). Für  $\text{C}_3\text{A}$  wird in Mischungen mit Portlandzement und Flugasche innerhalb weniger Stunden ein schnellerer Umsatz festgestellt als in den Mischungen ohne SFA, verbunden mit einer verstärkten Ettringitbildung auf der Oberfläche der Klinkerkörner (UCHIKAWA 1980). Damit erklärt PLOWMAN 1981 eine Verzögerung des Reaktionsfortschrittes, weil die Ettringitschicht die Hydratation behindert. Ähnliche Reaktionen wie für  $\text{C}_3\text{A}$  werden für  $\text{C}_2(\text{A}, \text{F})$  erwartet.

An der puzzolanischen Reaktion der SFA ist nur die Glasphase beteiligt, die im wesentlichen aus amorpher Kieselsäure ( $\text{SiO}_2$ ) besteht. Sie reagiert in Gegenwart von Feuchtigkeit mit dem Calciumhydroxid, das bei der Hydratation des Portlandzemen-

---

tes freigesetzt wird, zu Calciumsilikathydratphasen. Tendenziell nimmt das C/S-Verhältnis mit steigendem Flugaschegehalt und zunehmender Reaktionsdauer ab (RAYMENT 1982). Die Reaktionsgeschwindigkeit der SFA ist abhängig vom Anlösen der glasigen Flugaschepartikel im alkalischen Milieu der Porenlösung. Die Löslichkeit steigt mit zunehmendem pH-Wert und damit mit niedrigeren w/z-Werten (ODLER 1982). Den größten Einfluß auf die Geschwindigkeit der puzzolanischen Reaktion hat die Feinheit der SFA. Sie nimmt mit steigender Feinheit deutlich zu. Der Glasgehalt sowie die Glaszusammensetzung spielen im Vergleich dazu nur eine untergeordnete Rolle (SYBERTZ 1993). Der Beginn der puzzolanischen Reaktion ist abhängig von der Zementart. Er liegt bei Portlandzement zwischen 2 und 7 Tagen (HÄRDTL 1995). Die zusätzlich gebildeten CSH-Phasen bewirken eine Verschiebung der Porengrößenverteilung hin zu kleineren Porenradien. Der Gelporengehalt nimmt zu, der Anteil an Kapillarporen wird dagegen reduziert (FELDMAN 1981). Diese Verschiebung ist in erster Linie auf eine verringerte Porosität des Übergangsbereichs Zementstein - Zuschlag zurückzuführen. In der Kontaktzone, deren Breite üblicherweise 25 ... 75 µm beträgt, liegen besonders gut ausgebildete hexagonale Ca(OH)<sub>2</sub>-Kristalle vor. Durch den Austausch von 20 M.-% Zement gegen SFA wird nach Untersuchungen von LEHMANN 1965 die Dicke von 60 auf 15 µm verringert.

## **2 Untersuchungsmethoden**

### **2.1 Charakterisierung der Ausgangsstoffe**

#### **2.1.1 Chemische Zusammensetzung**

Bindemittel und Zusatzstoffe wurden durch Röntgenfluoreszenzanalysen des jeweiligen Herstellers charakterisiert.

#### **2.1.2 Reindichte**

Zur Bestimmung der Reindichte der Ausgangsstoffe diente ein Heliumpyknometer AccuPyc 1330 der Firma Micromeritics.

#### **2.1.3 Spezifische Oberfläche nach BLAINE**

Die spezifische Oberfläche der Binde- und Zusatzmittel wurde nach dem Verfahren nach BLAINE (DIN EN 196 Teil 6) bestimmt.

#### **2.1.4 Bestimmung des Freikalkgehaltes**

Die Bestimmung des Freikalkgehaltes erfolgte nach der Vorschrift von FRANKE 1941. Zur Titration wurde 0.1 n Salzsäure mit Bromphenolblau als Indikator verwendet. Als Lösungsmittel diente Isopropanol.

#### **2.1.5 Korngrößenverteilung**

Die Korngrößenverteilungen der Binde- und Zusatzmittel wurden mit dem Lasergranulometer Typ Helos der Fa. Sympatec im Bereich von 0,5 ... 175 µm ermittelt, unter Verwendung des Naßdispergiersystems Sucell 12CL. Als Dispergiermedium diente

Isopropanol. Bei bekannter Reindichte des Materials (vgl. 2.1.2) läßt sich dessen spezifische Oberfläche berechnen.

### **2.1.6 Sieblinie der Zuschläge**

Die Bestimmung der Kornzusammensetzung erfolgte mit einem Prüfsiebsatz nach DIN 4226 Teil 3 bzw. für gebrochene Zuschläge nach den Technischen Lieferbedingungen für Mineralstoffe im Straßenbau, Ausgabe 1978 (TL Min 78).

### **2.1.7 Kornrohichte der Zuschläge**

Die Kornrohichte der Zuschläge wurde nach DIN 4226 Teil 3 (Meßzylinderverfahren) ermittelt.

### **2.1.8 Abschlämbbare Bestandteile des Zuschlags**

Der Gehalt an abschlämbbaren Bestandteilen wurde gemäß DIN 4226 Teil 3 nach dem Auswaschverfahren bestimmt.

### **2.1.9 Frost-Tau-Wechselwiderstand des Zuschlags**

Der Zuschlag wurde laut DIN 4226 Teil 3 auf seinen Frost-Tau-Widerstand untersucht.

### **2.1.10 Teilchengrößenverteilung**

Die Teilchengrößenverteilung einer ca. 10 %igen, wäßrigen Polymerdispersion wurde mit einer Ultrazentrifuge Beckmann L 5-75 bestimmt. Die Durchführung erfolgte bei der Fa. Bayer AG. LANGE 1995 beschreibt das Meßprinzip und die Meßmethodik.

## 2.2 Frischmörteluntersuchungen

Der Mischvorgang zur Herstellung der Mörtel erfolgte in Anlehnung an DIN EN 196-1. Abweichend davon wurde das Bindemittel im Rührgefäß vorgelegt und das Wasser bzw. die Polymerdispersion zugegeben. Bindemittelleime wurden auf die gleiche Weise nach DIN EN 196-3 hergestellt.

### 2.2.1 Wasser/Zement-Wert und Wasseranspruch

Die Frischmörtel wurden nach DIN 18 555 Teil 2 über das Ausbreitmaß auf eine definierte Ausgangskonsistenz eingestellt. Als Maß für den Wasseranspruch eines Mörtels gibt der Wasser/Zement-Wert (w/z-Wert) das Verhältnis des benötigten Zugabewassers zum Zement an.

### 2.2.2 Verarbeitbarkeitszeit

Der Zeitraum vom Anmachen des Mörtels bis zum Ende der Verwendbarkeit, d. h. bis zu einer Abnahme des Ausbreitmaßes um 30 mm bezogen auf den Ausgangswert ( $170 \pm 50$ ) mm, wird als Verarbeitbarkeitszeit bezeichnet und entsprechend DIN 18 555 Teil 8 bestimmt.

### 2.2.3 Frischmörtelrohichte

Die Bestimmung der Rohichte  $\rho$  erfolgte gemäß DIN 18 555 Teil 2. Verdichtet wurde der Mörtel nach dem Vibrationsverfahren.

### 2.2.4 Luftporengehalt

Der Luftporengehalt wurde bezüglich DIN 18 555 Teil 2 nach dem Druckausgleichsverfahren nach vorheriger Verdichtung des Mörtels durch Vibration gemessen.

### **2.2.5 Wasserrückhaltevermögen**

Das Wasserrückhaltevermögen (WRV) wurde nach DIN 18 555 Teil 7 bestimmt.

### **2.2.6 Erstarrungszeit**

Erstarrungsbeginn und -ende von Zementleimen wurden nach deren Einstellung auf Normsteife gemäß DIN EN 196-3 ermittelt.

### **2.2.7 Wasserausfällung**

Die Bestimmung der von einer Probe frisch gemischten Mörtels abgesonderten Menge an Zugabewasser (Bluten) erfolgte nach DIN 18 999 Teil 6.

## **2.3 Festmörteluntersuchungen**

Die Festmörtel wurden, wie in DIN EN 196-1 beschrieben, hergestellt.

### **2.3.1 Mechanische Kennwerte**

Festmörteluntersuchungen wurden, wenn nicht anders angegeben, an Normprismen mit den Abmessungen 40 mm · 40 mm · 160 mm durchgeführt, Zementsteinuntersuchungen an Kleinprismen (15 mm · 15 mm · 60 mm).

#### **2.3.1.1 Dynamischer Elastizitätsmodul**

Der dynamische Elastizitätsmodul  $E_{\text{dyn}}$  der Mörtelprüfkörper wurde durch Resonanzmessung mit dem Meßgerät DIGI EG-2 der Fa. Labek nach KOTTAS 1964 ermittelt.

### 2.3.1.2 Biegezugfestigkeit

Die Biegezugfestigkeit  $\beta_{BZ}$  der Mörtel und Zementsteine wurde entsprechend DIN EN 196 Teil 1 bestimmt. Zur Verfügung stand eine Prüfpresse Typ Toni Comp III der Fa. RK Toni Technik.

### 2.3.1.3 Druckfestigkeit

Die Ermittlung der Druckfestigkeit  $\beta_D$  erfolgte an den nach der Messung der Biegezugfestigkeit erhaltenen Prismenhälften laut DIN EN 196 Teil 1 mit der oben genannten Prüfpresse der Fa. RK Toni Technik.

## 2.3.2 Hygrische Kennwerte

Zur Bestimmung der hygrischen Kennwerte wurden Normprismen verwendet.

### 2.3.2.1 Schwinden und Quellen

Als Schwinden  $\epsilon_s$  und Quellen  $\epsilon_q$  werden Volumenänderungen des Mörtels bezeichnet, die durch Änderungen des Feuchtigkeitsgehalts hervorgerufen werden. Das 1. Schwinden  $\epsilon_{s1}$  ist die Folge von sich überlagernden chemischen (Zemthydratation, Carbonatisierung) und physikalischen (Kapillarschwinden, Trocknungsschwinden) Prozessen im Zementstein (ROSTÁSY 1960). Meßtechnisch wird dabei auch das Schrumpfen erfaßt, d. h. die Kontraktion im weichen bis plastischen Zustand des Körpers.

Das Quellen  $\epsilon_q$  beschreibt die Dehnungen der Prüfkörper bei 7-tägiger Wasserlagerung (20 °C) nach Abklingen des 1. Schwindens ( $\epsilon_{s1}$ ). Daran anschließend wurden die Mörtel einer Austrocknung bis zur Längenkonstanz im Klima 23 °C/50 % rel. Luftfeuchte unterzogen (2. Schwinden  $\epsilon_{s2}$ ). Die Längenänderungen wurden bei den jeweiligen Lagerungsbedingungen mit einem BAM-Setzdehnungsmesser der Fa. Staeger, Bauart Pfender mit einer Meßgenauigkeit von  $\pm 0.001$  mm verfolgt. Das Verfahren von KNÖFEL 1993, Methode A6M beschreibt die Durchführung.

### **2.3.2.2 Wasserdampfdiffusionswiderstand**

Die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl  $\mu$  ( $\mu$ -Wert) ist ein Maß für die Wasserdampfdurchlässigkeit von Mörteln und gibt das Verhältnis des Diffusionswiderstandes betreffenden Stoffes zu dem einer gleich dicken, ruhenden Luftschicht an. Als Grundlage zur Berechnung dient hierbei das 1. Ficksche Gesetz. Ein neben der Diffusion stattfindender kapillarer Feuchtigkeitstransport wird vernachlässigt (WIERIG 1963). Die Durchführung erfolgte gemäß DIN 52 615 mit der Randbedingung 23-50/95 (Feuchtbereichsverfahren). Als Prüfkörper dienten Mörtelscheiben mit einem Durchmesser von 150 mm und einer Dicke von 10 mm.

### **2.3.3 Chemisch-physikalische Untersuchungsmethoden**

Chemisch-physikalische Untersuchungen wurden an Bindemitteln bzw. Zementsteinproben durchgeführt.

#### **2.3.3.1 Qualitative Phasenanalyse mittels Röntgenbeugung**

Die Röntgenbeugung ist eine Methode zur qualitativen Charakterisierung der Phasenzusammensetzung von Bindemitteln und hydratisierten Proben. Gemessen wurde mit einem Diffraktometer D 500 der Fa. Siemens mit  $\text{Cu-K}\alpha$ -Röntgenstrahlung bei einer Generatorspannung von 40 kV und einem Röhrenstrom von 30 mA. Die pulverförmigen Proben (Korngröße  $< 40 \mu\text{m}$ ) wurden in einem Winkelbereich von  $10 \dots 65^\circ 2\Theta$  mit einer Winkelgeschwindigkeit von  $1,2^\circ 2\Theta$  pro Minute untersucht.

#### **2.3.3.2 Infrarotspektroskopie (IR-Spektroskopie)**

Die Infrarotspektroskopie (IR-Spektroskopie) beruht auf folgendem Prinzip: Durch die Absorption von Strahlung im infraroten Bereich des elektromagnetischen Spektrums ( $2\text{-}15 \mu\text{m}$ ) werden in Molekülen Schwingungs- und Rotationsübergänge angeregt, die als Infrarotspektrum gemessen werden (GÜNZLER 1983). Komplexe organische Moleküle lassen sich auf Grund charakteristischer Absorptionsbanden der funktionellen Gruppen und des Moleküls als Ganzes eindeutig identifizieren. Letzte-

re befinden sich unterhalb einer Wellenzahl von  $1500 \text{ cm}^{-1}$  und werden durch Gerüstschwingungen hervorgerufen. Oberhalb liegen die Schwingungsbanden der funktionellen Gruppen. In einem IR-Spektrum ist die Durchlässigkeit  $T$  (Transmission) gegen die Wellenzahl  $\tilde{\nu}$  aufgetragen. Das Lambert-Beersche Gesetz beschreibt den Zusammenhang zwischen Absorption, Konzentration und durchstrahlter Schichtdicke.

$$A = -\log T = I/I_0 = \mu \cdot c \cdot d \quad (2.1)$$

- $A$  : Absorption
- $T$  : Transmission
- $I$  : Intensität des durchgelassenen Lichtes
- $I_0$  : Intensität des eingestrahnten Lichtes
- $\mu$  : reduzierte Masse der absorbierenden Komponente
- $c$  : Konzentration
- $d$  : durchstrahlte Schichtdicke

Von den kleiner  $40 \mu\text{m}$  gemörsterten Zementsteinproben wurden Kaliumbromid-Preßlinge hergestellt und die IR-Spektren bei der Fa. Bayer AG an einem FTIR-Spektrometer Paragon 1000 der Fa. Perkin Elmer in diffuser Reflexion gemessen.

### 2.3.3.3 $^{29}\text{Si}$ - NMR - Spektroskopie

Die hochauflösende  $^{29}\text{Si}$ -NMR-Spektroskopie (NMR: nuclear magnetic resonance) ermöglicht die Strukturaufklärung von festen Silikaten und Alumosilikaten, wie sie im Portlandzement und in dessen Hydratationsprodukten vorkommen. Voraussetzung für die Kernresonanzspektroskopie ist ein magnetisches Moment der Kernsorte ungleich Null.

Die siliciumhaltige Probe wird einem äußeren Magnetfeld mit variabler Flußdichte ausgesetzt. Die Frequenz der eingestrahnten Strahlung bleibt konstant. Bei einer bestimmten Flußdichte stimmt die Energie mit der zum Umklappen der magnetischen Momente notwendigen Strahlungsenergie überein und es erfolgt eine Absorption. Die genaue Resonanzfrequenz ist abhängig von der chemischen Umgebung des Kerns. So erzeugen die Elektronen des Moleküls durch ihre Bewegung ein zweites Magnetfeld, daß das äußere Feld entweder verstärkt oder schwächt. Diese Verschiebung der

NMR-Signale zu höherem oder niedrigerem Feld wird als chemische Verschiebung  $\delta$  bezeichnet. Sie wird in einem Spektrum immer relativ zu dem Signal einer Referenzverbindung, meistens Tetramethylsilan, in ppm angegeben. Die Fläche unter der Absorptionskurve ist ein Maß für die Intensität des Übergangs. Ursache für die Feinstruktur der gemessenen Signale d. h. die Aufspaltung in Singulets, Dupletts, Triplets usw. sind Wechselwirkungen mit Nachbarkernen, die ein magnetisches Moment besitzen (Spin-Spin-Kopplung). Die  $^{29}\text{Si}$ -NMR-Spektroskopie erlaubt somit die Untersuchung von schlecht-kristallinen Calciumsilikaten und deren Hydratationsprodukten. Je nach Verknüpfungsgrad der  $\text{SiO}_4$ -Tetraeder ändert sich die chemische Verschiebung (MACIEL 1996).

Tabelle 2-1. Chemische Verschiebungen von unterschiedlich verknüpften  $\text{SiO}_4$ -Einheiten in Zementphasen (BELL 1990)

	Chemische Verschiebung $\delta$ ppm
$\text{Q}^0$	-66 ... -74
$\text{Q}^1$	-75 ... -82
$\text{Q}^2$	-85 ... -89
$\text{Q}^3$	-95 ... -100
$\text{Q}^4$	-103 ... -115

Die  $^{29}\text{Si}$ -NMR-Spektren wurden bei 59.63 MHz mit einem Festkörper-Hochauflösungs-NMR-Spektrometer CXP 200 (Fa. Bruker-Physik) bei der Fa. Bayer AG aufgenommen. Die Proben rotierten mit einer Frequenz von 3.2 kHz. Der Pulsabstand betrug 30 s, die Meßtemperatur 25 °C. Für die Aufnahmen wurde das Probenmaterial auf eine Korngröße kleiner 40  $\mu\text{m}$  aufbereitet. Als Referenz diente Tetramethylsilan.

### 2.3.3.4 Differentialthermoanalyse

Die Differentialthermoanalyse (DTA) dient der Bestimmung des Wärmeumsatzes bei physikalischen oder chemischen Umwandlungen. Dazu werden die zu untersuchende Probe sowie eine inerte Vergleichssubstanz in einem Ofen, einem bestimmten Temperaturprogramm folgend, erhitzt. Mit Hilfe von Thermoelementen wird die Temperaturdifferenz zwischen den beiden Proben gemessen und ihr zeitlicher Verlauf re-

gistriert. Somit lassen sich exo- und endotherme Reaktionen in dem untersuchten System nachweisen.

Zur Verfügung stand das Meßgerät DTA 701/STA 2000 der Fa. Bähr Thermoanalyse, eine kombinierte DTA-TG-Apparatur. Vierzig mg des zerkleinerten Probenmaterials ( $< 40 \mu\text{m}$ ) und der Referenzsubstanz  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  wurden jeweils in Platintiegel eingewogen und mit einer Heizrate von 10 K pro Minute auf 1200 °C erwärmt.

### 2.3.3.5 Thermogravimetrie

Mit Hilfe der Thermogravimetrie (TG) wird die Masse bzw. die Massenänderung einer Probe in Abhängigkeit von Temperatur und/oder Zeit gemessen. Massenänderungen treten z. B. bei Verdampfung, Zersetzung und chemischen Reaktionen auf. Durchführung und Anordnung waren analog zu dem in 2.3.3.4 beschriebenen Verfahren.

### 2.3.3.6 Kalorimetrie

Die Wärmeflußkalorimetrie erlaubt es die Hydratation von Zement bzw. von einzelnen Klinkerphasen direkt über die dabei freiwerdende Wärmemenge bei einer konstanten Umgebungstemperatur zu verfolgen.

Gemessen wurde mit dem Wärmeflußkalorimeter ToniCAL der Fa. RK Toni Technik. Die Ausgangsmaterialien wurden vortemperierte. Nachdem ein stationärer Zustand erreicht war, konnte die Reaktion indirekt durch Zugabe des Wassers bzw. des Zusatzmittelwassergemischs zum Feststoff gestartet werden. Das Verhältnis von Wasser zu Feststoff betrug einheitlich 0.50. Als Vergleichsprobe diente das vollständig ausgehärtete Bindemittel. Die Hydratation wurde bis zu 72 Stunden beobachtet.

### 2.3.3.7 Leitfähigkeit

Zur Charakterisierung der Hydratation im frühen Stadium wurde die Leitfähigkeit über die Zeit verfolgt. Dazu wurde aus entgastem, bidestilliertem Wasser und dem Bindemittel eine Suspension mit einem w/z-Wert von 0.50 hergestellt. Das Gefäß wurde luftdicht verschlossen. Über einen Zeitraum von 3 Stunden wurden unter ständigem Rühren die Leitfähigkeit mit einem Leitfähigkeitsmeßgerät (Hersteller Fa. WTW GmbH, MultiLab P4 mit Meßfühler TetraCon 96) bestimmt. Die Messung fand bei 23 °C statt.

### 2.3.3.8 Rasterelektronenmikroskopie

Die Gefügeausbildung der hydratisierten Zemente wurde mit dem Rasterelektronenmikroskop (Hersteller Fa. Philips, Typ XL 30) an Mörtelbruchstücken untersucht.

### 2.3.3.9 Quecksilberdruckporosimetrie

Die Quecksilberdruckporosimetrie stellt ein Verfahren dar, mit dem das Porengefüge von hydratisierten Mörtel- und Zementsteinproben quantitativ erfaßt werden kann. Der Messung liegt folgendes Prinzip zugrunde: Quecksilber als nicht benetzende Flüssigkeit kann nur unter äußerem Druck in die offenen Poren eines Festkörpers eindringen. Mit steigendem Druck gelangt das Quecksilber in immer kleinere Poren. WASHBURN 1921 beschreibt unter der Annahme von zylinderförmigen Poren diesen Zusammenhang zwischen dem Porenradius  $r$  und dem Druck  $p$ :

$$r = \frac{-2 \cdot \sigma \cdot \cos \Theta}{p} \quad (2.2)$$

$r$  : Porenradius in  $\mu\text{m}$

$p$  : Druck in MPa

$\Theta$  : Randwinkel, für Quecksilber  $141.3^\circ$

$\sigma$  : Oberflächenspannung, für Quecksilber  $0.485 \text{ N/m}$

Die Versuche wurden mit einem Quecksilberdruckporosimeter der Fa. Micromeritics, Typ Autopore 9220 durchgeführt. Mit diesem Gerät können Poren mit Radien bis zu

1.8 nm erfaßt werden. Für die Messung der Porengrößenverteilung wurden die Mörtel auf eine Korngröße von 2-4 mm zerkleinert und anschließend bis zur Gewichtskonstanz bei 70 °C im Trockenschrank getrocknet.

In Tabelle 2.2 sind die Größenbereiche der einzelnen Porenarten nach POWERS 1947, SMOLCYK 1961 und ROMBERG 1978 und aufgeführt. Grundlage für die Auswertung und Beurteilung der durchgeführten Messungen war die Einteilung nach ROMBERG.

Tabelle 2-2. Poreneinteilung

Porenarten		Porenbereich nach		
allgemein	im Zementstein	POWERS	ROMBERG	SMOLCYK
Makroporen	Luftporen	100 ... 2000 µm	1 ... 1000 µm	> 10 µm
Mesoporen	Kapillarporen	1 ... 10 µm	0.01 ... 100 µm	0.03 ... 10 µm
Mikroporen	Gelporen	0.0025 µm	0.001 ... 0.01 µm	< 0.03 µm

## 2.3.4 Untersuchung der Widerstandsfähigkeit

### 2.3.4.1 Frost-Tausalz-Widerstand

Der Frost-Tausalz-Widerstand der Mörtel wurde in Anlehnung an das VDZ-Würfel-Eintauchverfahren (BONZEL 1977) geprüft. Probekörperwürfel mit einer Kantenlänge von 40 mm wurden vor dem Frosten 14 Tage bei 20 °C in einer 3 %igen Natriumchloridlösung gelagert, 7 Tage bis 10 mm unterhalb der Würfeloberkante und weitere 7 Tage eingetaucht in der Tausalzlösung. Anschließend wurden sie mit der Salzlösung 50 Frost-Tauwechseln unterzogen (Zyklusdauer 12 Stunden, Maximaltemperatur 20 °C, Minimaltemperatur - 20 °C). Nach jedem zehnten Wechsel wurden die Absplitterungen abfiltriert, bis zur Gewichtskonstanz bei 110 °C getrocknet und gewogen.

### 2.3.4.2 Sulfatwiderstand

Die Untersuchung des Sulfatwiderstandes nach dem Flachprismenverfahren (WITTEKIND 1960) erstreckte sich über einen Zeitraum von 3 Monaten. Flachprismen (10 mm · 40 mm · 160 mm) der zu untersuchenden Mörtel wurden stehend bis zum Alter von 14 Tagen bei 20 °C in gesättigter Calciumhydroxidlösung vorgelagert. Anschließend wurde eine Serie in 4,4 %iger Natriumsulfatlösung gelagert, die zweite Serie blieb in der Calciumhydroxidlösung. Nach 91 Tagen wurden die Dehnungen der unterschiedlich gelagerten Prismen mit dem BAM-Setzdehnungsmesser bestimmt und miteinander verglichen.

### 2.3.4.3 Carbonatisierungstiefe

Die Bestimmung der Carbonatisierungstiefe erfolgte gemäß einer Empfehlung von KRELL 1986. Eine frische Bruchfläche der Mörtelprismen wurde mit 1 %iger, ethanolscher Phenolphthaleinlösung besprüht. Das Farbumschlagintervall des Indikators liegt bei einem pH-Wert von 8.2 ... 10.0. Die Breite der farblosen, carbonatisierten Zone wurde an allen vier Prismenseiten mit einer Schieblehre auf 0.1 mm genau ausgemessen.

### 2.3.4.4 Ausblühverhalten

Die Ausblühneigung der Mörtel wurde nach KNÖFEL 1993, Methode B6M untersucht.

### 2.3.4.5 UV-Beständigkeit

Zweck des künstlichen Bestrahleins ist es die Alterung der Kunststoffe im Mörtel zu überprüfen und damit verbundene mögliche Veränderungen der Farbe und Oberflächenbeschaffenheit. Die Durchführung erfolgte in Anlehnung an DIN 53 384 Verfahren A. Mörtelprobekörper mit den Abmessungen 5 mm · 40 mm · 140 mm, aus Normprismen gesägt und zur Bestrahlung in ein Gerät der Fa. Siemens, Typ QUV UVA 340 mit einer UV-Kante von 300 nm eingesetzt. Abweichend von obengenann-

ter Norm waren die Prüfbedingungen. Die Proben wurden 4 Stunden bei einer Temperatur von 60 °C (Trockenphase) bestrahlt, anschließend die Strahlung abgeschaltet und für die nächsten 4 Stunden setzte die Betauungsphase mit einem Wasserbad ein. Die Temperatur betrug dabei 50 °C. Der Zyklus wurde 1000 Stunden wiederholt. Zum Vergleich dienende Probekörper lagerten im Dunkeln bei 20 °C und 65 % rel. Luftfeuchte. Die Durchführung erfolgte bei der Fa. Bayer AG.

#### **2.3.4.6 Verseifungsbeständigkeit**

Kunststoffe im Mörtel oder Beton neigen manchmal auf Grund der stark alkalischen Umgebung zu Hydrolyse- bzw. Verseifungserscheinungen. Die Prüfung wurde gemäß der Vorschrift TP BE-PCC 1990 durchgeführt. Als Beurteilungskriterium dienten die Biegezug- und Druckfestigkeiten nach 90 Tagen der in gesättigter Calciumhydroxidlösung (Lagerung A) gelagerten Mörtelprismen im Vergleich zu denen der Referenzserie (Lagerung B), die bis zum 7. Tag nach der Herstellung unter Wasser (20 °C) und bis zum 90. Tag im Klima 23 °C/50 % r. L. lagerten. Um hinsichtlich der Verseifbarkeit des Kunststoffzusatzes besonders ungünstige Verhältnisse zu schaffen, wurde für die Prüfungen ein Zement CEM I 42.5 R aus dem Werk D mit einem hohen Alkaligehalt verwendet.

### **2.4 Frischbetonuntersuchungen**

Zuschlag, Bindemittel und gegebenenfalls fester Zusatzstoff wurden in einem Zwangsmischer der Firma Zyklos vorgemischt. Anschließend wurde das Zugabewasser bzw. die Kunststoffdispersion bei laufendem Mischer zugegeben. Die Mischdauer betrug 2 Minuten.

#### **2.4.1 Wasser/Zement-Wert und Wasseranspruch**

Die erforderliche Menge an Zugabewasser zur Einstellung der gewünschten Frischbetonkonsistenz wurde anhand des Verdichtungsmaßes  $v$  nach DIN 1048 Teil 1 ermittelt. In einzelnen Fällen erfolgte zusätzlich die Bestimmung des Ausbreitmaßes.

Die verschiedenen Konsistenzbereiche der Frischbetone sind in Tabelle 2-3 zusammengestellt.

Tabelle 2-3. Konsistenzbereiche

Frischbetoneigenschaft	KS	KP	KR	KF
	steif	plastisch	weich	fließfähig
Verdichtungsmaß $v$	$\geq 1.20$	1.19 ... 1.08	1.07 ... 1.02	
Ausbreitmaß $a$ in cm		35 ... 41	42 ... 48	49 ... 60

### 2.4.2 Verarbeitbarkeit

Um die Verarbeitbarkeitsdauer der Frischbetone zu überprüfen, wurden unmittelbar nach der Herstellung sowie nach 30 und 60 Minuten das Verdichtungsmaß bzw. das Ausbreitmaß bestimmt. Vor jeder Probennahme wurde der Beton erneut 15 Sekunden aufgemischt.

### 2.4.3 Frischbetontemperatur

Die Temperatur des Frischbetons wurde nach DIN 1048 Teil 1 gemessen.

### 2.4.4 Frischbetonrohichte

Die Rohdichte des Frischbetons  $\rho$  wurde im 8-l-Topf des Luftgehalt-Prüfgerätes nach vorheriger Verdichtung mit dem Rütteltisch gemäß DIN 1048 Teil 1 bestimmt.

### 2.4.5 Luftgehalt

Der Luftgehalt  $p$  wurde vom verdichteten Frischbeton laut DIN 1048 Teil 1 (Druckausgleichverfahren) ermittelt.

## 2.5 Festbetonuntersuchungen

Der Frischbeton wurde in die entsprechenden Formen gefüllt und 40 Sekunden auf einem Rütteltisch verdichtet.

### 2.5.1 Mechanische Kennwerte

Um die Festigkeiten zu bestimmen wurden, wenn nicht anders angegeben, Betonwürfel mit einer Kantenlänge von 100 mm verwendet, beim Dränbeton betrug die Kantenlänge 150 mm.

#### 2.5.1.1 Dynamischer Elastizitätsmodul

Die Prüfung des dynamischen Elastizitätsmoduls  $E_{dyn}$  erfolgte mittels Impulslaufzeitmessung (Schalllaufzeit) nach KNÖFEL 1993, Methode A4 M.

#### 2.5.1.2 Statischer Elastizitätsmodul

Der statische Elastizitätsmodul  $E_{stat}$  wird laut DIN 1048 Teil 5 als Sehnenmodul, d. h. dem Verhältnis zwischen einer Druckspannungsdifferenz und der ihr zugehörigen elastischen Verformung definiert. Die Durchführung erfolgte mit einer Prüfpresse der Firma Losenhausenwerk. Zur Messung der Längenänderung des Probekörpers dienten zwei Dehnungsmeßstreifen der Firma Hottinger Baldwin Meßtechnik. Die Druckflächen der Probekörper wurden vor der Prüfung mit einer Abgleichschicht aus Mörtel versehen.

#### 2.5.1.3 Biegezugfestigkeit

Die Prüfung der Biegezugfestigkeit  $\beta_{BZ}$  erfolgte nach DIN 1048 Teil 5 durch Aufbringen einer Einzellast in der Probekörpermitte mit einer Prüfpresse der Firma Chemisches Labor für Tonindustrie. Es wurden Betonbalken mit den Abmessungen 150 mm · 150 mm · 700 mm eingesetzt.

### **2.5.1.4 Druckfestigkeit**

Die Druckfestigkeit  $\beta_D$  wurde gemäß DIN 1048 Teil 5 mit einer Prüfpresse der Firma Losenhausenwerk bestimmt.

### **2.5.1.5 Spaltzugfestigkeit**

Die Spaltzugfestigkeit  $\beta_{SZ}$  beschreibt nach DIN 1048 Teil 5 die Zugspannung, die sich beim Versagen eines auf Spalten beanspruchten Körpers in der Belastungsebene ergibt. Die Last wurde über Lastverteilungstreifen als Streifenlast mit einer Prüfpresse der Firma Losenhausenwerk ausgeübt. Als Probekörper dienten Reststücke der Biegezugfestigkeitsprüfung.

## **2.5.2 Hygrische Kennwerte**

### **2.5.2.1 Wasserundurchlässigkeit**

Die Wasserundurchlässigkeit der Betone wurde nach DIN 1048 Teil 5 an plattenförmigen Probekörpern (200 mm · 200 mm · 120 mm) geprüft. Auf eine aufgerauhte, runde Fläche (Durchmesser 100 mm) in der Mitte der Betonplatte wirkte 72 Stunden ein konstanter Wasserdruck von 5 bar. Anschließend wurden die Prüfkörper sofort gespalten und die Wassereindringtiefe mit einer Schieblehre auf 0.1 mm ausgemessen.

### **2.5.2.2 Quellen und Schwinden**

Die Durchführung erfolgte analog zu dem in Punkt 2.3.2.1 beschriebenen Verfahren an Betonwürfeln mit einer Kantenlänge von 150 mm.

## 2.5.3 Untersuchung der Widerstandsfähigkeit

### 2.5.3.1 Eindringverhalten organischer Flüssigkeiten

▪ *Bestimmung der Eindringmenge und Eindringtiefe von organischen Lösungsmitteln*  
Um eine Aussage über die Dichtigkeit des Betons machen zu können, wurden in Anlehnung an eine Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton einachsiale Eindringversuche mit organischen Lösungsmitteln aus verschiedenen chemischen Hauptgruppen, Diesel, Toluol, Dichlormethan, durchgeführt (PASCHMANN 1995a). Die physikalischen Kennwerte der Prüf Flüssigkeiten bei 20 °C sind in Tabelle 8-34 im Anhang zusammengestellt.

Die als Probekörper verwendeten Bohrkerne mit 150 mm Höhe und 80 mm Durchmesser, wurden im Alter von 7 Tagen aus Balken (150 mm · 80 mm · 700 mm) gewonnen. Die Balken lagerten unter Wasser bei 20 °C, die Bohrkerne für weitere 49 Tage im Klima 20/65. Anschließend wurden auf der Betonoberseite der Bohrkerne Glastrichter mit Standrohr fixiert und die Mantelflächen der Bohrkerne mit Epoxidkleber abgedichtet. Nach dessen Aushärtung wurde das Standrohr mit der Prüf Flüssigkeit bis 400 mm über der Probenoberfläche gefüllt und mit Metallfolie dicht verschlossen. Die Beaufschlagungsdauer belief sich abweichend von der Prüfvorschrift, die eine Prüfdauer von 3 Tagen vorsieht, auf 7 Tage. Versuchsweise wurden einige Probekörper auch über einen längeren Zeitraum beaufschlagt. Anhand des sinkenden Flüssigkeitsspiegels im Standrohr wurde der zeitliche Verlauf des Eindringens an jeweils drei Prüfkörpern verfolgt. Der Verdunstungsverlust der Prüf Flüssigkeit wurde in einer gleichartigen Prüfvorrichtung ohne Betonprobe bestimmt und entsprechend abgezogen. Nach der Prüfdauer wurden die Bohrkerne parallel zur Längsachse gespalten und sofort die Eindringtiefe der Flüssigkeit an 3 Stellen der Eindringfront mit einer Schieblehre auf 0.1 mm ausgemessen. Die Prüfvorrichtung ist in Abbildung 2-1 dargestellt.

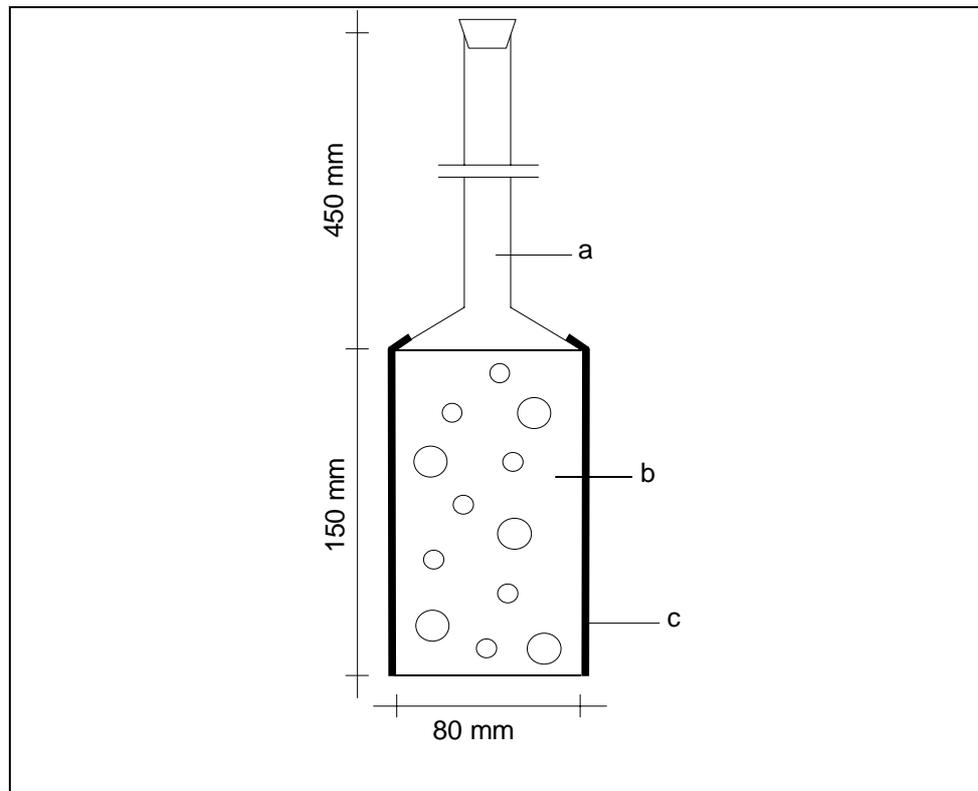


Abbildung 2-1. Prüfvorrichtung für das kapillare Eindringen von Flüssigkeiten in Beton. - a Prüfflüssigkeit; b Bohrkern; c Epoxidkleber (nach PASCHMANN 1995a)

Das Eindringen von inerten Flüssigkeiten in den Beton folgt einem  $\sqrt{t}$ -Gesetz. Zwischen der Eindringmenge  $E_t$  und der Dauer der Beaufschlagung  $t$  besteht folgender Zusammenhang (PASCHMANN 1995a):

$$E_t = A + B \cdot \sqrt{t} \quad (2.3)$$

$E_t$  : Eindringmenge in der Zeit  $t$  in  $l/m^2$

$A$  : Koeffizient in  $l/m^2$ , nicht zu erfassende Flüssigkeitsmenge direkt nach dem Einfüllen der Flüssigkeit und der Null-Ablesung

$B$  : Eindringkoeffizient in  $l/(m^2 \cdot h^{0.5})$

$t$  : Zeit in h

▪ *Bestimmung der Schädigungstiefe von organischen Säuren*

Bei diesem Prüfverfahren wird die Dicke der Betonschicht bestimmt, die von einer Säure während einer festgelegten Beaufschlagungsdauer zerstört wird (PASCHMANN 1995a). Zur Prüfung wurden Bohrkern (Höhe 150 mm, Durchmesser 80 mm) wie

zuvor beschrieben, hergestellt und gelagert. Nach 56 Tagen wurden die Prüfkörper bei 20 °C für einen Zeitraum von 72 Stunden vollständig in die Säure eingetaucht. Ein Magnetrührer bewegte die Lösung um Konzentrationsunterschiede zu vermeiden. Anschließend wurden die Bohrkern mit Wasser abgespült, an beiden Enden Kappen von 30 mm Dicke abgesägt und gespalten. An ihnen wurde die Schädigungstiefe mittels einer Schieblehre bestimmt. Als Referenz wurden gleichartige Prüfkörper in Wasser gelagert. Eine Darstellung des Versuchsaufbaus befindet sich in Abbildung 2-2.

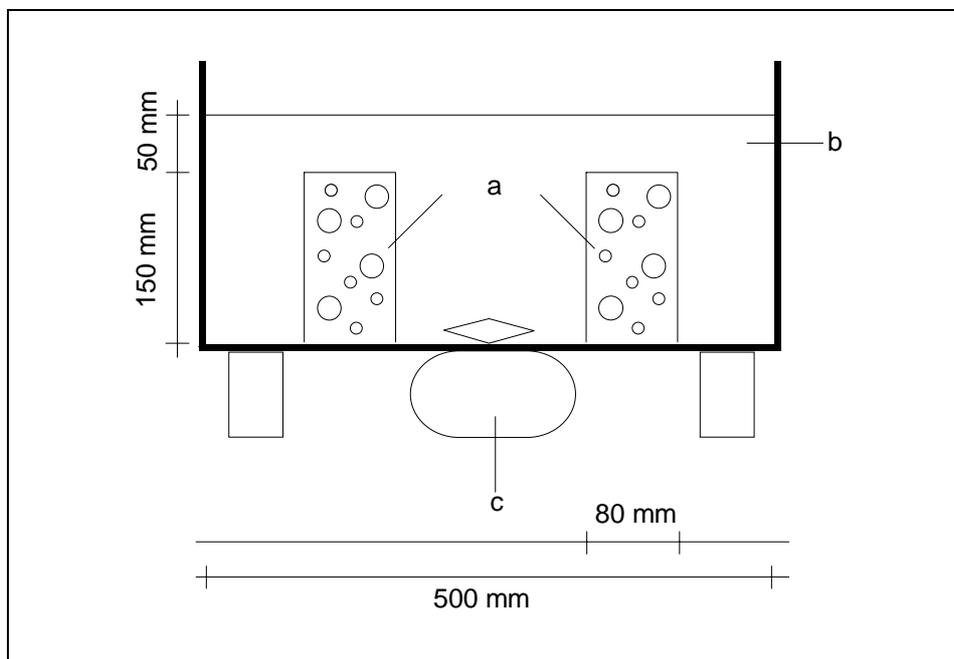


Abbildung 2-2. Prüfvorrichtung für den lösenden Angriff von Säuren. - a Prüfflüssigkeit; b Bohrkern; c Magnetrührer (nach PASCHMANN 1995a)

### 2.5.3.2 Verschleißwiderstand

Der Verschleißwiderstand ausgewählter Betone wurde nach DIN 52 108 mit einem Verschleißprüfgerät nach Böhme (Firma Chemisches Labor für Tonindustrie) geprüft. Beurteilt wurde der Abschleifverlust sowie der mittlere Dickenverlust der Betonwürfel (Kantenlänge 70 mm).

### 2.5.3.3 Frost-Tausalz-Widerstand

Zur Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes wurde das VDZ-Würfel-Eintauchverfahren angewendet. Die Durchführung erfolgte analog wie in 2.3.4.1 beschrieben mit Prüfkörpern der Abmessung 100 mm · 100 mm · 100 mm. Exemplarisch wurde als weitere Prüfmethode das CDF-Verfahren (Capillary suction of De-icing solution and Freeze thaw test) eingesetzt. Dieses Verfahren ermittelt die Abwitterungsmenge von einer Oberfläche durch eine Anzahl definierter Frost-Tau-Wechsel in Gegenwart von Tausalzlösung (3 %ige Natriumchloridlösung) (SETZER 1994).

Die Betonwürfel mit einer Kantenlänge von 150 mm lagerten nach dem Entschalen bis zum 7. Tag unter Wasser bei 20 °C und verblieben bis zum 28. Tag im Klima 20/65. In dieser Zeit wurden die Probekörper senkrecht zur Herstellungsrichtung halbiert. Zwei Tage vor Beendigung der Trockenlagerung wurden die Seitenflächen mit einem lösungsmittelfreien Epoxidharz abgedichtet. Anschließend erfolgte 7 Tage eine Vorsättigung mit 3 %iger Natriumchloridlösung bei 20 °C. Der Frost-Tau-Wechsel der Prüfkörper wurde in einem 12-Stunden-Zyklus mit einem CDF-Frostautomaten durchgeführt (vgl. Abbildung 2-3).

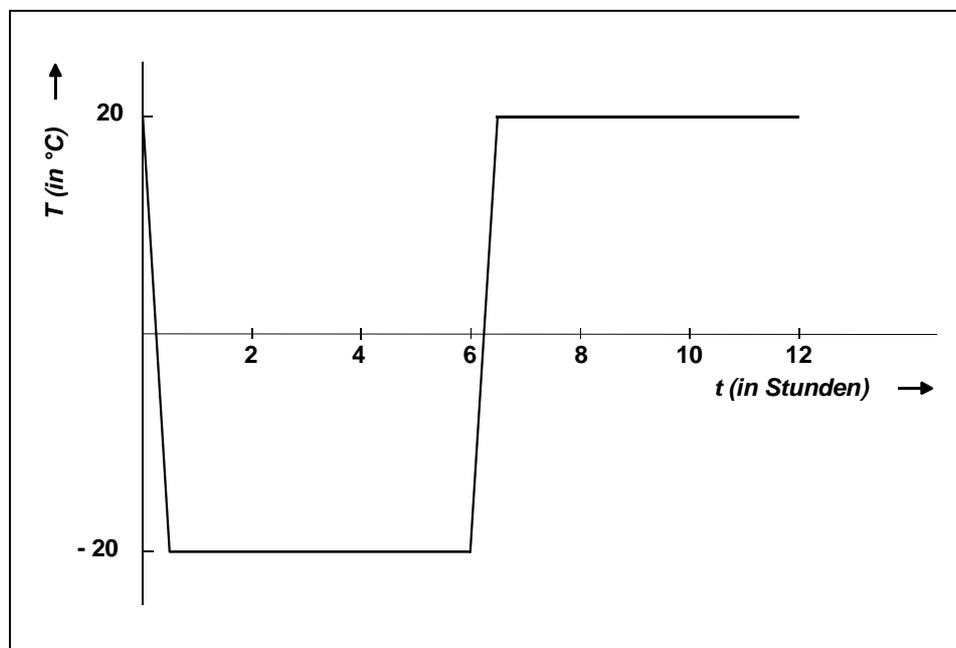


Abbildung 2-3. Temperaturzyklus eines Frost-Tau-Wechsels

Nach jeweils 4, 14 und 28 Frost-Tau-Wechseln wurden, die an der Beanspruchungsfläche aufgetretenen Abwitterungen bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und gewogen.

#### **2.5.4 Hohlraumgehalt**

Die Bestimmung des Hohlraumgehaltes von Dränbeton basierte auf dem physikalischen Prinzip der Wasserverdrängung. Der Probekörper wurde in ein Gefäß gegeben, daß mit einer definierten Wassermenge gefüllt war. Die Masse des verdrängten Wassers gab den Hohlraumgehalt des Prüfkörpers an.



Nachfolgende Abbildung 3-1 zeigt charakteristische Umsetzungen der Isocyanate.

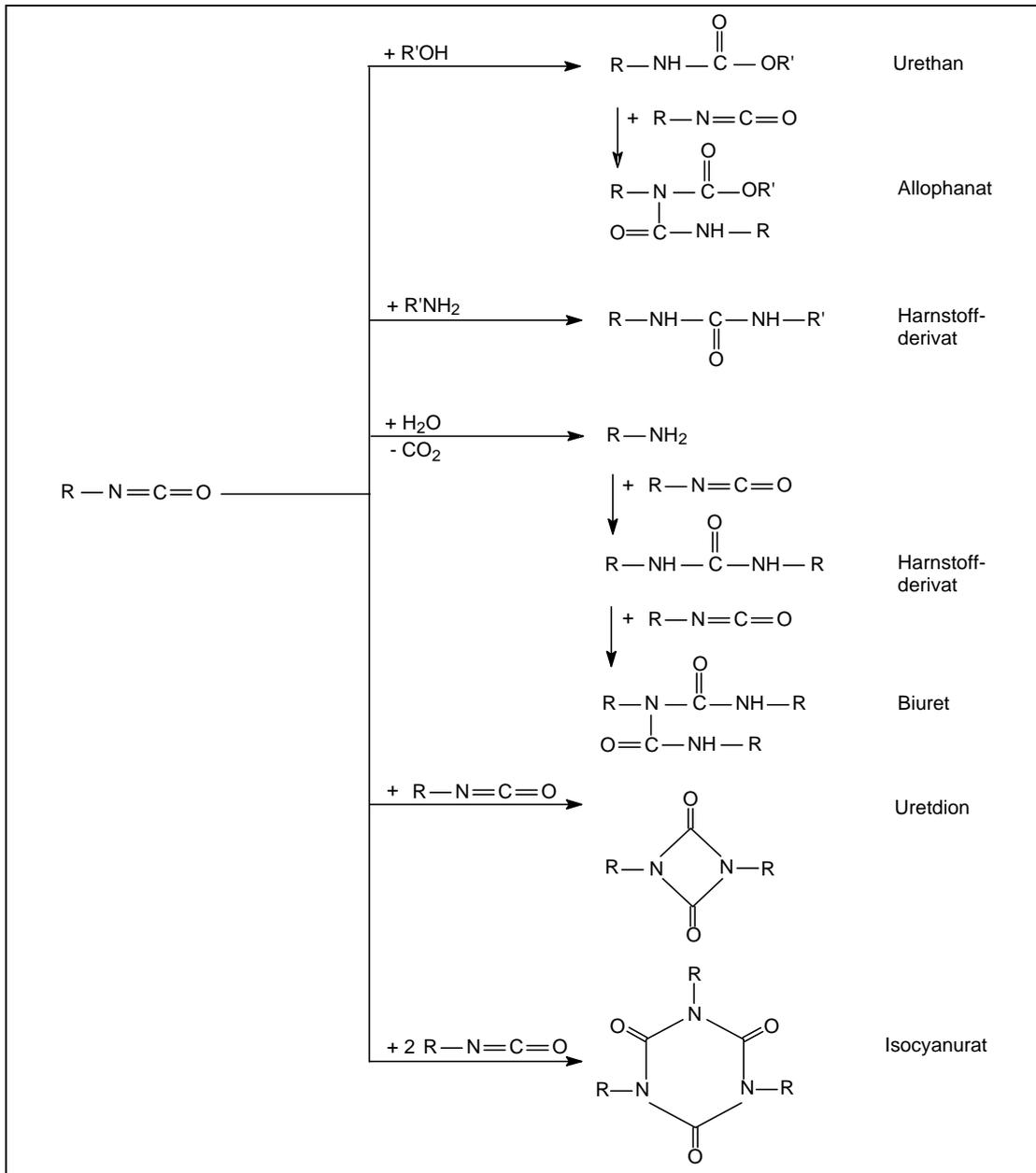
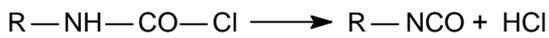
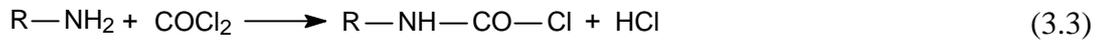


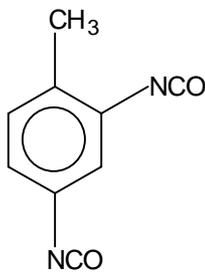
Abbildung 3-1. Typische Additionsreaktionen der Isocyanate

Die technisch am häufigsten verwendete Methode zur Produktion von Isocyanaten ist die Phosgenierung, d. h. die Umsetzung des entsprechenden Amins mit Phosgen. Im ersten Schritt (Kaltphosgenierung) erfolgt die Acylierung zum Carbaminsäurechlorid,

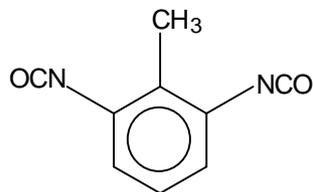
im zweiten (Heiphosgenierung) dessen Spaltung in Hydrogenchlorid und Isocyanat (SCHAUERTE 1994).



Unter den aromatischen Isocyanaten kommt dem vom Toluol abgeleiteten Diisocyanat (TDI) die größte Bedeutung zu. In der Regel handelt es sich dabei um ein Isomergemisch im Verhältnis 80:20 aus dem 2.4- und 2.6-Diisocyanat (WIRPSZA 1994).



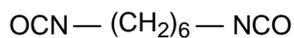
2.4-Toluyldiisocyanat (TDI)



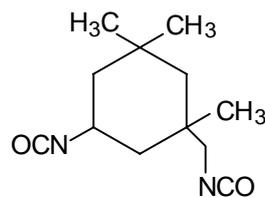
2.6-Toluyldiisocyanat (TDI)

(3.4)

Die wichtigsten handelsüblichen aliphatischen bzw. cycloaliphatischen Polyisocyanate leiten sich von den nachfolgend dargestellten Diisocyanaten ab.

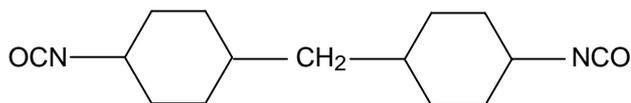


1.6-Diisocyanatohexan (HDI)



1-Isocyanato-3.3.5-trimethyl-5-isocyanatomethylcyclohexan (IPDI)

(3.5)

4.4'-Diisocyanato-dicyclohexylmethan (H<sub>12</sub>MDI)

Monomere Diisocyanate mit niedrigem Molekulargewicht weisen zum Teil einen erheblichen Dampfdruck auf und sind als toxisch eingestuft. Deswegen müssen sie mit Hilfe geeigneter Modifizierungsreaktionen in höhermolekulare, weniger flüchtige

Verbindungen umgewandelt werden. Eine Möglichkeit bietet die Dimerisierung oder Trimerisierung mit geeigneten Katalysatoren. Es entstehen Polyisocyanate mit einer Isocyanurat- bzw. Uretdionstruktur (vgl. Abbildung 3.1). In der Praxis bilden sich aber nicht nur die dargestellten Verbindungen, sondern man erhält eine Oligomerenmischung, die eine Molekulargewichtsverteilung aufweist (LAAS 1994). Begründen läßt sich das dadurch, daß die Reaktionsprodukte wiederum mit überschüssigem Diisocyanat weiterreagieren. So können hochmolekulare, hochvernetzte Produkte entstehen. Um das zu verhindern, wird die Reaktion nach einer bestimmten Zeit abgebrochen und nicht umgesetztes Diisocyanat z. B. durch Dünnschichtdestillation abgetrennt. Die Umsetzung von drei Diisocyanatmolekülen mit einem Molekül Wasser zu einem Biuret oder von 2 Diisocyanatmolekülen mit einem Molekül eines Alkohols zum Allophanat stellen weitere Möglichkeiten dar, die flüchtigen Ausgangsverbindungen zu modifizieren (vgl. Abbildung 3.1).

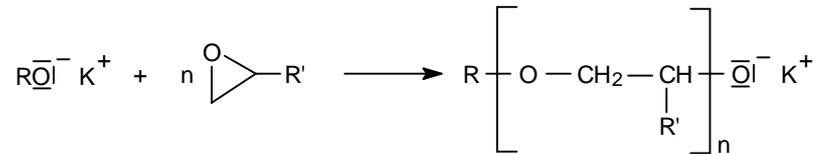
Eine häufig in der Praxis eingesetzte Methode ist die Bildung von sog. Prepolymeren. Dabei reagiert das Diisocyanat mit Polyhydroxylverbindungen in einer Polyadditionsreaktion. Als Reaktionspartner kommen aber auch andere nukleophile Verbindungen mit einem aciden Wasserstoff in Frage wie z. B. Dicarbonsäuren, Diamine, Diphenole oder Wasser. Je nach Mischungsverhältnis der Ausgangsstoffe entstehen NCO- oder OH-Prepolymere d. h. Polymere mit noch nicht abreagierten NCO- bzw. OH-Gruppen.

#### ▪ *Polyole*

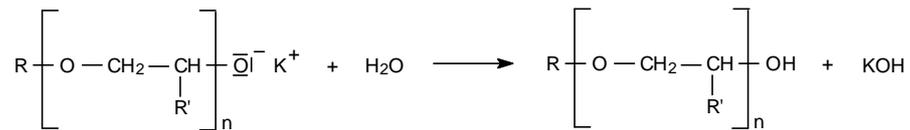
Um eine ausreichende Mischbarkeit der an sich hydrophoben Polyisocyanate mit den wäßrigen Mörteln oder Betonen zu ermöglichen, müssen diese hydrophil modifiziert werden. Eine Möglichkeit zur Hydrophilierung besteht in der Umsetzung der Polyisocyanate mit geeigneten hydrophilen Polyetheralkoholen. Die Herstellung solcher Polyetheralkohole erfolgt im allgemeinen durch Alkoxylierung von Startermolekülen, in der Regel ein- oder mehrwertige Alkohole. Geeignete Alkylenoxide sind Ethylen- bzw. Propylenoxid oder aber Gemische aus beiden (EP 0 850 896 A1). Der Chemismus ist nachfolgend dargestellt (ECHTE 1998).



Wachstum



Abbruch



Die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Polymere basieren bevorzugt auf Polyethylenoxidpolyetheralkoholen ( $\text{R}'=\text{H}$ ), die bekanntlich eine besonders gute Wasserungsverträglichkeit aufweisen.

#### ▪ *Katalysatoren*

Für die Reaktionen der Isocyanate werden sowohl Lewis-Säuren als auch Lewis-Basen als Katalysatoren eingesetzt. Zu den ersteren gehören vor allen Dingen zinnorganische Verbindungen wie Zinndioctoat oder Dibutylzinn-dilaurat, zu den letzteren tertiäre Amine wie Diazabicyclooctan (DABCO<sup>®</sup>) oder Triethylamin. Der Wirkungsmechanismus ist noch nicht vollständig geklärt. Vermutlich erhöht eine Lewis-Säure durch Komplexbildung die partiell positive Ladung des Carbonyl-C-Atoms, eine Lewis-Base die negative Ladung z. B. am O-Atom des nukleophilen Reaktionspartners. Dabei wird davon ausgegangen, daß die Reaktion um so schneller verläuft, je polarer die zwei miteinander reagierenden Zentren sind (DIETERICH 1987).

### 3.2 Auswahl der Polymere

In einer Screening-Phase wurden gezielt Polymere auf Polyetherpolyurethanbasis als Fließmittel für Mörtel bzw. Betone entwickelt. Durch Variation von Art und Menge der eingesetzten Ausgangskomponenten wurden bei verschiedenen Reaktionsbedingungen Produkte mit unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung und damit unterschiedlichem Hydrophilierungsgrad (= Gehalt an hydrophilen Ethylenoxideinheiten) hergestellt. Die Entwicklung der Polymere fand bei der Fa. Bayer AG statt.

Daraus ergaben sich folgende Stoffgruppen von Polyetherpolyurethanen, die im Mörtel untersucht wurden:

- aromatische Polyisocyanate
- aliphatische, cycloaliphatische und aromatische Diisocyanat-Prepolymere
- Polyisocyanatprepolymere
- Polyisocyanate mit Allophanatstruktur, basierend auf einem aliphatischen oder cycloaliphatischen Diisocyanat
- Isocyanurathaltige Polyisocyanate auf HDI-Basis

Neben praxisgerechten Verarbeitungseigenschaften sollte ein optimiertes Produkt die technischen Anforderungen, die an ein Fließmittel bzw. Betonverflüssiger gestellt werden, erfüllen. Wegen der leichteren Handhabung wurden die Untersuchungen an Mörteln unter standardisierten Bedingungen durchgeführt.

### **3.2.1 Verwendete Materialien**

#### **3.2.1.1 Bindemittel**

Bei dem einheitlich eingesetzten Bindemittel handelte es sich um einen CEM I 42.5 R aus dem Werk B. Die chemische Analyse, Rohdichte und Korngrößenverteilung befinden sich im Anhang in Kapitel 8 in den Tabellen 8-2 und 8-4.

#### **3.2.1.2 Zuschlag**

Die Untersuchungen wurden mit Normsand nach DIN EN 196 durchgeführt, um Einflüsse unterschiedlicher Sieblinien oder Kornzusammensetzungen auszuschließen.

#### **3.2.1.3 Zusatzmittel**

Die Polymere und gegebenenfalls Entschäumer wurden vor der Mörtelherstellung mit einem Rührstab bei 12 000 U/min. im vorgelegten Zugabewasser 30 Sekunden dispergiert. Dabei bildeten sich je nach chemischer Zusammensetzung der Kunststoffe

sehr feinteilige, bläustichige Emulsionen oder aber nahezu klare Lösungen. Die Einsatzmenge des Polymers betrug 2 M.-%, bezogen auf den Bindemittelgehalt, die des Entschäumers maximal 2.5 M.-%, bezogen auf den Polymeranteil. Als Katalysatoren wurden Diazabicyclooctan (DABCO®) und Dibutylzinndilaurat (DBTL) verwendet in einer Konzentration von 0.5 M.-% vom Polymer.

#### **3.2.1.4 Mörtelherstellung und -lagerung**

Die Mörtel wurden auf ein einheitliches Ausbreitmaß von  $(170\pm 50)$  mm eingestellt. Die Verdichtung des Frischmörtels erfolgte gemäß DIN 18 555 Teil 3 nach dem Vibrationsverfahren. Das Entformen der Probekörper, Normmörtel bzw. Zementstein, fand nach deren Erhärtung, in Abhängigkeit vom Polymer, 1 ... 5 Tage nach der Herstellung statt. Anschließend wurden die Probekörper einer Feuchtlagerung unterzogen: bis zum 7. Tag unter Wasser bei 20 °C, bis zum Prüftermin im Klima 23 °C/50 % r. L.

#### **3.2.2 Charakterisierung der Polymere**

Die Polymere lagen als farblose klare bzw. gelblich klare Flüssigkeiten mit Viskositäten (23 °C) von 240 ... 8200 mPa·s vor.

#### **3.2.3 Frischmörteleigenschaften**

Die Ergebnisse der Frischmörteluntersuchungen befinden sich im Anhang in der Tabelle 8-5. Die Frischmörteleigenschaften werden beeinflusst von der chemischen Basis des Polyisocyanats und des Polyethers, dem Grad der Hydrophilierung sowie dem Restgehalt an freien NCO-Gruppen. Bei den Entwicklungsprodukten P2, P4 ... P9, P13 ... 16 und P54 ... 57 handelt es sich um relativ hochviskose, farblose Polymere, in denen u. a. ein aromatisches Polyisocyanat (TDI) eingesetzt wird. Die Mörtel neigen zu Entmischungen ("Bluten") und zur Bildung von Luftporen, die durch Zugabe eines Entschäumers nicht ausreichend kompensiert werden können. Daraus resultieren entsprechend niedrige Rohdichten. Die Masse des abgesonderten Wassers ("Bluten") macht bei dem P2-haltigen Mörtel 19.5 % des Zugabewassers aus, bei der

Null-Mischung 0.3 %. Gegenüber der unmodifizierten Mischung beträgt die Wassereinsparung durch die Polymere maximal 23 %, zum Teil liegt der Bedarf auch über dem der Null-Probe. Aliphatische, cycloaliphatische und aromatische Diisocyanat-Prepolymere, wie sie in P3 sowie P10 ... 12 Verwendung finden, senken den Wasseranspruch der Normmörtel um 2 ... 15 %. Ein Absondern von Zementleim kann nicht beobachtet werden. Ähnlich wie die Diisocyanat-Prepolymere verhalten sich Polyisocyanat-Prepolymere (P25 ... 29).

In einer Untersuchungsreihe werden Polyisocyanate mit einer Allophanatstruktur (P17 ... 24, P30 ... 41) hergestellt, zum einen basierend auf einem aliphatischen Diisocyanat (HDI), zum anderen auf einem cycloaliphatischen Diisocyanat ( $H_{12}$ MDI). Letztgenannte Verbindungen besitzen höhere Viskositäten. Der Grad der Hydrophilierung und die NCO-Funktionalität sind annähernd identisch. Im Mörtel tragen die cycloaliphatischen Verbindungen zu einer deutlichen Erniedrigung der w/z-Werte bei, insbesondere das Polymer P23. Die Wassereinsparung beträgt 30 %. Erhöhte Luftporengehalte oder Entmischungen treten nicht auf. Die verflüssigende Wirkung der aliphatischen Allophanate ist geringer. Die w/z-Werte werden um maximal 20 % gesenkt. Bevorzugt untersucht werden isocyanurathaltige Polyisocyanate auf HDI-Basis (P42 ... 47, P49 ... 53, P58 ... 63, P66 ... 69, P70 ... 78, P87 ... 89, P91 ... 95, P101 ... 113, P120 ... 124, P65, P100), die in der Regel als farblose, mäßigviskose Flüssigkeiten vorliegen, mit einer höheren NCO-Funktionalität als die zuvor beschriebenen Produkte. Der Polyethergehalt und damit der Hydrophilierungsgrad werden systematisch variiert. Die Frischmörteluntersuchungen ergeben, daß ein bestimmter Restgehalt an freien NCO-Gruppen unverzichtbar ist, um eine ausreichende Verflüssigung zu erzielen. Das beweist auch die Untersuchung der Polymere P96 ... 98. Durch Umsetzung mit Monoalkoholen wird bei diesen Produkten die NCO-Funktionalität auf Null herabgesetzt. Diese Mörtel weisen ungefähr den gleichen Wasserbedarf auf wie die Null-Mischung. Mit steigendem NCO-Gehalt wiederum ist eine höhere Neigung zu Entmischungen verbunden. Durch sorgfältige Abstimmung der beiden Parameter Hydrophilierungsgrad und Isocyanatgruppen-Gehalt sondert der Mörtel, modifiziert mit dem Polymer P124, kein Wasser ab, und die Wassereinsparung beträgt verglichen mit der Null-Probe ca. 30 %. Entschäumer wird zu Beginn der Entwicklung getrennt vom Polyetherpolyurethan dem Zugabewasser zugefügt, im weiteren Verlauf erfolgt die Formulierung 1-komponentiger Systeme.

Eine Optimierung der Entschäumerkonzentration findet bei den Produkten P120 ... P123 statt.

### 3.2.4 Festmörteleigenschaften

Die unterschiedlichen Frischmörteleigenschaften, die der Zusatz der Polymere hervorruft, hat direkte Auswirkungen auf die Festmörteleigenschaften. Tendenziell nehmen die Druckfestigkeiten und damit auch die Biegezugfestigkeiten und dynamischen E-Moduln mit abnehmendem w/z-Wert zu. Der Anstieg des E-Moduls bleibt hinter dem der Druckfestigkeiten zurück (vgl. Abbildung 3-2). Die Festigkeiten, die dynamischen E-Moduln sowie die Ausschalzeiten der untersuchten Mörteln sind der Tabelle 8-6 im Anhang zu entnehmen.

Im Hinblick auf eine spätere Anwendung in der Praxis sollten die Anfangsfestigkeiten nicht beeinträchtigt werden. Dies ist nicht bei allen Polymeren gegeben. Die Mörtel sind zum Teil erst nach fünf Tagen entschaltbar. Daraus resultieren niedrige Festigkeiten nach 7 Tagen, insbesondere wenn die w/z-Werte  $\geq 0.40$  betragen. Eine verzögerte Erhärtung tritt bei allen Polymeren auf, die ein aromatisches Polyisocyanat enthalten, ebenso wie bei den Diisocyanat- und Polyisocyanat-Prepolymeren. Uneinheitlich verhalten sich die entwickelten Produkte mit Allophanatstruktur. Sowohl bei den Polymeren auf aliphatischer als auch auf cycloaliphatischer Diisocyanatbasis können verlängerte Ausschalfristen beobachtet werden. Die niedrigeren Wassergehalte der cycloaliphathaltigen Verbindungen führen z. B. bei P19 sowie P23, bei einem gewohnten Abbindeverhalten des Mörtels, zu einer ausgeprägten Erhöhung der 7-Tage-Festigkeiten, 60 % bzw. 65 % über den Werten der Null-Probe. Der Gehalt an freien NCO-Gruppen und der Hydrophilierungsgrad zeigen bei den isocyanurathaltigen Polyisocyanaten auf HDI-Basis gegenläufige Tendenzen bezüglich der Anfangserhärtung. Mit zunehmendem NCO-Anteil wird das Erhärten behindert.

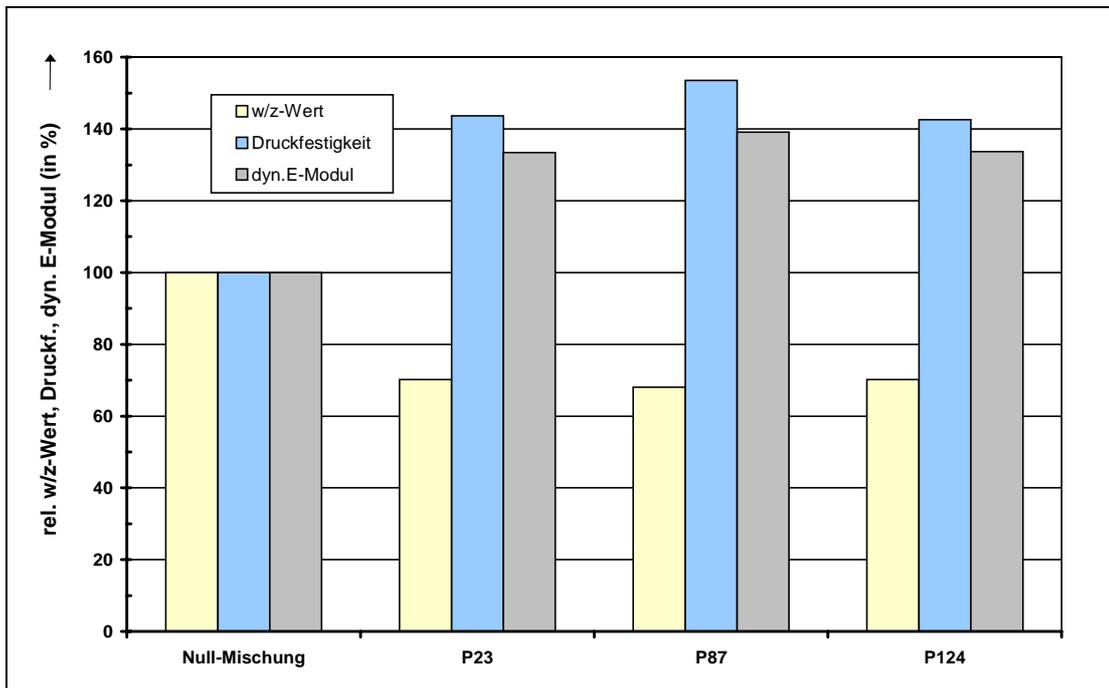


Abbildung 3-2. w/z-Wert, Druckfestigkeit und dynamischer E-Modul nach 28 Tagen ausgewählter modifizierter Mörtel (P23, P87, P124) relativ zur Null-Mischung

Die verzögernde Wirkung des Polymers P1 im Vergleich zu P124 ist sowohl bei der Umsetzung mit Wasser als auch mit Zement (CEM I 42.5 R, Werk B) an den Wärmeentwicklungsraten ablesbar, wie die Abbildungen 3-3 und 3-4 zeigen. Ursache ist der unterschiedliche Grad der Hydrophilierung bei den beiden Polymeren. P1 ist geringer hydrophiliert. Bei der Umsetzung mit Wasser bildet sich Polyharnstoff an der Oberfläche der Polyisocyanatropfen, der die im Inneren befindlichen NCO-Gruppen für eine begrenzte Zeit vor der Reaktion mit Wasser schützt (vgl. Abbildung 3-1). Höher hydrophilierte Produkte besitzen eine größere Grenzfläche zum Wasser und reagieren entsprechend schneller ab. Der Effekt kommt in Kombination mit dem Bindemittel stärker zum Tragen.

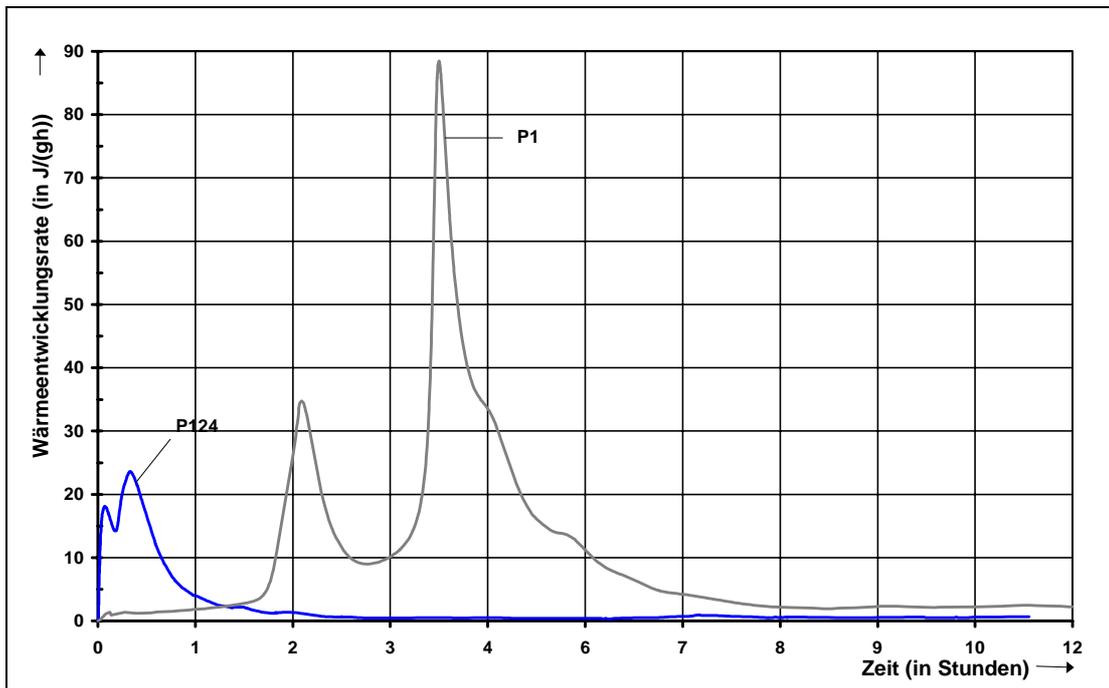


Abbildung 3-3. Wärmeentwicklung der Polymere P1 und P124 bei der Umsetzung mit Wasser

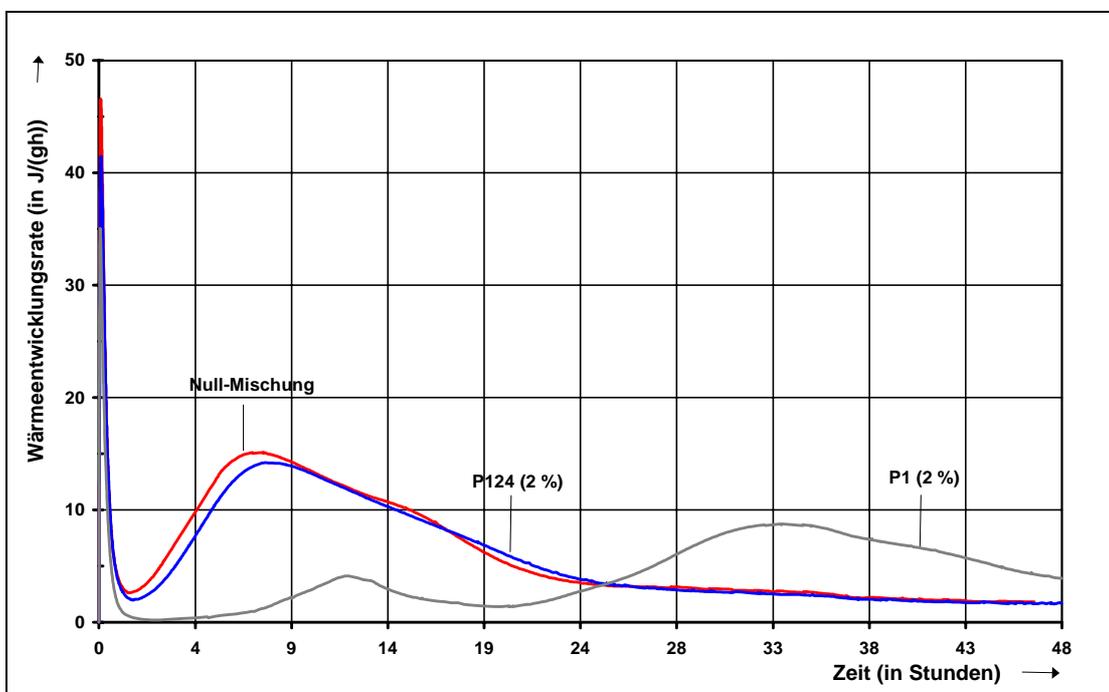


Abbildung 3-4. Wärmeentwicklung der Polymere (2 M.-%) P1 und P124 bei der Umsetzung mit CEM I 42.5 R, Werk B

Ein niedrigerer Wassergehalt der modifizierten Mörtel hat Auswirkungen auf deren Porenradienverteilung, wie Abbildung 3-5 deutlich macht. Die Maxima sind zu kleineren Porenradien hin verschoben und die Kapillarporosität wird erniedrigt.

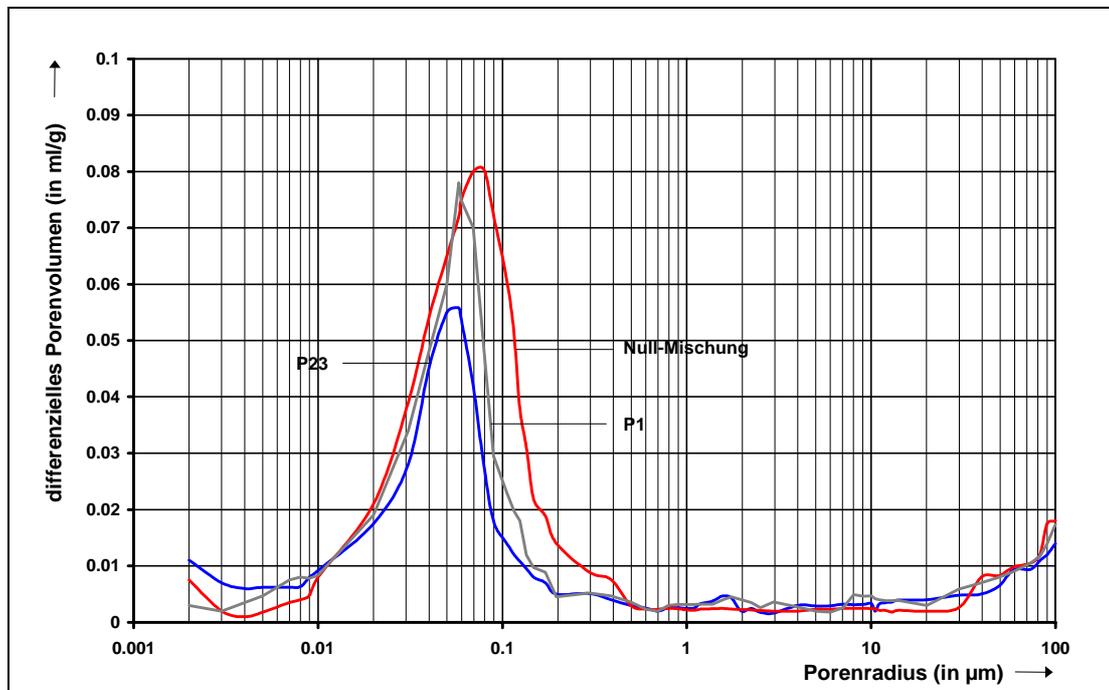


Abbildung 3-5. Porenradienverteilung der Null-Mischung und zweier modifizierter Mörtel (2 M.-% P1 bzw. P23) nach 28 Tagen

Das Polymer bildet im Mörtel eine Art Netzwerk aus, das mit Hydratationsprodukten des Bindemittels belegt ist und sorgt für einen besseren Kontakt zwischen Zementstein und Zuschlag. Im Vergleich zu der Null-Mischung weisen die polymermodifizierten Mörtel eine dichtere Gefügestruktur mit weniger Rissen auf (siehe Abbildungen 3-6 bis 3-9).

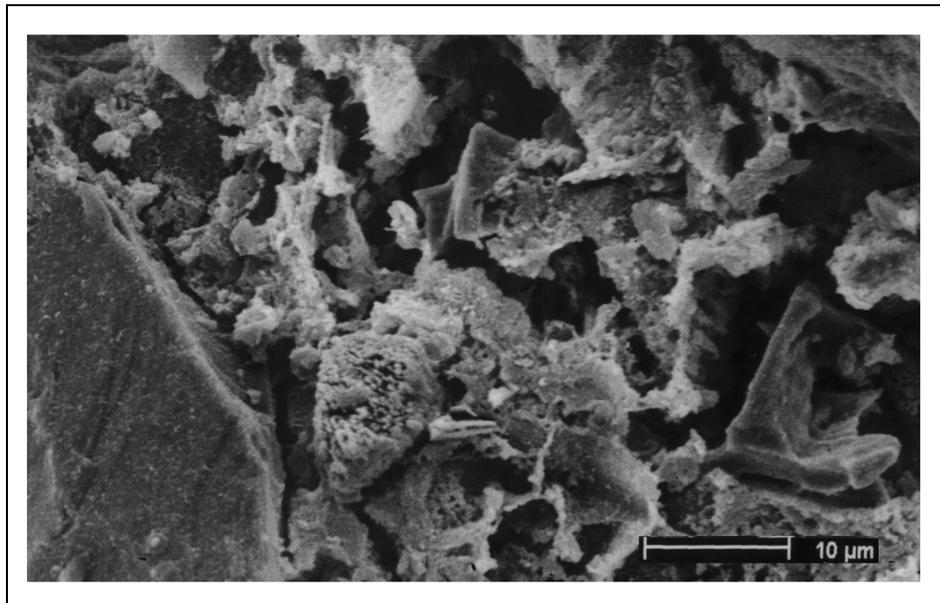


Abbildung 3-6. Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der Null-Mischung im Alter von 28 Tagen. Zu erkennen ist eine locker strukturierte Mörtelmatrix mit einem losen Kontakt zum Zuschlag (s. linker unterer Bildrand)

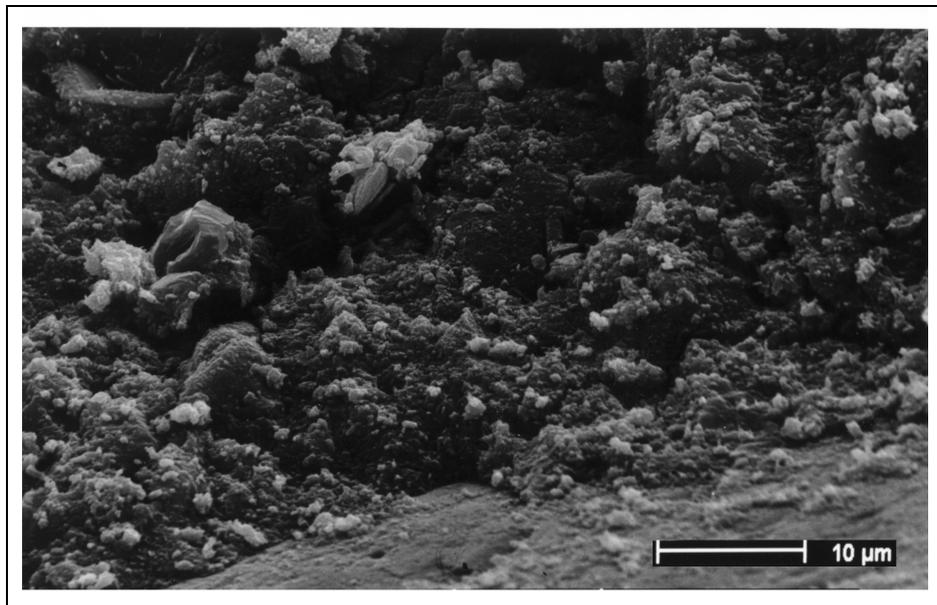


Abbildung 3-7. Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme des mit dem Polymer P124 (2 M.-%) modifizierten Mörtels nach einer Hydratationsdauer von 28 Tagen. Im unteren Bildbereich ist der Übergang zwischen einem Zuschlagskorn und der Bindemittelmatrix zu erkennen.

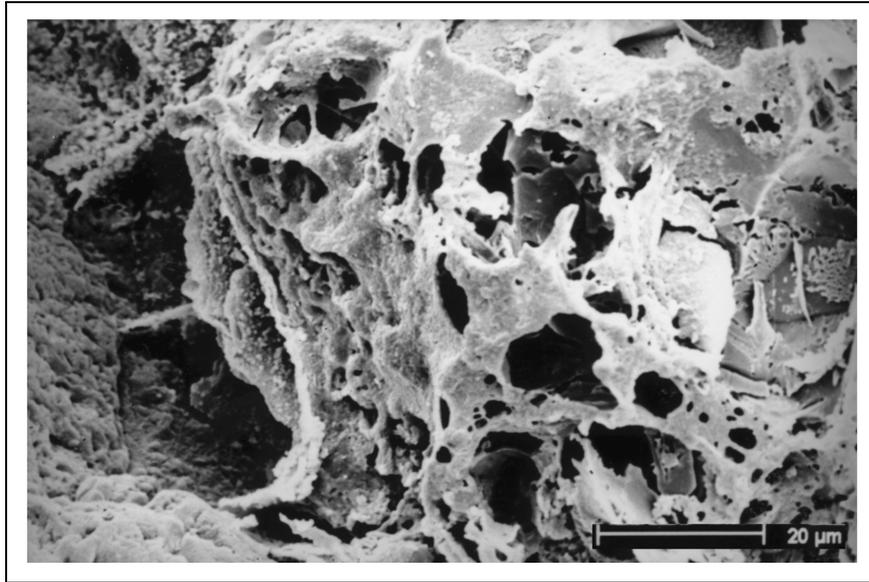


Abbildung 3-8. Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines polymermodifizierten Mörtels (P124, 2 M.-%) im Alter von 28 Tagen. Die Probe wurde 15 s in Salzsäure (1:10) geätzt. Zu erkennen ist ein Polymergerüst um ein Zuschlagskorn.

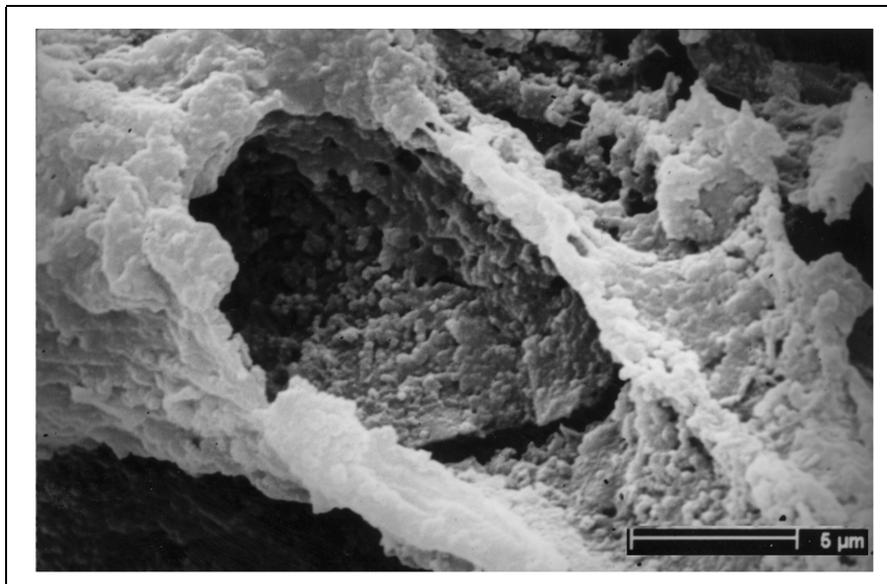


Abbildung 3-9. Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer "Polymerbrücke" zwischen Zementstein und Zuschlag. Die Probe wurde 15 s in Salzsäure (1:10) geätzt.

$^{29}\text{Si}$ -NMR-spektroskopische Untersuchungen einer polymerhaltigen Zementpaste im Vergleich zu einer mit einem handelsüblichen Fließmittel führen zu folgenden Ergebnissen. Im Spektrum des unhydratisierten Zementes ist ein scharfes Signal bei -70.420 ppm und ein weniger ausgeprägtes bei -71.974 ppm zu finden, die auf Alit und Belit zurückzuführen sind. Es handelt sich dabei um  $\text{SiO}_4$ -Monomere ( $\text{Q}^0$ ). Nach eintägiger Hydratation hat sich ein Teil der Ausgangsprodukte zu den entsprechenden Calcium-Silikat-Hydratphasen (C-S-H-Phasen) umgesetzt ( $\text{Q}^1$ , chemische Verschiebung: -76 ... -82 ppm). Im weiteren Hydratationsverlauf nimmt der Vernetzungsgrad der Silicat-Anionen sowie deren Anteil zu. Der Zusatz von 2 M.-% des Polymers P124 bewirkt eine anfängliche Verzögerung der Hydratation, die später kompensiert werden kann. Das Spektrum der Zementpaste mit dem Fließmittel auf Melaminharzbasis weist nach 28 Tagen ein niedrigeres  $\text{Q}^1/\text{Q}^0$ -Verhältnis auf als die Null- bzw. die polymerhaltige Probe. In den Abbildungen 3-10 und 3-11 sind die NMR-Spektren des modifizierten und unmodifizierten Zementsteins im Alter von 1 Tag dargestellt. Die Spektren der übrigen Proben befinden sich im Anhang Kapitel 8 in den Abbildungen 8-1 bis 8-4.

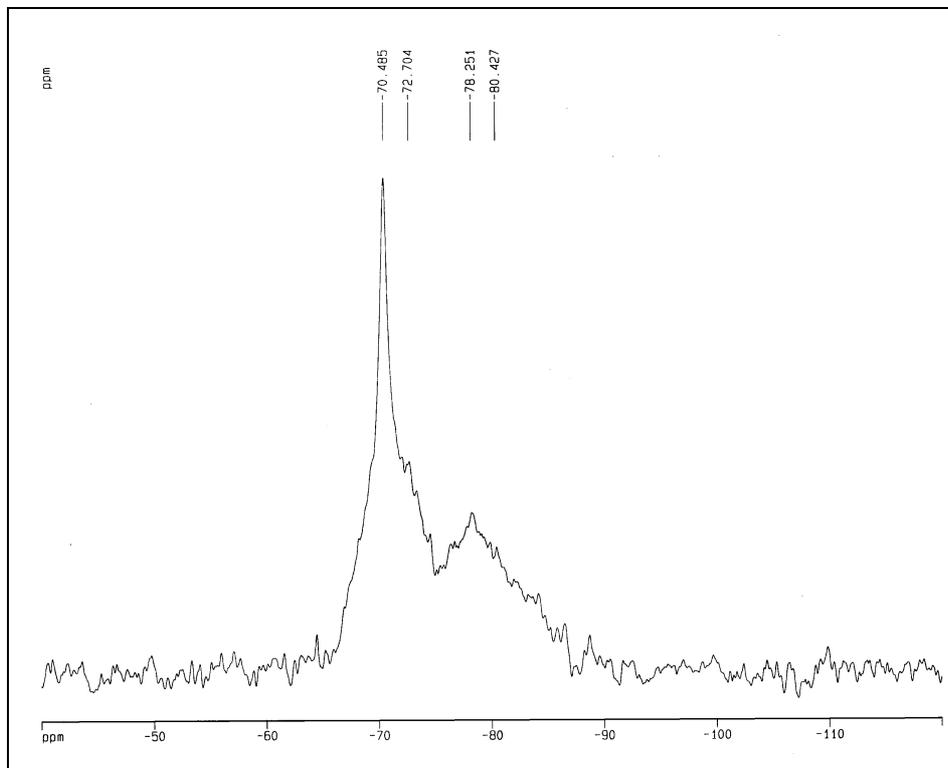


Abbildung 3-10.  $^{29}\text{Si}$ -NMR Spektrum der unmodifizierten Zementpaste (w/z-Wert: 0.50) nach einer Hydratationsdauer von 1 Tag

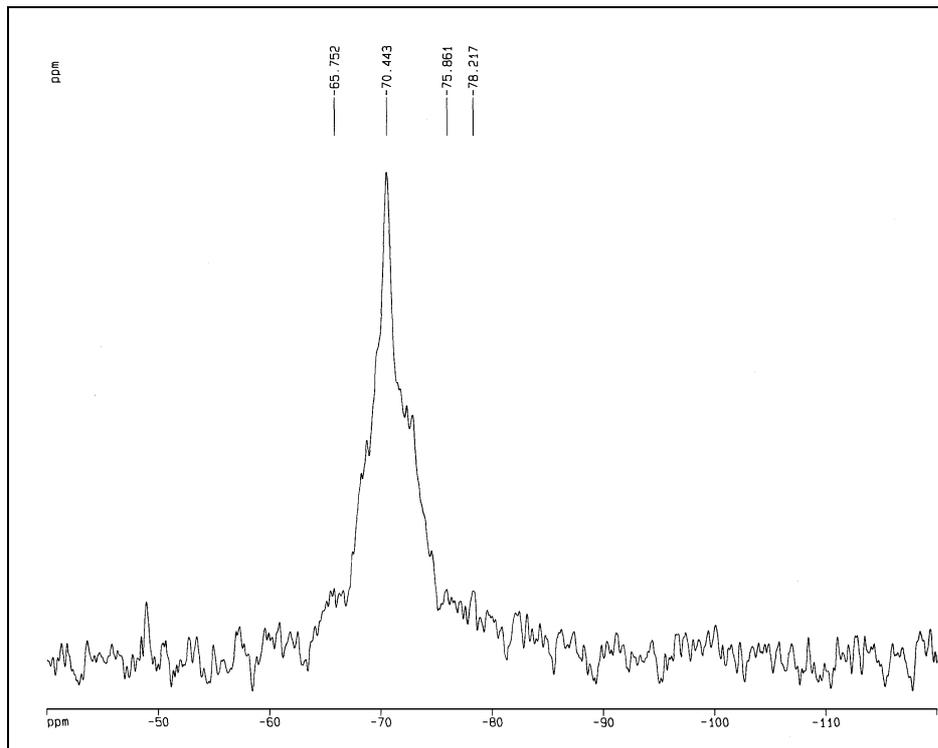


Abbildung 3-11.  $^{29}\text{Si}$ -NMR Spektrum der modifizierten Zementpaste (P124, 2 M.-%, w/z-Wert: 0.50) nach einer Hydratationsdauer von 1 Tag

Thermisch sind die eingesetzten Polyurethane bis ca. 200 °C stabil, oberhalb tritt eine Zersetzung der Urethan-Gruppe ein, die auch im Mörtel bei einer Dosierung von 2 M.-% zu beobachten ist. Dies belegen Differentialthermoanalysen, die in Abbildung 3.12 dargestellt sind.

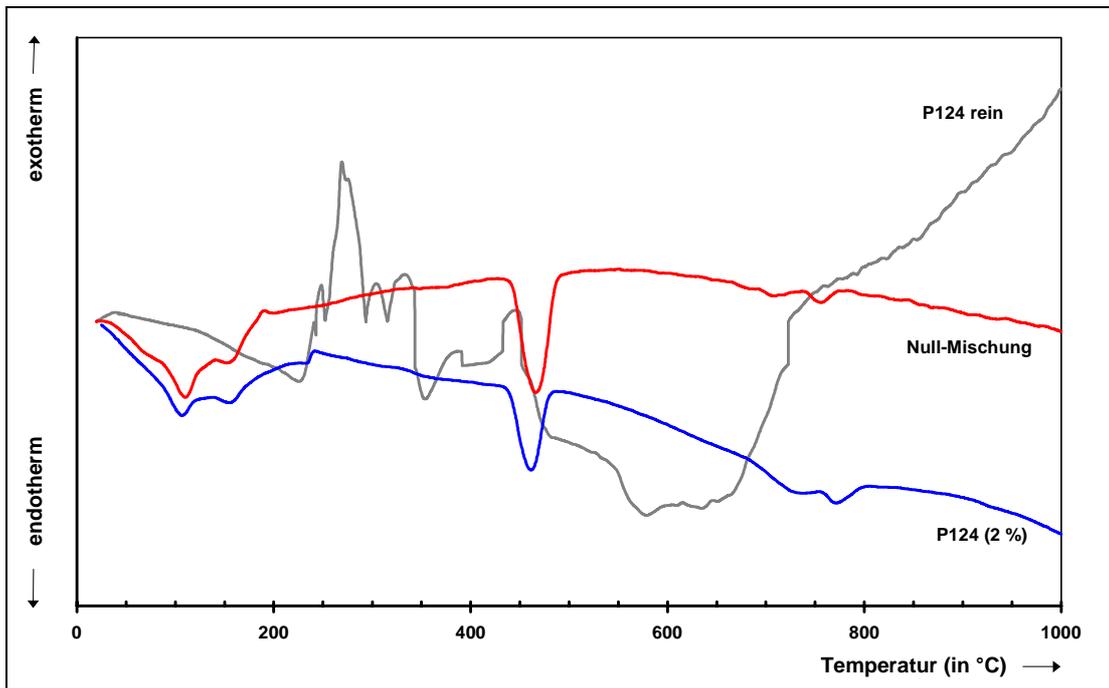


Abbildung 3-12. Differentialthermoanalysen des reinen Polymers P124 sowie des Null-Mörtels und des mit P124 (2 M.-%) modifizierten Mörtels nach 28 Tagen

Die IR-Spektren polymermodifizierter Zementpasten und der entsprechenden Null-Mischungen zeigen keine signifikanten Unterschiede (s. Anhang Abbildungen 8-4 und 8-5). Eine Absorptionsbande im Bereich von  $2360\text{ cm}^{-1}$  ist meßtechnisch bedingt. Im Spektrum des nichthydratisierten Zementes und in den Spektren der verschiedenen Zementleime tritt eine Bande bei  $3641 \dots 3643\text{ cm}^{-1}$  auf, die auf die Valenzschwingung  $\nu$  OH des Calciumhydroxids zurückzuführen ist. Ein breites Signal bei  $3400\text{ cm}^{-1}$  und eine scharfe Bande bei ca.  $1650\text{ cm}^{-1}$  bei den hydratisierten Proben rührt vom Wasser her. Erstere überlagert eine Absorptionsbande des Ettringits (GAO 1999, GHOSH 1980). Am Beispiel des Polymers P42 wird versucht durch die Zugabe von verschiedenen Katalysatoren (Diazabicyclooctan, Dibutylzinndilaurat) zu der Mörtelmischung die längeren Ausschulfristen zu verkürzen. Der gewünschte Effekt ist nicht zu beobachten

### 3.2.5 Verarbeitungseigenschaften

Die Polyetherurethane bewirken ein besseres "Zusammenhaltevermögen" des Frischmörtels, verbunden mit einem höheren Verdichtungsaufwand. Eine Vordispersierung der Polymere im Zugabewasser ist notwendig für deren gleichmäßige Verteilung und damit für die Bildung eines homogenen Polymergerüsts innerhalb der anorganischen Bindemittelmatrix. Dieser Vorgang erfordert nicht zwangsläufig hohe Scherkräfte. Bei niedrigeren Scherkräften muß die Mischdauer entsprechend verlängert werden. Die gebildeten Emulsionen oder Lösungen zeigen bis zu 24 Stunden nach der Herstellung keine Ausfällungen oder Kohlendioxidentwicklung. Ihre verflüssigende Wirkung hält, je nach chemischer Zusammensetzung des Polymers, über einen Zeitraum von 15 ... 24 Stunden an. Der im Gegensatz zu handelsüblichen Fließmitteln erforderliche zusätzliche Mischvorgang erlaubt keine Nachdosierung ohne den Wassergehalt des Mörtels bzw. des Betons zu verändern. In der Praxis z. B. im Transportbetonbereich sind längere Verarbeitungszeiten erwünscht. Dieser Aspekt wird bei der Polymerentwicklung berücksichtigt. Der mit P124 modifizierte Mörtel zeigt 90 Minuten ein annähernd gleichbleibendes Ausbreitmaß. Bei Lagerung der Produkte bei erhöhten Temperaturen (80 °C im Trockenschrank), wie sie beispielsweise im Sommer auf einer Baustelle möglich wären, tritt keine Beeinträchtigung ihrer Wirksamkeit auf.

### 3.2.6 Teilchengrößenverteilung

Die Untersuchung der Teilchengrößenverteilung mit der Ultrazentrifuge am Beispiel einer ca. 10 %igen, wäßrigen Dispersion des Polymers P108 ergibt eine mittlere Teilchengröße von 10.5 nm und eine spezifische Oberfläche von  $8 \cdot 10 \cdot 10^2 \text{ m}^2/\text{g}$ . Die Polymerkonzentration entspricht der im Mörtel bzw. Beton verwendeten. Eine integrale Massenverteilung gibt Tabelle 8-7 im Anhang wieder.

### 3.2.7 Dauerhaftigkeit

Die Ergebnisse zur Untersuchung der Dauerhaftigkeit befinden sich im Anhang in den Tabellen 8-8 bis 8-10. Die Dauerhaftigkeit eines Mörtels bzw. Betons gegen

chemische und chemisch-physikalische Angriffe hängt von seiner Dichtigkeit ab. Der Zusatz von Polymeren führt mit der damit verbundenen Absenkung des Wassergehaltes zu einer Verfeinerung der Porenstruktur. Diese Verdichtung des Porengefüges wirkt sich auf die treibende Wirkung durch Sulfatangriff aus. Die Dehnungen der modifizierten Mörtel waren niedriger als die der Null-Mischung. Durch die stark alkalische Umgebung in zementgebundenen Systemen neigen manche Polymere zur Hydrolyse bzw. Verseifung. Hierdurch tritt eine allmähliche Zerstörung des Mörtels auf, verbunden mit einem Festigkeitsverlust. Die Biegezugfestigkeiten der in gesättigter Calciumhydroxidlösung gelagerten, polyurethanhaltigen Probekörper sind geringfügig niedriger, maximal 9 %, als die der Referenzserie. Bei den handelsüblichen Produkten, die vom Hersteller als verseifungsbeständig eingestuft waren, betragen die Differenzen 25 % bzw. 15 %. Die Druckfestigkeiten werden durch die Lagerung in dem alkalischen Milieu noch erhöht, verbunden mit niedrigeren Volumenänderungen.

Ausblühfähige Salze können keine nachgewiesen werden. Die Alterung der polymerhaltigen Mörtel wird durch künstliche Bestrahlung mit UV-Licht simuliert. Farbveränderungen der Mörtel bzw. der Oberflächenbeschaffenheit treten nicht auf. Eine innere Carbonatisierung, wie sie durch Decarboxylierung bei der Reaktion der Polyetherpolyurethane mit dem Zusatzwasser denkbar gewesen wäre, wird nicht festgestellt.

### 3.3 Zusammenfassung

Die Polymere zeigten in Abhängigkeit von ihrer chemischen Struktur eine unterschiedliche verflüssigende Wirkung sowie eine Verzögerung der Zementhydratation, die in einigen Fällen längere Ausschulfristen der Mörtel zur Folge hatten. Nach Abschluß des Optimierungsprozesses erwies sich unter Berücksichtigung der Herstellungsbedingungen das Polymer P124 als geeignet im Hinblick auf eine spätere Anwendung in der Praxis. Dieser Kunststoff bewirkte neben einer guten Verarbeitbarkeit des Mörtels, eine gute Verflüssigung, die wiederum hohe Festigkeiten zur Folge hatte. Das gleiche galt für das Polymer P23. Neben hohen Festigkeiten spielte die Dichtigkeit eine wichtige Rolle. Die Verschiebung der Porenradien hin zu kleineren Werten hatte einen abdichtenden Effekt. Eine mittlere Teilchengröße des Kunststoffs

---

von 10.5 nm führte dazu, daß feine Zwickel innerhalb des Mörtelgefüges ausgefüllt wurden. Es bildete sich ein mit Hydratationsprodukten des Zementes belegtes Polymergerüst. Bei ca. 200 °C fand die Zersetzung des Polymers statt. Die  $^{29}\text{Si}$ -NMR-Spektroskopie war eine gute Methode Informationen über den Vernetzungsgrad der C-S-H-Phasen und damit über den Hydratationsgrad des Mörtels zu erhalten. In der Anfangsphase wurde die Reaktion des Zementes mit Wasser verzögert, im weiteren Verlauf beschleunigt. Auf Grund der geringen Empfindlichkeit der Meßmethode zeigten die IR-Spektren keine signifikanten Unterschiede im Reaktionsverhalten modifizierter und unmodifizierter Proben.

## 4 Optimierung der Mörtelzusammensetzung

In diesem Untersuchungsabschnitt werden im Hinblick auf eine spätere praktische Anwendung der Polyurethane im Beton Vorversuche an Mörteln bzw. Zementpasten durchgeführt. Zum einen variiert die Zusammensetzung der Mörtel, zum anderen wird die Widerstandsfähigkeit der Mörtel gegenüber chemischen und physikalischen Angriffen geprüft.

In Kapitel 3 konnte gezeigt werden, daß Polymere auf Polyetherpolyurethanbasis prinzipiell als Fließmittel in zementgebundenen Systemen geeignet sind. Im folgenden Abschnitt werden Einflüsse auf die Hydratation und somit auf die mechanischen Eigenschaften polymermodifizierter Mörtel dargestellt, die sich durch die Verwendung von

- Zementen unterschiedlicher Zusammensetzung
- Zusatzstoffen
- verschiedenen Polymerkonzentrationen

ergeben. Die Untersuchungen beginnen im frühen Stadium der Hydratation im noch plastischen Zustand der Mörtel bzw. Zementpasten und erstrecken sich bis zum 28. Tag. An ausgewählten Proben werden Langzeitversuche über einen Zeitraum von drei Monaten durchgeführt.

### 4.1 Verwendete Materialien

#### 4.1.1 Bindemittel

Ausgangsmaterialien für die Herstellung der Mörtel und Zementpasten waren handelsübliche Zemente unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung und Mahlfeinheit sowie selbsthergestellte Zemente bzw. Klinkerphasen. Die Analysen befinden sich im Anhang in den Tabellen 8-2 und 8-4.

Die Klinkerphase Tricalciumaluminat,  $C_3A$ , wurde entsprechend der Reaktionsgleichung



durch Brennen bei 1450 °C (17 h) hergestellt. Die Einwaage des Rohmehls erfolgte über die Berechnung der stöchiometrischen Verhältnisse der Oxide. Nach MACPHEE 1998 besitzt die reine Phase folgende Eigenschaften: der Schmelzpunkt beträgt 1539 °C, die Dichte 3.03 g/cm<sup>3</sup>, die Kristallstruktur ist kubisch. Das Rohmehlgemisch, bestehend aus Kalksteinmehl,  $Al_2O_3$  und  $K_2SO_4$  zur Schmelzpunktserniedrigung (1 % bezogen auf die Gesamtmasse), wurde 1.5 Stunden homogenisiert, in eine Platinschale gegeben und gebrannt. Anschließend wurde die Klinkerphase in einem Backenbrecher vorzerkleinert und in einer Kugelmühle auf eine Mahlfineinheit von  $(4000 \pm 100)$  cm<sup>2</sup>/g aufgemahlen.

Ein Teil des hergestellten Tricalciumaluminats (spez. Oberfläche nach BLAINE:  $(3000 \pm 100)$  cm<sup>2</sup>/g) wurde mit einem Gemisch aus Gips und Anhydrit (1:1) weiter gemahlen (spez. Oberfläche nach BLAINE:  $(4000 \pm 100)$  cm<sup>2</sup>/g). Der Sulfatträgergehalt war so berechnet, daß mit Wasser eine vollständige Umsetzung zu Ettringit erfolgt (vgl. Gleichung 4.2). Die Ausgangsfeinheit von Gips und Anhydrit betrug jeweils  $(3200 \pm 100)$  cm<sup>2</sup>/g.



Zur Herstellung von Portlandzement-Klinker wurden die Rohmaterialien Kalkstein- und Quarzmehl, Kaolin und Eisenoxid ( $Fe_2O_3$ ), falls erforderlich, aufgemahlen ( $< 90 \mu m$ ), in einem Turbula-Mischer (Hersteller Fa. Backofen AG, Typ T2C) zwei Stunden homogenisiert und anschließend granuliert. Die Größe der Granalien lag zwischen 6 und 10 mm. Pro Charge wurden ca. 400 g granuliertes Rohmehl in einer Platinschale bei 1450 °C für 1 Stunde in einem Elektroofen der Fa. Naber, Typ LHT-16/R gebrannt. Die Kühlung erfolgte an der Luft durch Ausschütten und Verteilen der Klinker auf einer feuerfesten Unterlage. Das Material wurde in einem Backenbrecher und einer Scheibenschwingmühle zerkleinert und in einer Kugelmühle zunächst auf eine spezifische Oberfläche von  $(3000 \pm 100)$  cm<sup>2</sup>/g aufgemahlen. Der Freikalkgehalt betrug 0.3 M.-%. Ein Drittel des Klinkermehls wurde mit 20 % Tricalciumaluminat (Spezifische Oberfläche:  $(3000 \pm 100)$  cm<sup>2</sup>/g, siehe oben) sowie 6 %

eines Gemisches aus Gips und Anhydrit (1:1) versetzt, ein weiteres Drittel mit 10 % Tricalciumaluminat und ebenfalls 6 % Sulfatträger und eins mit 0 % Tricalciumaluminat und dem Sulfatgemisch (6 %). Die einzelnen Mischungen wurden zuerst homogenisiert und dann in einer Kugelmühle gemahlen (Spezifische Oberfläche:  $4000\pm 100$ )  $\text{cm}^2/\text{g}$ ). Nach Abschluß der Klinkerherstellung ergaben sich für die weiteren Untersuchungen vier Prüfreiheiten:

- $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$  + 6% Sulfatträger (Gips/Anhydrit: 1:1)
- Klinkermehl + 0 %  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$  + 6 % Sulfatträger (Gips/Anhydrit: 1:1)
- Klinkermehl + 10 %  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$  + 6 % Sulfatträger (Gips/Anhydrit: 1:1)
- Klinkermehl + 20 %  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$  + 6 % Sulfatträger (Gips/Anhydrit: 1:1)

Zur Synthese von Alit, ausgehend von der Zusammensetzung  $\text{Ca}_{50}\text{MgAl}_2\text{Si}_{16}\text{O}_{86}$ , wurden stöchiometrische Mengen an  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{Al}(\text{OH})_3$ ,  $\text{SiO}_2$  und  $\text{MgO}$  (Laborchemikalien,  $< 90 \mu\text{m}$ ) eingewogen, homogenisiert und 5 Stunden bei  $1550 \text{ }^\circ\text{C}$  gebrannt. Anschließend wurde die Klinkerphase zerkleinert und in einer Kugelmühle auf eine Mahlfeinheit von  $4000\pm 100 \text{ cm}^2/\text{g}$  aufgemahlen. Der Gehalt an Freikalk betrug 0.2 M.-%. Der Klinker, sowie die einzelnen Phasen wurden röntgendiffraktometrisch analysiert (siehe Anhang, Abbildungen 8-7 bis 8-9).

### 4.1.2 Zusatzmittel

Für die Untersuchungen wurden ausgewählte Polymere (P1, P2, P23, P42) eingesetzt (vgl. Kapitel 3.2), sowie ein handelsübliches Fließmittel (FM) auf Melaminharzbasis. Die Auswahl der Polymere (vgl. Kapitel 3) und Optimierung der Mörtelzusammensetzung wurden parallel durchgeführt, so daß das Produkt P124 nur zum Teil in die in diesem Kapitel durchgeführten Untersuchungen einbezogen wurde.

### 4.1.3 Zusatzstoffe

Die verwendeten Zusatzstoffe lassen sich in zwei Gruppen einteilen: Puzzolane und Füller (siehe auch Kapitel 1). Zu den ersteren gehörten Mikrosilica (MS), Nanosilica (NS) und Steinkohlenflugasche (SFA), als Füller wurden Glas-(GM), Kalkstein-(KStM) sowie Basaltmehl (BM) eingesetzt. Die Dosierung betrug jeweils 5, 7.5 und

10 M.-%, bezogen auf den Bindemittelgehalt. Eine Ausnahme stellte Nanosilica dar, das nur in einer Konzentration von 5 M.-% eingesetzt wurde. Die Mahlfeinheit der Zusatzstoffe war, mit Ausnahme des Mikro- und Nanosilicas, annähernd gleich. Eine Übersicht über die oxidische Zusammensetzung sowie die Mahlfeinheiten der Zusatzstoffe gibt Tabelle 8-3 im Anhang.

#### **4.1.4 Zuschlag**

Für die Mörtel wurde Normsand gemäß DIN EN 196 verwendet.

### **4.2 Probenherstellung und -lagerung**

Die in Anlehnung an DIN EN 196 Teil 1 bzw. Teil 3 hergestellten Probekörper mit den Abmessungen 40 mm · 40 mm · 160 mm bzw. 15 mm · 15 mm · 60 mm wurden nach ihrer Erhärtung entschalt und bis zum 7. Tag nach der Herstellung unter Wasser bei 20 °C gelagert, anschließend im Klima 23 °C/50 % r. L. Der Wasseranspruch der Mischungen war zuvor über das Ausbreitmaß, (170±50) mm, ermittelt worden. Die Proben lagerten bis zum 7. Tag nach der Herstellung unter Wasser bei 23 °C, bis zum Prüfetermin bei 23 °C und 50 % r. L.

### **4.3 Variation des Bindemittels**

#### **4.3.1 Frischmörteleigenschaften**

Die Polymere P2, P23 und P42 zeigen ein von der Mahlfeinheit des Zementes und dessen Zusammensetzung abhängiges Verhalten, daß sich in der Tendenz nicht von dem der unmodifizierten Proben unterscheidet (siehe Tabelle 8-11 im Anhang). Bei einer spezifischen Oberfläche des Zementes von ca. 4000 cm<sup>2</sup>/g ist der Wasseranspruch der Mörtel am geringsten. Der Ersatz eines Teils des Portlandzementklinkers durch Hüttensand, 17.6 % bei dem CEM II/A-S 42.5 R bzw. 42.2 % bei dem CEM III/A 42.5 R, hat keine Auswirkungen auf die w/z-Werte. In Kombination mit dem Polymer P2 ist lediglich eine Verzögerung der Anfangserhärtung zu beobachten. Ein hoher Alkaligehalt des Zementes läßt den Wasserbedarf ansteigen. Darauf reagieren

die vergüteten Mörtel empfindlicher als die Null-Mischung. Dieses Ergebnis kann durch die Untersuchung der elektrischen Leitfähigkeit von Zementsuspensionen (w/z-Wert: 0.50) bestätigt werden. Abbildung 4-1 zeigt den Einfluß unterschiedlicher Alkaligehalte im Zement auf die Leitfähigkeit in Gegenwart von Polymer (P124, 2 M.-%).

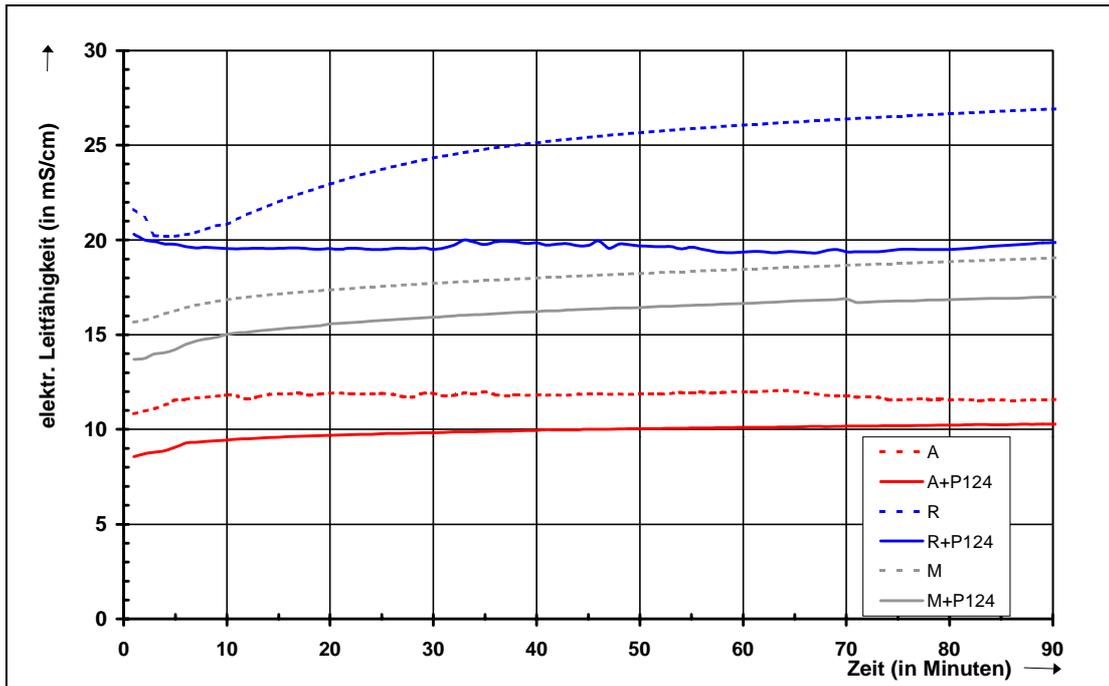


Abbildung 4-1. Einfluß des Alkaligehaltes des Zementes auf die elektrische Leitfähigkeit polymermodifizierter Bindemittelsuspensionen (P124 (2 M.-%), w/z-Wert: 0.50)

A : alkaliarmer Zement, CEM I 42.5 R, Werk C

R : alkalireicher Zement, CEM I 42.5 R, Werk D

M: Zement mit mittlerem Alkaligehalt, CEM I 42.5 R, Werk B

Mit steigendem Alkaligehalt des Zementes nehmen die elektrischen Leitfähigkeiten zu. Der Zusatz von Polymer führt in jedem Fall zu einer Abnahme der Leitfähigkeit, die besonders ausgeprägt ist in Verbindung mit dem alkalireichsten Zement. Das Verhalten des Polymeren in einer Bindemittelsuspension unterscheidet sich von dem in einer gesättigten  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Lösung. Zu Beginn der Messung bleibt die Ionen-Konzentration ca. 5 Minuten konstant, nimmt dann sehr schnell und nach 10 Minuten kontinuierlich ab. Im Gegensatz zu den Polymeren erhöht das melaminharzhaltige Fließmittel die Leitfähigkeit der Zementsuspension (vgl. Abbildung 4-2).

Es wird das Erstarrungsverhalten des Polymers P124 (2 M.-%) in verschiedenen handelsüblichen Zementen untersucht. Zur Einstellung der Konsistenz auf Normsteife werden bei den modifizierten Zementleimen 44 ... 57 % weniger Wasser benötigt als bei den Null-Mischungen. Das Polymer bewirkt eine Verzögerung der Zementhydratation, die in verlängerten Erstarrungszeiten, insbesondere des Erstarrungsbeginns zum Ausdruck kam. Tendenziell sind mit einer zunehmenden Wassereinsparung längere Erstarrungszeiten zu beobachten. Auf die Verzögerung durch den Kunststoff hat der  $C_3A$ -Gehalt des Zementes keinen signifikanten Einfluß (siehe Tabelle 8-12 im Anhang).

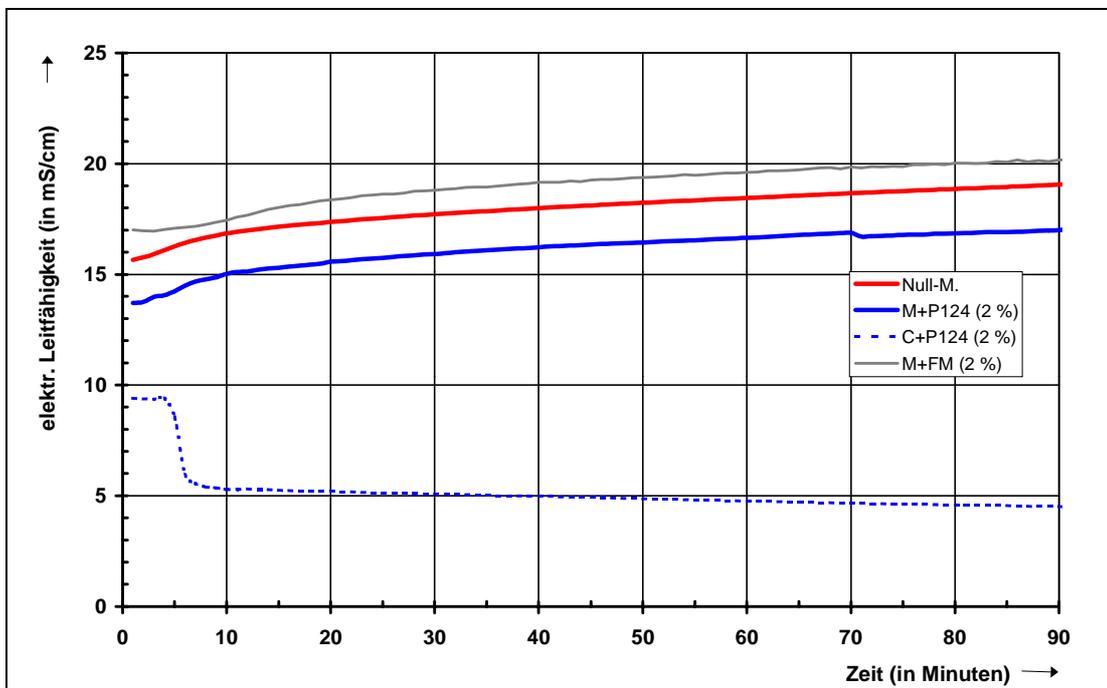


Abbildung 4-2. Elektrische Leitfähigkeit einer mit Fließmittel (2 M.-%) bzw. P124 (2 M.-%) modifizierten Zementsuspension (w/z-Wert: 0.50) gegenüber einer gesättigten, polymerhaltigen  $Ca(OH)_2$ -Lösung (2 M.-%)  
M: Zement mit mittlerem Alkaligehalt, CEM I 42.5 R, Werk B  
C : gesättigte  $Ca(OH)_2$ -Lösung

Kalorimetrische Messungen dokumentieren ebenfalls die verzögernde Wirkung des Polymers auf die Zementhydratation. Wie in Abbildung 4-3 zu erkennen ist, wird die Beschleunigungsphase nach hinten verschoben und die Wärmeentwicklung reduziert. Dieser Effekt ist bei dem alkalireichen Zement stärker ausgeprägt als bei dem alkaliarmeren. Das Polymer (P124) beeinträchtigt in erster Linie die Reaktion des Alits.

Abbildung 4-4 zeigt den Hydratationsverlauf von einem Gemisch aus  $C_3A$  und Sulfatträger sowie Alit mit und ohne Kunststoff.

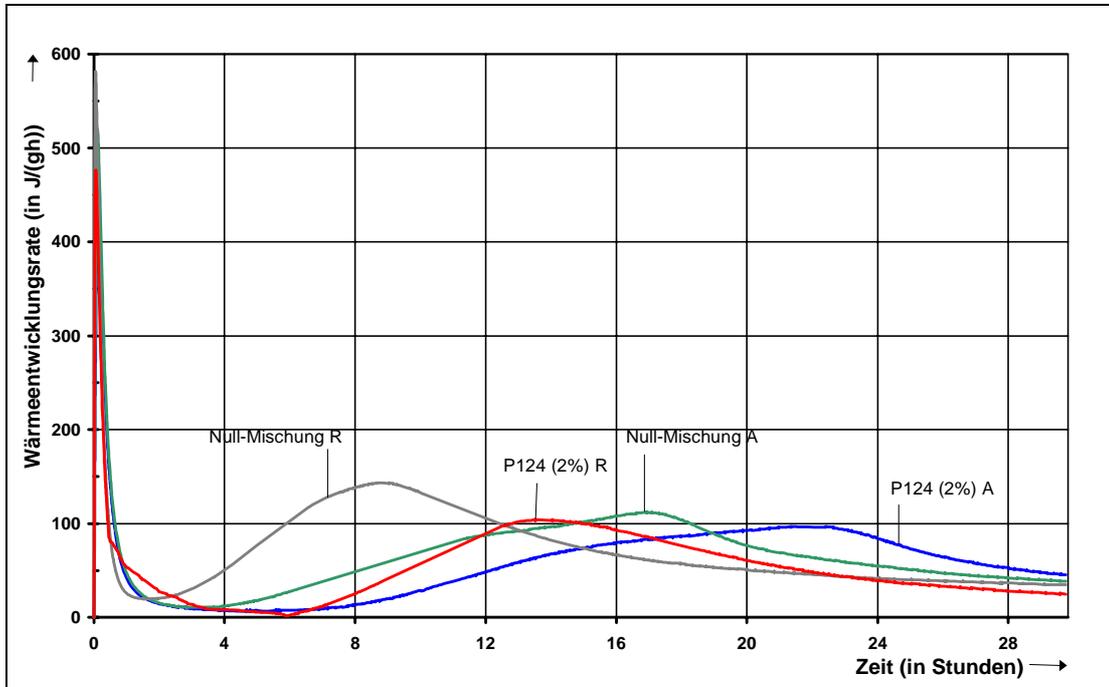


Abbildung 4-3. Hydratationswärmeentwicklung polymermodifizierter Zementpasten ( $w/z$ -Wert: 0.50) in Abhängigkeit vom Alkaligehalt des Zementes  
R: Alkalireicher Zement, CEM I 42.5 R, Werk D  
A: Alkaliarmer Zement, CEM I 42.5 R, Werk C

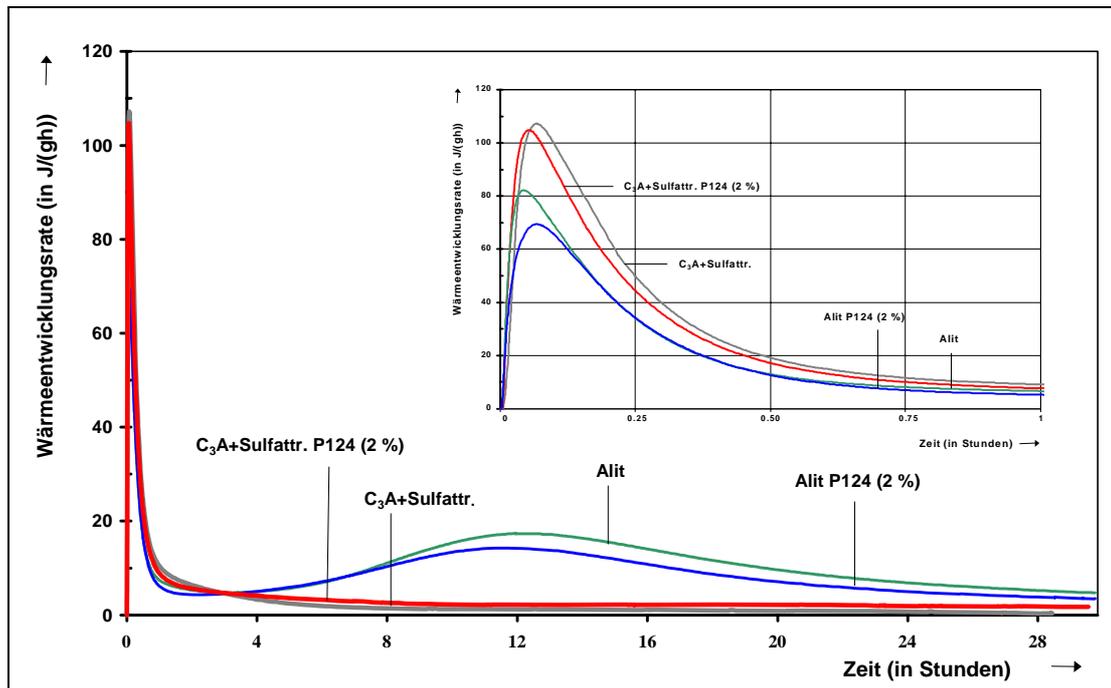


Abbildung 4-4. Einfluß des Polymers P124 (2 M.-%) auf die Hydrationswärmeentwicklung der Klinkerphasen  $C_3A$  + Sulfatträger und Alit (w/z-Wert: 0.50)

Bei verschiedenen Gehalten an Tricalciumaluminat im Zement, 10 und 20 %, ergeben sich die in Abbildung 4-5 dargestellten Hydrationsverläufe.

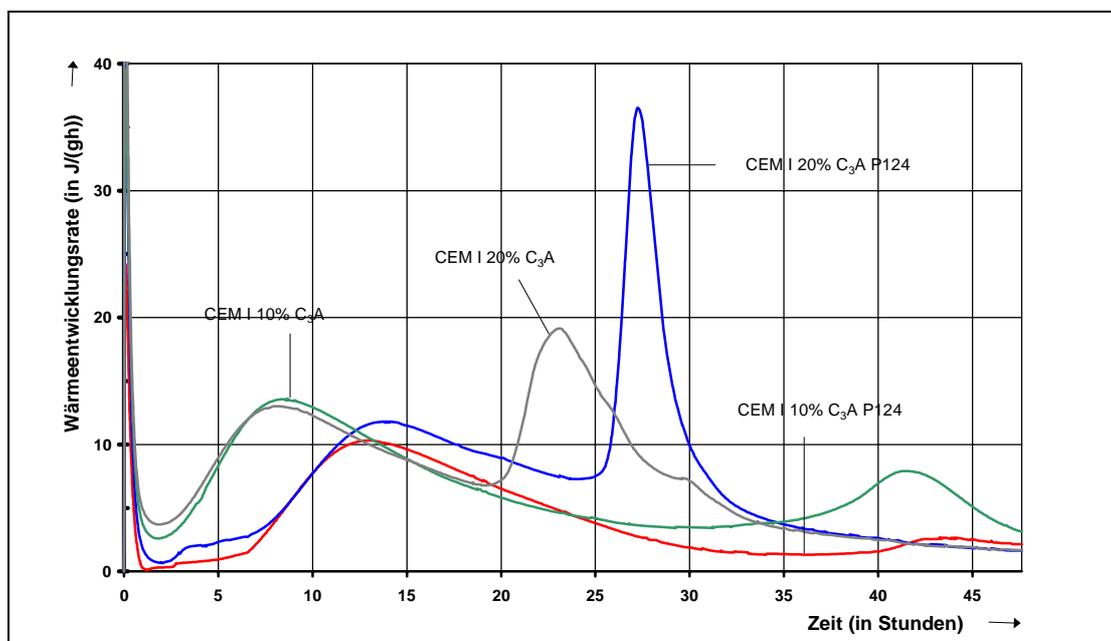


Abbildung 4-5. Hydrationsverlauf polymermodifizierter Zementpasten (w/z-Wert: 0.50) in Abhängigkeit vom  $C_3A$ -Gehalt des Zementes

Der mehr oder weniger ausgeprägte Peak nach dem Beschleunigungsstadium charakterisiert die Hydratation von  $C_3A$  und Sulfatträger. In jedem Fall bewirkt das Polymer eine Verschiebung der Hydratationsmaxima zu späteren Zeiten. Abbildung 4-6 beschreibt die Umsetzung von Hochofenzement mit und ohne Kunststoff. Der Polymerzusatz führt auch hier zu einer Verzögerung der Hydratation.

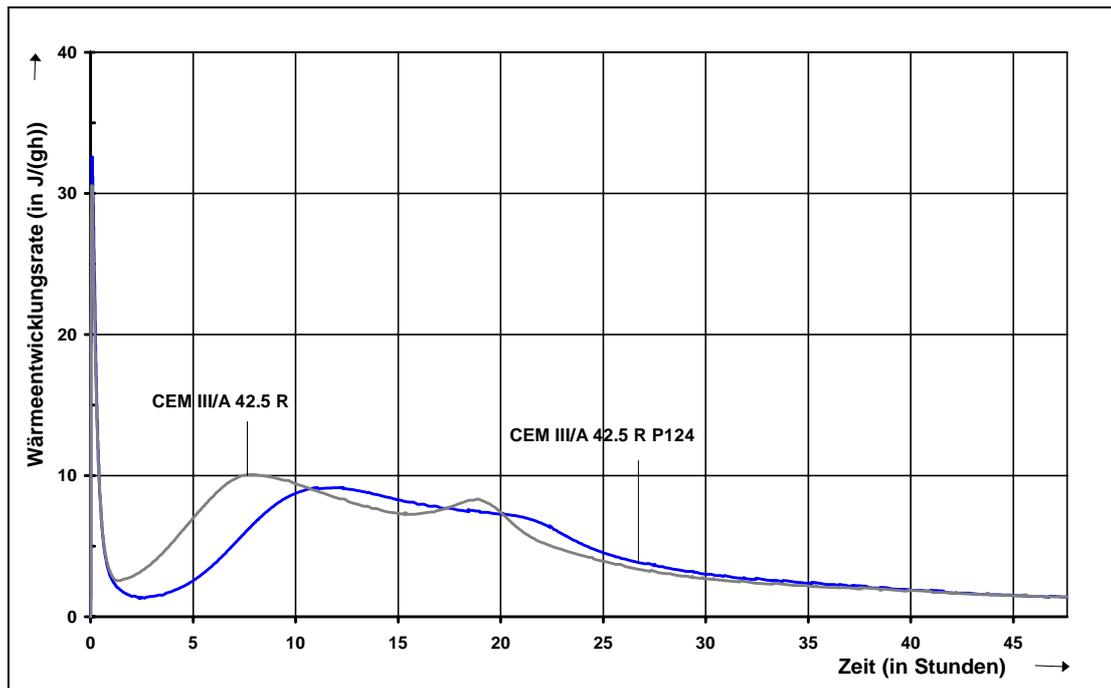


Abbildung 4-6. Hydratationsverlauf von Hochofenzement CEM III/A 42.5 R, Werk A (w/z-Wert: 0.50) mit dem Polymer P124 (2 M.-%)

### 4.3.2 Festmörteleigenschaften

Tendenziell korrelieren die Festigkeiten der mit verschiedenen Zementen hergestellten polymermodifizierten Mörteln mit den w/z-Werten (siehe Tabelle 8-11 im Anhang). Eine Ausnahme stellt die Verwendung eines alkaliarmen CEM I 52.5 R dar. Bei höheren Wassergehalten nehmen die Festigkeiten, insbesondere die 7-Tage-Werte zu. Hohe Alkaligehalte des Zementes führen zu einem Festigkeitsverlust. Die beschriebenen Tendenzen sind bei den eingesetzten Polymeren P2, P23 sowie P42 gleich, unabhängig von deren chemischen Zusammensetzung. Steigende Hütten sandgehalte dagegen bewirken in Kombination mit dem Kunststoff P2 einen Festigkeitszuwachs des Mörtels, verglichen mit reinem Portlandzement gleicher Mahlfein-

heit aus dem gleichen Werk. Eine Kombination mit P23 bzw. P42 wirkt sich gegenläufig aus. Die Biegezugfestigkeiten machen im allgemeinen 1/7 ... 1/9 der Druckfestigkeiten aus. Die Festigkeiten der Mörtel lassen sich zurückführen auf deren Porenstruktur. Erwartungsgemäß nimmt mit sinkendem Wassergehalt die Porosität ab. Der Anteil an Kapillarporen hat den größten Einfluß. Die Luftporengehalte liegen, in dem für Zementmörtel üblichen Bereich, zwischen 2.7 und 5.5 Vol.-%. Auffallend ist die niedrige Gelporosität bei den modifizierten Proben, die zum Teil unter der der Null-Mischung lag (siehe Tabelle 8-13 im Anhang).

$^{29}\text{Si}$ -NMR-spektroskopische Untersuchungen von Pasten aus Alit belegen, daß das Polymer (P124) innerhalb der ersten 24 Stunden die Hydratation verzögert. Im weiteren Verlauf wird die Umsetzung durch den Zusatz beschleunigt. Die Abbildungen 4-7 bis 4-10 zeigen die Spektren der modifizierten und unmodifizierten Proben nach einer Hydrationsdauer von 1 und 28 Tagen.

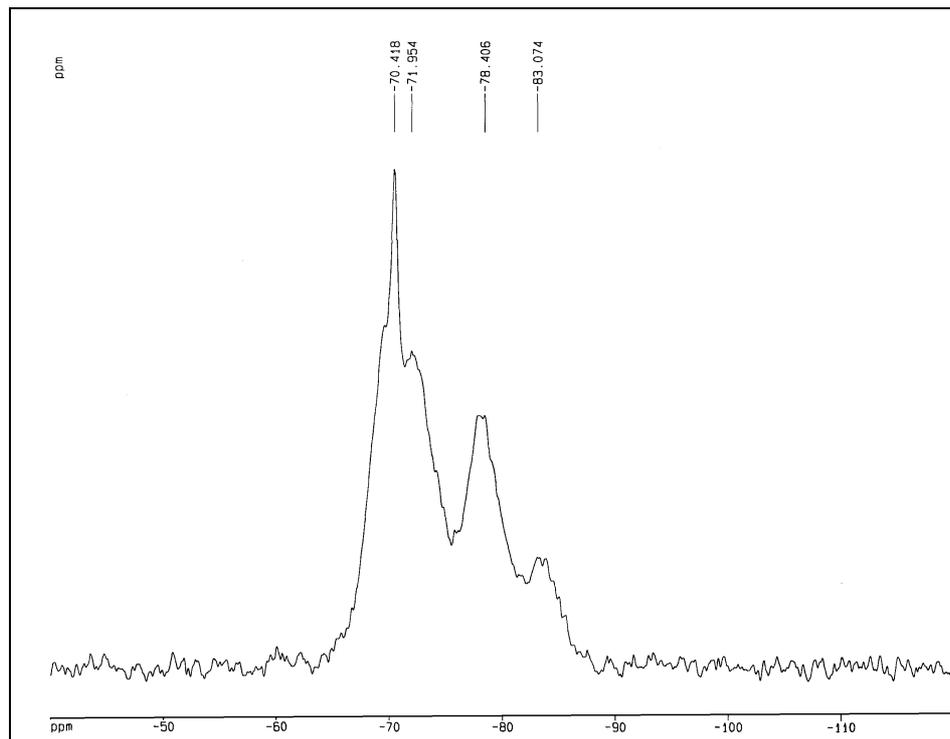


Abbildung 4-7.  $^{29}\text{Si}$ -NMR Spektrum der unmodifizierten Alitpaste nach einer Hydrationsdauer von 1 Tag

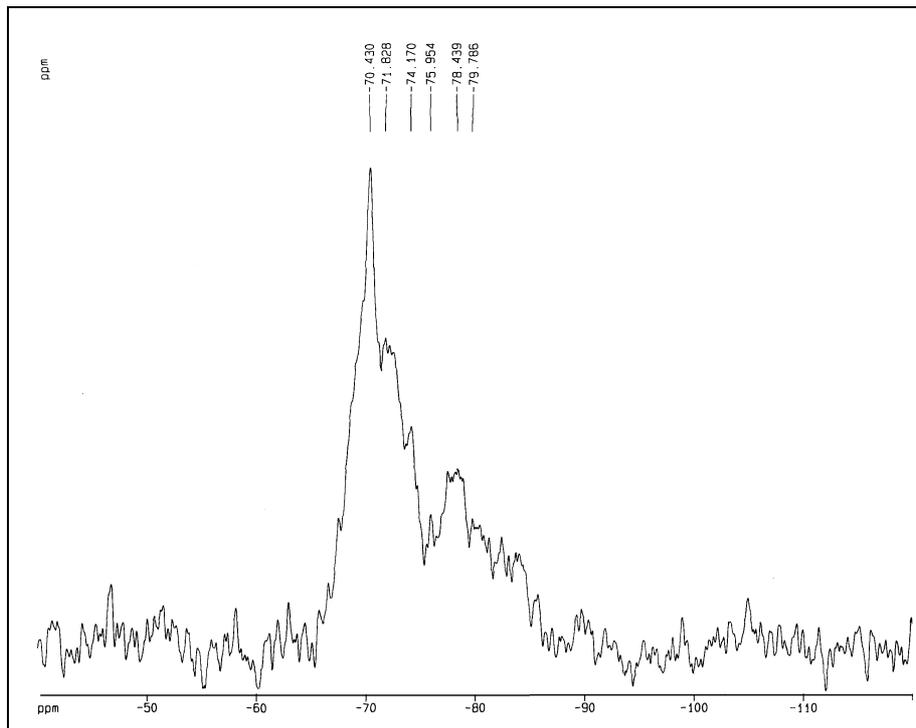


Abbildung 4-8.  $^{29}\text{Si}$ -NMR Spektrum der modifizierten Alitpaste (PI24, 2 M.-%) nach einer Hydratationsdauer von 1 Tag

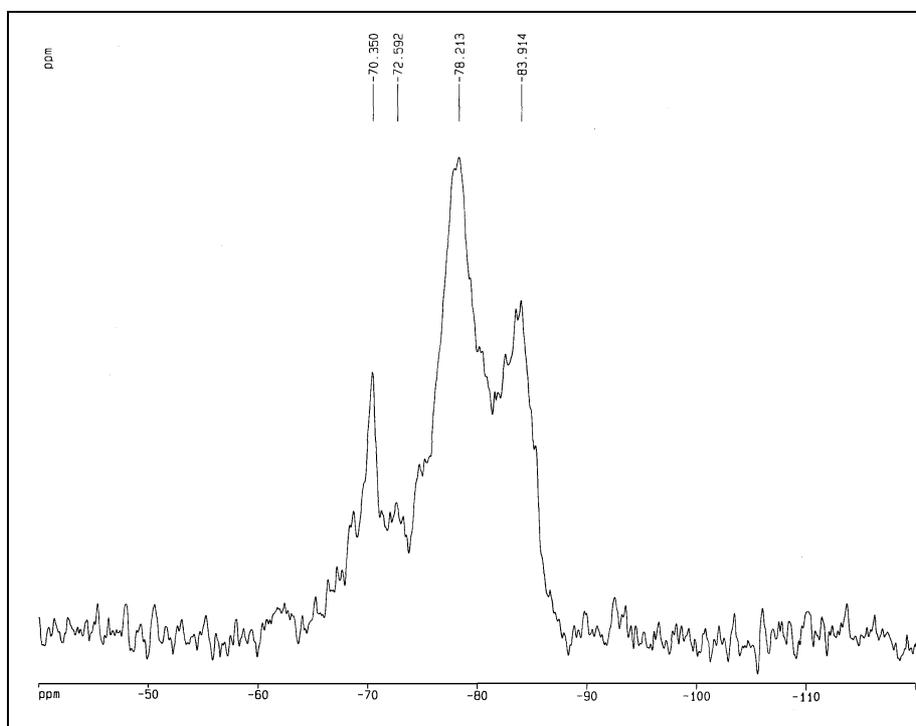


Abbildung 4-9.  $^{29}\text{Si}$ -NMR Spektrum der unmodifizierten Alitpaste nach einer Hydratationsdauer von 28 Tagen

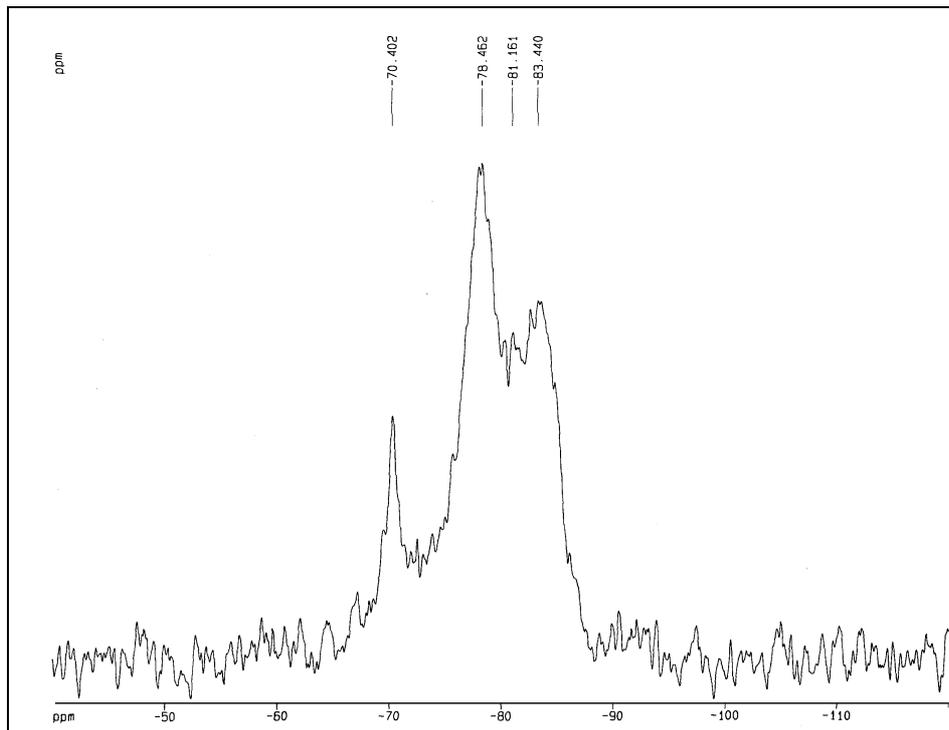
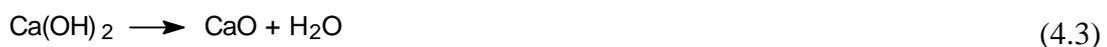


Abbildung 4-10.  $^{29}\text{Si}$ -NMR Spektrum der modifizierten Alitpaste (P124, 2 M.-%) nach einer Hydratationsdauer von 28 Tagen

Abbildung 4-11 stellt die DTA-Thermogramme der einzelnen Proben nach 1 und 28 Tagen dar. Zwischen 100 ... 700 °C findet die Entwässerung der CSH-Phasen statt, zwischen 400 und 500 °C die Zersetzung des gebildeten Calciumhydroxids gemäß folgender Gleichung 4.3.



Nach SCHIEBL 1997 läßt sich der Calciumhydroxidgehalt aus den thermogravimetrischen Analysen berechnen. Er dient als Maß für den Reaktionsgrad. Nach einem Tag liegt der Anteil der modifizierten Probe (12.7 M.-%) unter dem der Null-Mischung (16.9 M.-%), nach 28 Tagen darüber, 17.4 M.-% gegenüber 16.1 M.-% bei der Null-Probe. Die abnehmende Calciumhydroxidkonzentration bei der polymerfreien Mischung beruht auf einer teilweisen Umsetzung zu Calciumcarbonat. Die Ein-Tages-Festigkeiten der Zementpasten wurden durch den Kunststoff nicht beeinträchtigt. Bei gleichem Wassergehalt (w/z-Wert 0.50) beträgt die Biegezugfestigkeit 3.40 N/mm<sup>2</sup> und die Druckfestigkeit 10.5 N/mm<sup>2</sup> bei der polymerhaltigen und 2.10 N/mm<sup>2</sup> bzw. 7.0 N/mm<sup>2</sup> bei der polymerfreien.

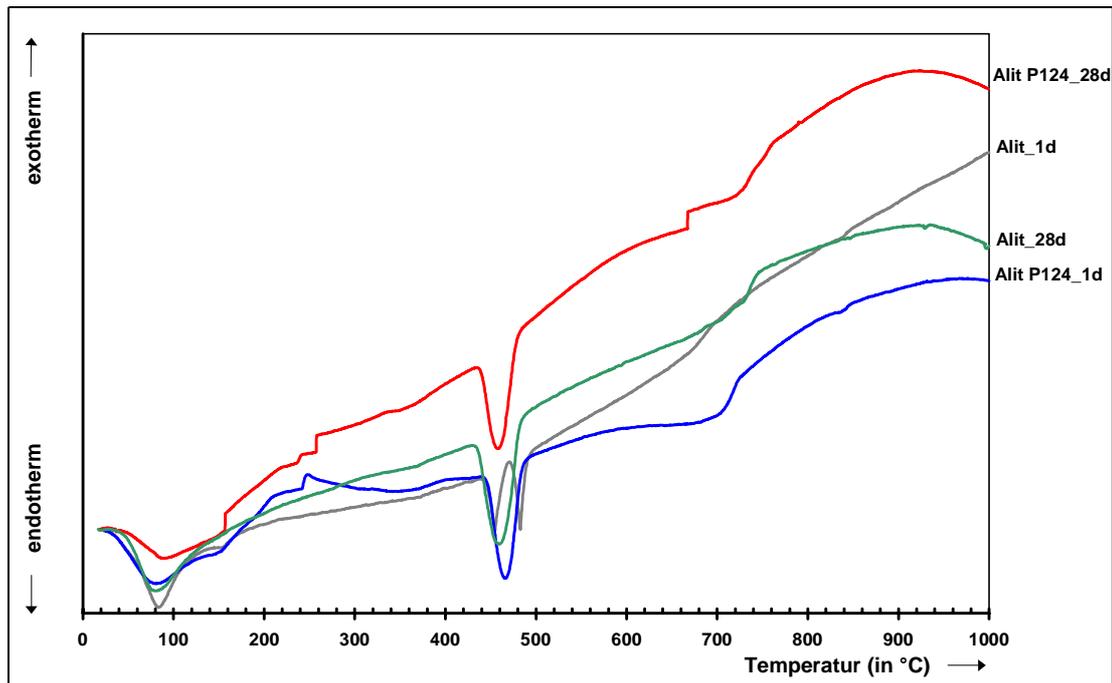


Abbildung 4-11. DTA-Kurven der modifizierten und unmodifizierten Alitpasten (w/z-Wert: 0.50) nach 1 und 28 Tagen

Der Zement CEM I 42.5 R aus dem Werk B hat in Kombination mit den Polymeren P2, P23 sowie P42 auf Grund der Absenkung des w/z-Wertes eine zusätzliche abdichtende Wirkung gegenüber eindringenden Gasen wie Kohlendioxid und Wasserdampf, erkennbar an niedrigen Carbonatisierungstiefen. Der gleiche Effekt kann mit dem alkaliarmen Zement aus dem Werk C nur in Kombination mit dem Polymer P23 beobachtet werden. Ursache ist der höhere Luftporengehalt der Mörtel mit den Zusätzen P2 und P42 und dem alkaliarmen Zement. Die  $\mu$ -Werte werden durch die Modifizierung bei beiden Zementen deutlich erhöht (siehe Tabelle 8-14 im Anhang).

## 4.4 Einfluß von Zusatzstoffen

In diesem Untersuchungsabschnitt wird der Einfluß verschiedener Zusatzstoffe auf die Eigenschaften polymermodifizierter Mörtel untersucht. Als Bindemittel wurde standardmäßig ein handelsüblicher CEM I 42.5 R, Werk B eingesetzt. Die Dosierung der Zusatzstoffe erfolgte additiv, bezogen auf den Bindemittelgehalt.

### 4.4.1 Frischmörteleigenschaften

Die Einzelergebnisse der Frischmörteluntersuchungen sind in Tabelle 8-15 im Anhang aufgeführt. Mit zunehmender Dosierung der Zusatzstoffe nimmt der Wasserbedarf der Mischungen erwartungsgemäß zu. Diese Tendenz ist bei den jeweiligen Null-Mischungen stärker ausgeprägt als bei den polymermodifizierten. Der Polymerzusatz führt, verglichen mit den jeweiligen Null-Proben, immer zu einer Verflüssigung. Den höchsten Wasseranspruch verursacht die Verwendung von Mikrosilica. Der Zusatz von 5 M.-% Mikrosilica erhöht den w/z-Wert der Null-Probe um 8.5 %, 7.5 M.-% Mikrosilica rufen einen Anstieg von 14.9 % hervor und 10 M.-% Mikrosilica eine Zunahme von 23.4 %. Bei den übrigen Zusatzstoffen werden Werte zwischen 2.1 % und 4.3 % gemessen. Nanosilica wird bei der Diskussion nicht berücksichtigt, da bei diesen Proben noch zusätzlich Fließmittel eingesetzt wurde. Das Polymer P23 zeigt eine besondere Affinität zu Mikrosilica. Entgegen der oben beschriebenen Tendenz kann der Wassergehalt mit steigender Silicastaubkonzentration bis zu 32 % gesenkt werden. In Kombination mit Nanosilica wird dieser Effekt nicht beobachtet. Die übrigen Polyurethane verhalten sich unabhängig von der Art des Zusatzstoffes ähnlich. Abbildung 4-12 dokumentiert den Wasserbedarf der Mörtel mit den für die Praxis wichtigsten Zusatzstoffen relativ zur Null-Mischung.

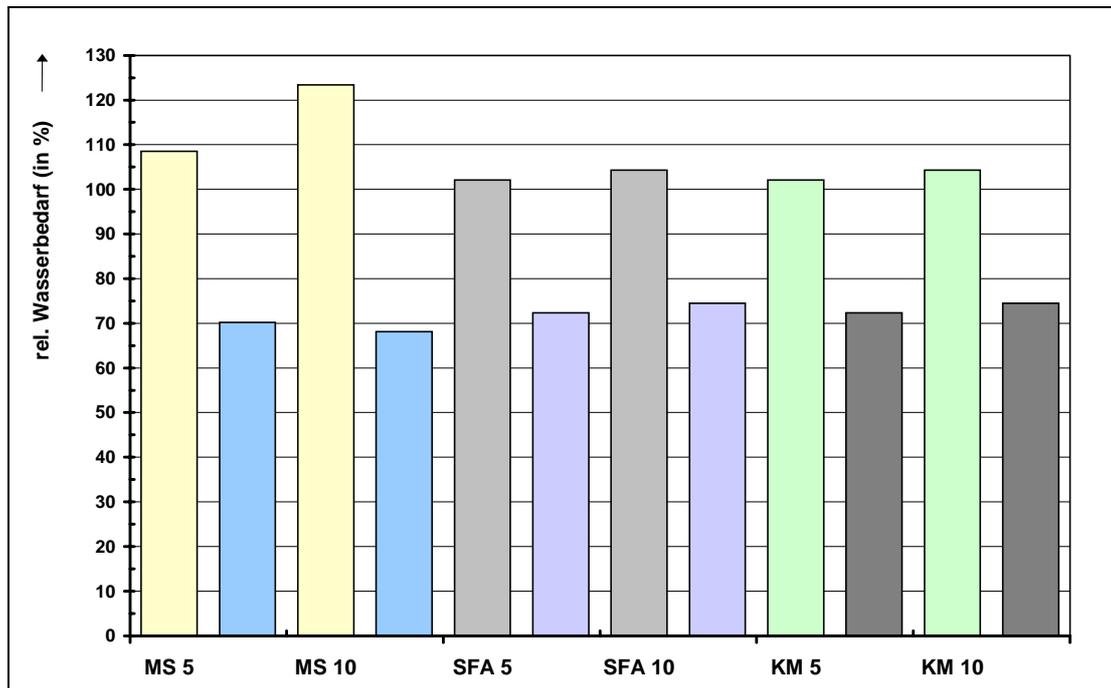


Abbildung 4-12. Einfluß verschiedener Zusatzstoffe auf den Wasserbedarf polymermodifizierter und polymerfreier Mörtel relativ zur Null-Mischung  
 unbeschriftete Säulen: Proben mit 2 M.-% P23  
 5, 10 : 5 bzw. 10 M.-% des jeweiligen Zusatzstoff

Die Rohdichten der Mörtel korrelieren mit deren Luftporengehalten. Das Polymer P42 führt häufig in Kombination mit den verschiedenen Zusatzstoffen zu einem höheren Luftporeneintrag. Die Zusatzstoffe verbessern das "Zusammenhaltevermögen" der Mörtel, die Neigung zu Entmischungen nimmt ab. Damit verbunden ist eine hohe Klebrigkeit der Mörtel.

#### 4.4.2 Festmörteleigenschaften

Durch den Einsatz von Zusatzstoffen können die Festigkeiten der polymermodifizierten Mörtel im allgemeinen gesteigert werden. Die Ergebnisse sind im Anhang in der Tabelle 8-16 aufgelistet. Bei der Betrachtung muß differenziert werden nach der Art des eingesetzten Kunststoffes. Unabhängig von dem Zusatzstoff und dessen Konzentration steigen die Werte bei Verwendung der Polymere P1, P2 sowie P23 gegenüber den zustofffreien Proben an. Der Zuwachs beträgt 5.7 ... 27.4 % bei P1, 11.1 ... 39.2 % bei P2 und 0.5 ... 21.6 % bei P23. Niedrige Steigerungen werden mit Kalksteinmehl und Flugasche erzielt, einen hohen Beitrag leisten die Silicastaube.

Eine Kombination der verschiedenen Zusatzstoffe mit P42 läßt die Festigkeiten um bis zu 25 % sinken. Ohne Zusatzstoffe werden mit dem Polymer deutlich höhere Festigkeiten erzielt. Die optimale Dosierung der Zusatzstoffe beträgt in den meisten Fällen 7.5 M.-%, bezogen auf den Bindemittelgehalt.

Aus einem niedrigen Wassergehalt des Mörtels resultieren entsprechend hohe Druckfestigkeiten nach 28 Tagen. Dieses Verhalten ist weitgehend unabhängig von der Art des Zusatzstoffes. Den Zusammenhang verdeutlicht Abbildung 4-13. Mit Mikrosilica steigen die Festigkeiten, und besonders die Frühfestigkeiten, überproportional an. Das Polymer P1 verzögert die Anfangserhärtung derart, daß daraus längere Ausschulfristen (3 Tage) resultieren (vgl. Kapitel 3.2.4). Diese Zeiten werden durch die Zusatzstoffe Mikrosilica, Basaltmehl, Flugasche und Glasmehl zum Teil bis auf 6 Tage verlängert. Kalksteinmehl wiederum trägt zu einer Verkürzung auf 2 Tage bei. Aus Abbildung 4-14 geht der Zusammenhang zwischen Druck- und Biegezugfestigkeit und zwischen Druckfestigkeit und dynamischem E-Modul nach einer Hydratationsdauer von 28 Tagen hervor. Der dynamische E-Modul steigt nicht proportional mit der Festigkeit an, sondern bleibt dahinter zurück. Die Biegezugfestigkeiten werden durch die Zusatzstoffe geringfügig reduziert.

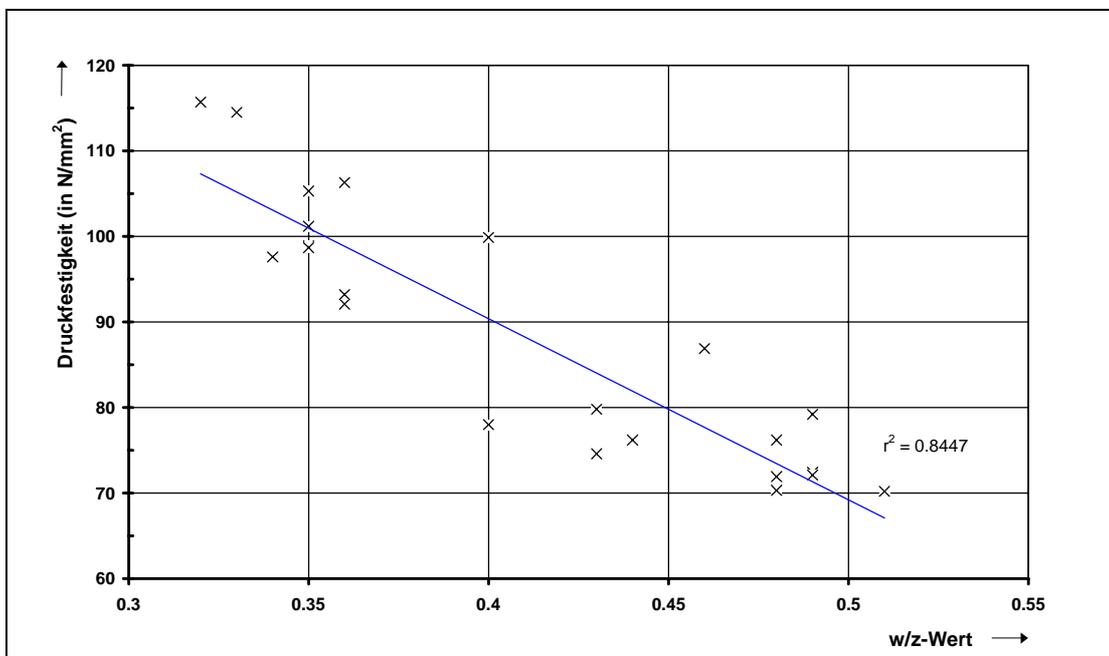


Abbildung 4-13. Zusammenhang zwischen w/z-Wert und Druckfestigkeit nach 28 Tagen verschiedener zusatzstoffhaltiger Mörtel

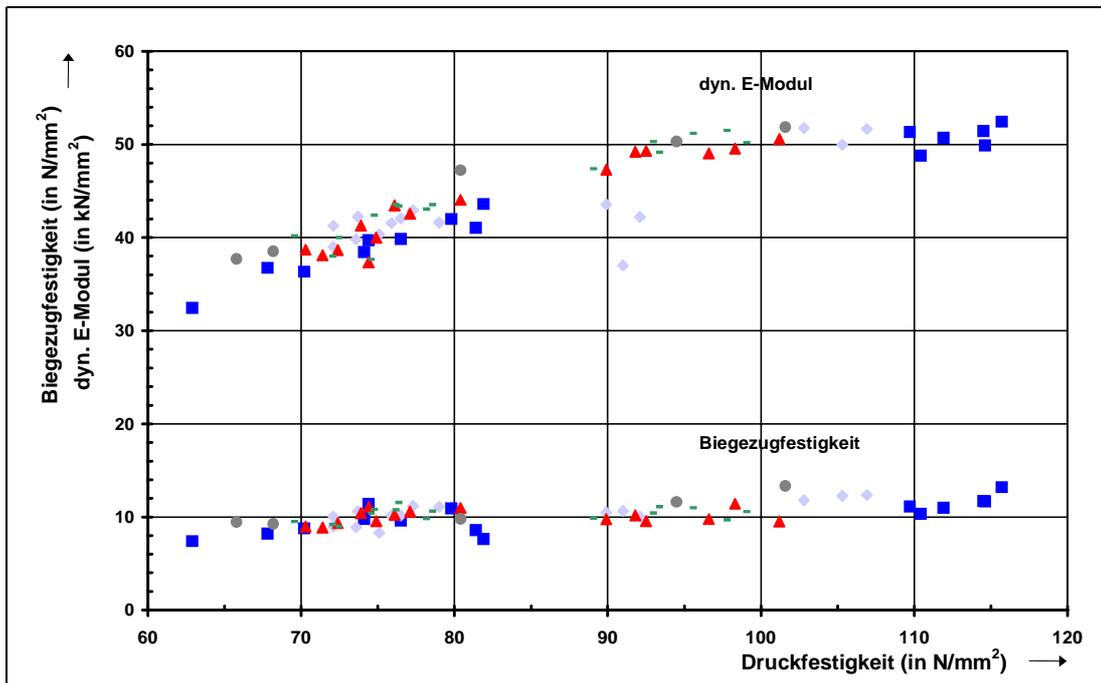


Abbildung 4-14. Korrelation zwischen Druck- und Biegezugfestigkeit sowie zwischen Druckfestigkeit und dyn. E-Modul der zusatzstoffhaltigen Mörtel nach 28 Tagen

- : Mikrosilica
- : ohne Zusatzstoff
- : Kalksteinmehl
- ◆ : Steinkohlenflugasche
- ▲ : Glasmehl

Ursache für die hohen Druckfestigkeiten der zusatzmittelhaltigen, polymermodifizierten Mischungen ist eine verringerte Gesamtporosität, die auf einer Absenkung des Kapillarporengehalts beruht (vgl. Tabelle 8-17 im Anhang). Der Anteil an Gelporen als Maß für den Hydratationsfortschritt wird erhöht, verglichen mit der zusatzstofffreien Probe. Als Beispiel sei die Mischung P 23 MS 7.5 genannt (siehe Abbildung 4-15). Das Quellen und Schwinden kann durch die Zusatzstoffe nicht gesenkt werden (siehe Tabelle 8-18 im Anhang). Hier werden höhere Werte gemessen als bei Mörteln, die nur Polymer enthalten.

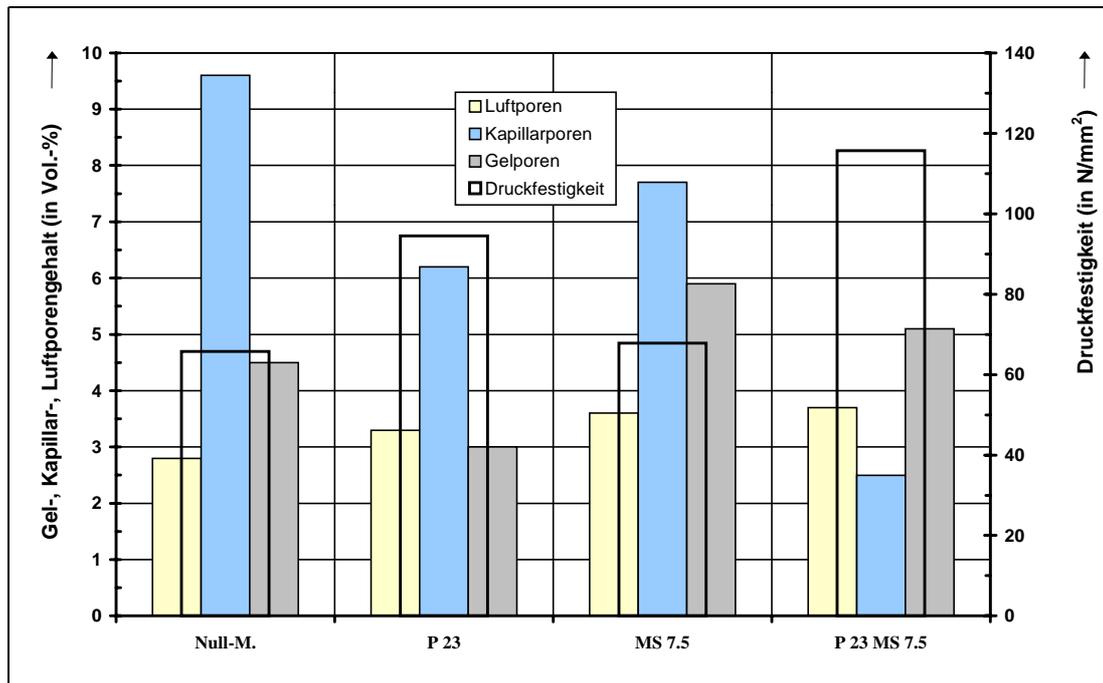


Abbildung 4-15. Einfluß von Mikrosilica auf den Gel-, Kapillar-, Luftporengehalt und die Druckfestigkeit nach 28 Tagen einer Mischung mit dem Polymer 23 (2 M.-%)

Zehn M.-% Mikrosilica beschleunigen den Hydratationsverlauf, insbesondere in Kombination mit dem Polymer P124 wie  $^{29}\text{Si}$ -NMR-spektroskopische Untersuchungen belegen. Der Anteil an nichthydratisierten Ausgangsprodukten geht zurück und der Kondensationsgrad der Silikate ( $Q^3$ ) nimmt zu (siehe Abbildungen 8-10 und 8-11 im Anhang). Durch den Zusatz von Silicastauben, Kalksteinmehl und Flugasche kann bei den polymerfreien Mörteln keine höhere Widerstandsfähigkeit gegenüber Frost-Tausalzangriff erzielt werden (siehe Tabelle 8-19 im Anhang). Erst in Kombination mit den Polyurethanen werden deutlich niedrigere Abwitterungsraten gemessen, die mit dem Wassergehalt der jeweiligen Probe korrelieren. P23-haltige Mörtel erweisen sich auf Grund dieser Tatsache als äußerst resistent. Der Einfluß der einzelnen Zusatzstoffe läßt sich wie folgt beurteilen. Wie bereits in früheren Untersuchungen beobachtet wird, zeigen die Kunststoffe eine besondere Affinität zu Mikrosilica. Diese Mischungen weisen den höchsten Frost-Tausalzwiderstand auf. Eine Dosierung von 7.5 M.-% sorgt für ein günstigeres Verhalten als 10 M.-%. Die Abwitterung nach 50 Frost-Tausalzwecheln beträgt bei der modifizierten Probe P23 MS7.5 0.20 M.-%, bei der entsprechenden Null-Mischung (MS 7.5) 19.79 M.-%. Abbildung 4-16 zeigt das dichte Gefüge des polymerhaltigen Mörtels mit 7.5 M.-%

Silicastaub. Der Zusatz von Flugasche dagegen kann die Dauerhaftigkeit nicht wesentlich verbessern. Das verwendete VDZ-Würfelverfahren zur Prüfung des Frost-Tausalz widerstandes der modifizierten Mörtel erweist sich als geeignet, die Abwitterungen nehmen im Zeitraum der Untersuchungen kontinuierlich zu. Im Carbonatisierungsverhalten bestehen keine signifikanten Unterschiede zwischen den einzelnen Zusatzstoffen. Die Differenzen betragen im allgemeinen nicht mehr als 1 mm (siehe Tabelle 8-20 im Anhang).

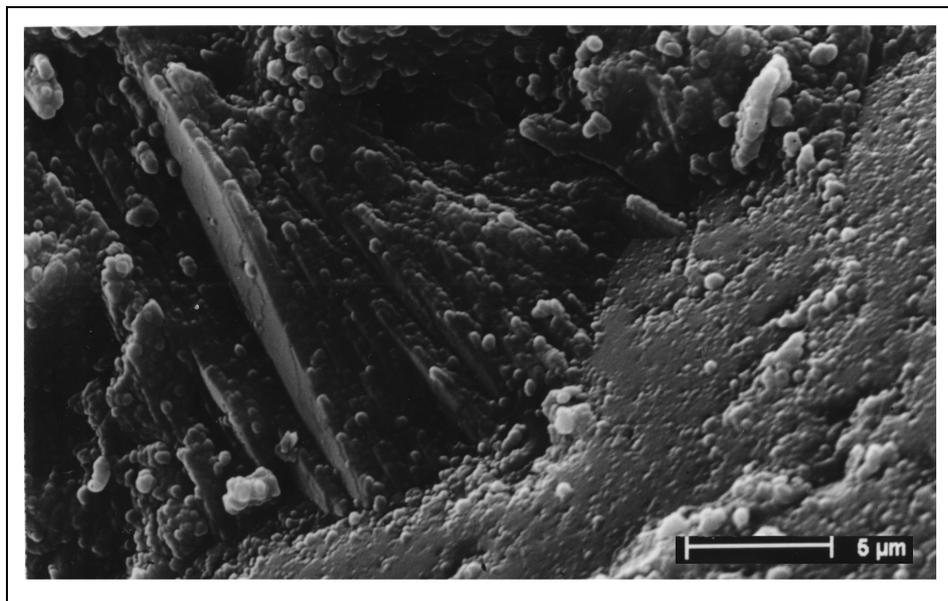


Abbildung 4-16. Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines polymermodifizierten Mörtels (P23, 2 M.-%) mit 7.5 M.-% Mikrosilica im Alter von 28 Tagen. Es hat sich ein homogenes Mörtelgefüge und eine dichte Übergangszone zum Zuschlag ausgebildet.

#### 4.5 Einfluß der Polymerkonzentration

In den vorherigen Untersuchungen beträgt die Polymerkonzentration 2 M.-% bezogen auf den Bindemittelgehalt. Im Rahmen dieses Untersuchungsabschnittes werden zum einen niedrigere Gehalte, 0.5, 1, 1.5 M.-%, als auch höhere Konzentrationen, 4, 6 und 8 M.-% eingesetzt und die Auswirkungen auf die Frisch- und Festmörteleigenschaften untersucht. Bei den eingesetzten Polyurethanen handelt es sich um P1, P2, P23 und P42. Als Bindemittel dient der Portlandzement CEM I 42.5 R aus dem Werk B.

### 4.5.1 Frischmörteleigenschaften

Bei Erhöhung der Polymerkonzentration ist in Abhängigkeit von der chemischen Zusammensetzung ein unterschiedliches Verhalten im Mörtel zu beobachten. Die Zugabe von 4, 6 bzw. 8 % P1 bewirkt einen kontinuierlichen Anstieg des w/z-Wertes von 0.46 bis 0.65. Damit verbunden nimmt das Wasserrückhaltevermögen ab. Eine Erhöhung der Dosierung der Kunststoffe P2, P23, P42, P100 sowie P124 über 2 M.-% übt keinen bzw. nur einen unwesentlichen Einfluß auf den Wasseranspruch des Mörtels aus. Dagegen führen niedrigere Zugabemengen, 0.5, 1, 1.5 bis hin zu 2 M.-% zu einer Absenkung um jeweils ca. 7 %. Vermehrte Luftporen werden durch höhere Polymergehalte nicht eingetragen. Die Einzelergebnisse sind im Anhang in Tabelle 8-21 aufgeführt.

Abbildung 4-17 zeigt die Leitfähigkeiten von Zementsuspensionen mit 2 M.-% und 4 M.-% der Polymere P1 und P124 sowie mit 2 M.-% eines handelsüblichen Fließmittels bei gleicher Konsistenz. Mit steigendem Polyurethangehalt nehmen die Leitfähigkeiten ab. Im Gegensatz zu P124 führt die 4 M.-%ige Zugabe von P1 zusätzlich zu einer Erniedrigung der Werte im zeitlichen Verlauf.

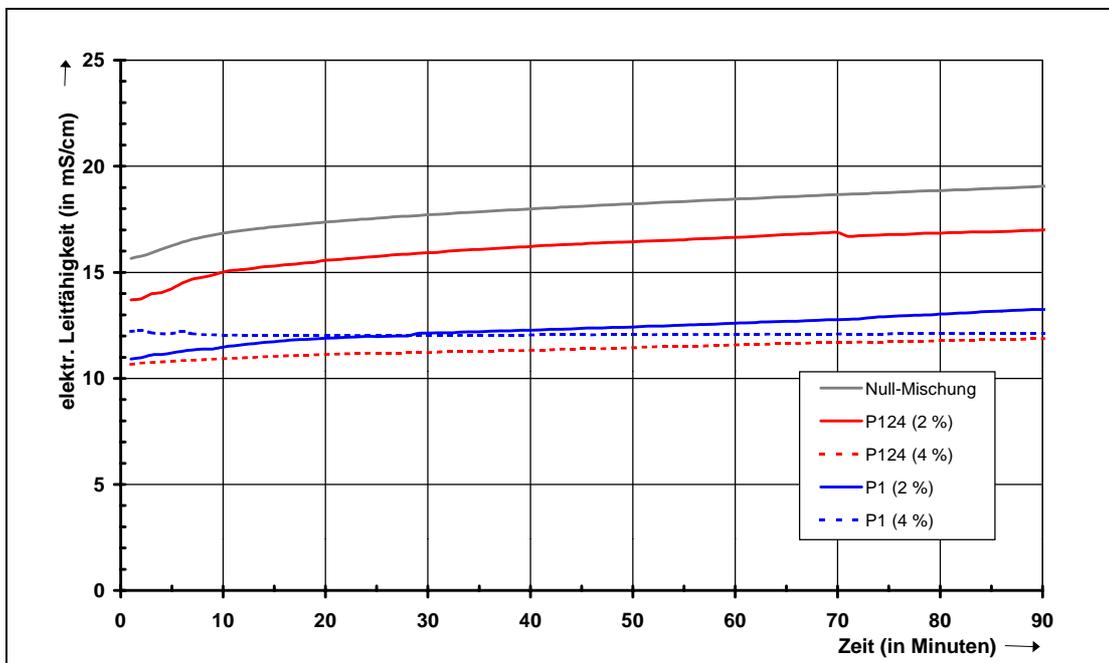


Abbildung 4-17. Einfluß unterschiedlicher Polymerkonzentrationen (P1, P124), 2 und 4 M.-%, auf die elektrische Leitfähigkeit von Zementsuspensionen (CEM I 42.5 R, Werk B, w/z-Wert: 0.50)

### 4.5.2 Festmörteleigenschaften

Eine Erhöhung der Polymerkonzentration (P1, P23, P42) ist verbunden mit längeren Ausschallfristen der Mörtel und mit einer Abnahme der Druck-, Biegezugfestigkeiten und dynamischen E-Moduln nach 7 und 28 Tagen (vgl. Tabelle 8-22 im Anhang). Abbildung 4-18 zeigt eine rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines mit 8 M.-% des Polymers P1 modifizierten Mörtels. Es bildet sich eine poröse Binde-mittelmatrix aus, die von dem Polymer durchzogen wird.

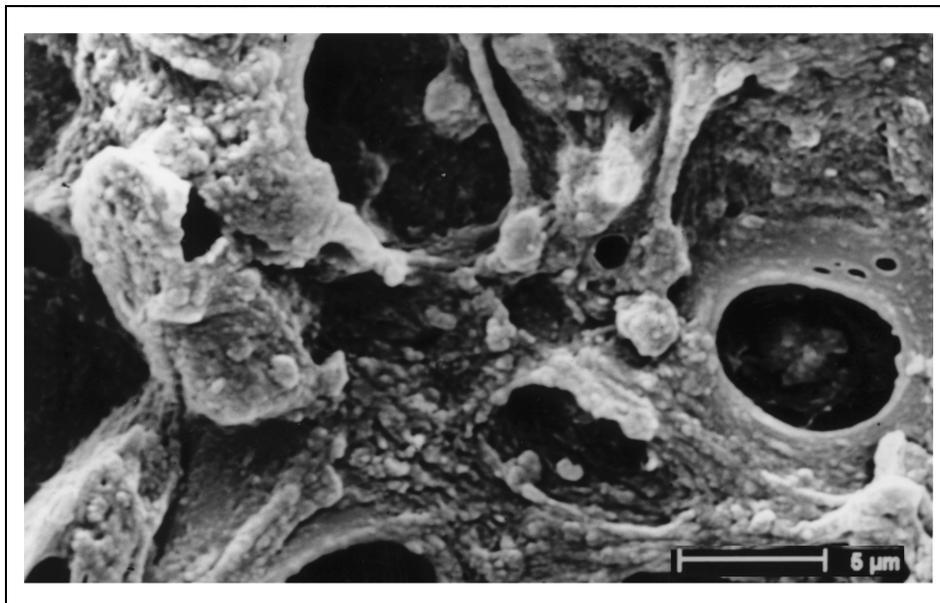


Abbildung 4-18. Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme des mit 8 M.-% P1 modifizierten Mörtels nach einer Hydratationsdauer von 28 Tagen. Neben dem Polymerfilm sind insbesondere in der linken und rechten oberen Ecke des Bildes Hydratationsprodukte des Zementes zu erkennen.

Maximale Festigkeiten werden gemessen bei einer Dosierung von 2 M.-%. Abbildung 4-19 dokumentiert die Korrelation zwischen Druck- und Biegezugfestigkeit und Druckfestigkeit und dynamischem E-Modul nach einer Hydratationsdauer von 28 Tagen. Mit steigender Druckfestigkeit nimmt der dynamische E-Modul kontinuierlich zu, während sich die Biegezugfestigkeit nur geringfügig verändert. Die niedrigen mechanischen Kennwerte bei Verwendung des Polymers P1 lassen sich mit einer zunehmenden Gesamtporosität erklären, die auf einem Anstieg des Kapillarporengehaltes beruht. Polymergehalte von 4, 6 und 8 % rufen, verglichen mit 2 %, höhere Volumenänderungen hervor (siehe Tabellen 8-23 und 8-24 im Anhang). Mit Aus-

nahme der P1-haltigen Mörtel liegen die Schwindwerte unter denen der Null-Mischung. Der Zusatz von 0,5, 1 und 1,5 M.-% P124 läßt die Festigkeiten und dynamischen E-Moduln schrittweise ansteigen (vgl. Abbildung 4-19).

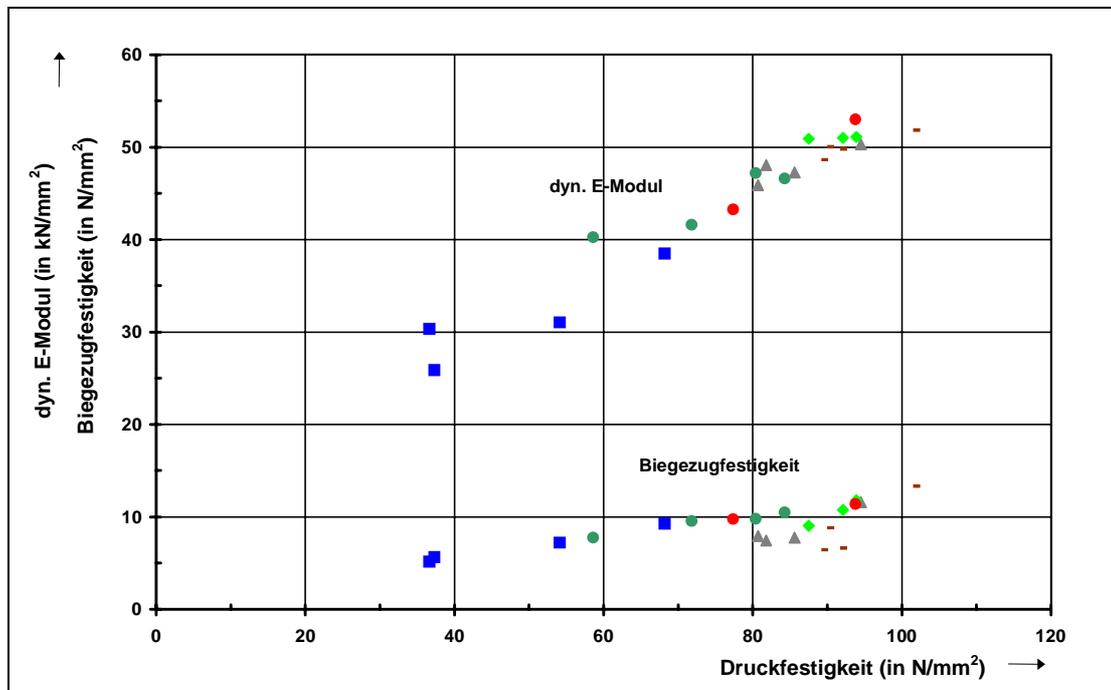


Abbildung 4-19. Korrelation zwischen Druck- und Biegezugfestigkeit sowie zwischen Druckfestigkeit und dynamischem E-Modul bei verschiedenen Polymergehalten (2, 4, 6 und 8 M.-%) der Mörtel im Alter von 28 Tagen

- |         |          |
|---------|----------|
| ■ : P1  | ◆ : P100 |
| ● : P2  | ▲ : P23  |
| - : P42 | ● : P124 |

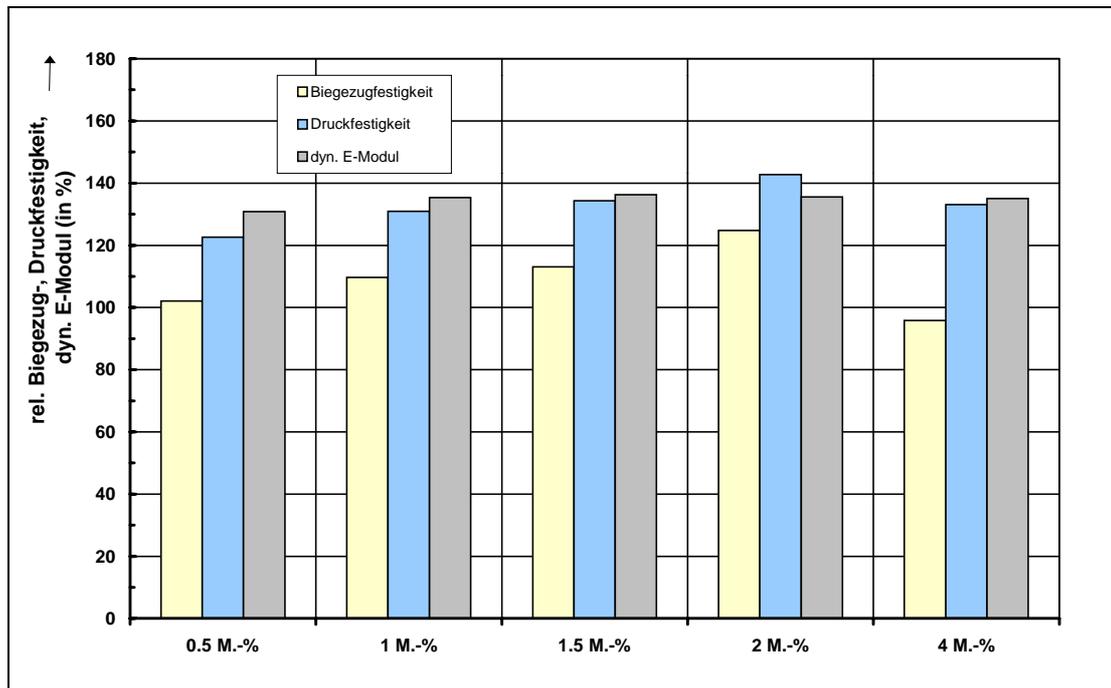


Abbildung 4-19. Relative Biegezug-, Druckfestigkeit und dynamischer E-Modul der Mörtel mit verschiedenen Konzentrationen P124 nach 28 Tagen bezogen auf die Null-Mischung

Das  $^{29}\text{Si}$ -NMR -Spektrum der Zementpaste weist für die Probe mit 4 M.-% P124 einen niedrigeren Hydratationsgrad nach als für die mit 2 M.-% (siehe im Anhang Abbildung 8-12).

Im Hinblick auf die mechanischen Eigenschaften hat sich eine Dosierung der Polymere von 2 M.-% als optimal herausgestellt. Bei der Beurteilung des Frost-Tausalzwanstandes der modifizierten Mörtel muß differenziert werden nach der Art des eingesetzten Kunststoffes (siehe Tabelle 8-25 im Anhang). Mit steigender Konzentration von MZN 749/1 und P42 von 2 ... 6 M.-% nehmen die Gesamtabwitterungen nach 50 Frost-Tausalzwechselfen deutlich zu. Die Modifizierung mit P23 führt zu vergleichsweise niedrigen Masseverlusten. Eine eindeutige Abhängigkeit von der Polymerkonzentration kann hier nicht festgestellt werden (siehe Abbildung 4-20). Auffallend ist, daß die Abwitterungen in einigen Fällen bis zu einem Gehalt von 6 M.-% anstiegen und bei 8 M.-% wieder abnahmen.

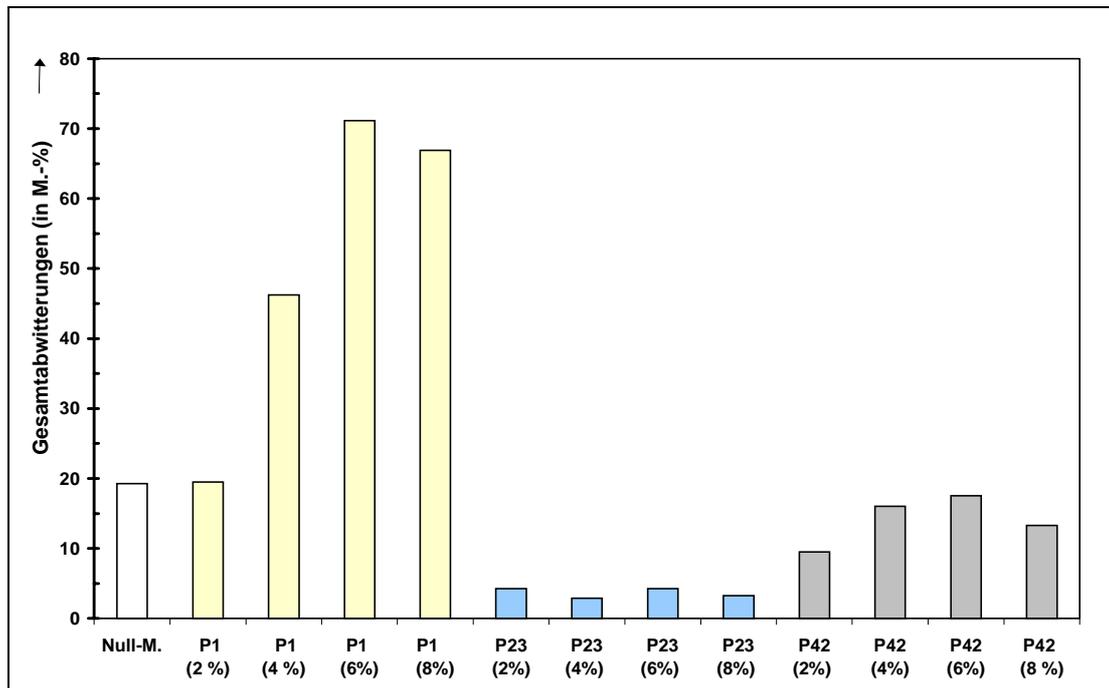


Abbildung 4-20. Einfluß der Polymerkonzentration (2, 4, 6 und 8 M.-%) der Polymere P1, P23 und P42 auf den Frost-Tausalz widerstand

## 4.6 Diskussion der Ergebnisse

In diesem Teil der Arbeit wurde die Zusammensetzung polymermodifizierter Mörtel variiert und die Auswirkungen auf die Frisch- und Festmörteleigenschaften untersucht. Angestrebt war neben einem niedrigen Wassergehalt und dem damit verbundenen festigkeitsteigernden Effekt, eine praxisgerechte Verarbeitbarkeit sowie eine hohe Dichtigkeit gegenüber schädigenden Gasen und Flüssigkeiten. Die Untersuchungen ließen sich in drei Teile gliedern:

- Variation des Bindemittels
- Einsatz von verschiedenen Zusatzstoffen und Variation der Konzentration
- Variation der Polymerkonzentration

Im ersten Teil wurden normgerechte Zemente unterschiedlicher Mahlfineinheit und chemischer Zusammensetzung verwendet. Neben einem CEM I 32.5 R, CEM I 42.5 R und CEM I 52.5 R kamen hüttensandhaltige Bindemittel, CEM II/A-S 42.5 R, CEM III/A 42.5 R, zum Einsatz. Die Dosierung der Polymere P2, P23 sowie P42

betrug einheitlich 2 M.-%. Um deren Einfluß auf die Zementhydratation näher zu analysieren, wurden mit einzelnen Klinkerphasen (Alit, Tricalciumaluminat) bzw. selbst hergestellten Zementen mit Zusatz von 0, 10 und 20 M.-% Tricalciumaluminat weiterführende Untersuchungen durchgeführt. Die verflüssigende Wirkung der Polymere war abhängig von der Mahlfineinheit sowie dem Alkali- und Alitgehalt des Zementes. Dabei zeigten die eingesetzten Polyurethane ein tendenziell gleiches Verhalten. Als optimal erwies sich eine spezifische Oberfläche nach BLAINE von ca.  $3500 \text{ cm}^2/\text{g}$ . Bei höheren und niedrigeren Mahlfineinheiten stieg der Wasseranspruch. Einen deutlichen Einfluß auf die Festigkeiten übte der Alkaligehalt aus. Mit steigender Konzentration nahmen die Festigkeiten nach 7 und 28 Tagen signifikant ab. Die Festigkeitsdifferenzen zwischen dem alkaliärmsten und -reichsten Zement betragen im Mittel 21 %. Zurückzuführen waren diese Ergebnisse auf einen deutlich höheren Kapillarporengehalt der alkalireichen Mischungen. Leitfähigkeitsmessungen der entsprechenden modifizierten Bindemittelsuspensionen belegen, daß mit dem Zement mit einem hohen Alkaligehalt die verzögernde Wirkung des Polymers am stärksten ausgeprägt war. Möglicherweise trat eine Komplexierung der Alkaliionen durch den Kunststoff in Form von Kronenethern auf, so daß die Weiterreaktion des Zementes behindert wurde. Weiterhin stand auf Grund der angenommenen Komplexbildung ein Teil des Polymers nicht mehr für eine Verflüssigung zur Verfügung. Das erklärt auch den höheren Wasserbedarf dieser Mischungen.

Vorteilhaft wirkte sich ein hoher Alitanteil an der Klinkerzusammensetzung auf die Frisch- und Festmörteleigenschaften aus. Das dieser Klinkerphase in Kombination mit den Polymeren eine besondere Bedeutung zukommt, dokumentierten auch  $^{29}\text{Si}$ -NMR-spektroskopische Untersuchungen. Innerhalb der ersten 24 Stunden wurde die Hydratation des Alits durch den Kunststoff verzögert, im weiteren Verlauf nahm der Vernetzungsgrad der Silikationen und damit der Hydratationsgrad zu. Die gemachten Beobachtungen bezüglich der Zementeigenschaften bestätigten im wesentlichen die Untersuchungsergebnisse von ALTNER 1989. Grundsätzlich eigneten sich die Polymere auch für den Einsatz in hüttensandhaltigen Zementen.

Der zweite Teil dieses Untersuchungsabschnittes beschäftigte sich mit den Auswirkungen von verschiedenen Zusatzstoffen wie Steinkohlenflugasche, Mikro- und Nanosilica, Glas-, Basalt- und Kalksteinmehl auf die Frisch- und Festmörteleigenschaften modifizierter Mörtel. Mit Ausnahme von Nanosilica reichten die Konzentra-

tionen von 5 M.-% über 7.5 M.-% bis zu 10 M.-% bezogen auf den Zementgehalt. Eine deutliche Verbesserung der Mörtel Eigenschaften d. h. höhere Festigkeit und Dichtigkeit, wurde mit der Zugabe von 7.5 M.-% Mikrosilica in Kombination mit dem Polymer P23 erzielt. Die gute dispergierende Wirkung bewirkte eine Wassereinsparung gegenüber der fließmittelfreien Mischung von 40 %. Daraus resultierte eine entsprechend niedrige Kapillarporosität verbunden mit einem hohen Widerstand gegenüber Frost-Tausalzangriff. Die gleichen Eigenschaftsverbesserungen beschreiben HERFURTH 1988 und WAGNER 1996 in ihren Untersuchungen und führen das auf den Füllereffekt, die puzzolanische Reaktion der Silikate sowie den verbesserten Kontakt zwischen Zementstein und Zuschlag zurück. Durch die verschiedenen Zusatzstoffe konnten die Festigkeiten je nach Konzentration, Art des Zusatzes und Polymers in unterschiedlichem Maß gesteigert werden. Eine Ausnahme stellte P42 dar. Hierbei wurde eine Unverträglichkeit mit den Füllern bzw. Puzzolanen festgestellt, die in niedrigen mechanischen Kennwerten zum Ausdruck kam. Basalt-, Kalkstein- und Glasmehl bewirkten im wesentlichen nur eine bessere Verarbeitbarkeit der Mörtel. Die Zusatzstoffe verminderten das Schwinden der modifizierten Mörtel nicht. Nach SCHIEBL 1993a kann dafür eine besondere Art des Trocknungsschwindens, das sog. autogene Schwinden verantwortlich sein. Infolge niedriger w/z-Werte findet eine Selbstaustrocknung statt, die zu einer Verengung der Kapillaren durch Kapillarzyug und damit zu einer Volumenverminderung des Materials führt.

Der dritte Teil setzte sich mit dem Einfluß verschiedener Polymerkonzentrationen auseinander. Zum einen wurde die Dosierung schrittweise erniedrigt bis zu 0.5 M.-% als auch erhöht bis zu 8 M.-%. Die Ergebnisse belegen, daß mit 2 M.-% eine optimale Verflüssigung und Verbesserung der Mörtel Eigenschaften erzielt wurde. Darüber hinaus zugegebener Kunststoff führte in einigen Fällen zu einer deutlichen Verzögerung der Hydratation, mit der Folge, daß die Ausschulfristen verlängert wurden und somit für eine Anwendung in der Praxis nicht in Frage kommt. Im Gegensatz dazu bewirkte der Zusatz von 0.5 M.-% P124 bereits eine Wassereinsparung von ca. 10 %. Daraus resultierte eine Endfestigkeit, die 22 % über der der Null-Mischung lag.

## 4.7 Zusammenfassung

Im vorliegenden Arbeitsabschnitt wurde ein Überblick darüber gegeben, wie sich verschiedene Zemente, Zusatzstoffe und Polymerkonzentrationen auf die Eigenschaften polymermodifizierter Mörtel auswirkten. Diese Untersuchungen sind als Vorversuche für die Entwicklung von Hochleistungsbetonen (siehe Kapitel 5) anzusehen. Ferner war es das Ziel, näheres über die Verteilung und die Wirkungsweise der Kunststoffe in dem Zementgefüge zu erfahren. Dazu wurden Normmörtel sowie Zementpasten mit Polymeren unterschiedlicher chemischer Basis hergestellt. Es handelte sich um die Produkte P1, P2, P23 sowie P124. Das Zuletztgenannte hatte nach Abschluß des Optimierungsprozesses (siehe Kapitel 3) unter Berücksichtigung der Herstellungsbedingungen und der Beeinflussung der Mörtel­eigenschaften die besten Ergebnisse erzielt. Es ist für die bauaufsichtliche Zulassung und Anwendung in der Praxis vorgesehen.

Es wurde der Einfluß von unterschiedlich zusammengesetzten Zementen auf die Wirkung der Polymere untersucht. In jedem Fall trat eine Verflüssigung ein. Als bestimmende Größen waren die Mahlfineinheit, der Alit- und Alkaligehalt der Zemente sowie die chemische Basis der Additive anzusehen. Eine spezifische Oberfläche von ca.  $3500 \text{ cm}^2/\text{g}$ , ein hoher Alitanteil am Gesamtklinker sowie ein niedriger Alkaligehalt begünstigen niedrige w/z-Werte und senken sie um maximal 30 %. Daraus resultierten entsprechend hohe Festigkeiten zu bereits frühen Prüfterminen. Die Polymere eignen sich ebenso für die Anwendung in hüttensandhaltigen Mörteln. Auf die anfängliche Zementhydratation hatten die Polyurethane einen verzögernden Einfluß, der zum Teil verlängerte Ausschulfristen der Mörtel zur Folge hatte. Er ließ sich u. a. auf eine Behinderung in der Ausbildung der CSH-Phasen zurückführen. Der verzögernde Effekt war besonders deutlich ausgeprägt, wenn ein Bindemittel mit einem hohen Alkaligehalt eingesetzt wurde. Es besteht die Vermutung, daß Alkaliionen mit dem Kunststoff einen Komplex in Form eines Kronenethers ausbildeten. Auswirkungen auf die Hydratation des Tricalciumaluminat-Sulfat­trägersystems durch die Polymere ließen sich nicht feststellen. Die Verzögerung war unabhängig vom  $\text{C}_3\text{A}$ -Gehalt des Zementes.

Durch die Verwendung von Zusatzstoffen wie Steinkohlenflugasche, Silicastauben und Basalt-, Kalkstein- und Glasmehl konnten die Eigenschaften der polymermodifi-

zierten Mörtel in den meisten Fällen verbessert werden. Basalt-, Kalkstein- und Glasmehl wirkten sich in erster Linie auf die Verarbeitungseigenschaften aus d. h. sie verminderten das Entmischen und erhöhten das Zusammenhaltevermögen. Am deutlichsten machte sich der Einfluß von Mikrosilica bei den modifizierten Mörteln bemerkbar. Durch die Füllerwirkung des Silicastaubs zwischen den Zementkörnern wurden bei gleicher Verarbeitbarkeit im Vergleich zu einem Mörtel ohne Silicastaub bis zu 32 % Wasser eingespart. Entsprechend niedrig war die Porosität, die wiederum zu hohen mechanischen Kennwerten und einer hohen Dichtigkeit des Gefüges führte. Der Vernetzungsgrad der Silikationen und damit der Hydratationsgrad nahm mit der Zugabe von Mikrosilica zu. Die optimale Konzentration betrug, ebenso wie bei den anderen Zusatzstoffen, 7,5 M.-%. Die Schwindmaße der silicastaubhaltigen Mörtel wurden im Vergleich zu entsprechenden zusatzstofffreien Mörteln erhöht, vermutlich bedingt durch ein erhöhtes autogenes Schwinden, das durch das verringerte Trocknungsschwinden nicht aufgehoben wurde. Nanosilica hatte dem Mikrosilica vergleichbare Auswirkungen im Mörtel. Auf Grund der langsamen Reaktion der Flugasche blieb die Festigkeitsentwicklung hinter der der mikrosilicahaltigen Mörtel zurück. Eine höhere Widerstandsfähigkeit gegenüber Frost-Tausalzangriff war durch die Zusatzstoffe nicht festzustellen.

Eine optimale Verbesserung der Mörtel Eigenschaften wurde erreicht bei einer Dosierung der Polymere von 2 M.-%, bezogen auf den Bindemittelgehalt, unabhängig von deren chemischer Basis. Höhere Konzentrationen wie 4, 6 und 8 M.-%, führten zum Teil zu einer deutlichen Erhöhung des Wasseranspruchs und verlängerten Ausschulfristen. Bei einigen Polymeren wurde noch eine leichte Absenkung des w/z-Wertes beobachtet. Höhere Polymergehalte verursachten jedoch keine höheren mechanischen Kennwerte bzw. Widerstandsfähigkeit. Niedrigere Polymergehalte wie 0,5, 1 und 1,5 M.-% bewirkten eine schrittweise Erniedrigung des Wassergehaltes sowie eine Verbesserung der Mörtel Eigenschaften bezüglich der gestellten Anforderungen.

## 5 Praktische Anwendungen

In dieser Arbeit werden zwei Beispiele für den Einsatz der Polymere in der Baupraxis behandelt: zum einen zur Herstellung von Hochleistungsbeton, zum anderen zur Herstellung von Dränbeton für den Straßenbau. Die Polymere übernehmen die Funktion eines Fließmittels und sollen gleichzeitig zu einer Abdichtung des Betongefüges beitragen. Ziele bei der Entwicklung von Hochleistungsbeton sind hohe Festigkeit und Dichtigkeit, niedriger E-Modul sowie gute Verarbeitungseigenschaften mit handelsüblichen Materialien und üblicher Verarbeitungstechnik.

### 5.1 Hochleistungsbeton

Hochleistungsbeton bezeichnet einen Baustoff, der neben seiner hohen Festigkeit ein besonders dichtes Gefüge aufweist. Die hohe Gefügedichte bewirkt eine Verbesserung der Widerstandsfähigkeit bei mechanischer Beanspruchung sowie gegenüber eindringenden, betonschädlichen Gasen und Flüssigkeiten. In der Normung spielt die Festigkeit die maßgebliche Rolle. Als hochfest werden Betone bezeichnet mit Druckfestigkeiten nach 28 Tagen zwischen  $75 \text{ N/mm}^2$  und  $115 \text{ N/mm}^2$ , gemessen an Würfeln mit 150 mm Kantenlänge. Hochfester Beton darf nur als Beton B II verarbeitet werden. Aufgrund fehlender Praxiserfahrung erfordert der Einbau von Betonen der Festigkeitsklassen C 90/105 und C 100/115 (nach DIN 1045 (Entwurf) 1998) eine besondere Genehmigung durch die Bauaufsichtsbehörde. Europäische Normentwürfe wie z. B. die prEN 206 von 1997 sehen diese Einschränkung nicht vor.

Die Entwicklung von Hochleistungsbeton begann in Deutschland bereits 1944 mit dem Entwurf eines B 60 durch VON HALASZ 1945. Anfang der 50er Jahre beschrieb GRAF 1954 die Herstellung von Betonen mit einer Festigkeit bis zu  $75 \text{ N/mm}^2$ . Fand die Erhärtung bei niedrigen Temperaturen und unter Druck statt, konnten nach 42 Tagen Werte bis zu  $140 \text{ N/mm}^2$  erzielt werden (WALZ 1966). Der Frischbeton setzte sich dabei aus Basaltzuschlägen mit einem Größtkorn von 25 mm und einem Zement PZ 45 (CEM I 42.5) zusammen, der Wasserzementwert betrug 0.32. Einen großen Fortschritt machte die Herstellung von hochfestem Beton zu Beginn der 70er Jahre mit der Entwicklung von Hochleistungsfließmitteln. Sie reduzierten deutlich den

Wasseranspruch und ermöglichten gleichzeitig eine gute Verarbeitung und Pumpfähigkeit des Betons. Stand der heutigen Technologie ist die Verwendung von Fließmitteln in Kombination mit Silicastaub als Betonzusatzstoff. Erstmals kam 1990 in Deutschland hochfester Beton (B 85) beim Bau des Verwaltungsgebäudes der Bank für Gemeinwirtschaft in Frankfurt zum Einsatz. Für das weltweit höchste Betongebäude, das "311 South Wacker Drive (292 m)" in Chicago/USA wurden 158.000 m<sup>3</sup> Beton B 83 eingebaut.

Zur Herstellung von Hochleistungsbeton werden mit Ausnahme des Silicastaubs Materialien verwendet, die auch für konventionellen Beton zur Anwendung kommen. Ziel ist die Erhöhung der Festigkeit der Zementsteinmatrix bzw. des Verbundes zwischen Zementstein und Zuschlag. Weiterhin sollte der Beton baustellengerechte Verarbeitungseigenschaften aufweisen. Im Gegensatz zu Normalbeton erfordert die Herstellung von Hochleistungsbeton besondere Qualitätssicherungsmaßnahmen wie z. B. Eignungsprüfungen mit den vorgesehenen Ausgangsstoffen.

Nachfolgend werden die in der Literatur beschriebenen Eigenschaften der Ausgangsmaterialien und die an sie gestellten Anforderungen diskutiert.

#### ▪ *Zement*

Die zur Herstellung von Hochleistungsbeton eingesetzten Bindemittel unterscheiden sich sehr stark hinsichtlich ihrer chemisch-mineralogischen Zusammensetzung und ihrer Mahlfeinheit. Das hängt zum einen mit der Verfügbarkeit der Zemente zusammen, zum anderen mit den verschiedenartigen Entwurfskriterien und der Wirtschaftlichkeit. Am häufigsten werden Portlandzemente CEM I 42,5 R verwendet. Mit einem CEM I 52,5 bzw. CEM I 52,5 R lassen sich hohe Früh- und 28-Tage-Festigkeiten erzielen, die Endfestigkeiten werden dagegen häufig reduziert. Ist die Frühfestigkeit vernachlässigbar, können auch Zemente mit niedrigerer Mahlfeinheit wie ein CEM I 32,5 R eingesetzt werden.

Der Zementklinker sollte, unter Berücksichtigung des Reaktionsverhaltens der einzelnen Klinkerphasen, einen hohen Alit- und Belitgehalt haben sowie einen niedrigen Anteil an C<sub>3</sub>A, C<sub>2</sub>(A,F) und Alkalien (ALTNER 1989). Zu dem gleichen Ergebnis kommt SARKAR 1992. Er untersuchte den Einfluß von 5 verschiedenen Zementen auf die Eigenschaften von Hochleistungsbeton. Alit bestimmt die Festigkeitsentwicklung

stärker als Belit, der bei dem niedrigen Wasserangebot nur sehr langsam hydratisiert. Ein geringer  $C_3A$ -Gehalt senkt den Wasseranspruch des Betons. Der Feinheit des Zementes kommt jedoch die größere Bedeutung zu. Um einen zielsicheren Betonentwurf zu gewährleisten, legt das ACI 1984 nahe die Variationsbreite von  $C_3A$ ,  $SO_3$ , Glühverlust und Mahlfineinheit zu begrenzen. Der Bindemittelgehalt von Hochleistungsbeton ist höher als der von Normalbeton. Die Angaben reichen von  $350 \text{ kg/m}^3$  bis  $500 \text{ kg/m}^3$ . Bei höheren Zementzugaben, wie sie zum Teil in den USA verwendet werden, besteht die Gefahr der Selbstaustrocknung durch Wassermangel im Inneren des Betons infolge der hohen, frei werdenden Hydratationswärme. Damit verbunden sind die Neigung zur Rißbildung sowie die Verformung durch Schwinden und Kriechen (SCHRAGE 1994). Die Temperaturprobleme steigen nicht proportional mit dem Zementgehalt, da die unvollständig ablaufende Hydratation, bezogen auf den Zementgehalt, die Wärmemenge reduziert (HELLAND 1987, TACHIBANA 1990). COOK 1989 untersucht in dem Zusammenhang die Temperaturentwicklung von Betonen unterschiedlicher Festigkeit, einem B 35, B 90 und B 120, bis zum 5. Tag nach ihrer Herstellung. Mit steigender Festigkeit nimmt der Zementgehalt zu bis auf  $540 \text{ kg/m}^3$ . Der Temperaturverlauf aller 3 Betone (Probekörperabmessung  $1 \text{ m} \cdot 1 \text{ m} \cdot 2.4 \text{ m}$ ) ist annähernd gleich. Das Maximum liegt bei dem normalfesten Beton bei  $43 \text{ }^\circ\text{C}$ , bei den hochfesten jeweils bei  $47 \text{ }^\circ\text{C}$ . AITCIN 1997 stellt fest, daß die Zementhydratation nicht zwangsläufig zu einem Temperaturanstieg im Frischbeton führen muß. Ist die entstehende Wärme gleich dem Wärmeverlust über die Oberfläche des Betonbauteils, verändert sich die Frischbetontemperatur nur unwesentlich. Im Winter kann sogar eine Erniedrigung auftreten.

Wird anstelle von Portlandzement Hochofenzement eingesetzt, verringert sich die Erwärmung in jedem Fall. Gleichzeitig nehmen die Rohdichten und Festigkeiten bis zum 28. Tag ab. Nach 90 Tagen erreicht ein hochfester Beton mit CEM III B 32,5 auf Grund der guten Nacherhärtung eine fast gleichhohe Festigkeit wie ein Beton mit CEM I 42,5 R (SPRINGENSCHMID 1996). Durch die Verwendung von Weißzement CEM I 42,5 R kann Hochleistungsbeton auch als Sichtbeton B 85 hergestellt werden (STARK 1993a). Ultrafeinzemente mit spezifischen Oberflächen nach BLAINE von  $10.000 \dots 15.000 \text{ cm}^2/\text{g}$  sind als Bindemittel für hochfeste Betone nicht geeignet, sondern z. B. der Herstellung von hochfesten, polymergebundenen Formenmassen vorbehalten.

▪ *Wasser-Zement-Wert, w/z-Wert*

Die Wasser-Zement-Werte von Hochleistungsbetonen liegen im Bereich von 0.20 ... 0.35. Eine Untergrenze ergibt sich durch die Gewährleistung einer ausreichenden Verarbeitbarkeit. Der niedrige w/z-Wert ist die Voraussetzung für eine hohe Festigkeit und Dichtigkeit des Betons. Die Absenkung von 0.45 auf 0.32 bzw. 0.28 verbessert den Säurewiderstand um 20 % bis 30 %. Gleichzeitig beschleunigt sich mit niedrigeren Wassergehalten die Wärme- und Festigkeitsentwicklung, insbesondere in Gegenwart von Silicastaub als Zusatzstoff, wie Untersuchungen im Bereich von 0.25 ... 0.70 belegen (MALHOTRA 1984). Niedrige Umgebungstemperaturen wirken sich nach HELLAND 1987 bei niedrigen w/z-Werten geringer auf die Endfestigkeiten aus.

Der Wassergehalt im Frischbeton setzt sich aus der Oberflächenfeuchte der Zuschläge, dem Zugabewasser sowie aus den Anteilen der gegebenenfalls zugesetzten Mikrosilicasuspension bzw. des Betonzusatzmittels zusammen. Auch die beiden letztgenannten Positionen sind auf den w/z-Wert anzurechnen. Das gleiche gilt für den Festkörperanteil derartiger Suspensionen und die Gesamtmasse von Flugasche (SCHRAGE 1994). Daraus ergibt sich als Grundlage für den Mischungsentwurf folgende Gleichung:

$$\omega = \frac{w_{zw} + w_{zs} + w_{zm}}{z + k_{sf} \cdot s + k_{FA} \cdot f} \quad (5.1)$$

$\omega$	: Wasser-Bindemittel-Wert
$w_{zw}$	: Zugabewassergehalt
$w_{zs}$	: Wassergehalt der Zusatzstoffe
$w_{zm}$	: Wassergehalt der Zusatzmittel
$z$	: Zementgehalt
$k_{sf}$	: Zementäquivalentfaktor für Silicastaub, nach prEN 206 1.0 ... 2.0
$s$	: Feststoffgehalt der Silicasuspension
$k_{FA}$	: Zementäquivalentfaktor für Flugasche, nach prEN 206 0.2 ... 0.4
$f$	: Flugaschegehalt

Die klassische Betontechnologie geht davon aus, daß für eine vollständige Hydratation des Zementes 25 % des Zementgewichtes als chemisch gebundenes und 15 % als physikalisch gebundenes Wasser notwendig sind (LOCHER 1976). Bei niedrigeren Wassergehalten, wie sie im Hochleistungsbeton vorkommen, hydratisiert der Zement nur unvollständig (siehe auch Kapitel 1.2.2.3) (KÖNIG 1992). DE LARRARD 1996 schlägt deswegen vor, den Teil des Zementes der nur als Füller dient, durch Stein-

mehle zu ersetzen und die Festigkeit gegebenenfalls durch Silikastaub zu korrigieren. Die Eigenschaften von hochfesten Betonen werden nach AITCIN 1997 zuerst vom Wasser-Zement-Wert bestimmt und später vom Wasser-Bindemittel-Wert, auf Grund der niedrigeren Reaktivität der Zusatzstoffe. Viele Autoren warnen vor einer zu starken Reduktion des Wassergehaltes. DANIELSEN 1987 und KOKKILA 1990 empfehlen den Festigkeitsgewinn gegen die zunehmende Neigung des Betons zur Selbst-austrocknung und Mikrorißbildung abzuwägen.

#### ▪ *Zuschlag*

Hochleistungsbetone zeichnen sich durch eine geringe Festigkeitsdifferenz zwischen Zementstein und Zuschlag aus d. h. die Art und Zusammensetzung des Zuschlags haben einen wesentlichen Einfluß auf die mechanischen Kennwerte. Der Wasseranspruch des Zuschlags, der durch die Kornform, die Korngrößenverteilung, die Oberflächenbeschaffenheit sowie die mineralogische Zusammensetzung bestimmt wird, sollte so gering wie möglich sein. Die höchsten Festigkeiten lassen sich erzielen, wenn der E-Modul des Zuschlags und der des Zementsteins annähernd gleich sind. Grundsätzlich gelten die Anforderungen der DIN 4226 auch für hochfeste Betone. In der Literatur weichen die Empfehlungen bis zu welcher Festigkeit Normalzuschläge ausreichen und ab wann gebrochenes Material eingesetzt werden sollte voneinander ab. Die BAUBERATUNG 1997 gibt als oberste Festigkeitsklasse für rundkornhaltige Betone B 85 an, FELSCH 1993 B 120.

Der Verbund zwischen Zementstein und Zuschlag ist bei gebrochenen Körnern wegen der rauheren Oberfläche besser als bei gerundeten. Empfohlen werden Splitte mit hoher Kornfestigkeit, gedrungener Kornform und ohne anhaftende Gesteinsmehle (KÖNIG 1992). NIEMEYER 1981 vergleicht den Einfluß von verschiedenen Natursteinsplitten auf die Frischbetoneigenschaften und mechanischen Kennwerte. Er ersetzt ab einem Korndurchmesser von 8 mm den Kies durch Basalt und Kalkstein, ab 2 mm durch Grauwackensplitt. Das Größtkorn beträgt jeweils 32 mm. Alle Betone werden mit einem CEM I 32,5 R hergestellt ohne Verwendung von Zusatzstoffen und Zusatzmitteln. Der w/z-Wert schwankt zwischen 0.64 und 0.67. Die kantige Kornform führt zu schlechteren Verarbeitungseigenschaften bzw. erhöht den Zementleimbedarf. Das Ansteifungsverhalten ist identisch mit dem der Kiesbetone ebenso wie die Biegezug-, Spaltzugfestigkeit und der E-Modul. Kalksteinsplitt reduziert geringfügig die

Druckfestigkeit. SPRINGENSCHMID 1996 tauscht Moränekies gegen Hartsteinsplitt aus und mißt die gleichen Festigkeiten aber höhere E-Moduln.

Die Empfehlungen zur Gesteinsart hängen von der regionalen Verfügbarkeit ab. ALTNER 1989 bevorzugt wegen der hohen Druck- und Verschleißfestigkeiten Magmatite, insbesondere Basalt. Das ACI 1984 ist der Meinung, daß wegen der chemischen Affinität zwischen Quarz und Portlandzement der Verbund verbessert wird. Glimmer erhöht, im Gegensatz zu Hornblende, den Wasseranspruch und reduziert die Festigkeiten (DANIELSEN 1987). AITCIN 1990 stellt Hochleistungsbeton mit 4 verschiedenen Zuschlägen her: Quarzkies, Diabas-, Kalkstein- und Granitsplitt. Die niedrigsten Druckfestigkeiten und E-Moduln ergibt Granitsplitt. Der Bruch verläuft durch das Gestein. Ursache dafür ist das Vorhandensein des Minerals Laumontit. Diabas führt zu den höchsten Druckfestigkeiten, Kalkstein zu den höchsten E-Moduln.

Die Sieblinie des Zuschlags beeinflußt den Wasseranspruch sowie die Konsistenz des Betons. Quellen berichten ausschließlich über hochfeste Betone mit stetiger Kornverteilung. Empfohlen wird eine Sieblinie zwischen den Regelsieblinien A und B nach DIN 1045: im Kornbereich bis 2 mm nahe B, für größere Korndurchmesser nahe A. Mit zunehmendem Größtkorn nimmt der Wasserbedarf in der Regel ab (JACOBSEN 1996). Aus Gründen der leichteren Verarbeitbarkeit fordert das CEB/FIP 1990 eine Begrenzung des Größtkorns auf 22 mm.

Zur Reduktion des Zugabewassers sollte der Gehalt an Feinanteilen möglichst niedrig sein. Der DEUTSCHE AUSSCHUß FÜR STAHLBETON (SCHRAGE) 1994 begrenzt deswegen den höchstzulässigen Mehlkorn- und Feinstsandgehalt (Feinstkorn  $\leq 0.25$  mm), der überwiegend aus Bestandteilen des Zementes, der Zusatzstoffe und des Zuschlags besteht. Empfohlen werden scharfe Sande. GJÖRV 1990 beobachtet höhere Festigkeiten und geringeren Abrieb bei Verwendung von Brechsand.

#### ▪ *Zusatzstoff*

Charakteristisch für die Herstellung von Hochleistungsbetonen ist die Verwendung von puzzolanischen Zusatzstoffen. Am häufigsten wird Silicastaub eingesetzt, der auf Grund seiner Füllerwirkung und hydraulischen Eigenschaften den Kontakt zwischen Zementstein und Zuschlag verbessert. Sein Einsatz empfiehlt sich bei Zielfestigkeiten

ab  $100 \text{ N/mm}^2$ . Die Wirkung ist im einzelnen in Kapitel 1.1.3 beschrieben. Silicastaub oder eine Silicasuspension können bei Vorliegen eines Prüfbescheides vom Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) als Betonzusatzstoff nach DIN 1045 verwendet werden (BAUBERATUNG 1997). Dabei gelten u. a. folgende Regelungen:

- Die maximale Zusatzmenge ist auf 10 M.-% Feststoff, bezogen auf den Zementgehalt, beschränkt.
- Der Wasseranteil der Suspension ist bei der Betonzusammensetzung zu berücksichtigen.
- Andere Betonzusatzstoffe dürfen nicht kombiniert mit Silicastaub eingesetzt werden.
- Die Betonzusammensetzung ist durch Eignungsprüfungen festzulegen.

Die eingesetzten Fließmittel sorgen für eine Verteilung des Silicastaubs in die Hohlräume zwischen den Zementpartikeln. Das vorhandene Wasser wird verdrängt und unterstützt eine Verflüssigung. Der Wasseranspruch sinkt nach Untersuchungen SCHIEBL 1994a dadurch um bis zu 16 %. Wird kein Verflüssiger eingesetzt, ruft die Verwendung von Silicastaub einen deutlich höheren Wasserbedarf des Frischbetons hervor, da 1 kg Silicastaub ca. 1 kg Wasser bindet (ALFES 1989). Die Empfehlungen in der Literatur zur Dosierung reichen von 2 M.-% bis 50 M.-%, wobei die geringen Mengen lediglich die Pumpfähigkeit verbessern (SANDVIK 1993, BACHE 1981). Eine deutliche Erhöhung der Betonfestigkeit ergibt sich ab einer Zugabemenge von 5 M.-% und steigt bei weiterem Zusatz an. Die Druckfestigkeit des Zementsteins erfährt dagegen kaum einen Anstieg (vgl. Abbildung 6-1). Ursache ist eine dichtere Übergangszone zwischen Zementstein und Zuschlag durch Silicastaub (KÖNIG 1992). MANNS 1990 berechnet ein Optimum bei 11 M.-%. Er geht davon aus, daß bei der vollständigen Hydratation von Portlandzement etwa 24 % Calciumhydroxid frei werden. Für den Korrosionsschutz sollten mindestens 4 % vorliegen und die restlichen 20 % binden bei vollständiger puzzolanischer Reaktion 11 % Silicastaub. Praktische Erfahrungen von ALFES 1989 bestätigen dieses Ergebnis. Auch aus wirtschaftlichen Gründen empfiehlt sich eine Begrenzung (DE LARRARD 1989). Weiterhin werden die Betone mit steigendem Silicagehalt klebrig und die Verdichtung wird erschwert, die Neigung zur Entmischung nimmt ab (Kugellagereffekt). Silicastaub hat keine Auswirkungen auf das Erstarrungsverhalten (MAAGE 1992).

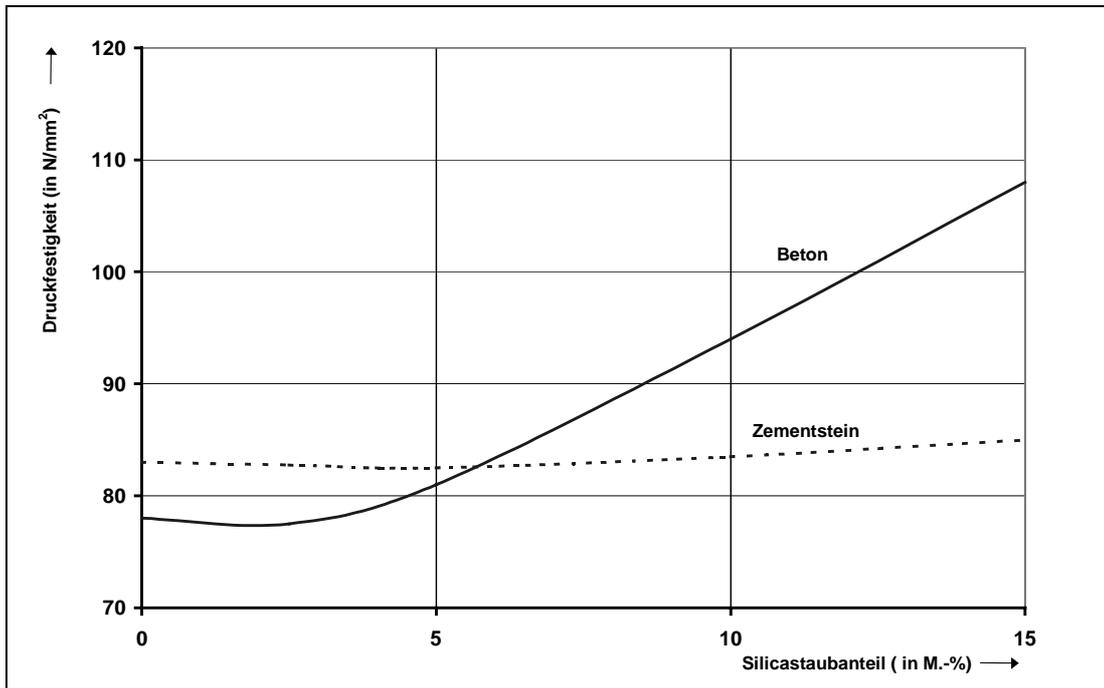


Abbildung 5-1. Druckfestigkeit von Beton und Zementstein in Abhängigkeit vom Silicastaubgehalt (nach BENTUR 1991).

Mit zunehmender Hydrationsdauer nimmt der Einfluß von Silica auf die Festigkeiten zu. Bereits nach 1 Tag beobachtet BENTUR 1989 10 % höhere Druckfestigkeiten bei einem silicastaubhaltigen Beton gegenüber einer Referenzmischung. Dies geht einher mit einem Temperaturanstieg und einer höheren Wärmeentwicklung, wie kalorimetrische Untersuchungen zeigen. Ursache dafür ist ein beschleunigender Effekt des Silicastaubs auf die Zementhydratation. Zu dem gleichen Ergebnis kommen MELAND 1983 und BUIL 1984. Die puzzolanische Reaktion setzt nach BREITENBÜCHER 1990 nach 2 bis 4 Wochen ein, wenn genügend Calciumhydroxid freigesetzt worden ist. Bei einem Festigkeitsanstieg des Betons von  $30 \text{ N/mm}^2$  geht der Calciumhydroxidgehalt in der Übergangszone Matrix - Zuschlag wieder um 6 % zurück. BENTUR 1989 mißt nach 56 Tagen die höchste freiwerdende Wärmemenge eines Silicabetons im Kalorimeter und begründet das mit dem Einsetzen der puzzolanischen Aktivität.

Silicastaub führt zu einer Erhöhung des statischen Beton-E-Moduls (AITCIN 1997). Ein Maximum ergibt sich bei einer Dosierung von 10 M.-% bezogen auf den Zementgehalt. Parallel dazu nimmt das Schwindmaß (Trocknungsschwinden) ab, da der Verformung ein höherer Widerstand entgegengesetzt wird. Das zu Beginn der Hy-

dratation verstärkt auftretende plastische Schwinden sowie das autogene Schwinden infolge der Selbstaustrocknung durch niedrige W/Z-Werte können kompensiert werden (LINDER 1992).

Steinkohlenflugasche ist ein weiterer in der Praxis häufig verwendeter puzzolanischer Zusatzstoff. Für Betone nach DIN 1045, ZTV-K und ENV 206 dürfen nur Flugaschen eingesetzt werden mit einem Prüfbescheid des Deutschen Institutes für Bau-technik (BVK 1993). Ihre Wirkung basiert im wesentlichen auf den gleichen Effekten wie beim Mikrosilica (vgl. Kapitel 1.2.3). Im Frischbeton verbessert Flugasche die Grünstandsfestigkeit, die Neigung zur Sedimentation wird verringert und die Verdichtungsarbeit minimiert (DARTSCH 1992). Die Wirkung im Festbeton ist gekennzeichnet durch die relativ langsame Reaktion des Puzzolans. Dies äußert sich in niedrigen Festigkeiten, insbesondere zu Beginn der Hydratation. Die Werte sind häufig niedriger als bei der Referenzmischung. Erst nach 6 Monaten werden vergleichbare Festigkeiten erreicht (SCHIEBL 1990). Der Einfluß von Flugasche auf den statischen E-Modul und das Schwinden ist gering, wenn Betone gleicher Druckfestigkeit miteinander verglichen werden.

Weitere in der Literatur beschriebene anorganische Zusatzstoffe für Hochleistungsbetone wie Reisschalenasche, Metakaolin und Schlacke spielen in der Praxis eine untergeordnete Rolle (AİTCIN 1997, MALHOTRA 1997).

Zunehmend an Bedeutung gewinnen organische Zusatzstoffe. Als Polymere werden Styrolbutadiene, Reinacrylate und Styrolacrylate verwendet. Um einen abdichtenden Effekt zu erzielen, müssen sie in einer Dosierung von über 5 M.-% bezogen auf den Zementgehalt zugegeben werden und benötigen demzufolge eine Zulassung vom DIBt. Die Kunststoffteilchen füllen bei einer Partikelgröße von 0.1 ... 0.2  $\mu\text{m}$  die Hohlräume zwischen den Zementkörnern aus. Infolge von Wasserentzug durch die Zementhydratation bildet sich im Betongefüge ein zusammenhängender Polymerfilm aus. SCHIEBL 1996 untersucht die Wirkung einer Styrol-Acrylat-Dispersion auf die Betoneigenschaften. Er beobachtet bei einer Dosierung von 10 M.-% Feststoff eine deutliche Verflüssigung sowie ein gutes Zusammenhaltevermögen des Frischbetons. Ursache für die verflüssigende Wirkung ist u. a. die oberflächenaktive Wirkung der Emulgatoren des Dispergiersystems. Der Festbeton wird unempfindlicher gegenüber der Nachbehandlung, die Zugfestigkeit nimmt zu und der statische E-Modul sinkt.

Die abdichtende Wirkung der Dispersion äußert sich in niedrigeren Wassereindringtiefen und einem höherem Frostwiderstand verglichen mit der Referenzmischung. Ein Einfluß auf die Druckfestigkeit wird nicht festgestellt.

▪ *Zusatzmittel*

Die Verarbeitung von Hochleistungsbetonen ist nicht möglich ohne die Verwendung von Betonverflüssigern (BV) oder Fließmitteln (FM). Ihr Einsatz ist bauaufsichtlich geregelt. Die maximale Zugabemenge ist auf 70 g/kg Zement bzw. 70 ml/kg Zement begrenzt. Werden mehrere Betonzusatzmittel verwendet, beträgt die zulässige Dosierung 80 g/kg bzw. 80 ml/kg. Es stehen Produkte folgender Wirkstoffbasis zur Verfügung: Ligninsulfonate, Naphtalin- und Melaminkondensate sowie Carboxylate. Sie werden im Hochleistungsbeton, im Gegensatz zu Normalbeton in hohen Konzentrationen, 5 ... 20 l/m<sup>3</sup>, eingesetzt. Ihre Wirkung beruht auf einer mechanisch-chemischen Dispergierung der Zementpartikel sowie der anderen Feinststoffe im Beton (SCHNEIDER 1993). Die Einzelheiten sind in Kapitel 1.2.2 detailliert beschrieben.

AÏTCIN 1997 untersucht den Einfluß von vier verschiedenen Fließmitteln auf die Eigenschaften von Hochleistungsbeton. Die Fließmittel werden so dosiert, das sich ein Ausbreitmaß von 420 ... 450 mm einstellt. Der w/z-Wert beträgt konstant 0.30. Das Fließmittel auf der Basis eines Carboxylats zeigt die stärkste verflüssigende Wirkung, gleichzeitig wird die Frühfestigkeit deutlich reduziert. Naphtalin- und melaminharzhaltige Produkte bewirken eine Verlängerung der Verarbeitungszeit ohne die Festigkeiten nach 14 und 24 Stunden zu beeinträchtigen. Auf die Festigkeiten nach 28 und 91 Tagen hat die Wahl des Fließmitteltyps nur einen geringen Einfluß. Zu dem gleichen Ergebnis kommt GUERRINI 1997.

Die Wahl des richtigen Verflüssigers spielt bei der Betonherstellung eine große Rolle. Wichtige Einflußfaktoren auf die Wirksamkeit sind die Zementzusammensetzung, der Zementgehalt, die Kornzusammensetzung der Zuschläge, der W/Z-Wert, die Mischzeit, die Mischintensität, die Konsistenz, die Temperatur und der Zeitpunkt der Fließmitteldosierung. Als optimal erweist sich die Beimischung nach der Wasserzugabe. Bei der Zugabe mit dem Wasser wird der Verflüssiger in das C<sub>3</sub>A-Gips-System eingebaut und es bleiben nur geringe Mengen für die Dispergierung von C<sub>3</sub>S und C<sub>2</sub>S übrig. (HEINRICH 1983, FELSCH 1986). Mit steigendem C<sub>3</sub>A-, Freikalk- und lösli-

chem Kaliumgehalt des Zementes nimmt die verzögernde und verflüssigende Wirkung der Fließmittel ebenfalls ab. Die Betonkonsistenz läßt sich nur bis zu einem bestimmten Grad verbessern. Darüber hinaus zugegebener Verflüssiger zeigt keine Wirkung. Eine Überdosierung kann im Beton die Erstarrung verzögern, Luftporen eintragen und Sedimentation hervorrufen. Luftporen werden vor allem dann erzeugt, wenn der Zuschlag hohe Gehalte an abschlämmbaren Bestandteilen aufweist, die mit dem Fließmittel reagieren (FELSCH 1986).

Neue Verflüssigertypen sollten das Ausbreitmaß über einen langen Zeitraum aufrechterhalten. FUJII 1985 entwickelt in dem Zusammenhang ein wasserunlösliches Polymer, daß sich im alkalischen Milieu in ein wasserlösliches umwandelt. Ähnlich geht FUKUDA 1990 vor. Er berichtet über eine Neuentwicklung, die zum einen aus einem Naphthalinkondensat als Dispergiermedium und zum anderen aus einem reaktiven Polymer besteht. Die Hydroxidionen der Porenlösung greifen das Polymer an und bewirken seine Wasserlöslichkeit.

#### ▪ *Nachbehandlung*

Eine gute Nachbehandlung des Betons erhöht seine Widerstandsfähigkeit gegenüber schädlichen Gasen und Flüssigkeiten und reduziert das Schwinden. Sie sollte nicht nur gegen den Wasserverlust durch Trocknung schützen, sondern darüber hinaus dem Beton Wasser zuführen. Dadurch wird der Kapillarporenanteil in der Randzone erniedrigt und die Zone dichter (SYBERTZ 1993, ACI 1984). HILSDORF 1986 findet heraus, daß bei Luftlagerung bis zu 25 % des Gesamtwassergehaltes verdunsten. Der Kapillarporengehalt steigt parallel um 4 %. Nach Meinung von AİTCIN 1997 ist der kritische Zeitraum in dem Wasser von außen dem Beton zugeführt werden sollte, 12 ... 36 Stunden nach der Herstellung. Eine spätere Feuchtlagerung hat wegen der kompakten Mikrostruktur kaum noch Auswirkungen auf das autogene Schwinden. REINHARDT 1997 ersetzt einen Teil des normalen Zuschlags durch wassergesättigte Leichtzuschläge als Feuchtigkeitsdepot um so ein späteres Austrocknen des Betons zu verhindern. Die beste Art der Nachbehandlung sieht bis zum 7. Tag nach der Herstellung eine Lagerung unter Wasser oder im Wasserdampf vor und anschließend an der Luft. Durch die feuchten Bedingungen zu Beginn erhöhen sich die Festigkeiten signifikant, unbeeinflußt vom Silicastaubgehalt (MEHTA 1989). Flugaschehaltige Betone sind empfindlicher gegenüber mangelnder Nachbehandlung als silicahaltige, da die puzzolanische Reaktion erst später einsetzt (WISCHERS 1990).

#### ▪ *Widerstandsfähigkeit*

Wesentlich für eine hohe Widerstandsfähigkeit gegenüber eindringenden, schädlichen Gasen und Flüssigkeiten sowie gegen mechanische Beanspruchung ist eine niedrige Festbetonporosität sowie eine Verschiebung hin zu kleineren Porendurchmessern. Nach Erfahrungen von STARK 1993b können Betone mit Gesamtporositäten von 10 ... 13 Vol.-% als sehr dicht angesehen werden. WAGNER 1996 gibt eine Übersicht über mögliche physikalische und chemische Angriffe auf Beton. Physikalische Angriffe werden zum einen verursacht durch Transportvorgänge wie Diffusion und das Eindringen von Flüssigkeiten, zum anderen durch statische und dynamische Kräfte (Druck-, Zug-, Torsionskräfte, Verschleiß). Die chemischen Einflüsse können u. a. unterschieden werden in lösende (organische und anorganische Säuren) und treibende Vorgänge (z. B. Ettringitbildung, Alkali-Kieselsäure-Reaktion).

#### - *Chemische Widerstandsfähigkeit*

Prüfmethode zur Beurteilung der chemischen Widerstandsfähigkeit von Beton wurden vom DEUTSCHEN AUSSCHUSS FÜR STAHLBETON (PASCHMANN) 1995a aufgestellt. Darin wird unterschieden zwischen Verfahren zur:

- Bestimmung der Eindringmenge und Eindringtiefe der Flüssigkeiten in Beton
- Bestimmung der Dampfdiffusion von Beton
- Prüfung des chemischen Widerstandes von Beton

Das Eindringen von Flüssigkeiten hängt ab von der Gefügestruktur des Betons und den physikalischen und chemischen Eigenschaften der Flüssigkeit. Basierend auf der Einteilung von SCHÖNBERG 1988 hat das IfBt, heute DIBt, 1989 für neun chemische Hauptgruppen Referenzflüssigkeiten festgelegt, zwecks Prüfung der Betondichtigkeit. Transportarten, die für das Eindringen von Gasen und Flüssigkeiten in Frage kommen, sind Diffusion, Kapillarleitung sowie laminare Strömung. Der Kapillarleitung kommt die größte Bedeutung zu.

Die Mehrzahl der in der Literatur beschriebenen Untersuchungen stellen eine Abhängigkeit des chemischen Widerstandes vom Silicastaubgehalt des Betons fest. Mit steigendem Anteil nimmt die Stärke der Schädigung ab. In der fünffachen Zeit werden vergleichbare Eindringtiefen gemessen wie bei Betonen ohne Silicazusatz (MEHTA 1985). Weiterhin erhöht sich der Sulfatwiderstand der silicahaltigen Betone.

GJÖRV 1990 begründet das mit der Zunahme der Dichtigkeit und mit der Bindung von Aluminiumionen aus dem Zement durch den Silicastaub. Beide Effekte reduzieren die Ettringitbildung während der Erhärtung. Die in den Versuchen von PASCHMANN 1994 eingesetzten organischen Zusatzstoffe Styrol-Butadien und Polystyren leisten auf Grund ihrer quellenden bzw. lösenden Reaktion mit der eindringenden Flüssigkeit einen weiteren Beitrag zur Abdichtung des Betongefüges.

*- Frosttauwechsel- bzw. Frosttausalz-Widerstand*

Ein genormtes Verfahren zur Prüfung des Frostwiderstandes von Betonen existiert zur Zeit in Deutschland noch nicht. Die national am häufigsten verwendeten Methoden sind das VDZ-Würfelverfahren sowie das CF- bzw. CDF-Verfahren. Umfangreiche Untersuchungen von SETZER 1991 und STARK 1994 vergleichen die verschiedenen Prüfmethode miteinander. Einen wesentlichen Einfluß auf die Prüfergebnisse hat die Vorlagerung der Proben. Überschreitet der Wassergehalt einen kritischen Wassersättigungsgrad tritt bereits nach dem ersten Frosttauwechsel eine Schädigung auf (FAGERLUND 1977). Abbildung 5-2 zeigt den Schädigungsverlauf eines Betons mit unzureichendem Frost- bzw. Frosttausalz-Widerstand.

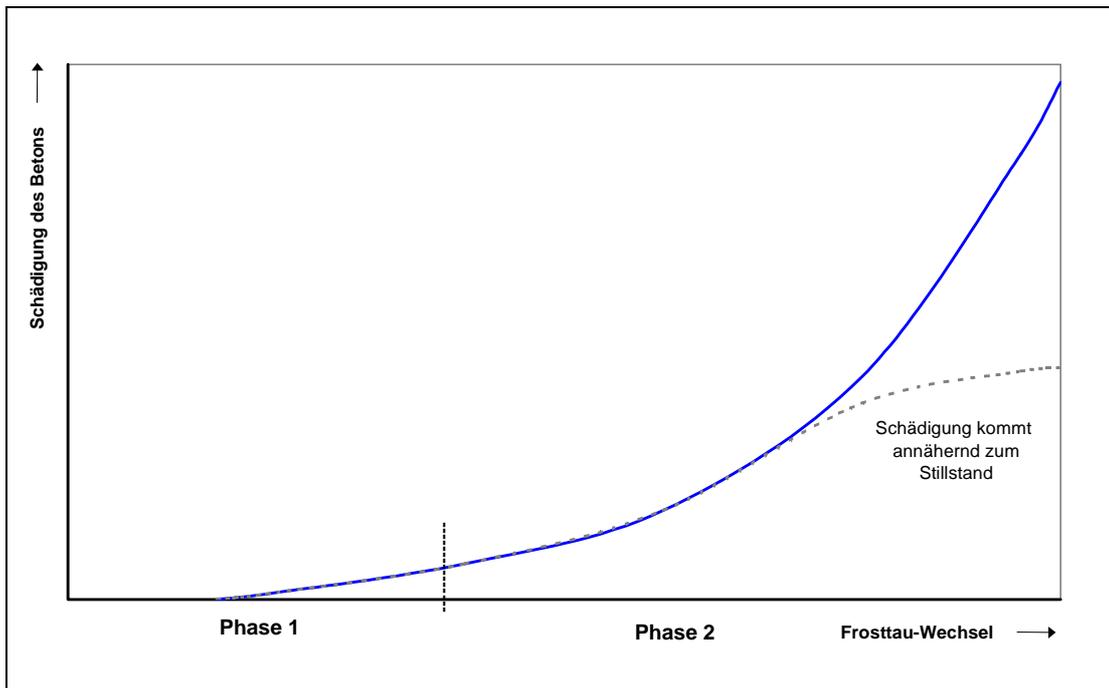


Abbildung 5-2. Schädigungsverlauf bei einem Beton mit unzureichendem Frost- bzw. Frosttausalz-Widerstand (nach SIEBEL 1992).

Phase 1: Mikroschädigung und Verschärfung der Beanspruchung (Erhöhung des Wassergehaltes, der Lastwechsel und ggf. der Chloridkonzentration)

Phase 2: Makroschädigung: Entstehung von Oberflächen- und/oder Gefügeschäden

Der Schädigungsmechanismus durch Frosttauwechsel beruht zum einen auf der Volumenvergrößerung des Wassers beim Gefrieren, zum anderen können Spannungen auftreten auf Grund von Oberflächenkräften und durch den Wassertransport im Gefüge. Ist der Beton mit Tausalzen getränkt, tritt zusätzlich ein osmotischer Druck auf. Die Salzlösung in den tieferen Schichten gefriert auf Grund der geringeren Konzentration zuerst und setzt den später, in höheren Schichten gefrierenden Lösung, einen Widerstand entgegen. Beim Frosttausalzangriff werden in erster Linie die oberflächennahen Zonen beansprucht (SIEBEL 1992). Eine detaillierte Übersicht über den Schädigungsmechanismus gibt STARK 1995.

Nach Aussage mehrerer Autoren weisen hochfeste Betone ab B 85 auch ohne Luftporbildner einen hohen Frost- bzw. Frosttausalzwiderstand auf. Silicastaub, insbesondere in hohen Dosierungen verwendet, vermindert die Widerstandsfähigkeit (SELLEVOLD 1996).

*- Brandverhalten*

Hochfeste Betone zeigen bei thermischer Beanspruchung über 100 °C ein ungünstiges Verhalten. Die Festigkeit reduziert sich nach Untersuchungen von DIEDERICHS 1983 bei 150 °C um 30 %. Bei Normalbetonen tritt dieser Abfall erst bei 350 °C auf. Steigt die Temperatur auf über 800 °C, verdampft das im Zementstein chemisch und physikalisch gebundene Wasser und führt zu einer Absprengung der Betondecke. Nachteilig auf das Brandverhalten wirkt sich weiterhin die hohe Sprödigkeit des Betons und der niedrige Gehalt an Kapillarporen aus, in die sich der Dampf entspannen könnte. BREITENBÜCHER 1996 mischt dem Beton zu diesem Zweck Propylenfasern zu, die bei hohen Temperaturen schmelzen und Kanäle hinterlassen.

*- Verschleißwiderstand*

Der Verschleißwiderstand von Hochleistungsbeton wird in der Literatur als sehr gut beurteilt. Erfahrungen hierzu liegen vor allem beim Bau von Fahrbahndecken in Skandinavien vor (PEDERSEN 1988).

*▪ Einsatzgebiete*

Die hohe Dichtigkeit und Festigkeit von Hochleistungsbeton bieten konstruktive Vorteile, die in den unterschiedlichsten Anwendungsbereichen genutzt werden. Beim Bau von Hochhäusern können die Abmessungen der Bauteile verkleinert und der Bewehrungsanteil reduziert werden. Die Verformungen unter Dauerlast sind geringer (HUBER 1993). Diese Vorteile werden gleichermaßen beim Brückenbau ausgenutzt. Weitere Anwendungsmöglichkeiten auf Grund der hohen chemischen Widerstandsfähigkeit ergeben sich beim Bau von Ölplattformen, Becken von Kläranlagen, Auffangwannen von Deponiewässern, Abwasserkanälen und Rohren (MIEDLER 1993).

*▪ Typische Rezepturen*

Typische Mischungsentwürfe für Hochleistungsbetone sind in Tabelle 5-1 angegeben (KÖNIG 1991).

Tabelle 5-1. Rezepturbeispiele von Hochleistungsbetonen

		B 65	B 115
CEM I 42,5 R	/ kg/m <sup>3</sup>	416	-
CEM I 52,5	/ kg/m <sup>3</sup>	-	450
Silicastaub (Feststoff)	/ kg/m <sup>3</sup>	-	45
Wasser	/ kg/m <sup>3</sup>	124.8	148.5
Fließmittel	/ kg/m <sup>3</sup>	13.0	22.5
Verzögerer	/ kg/m <sup>3</sup>	-	1.8
Sand 0 ... 2	/ kg/m <sup>3</sup>	650	829
Kies 2 ... 8	/ kg/m <sup>3</sup>	418	-
Kies 8 ... 16	/ kg/m <sup>3</sup>	789	-
Splitt 2 ... 5	/ kg/m <sup>3</sup>	-	270
Splitt 5 ... 8	/ kg/m <sup>3</sup>	-	207
Splitt 8 ... 11	/ kg/m <sup>3</sup>	-	353
Splitt 11 ... 16	/ kg/m <sup>3</sup>	-	415

### 5.1.1 Verwendete Materialien

Zur Optimierung der Betonzusammensetzung im Hinblick auf eine hohe Dichtigkeit und Festigkeit werden bei der Auswahl der Rohstoffe die Ergebnisse aus den Mörteluntersuchungen (vgl. Kapitel 4) und der Literaturrecherche berücksichtigt.

#### 5.1.1.1 Bindemittel

Als Bindemittel wurden die normgerechten Portlandzemente CEM I 42,5 R und CEM I 52,5 R aus dem Werk C eingesetzt. Die chemischen Analysen, die Korngrößenverteilungen und die Kornrohdichten befinden sich im Anhang in den Tabellen 8-2 bis 8-4.

#### 5.1.1.2 Zuschlag

Für die Betone wurden Zuschläge aus gerundetem und gebrochenem Korn verwendet. Bei dem Rundkorn handelte es sich um Rheinsand und Rheinkies aus quarziti-

schem Material, daß in den Korngruppen 0/2, 2/8, 8/16 vorlag. Der gebrochene Zuschlag, Brechsand und Splitt aus Basalt (Westerwald), setzte sich aus den Körnungen 0/2, 2/5, 5/8, 8/11 und 11/16 zusammen. Von jeder Kornfraktion wurde die Sieblinie bestimmt. Der Mehlkorn- und Feinstsandanteil des Brechsandes (0/2) wurde abgeseibt und später dem Beton wieder dosiert zugesetzt. Dabei wurden die Richtwerte für die höchstzulässigen Gehalte nach DIN 1045 für Beton mit besonderen Eigenschaften eingehalten. Die Zuschläge wurden bei 105 °C getrocknet. Sie erfüllten die Anforderungen der DIN 4226 Teil 1 an die Kornform, die Kornzusammensetzung und den Frosttauwechselwiderstand.

### 5.1.1.3 Sieblinie

Die Kornzusammensetzung der Betone entsprach einer Sieblinie zwischen den Regelsieblinien A 16 und B 16 nach DIN 1045 (vgl. Abbildung 5-3). Nach dem Überkorn-Unterkorn-Verfahren wurden die prozentualen Anteile der einzelnen Korngruppen berechnet, die im Anhang in den Tabellen 8-26 und 8-27 gesondert aufgeführt sind (SCHOLZ 1997). Der k-Wert der Sieblinie betrug 1.64. Den brechsandhaltigen Betonen wurden 2.2 M.-% bzw. 2.3 M.-% des zuvor vom Brechsand abgeseibten Mehlkorns ( $< 0.125 \mu\text{m}$ ) und Feinstsandes ( $0.125 \dots 0.250 \mu\text{m}$ ) wieder zugegeben. Diese Werte ergaben sich in Vorversuchen aus der Optimierung der Verarbeitungseigenschaften und des Wasseranspruchs. Es wurden Betone hergestellt, in denen die Zuschläge folgendermaßen variiert wurden:

- Rundkorn 0/16
- Gebrochenes Korn 0/16
- Rundkorn 0/2, Gebrochenes Korn 2/16

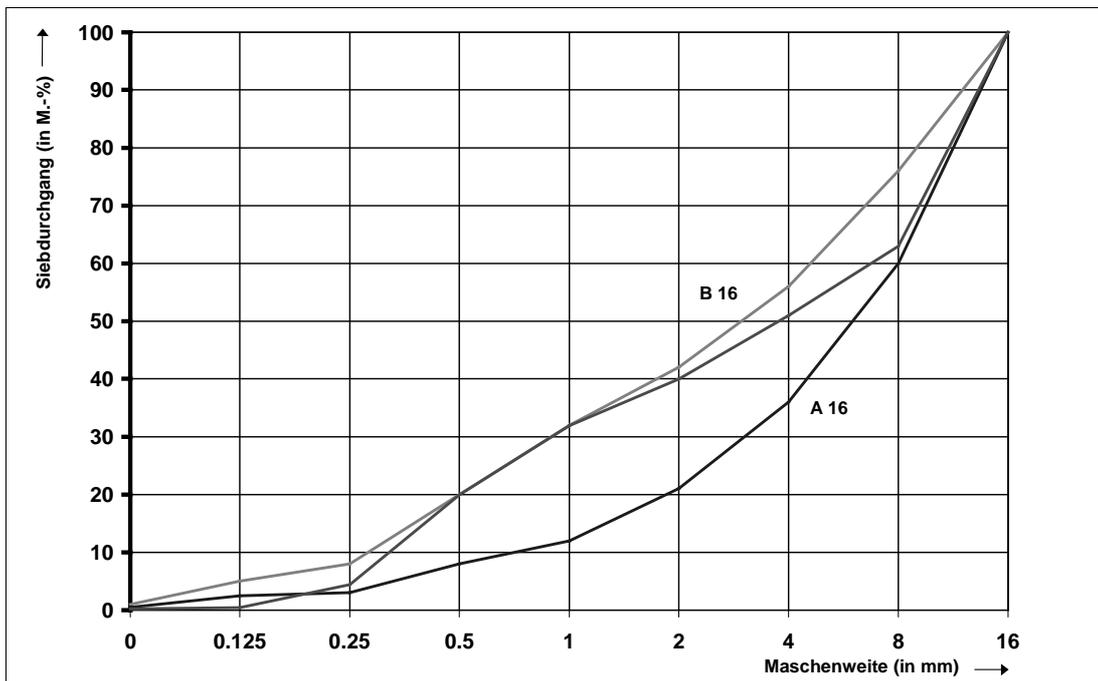


Abbildung 5-3. Sieblinie für Hochleistungsbetone am Beispiel des Rundkorns 0/16  
Die mittlere Linie stellt die verwendete Sieblinie dar

#### 5.1.1.4 Zusatzstoff

Als anorganische Zusatzstoffe kamen Mikrosilica und eine Steinkohlenflugasche, als organischer Zusatzstoff eine Copolymerisatdispersion aus Styrol und einem Acrylsäureester, jeweils mit Prüfzeichen, zur Anwendung. Die Mindestfilmbildungstemperatur des Polymers betrug ca. 32 °C. Das Mikrosilica und der Kunststoff lagen als 50 %ige Dispersion vor. Der Wasseranteil wurde auf den w/z-Wert angerechnet. Die granulometrischen und chemischen Zusammensetzungen der Zusatzstoffe sind im Anhang in den Tabellen 8-3 und 8-4 zusammengefaßt.

#### 5.1.1.5 Zusatzmittel

Folgende Zusatzmittel wurden für die Untersuchungen eingesetzt: Polymere auf Polyetherpolyurethanbasis, ein Stabilisierer, ein Verzögerer sowie Entschäumer.

Die verwendeten Polyurethane P2, P23, P42, P45 und P124 unterschieden sich hinsichtlich ihrer chemischen Zusammensetzung und Viskosität. Bei dem Stabilisierer handelte es sich um eine 46 %ige Nanosilicasuspension. Als Verzögerer kam ein handelsübliches Produkt auf Phosphatbasis zum Einsatz. Der genaue Wirkungsmechanismus ist noch unbekannt. Vermutlich beruht die Verzögerung auf der Bildung einer Schutzschicht auf der Oberfläche der Zementpartikel, die die Weiterreaktion behindert. Der Einfluß von Entschäumern, in diesem Fall ein Siliconentschäumer, ist ebenfalls ungeklärt. Sie tragen zu einer Destabilisierung des Schaums bei, indem sie zum einen die Kohäsionskräfte zwischen den Teilchen reduzieren und andererseits an der Oberfläche Tensidmoleküle anlagern, die den Schaum zusammenbrechen lassen.

#### **5.1.1.6 Betonherstellung**

Zuschlag, Zement und ggf. feste Zusatzstoffe wurden in einem Zwangsmischer kurz trocken vorgemischt und das Wasser bzw. die Polymeremulsion sowie eventuell flüssige Zusatzstoffe/-mittel zugegeben. Die anschließende Mischzeit betrug 2 Minuten. Nach den Frischbetonprüfungen wurden die Probekörper mit einer Verdichtungszeit von 20 Sekunden auf einem Rütteltisch hergestellt.

#### **5.1.1.7 Nachbehandlung**

Im Rahmen der Festbetonuntersuchungen wurden zwei unterschiedliche Lagerungsarten der Probekörper gewählt, um im Labor die Verhältnisse in der Praxis mit guter und weniger guter Nachbehandlung zu simulieren:

- LL 7 : 1 Tag in der Schalung bei 20 °C/95 % rel. F., 6 Tage unter Wasser bei 20 °C und bis zur Prüfung bei einer Temperatur von 20 °C und einer relativen Feuchte von etwa 65 %
- LF : 1 Tag in der Schalung bei 20 °C/95 % rel. F., anschließend in Folie eingeschlagen bei 20 °C

### 5.1.1.8 Versuchsprogramm

Um den Einfluß unterschiedlicher Betonzusammensetzung und Nachbehandlung auf die Eigenschaften von polymermodifizierten Hochleistungsbetonen zu bestimmen, variierten die Festigkeitsklasse des Zementes, der Zementgehalt, die Art der Zuschläge, die Zusatzstoffe und -mittel, die Konsistenz sowie die Nachbehandlung. Daraus ergeben sich 61 verschiedene Mischungen, deren Zusammensetzung in Tabelle 8-28 im Anhang aufgeführt ist. Als Vergleich dienten entsprechende Null-Mischungen. Die Mischungszusammensetzung erfolgte nach vorheriger Stoffraumrechnung.

Üblicherweise betrug der Zementgehalt der Betone  $450 \text{ kg/m}^3$ , in einigen Fällen wurden  $550 \text{ kg/m}^3$  CEM I 42,5 R bzw. CEM I 52,5 R eingesetzt. Die w/z-Werte zur Einstellung einer plastischen Konsistenz reichten von 0.20 bis 0.52. Einzelne Betone besaßen eine fließfähige bzw. weiche Konsistenz. Bei Verwendung von Polyurethanen als Zusatzmittel betrug die Dosierung konstant 2 M.-% vom Zementgewicht. Dies entsprach einem Kunststoff/Zement-Wert (k/z-Wert) von 0.02. Betone mit der Kennzeichnung R enthielten gerundete, quarzitisches Zuschläge d. h. Rheinsand bzw. Rheinkies. Ein "G" steht für Brechsand und Splitt aus Basalt, "RG" bezeichnet Betone mit Rheinsand und Splitt. Eine Übersicht der verwendeten Abkürzungen befindet sich im Anhang in Tabelle 8-28. Die Kornzusammensetzung lag in allen Fällen gemäß der Regelsieblinien zwischen A 16 und B 16.

Zur Erhöhung der Dichtigkeit wurden einem Teil der Betone 10 M.-% bezogen auf den Zementgehalt Silicastaub, Flugasche oder Kunststoffdispersion auf Styrolacrylatbasis zugegeben (k/z-Wert: 0.1). Bei einer Mischung wurde ein Teil des Mikrosilicas durch 3 % Nanosilica ersetzt, bei einer weiteren Mischung 2 % der Styrolacrylatdispersion durch ein Polymer auf Polyurethanbasis. Um die Wirkung unterschiedlicher Nachbehandlungsarten festzustellen, wurden die Betone den in Abschnitt 5.1.1.7 beschriebenen Lagerungen ausgesetzt. Einzelne Prüfungen erfolgten exemplarisch an ausgewählten Mischungen.

### 5.1.2 Frischbetonuntersuchungen

Die Frischbetoneigenschaften sind im Anhang in Tabelle 8-29 aufgeführt. Wichtige Einflußgrößen auf den Wasserbedarf sind der Zuschlag und die Polymere. Die Art des verwendeten Zusatzstoffes, die Mahlfeinheit des Zementes sowie dessen Menge haben nur geringe Auswirkungen auf den w/z-Wert. Betone mit Brechsand und Splitt weisen um bis zu 16 % bzw. 26 % höhere Wassergehalte auf als die rundkornhaltigen bzw. die sich aus einer Kombination aus Sand mit Splitt zusammensetzten. Die Polymere P2, P23, P42, P45 sowie P124 besitzen bei einer Zugabemenge von 2 M.-% eine deutlich verflüssigende Wirkung. Sie zeigen eine besondere Affinität zu Brechsand. Die Wassereinsparung ist bei diesen Mischungen höher als bei denen die nur Rundkorn bzw. die neben Sand noch Splitt enthielten. Verglichen mit den jeweiligen Null-Mischungen senken die Kunststoffe den Wasser/Zement-Wert um maximal 44 %. Durch die Zugabe einer Styrolacrylatdispersion in einer Menge von 8 M.-% Feststoff bezogen auf den Zementgehalt, können vergleichbare Werte erzielt werden. Mikrosilica und Flugasche bewirken, zusammen mit den Polymeren auf Polyurethanbasis, eine weitere Wassereinsparung im Frischbeton. Dies ist zurückzuführen auf das Auffüllen der Zwickel zwischen den Zementpartikeln durch die Zusatzstoffe. Die Fließmittel tragen zu deren Dispergierung bei.

Die kantige Kornform der gebrochenen Zuschläge führt zu schlechteren Verarbeitungseigenschaften. Dieser Effekt wird verstärkt durch den Zusatz von Mikrosilica. Die Betone sind klebrig und wenig verdichtungswillig. Gleichzeitig nimmt die Neigung zu Entmischungen ab. Bei den polymermodifizierten Mischungen kann ein thixotropes Fließverhalten beobachtet werden. Um das Ansteifen über die Zeit zu verfolgen, wird das Ausbreitmaß von ausgewählten Mischungen direkt nach der Herstellung sowie nach 30 und 60 Minuten bestimmt, obwohl die über das Verdichtungsmaß ermittelte Konsistenz die Verarbeitbarkeit der Betone aus gebrochenem Zuschlag besser beschreibt. Das Ausbreitmaß ermöglicht jedoch eine gute optische Beurteilung. Die Ergebnisse zeigen, daß die untersuchten Polymere P23 und P124 auf den Erhärtungsbeginn eine verzögernde Wirkung ausüben. Bei den unmodifizierten Betonen ist nach 60 Minuten kein Verlauf mehr meßbar. Mischungen mit weicherer Ausgangskonsistenz neigen zu stärkerem Ansteifen als solche mit niedrigerer Ausgangskonsistenz.

Der Luftgehalt ist ein Kriterium für die erreichte Verdichtung des Betons. Er liegt für die rundkornhaltigen Mischungen im Bereich von 1.85 ... 3.75 Vol.-%, für die mit gebrochenem Korn zwischen 0.35 und 3.10 Vol.-% und bei den Betonen, deren Zuschlag sich aus Sand und Splitt zusammensetzt im Bereich von 1.10 ... 3.20 Vol.-%. Eine Ausnahme stellt die Probe mit 8 % einer Styrolacrylatdispersion und 2 % P23 dar. Der Luftporengehalt beträgt 6.50 Vol.-%. Es ist zu erkennen, daß sich die Betone mit gebrochenen Zuschlägen bei ausreichender Verdichtungsenergie gut verdichten lassen. Die Polymere auf Polyurethanbasis führen keine zusätzlichen Luftporen ein. Erwartungsgemäß korrelieren die Frischbetonrohdsichten mit dem Brechsand- und Splittgehalt in den Mischungen. Bei gleichem Kornaufbau hängt die Rohdichte vom Luftgehalt ab.

### **5.1.3 Festbetonuntersuchungen**

#### **5.1.3.1 Mechanische Eigenschaften**

Die Daten sind den Tabellen 8-30 und 8-31 im Anhang zu entnehmen. Alle untersuchten Betone sind gemäß der Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton als hochfeste Betone einzustufen. Tendenziell nimmt mit abnehmendem Wasser/Zement-Wert die Bruchenergie zu. Gegenüber den polymerhaltigen Kiessand- bzw. Splittbrechsandbetonen zeigen die vergleichbaren Betone mit Zuschlägen aus Sand und Splitt geringfügig höhere Druckfestigkeiten. Diesen Zusammenhang macht Abbildung 5-4 deutlich. Dargestellt sind die Druckfestigkeiten nach 28 Tagen, gemessen an 10er Würfeln.

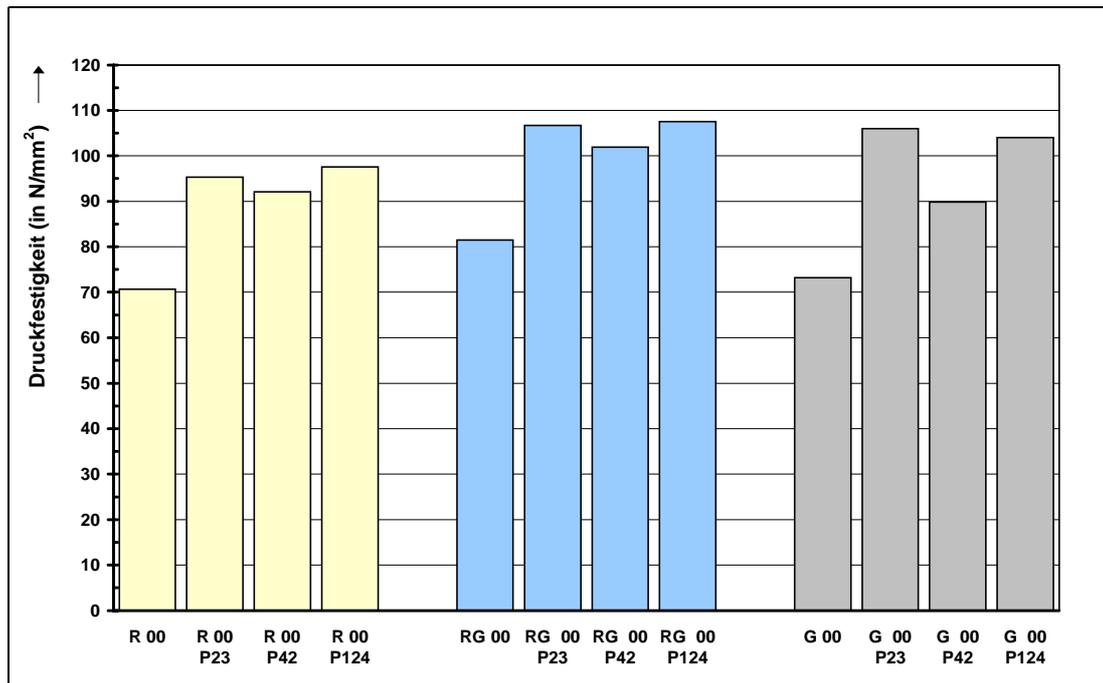


Abbildung 5-4. Einfluß des Zuschlags auf die Druckfestigkeit nach 28 Tagen

RG : Rundkorn 0/2, Gebrochenes Korn 2/16

G : Gebrochenes Korn 0/16

R : Rundkorn 0/16

00 : 450 kg/m<sup>3</sup> CEM I 42.5 R, Werk C

Mit zunehmendem Gehalt an Feinanteilen, entweder in Form von Mikrosilica, durch Zement höherer Mahlfeinheit oder einen höheren Zementgehalt, nehmen die Druckfestigkeiten zu. Der Wasseranspruch der Betone sinkt dagegen nur durch die Verwendung von Silicastaub. Die Ergebnisse müssen differenzierter betrachtet werden, wenn die Betone außerdem noch Polymere und Silicastaub enthalten. Am Beispiel der Splittbrechsandmischungen werden die Zusammenhänge erläutert (vgl. Abbildung 5-5).

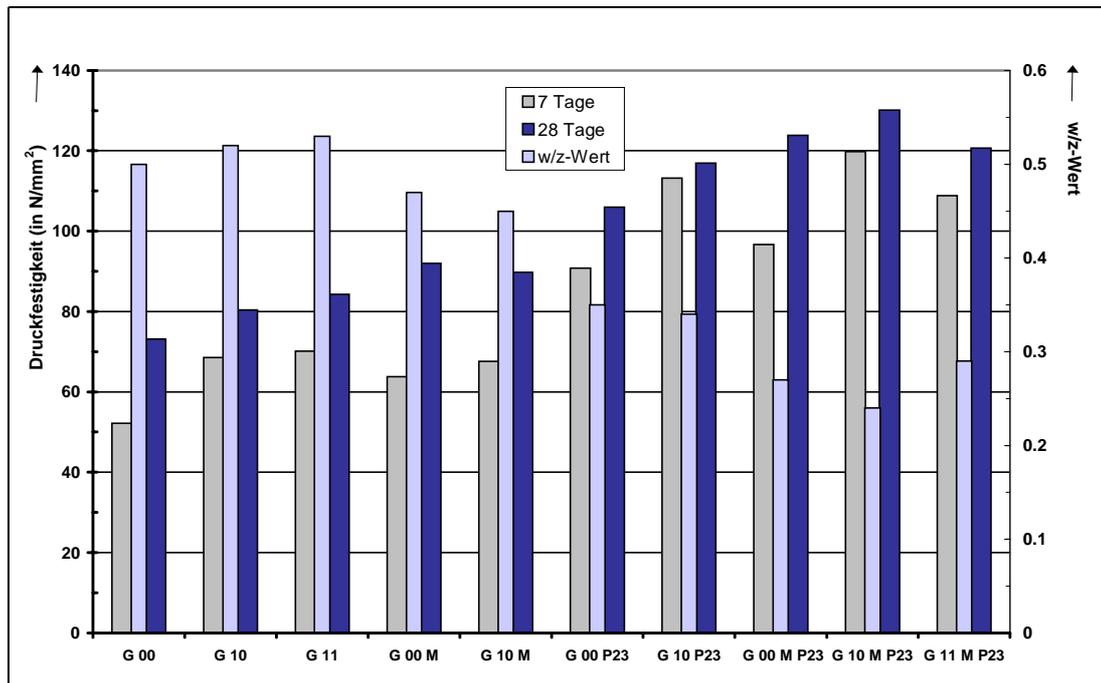


Abbildung 5-5. Einfluß des Zementgehaltes und dessen Mahlfeinheit auf die Druckfestigkeiten splittbrechsandhaltiger Betone

G : Gebrochenes Korn 0/16

0 : CEM I 42.5 R, Werk C

0 : 450 kg/m<sup>3</sup> Zement

M: Mikrosilica, 10 M.-% (Feststoff)

1 : CEM I 52.5 R, Werk C

0 : 550 kg/m<sup>3</sup> Zement

P23: Polymer 23

Die stark verflüssigende Wirkung des Polymers P23 läßt die Festigkeiten der Mischungen G 00 P23 (mit CEM I 42.5 R) und G 10 P23 (mit CEM I 52.5 R) weiter ansteigen. Auffallend sind die hohen 7-Tage-Werte, die bei der Probe G 10 P23 bereits 113.2 N/mm<sup>2</sup> erreichen. Eine weitere Zunahme kann durch eine Kombination aus Mikrosilica mit Kunststoff erzielt werden. Ein zu hoher Feinanteil d. h. 10 M.-% Silica sowie 550 kg/m<sup>3</sup> CEM I 52.5 R bewirken einen höheren w/z-Wert, die Druckfestigkeiten nach 7 und 28 Tagen nehmen ab.

Die Polymere bewirken zum einen durch die Reduktion des w/z-Wertes einen Anstieg der Betonfestigkeiten, zum anderen tragen sie selbst zur Festigkeitssteigerung bei. Dies wird deutlich bei Betrachtung der Mischungen R 00 und R 00 P23 (siehe Anhang Tabelle 8-29). Bei gleichem Wassergehalt aber verschiedener Konsistenz, weist der modifizierte Beton zu jedem Prüftermin höhere Werte auf. Die Zugabe von anorganischen Zusatzstoffen muß differenziert betrachtet werden. Zehn M.-% Mikrosilica führen in den meisten Fällen zu einer Festigkeitssteigerung, insbesondere nach

einer Hydratationsdauer von 28 Tagen. Hingegen verläuft die Festigkeitsentwicklung der flugaschehaltigen Mischungen nahezu identisch mit denen der entsprechenden Null-Betone. Eine signifikante Erhöhung infolge der puzzolanischen Reaktion der Flugasche kann nur bei der Probe G 00 F P42 festgestellt werden. Die Kombination aus Mikro- und Nanosilica wirkt sich positiv auf die Druckfestigkeit der Null-Mischung aus. Der Zusatz von Kunststoff, P23, führt in diesem Fall zu einem Festigkeitsverlust.

Abbildung 5-6 zeigt die Langzeitfestigkeitsentwicklung ausgewählter Betone. Zur besseren Übersicht wird eine logarithmische Skalierung der Zeitachse (Abszisse) gewählt. Nach 28 Tagen erreichen die Betone annähernd ihre Endfestigkeiten. Die Werte steigen bis zum 360. Tag nur noch geringfügig an bzw. nehmen leicht ab. Das Polymer P42 bewirkt im Gegensatz zu P23 eine anfängliche Behinderung der Hydratation, die im weiteren Verlauf kompensiert wird.

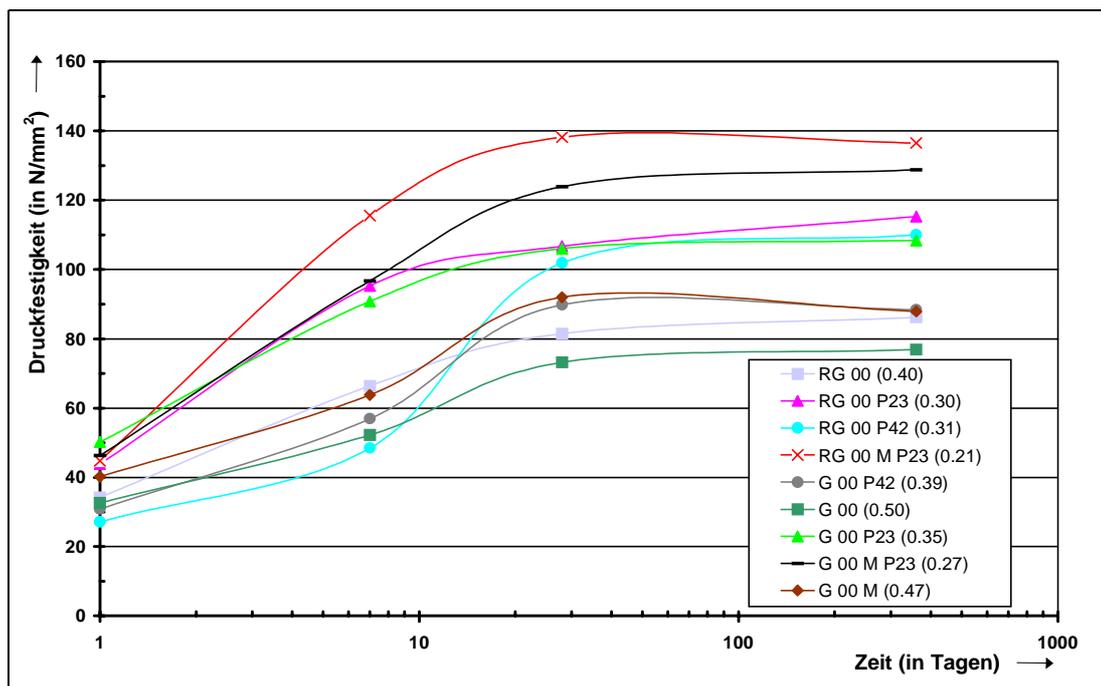


Abbildung 5-6. Druckfestigkeitsentwicklung von polymerfreien und polymerhaltigen Betonen bei unterschiedlicher Zusammensetzung der Zuschläge  
 Werte in (): w/z-Werte der einzelnen Mischungen  
 RG : Rundkorn 0/2, Gebrochenes Korn 2/16  
 G : Gebrochenes Korn 0/16  
 00 : 450 kg/m<sup>3</sup> CEM I 42.5 R, Werk C  
 P23, 42 : Polymer 23, 42  
 M : Mikrosilica, 10 M-% (Feststoff)

Die 28-Tage-Biegezugfestigkeiten zeigen keine Abhängigkeit von der Art des eingesetzten Zuschlags. Eine höhere Mahlfeinheit des Zementes läßt die Werte geringfügig ansteigen. Den größten Einfluß hat der Zusatz von Polymeren, insbesondere kombiniert eingesetzt mit Mikrosilica. Bei diesen Mischungen werden bis zu 40 % höhere Biegezugfestigkeiten gemessen als bei den zugehörigen Null-Proben. Die Spaltzugfestigkeit nimmt mit zunehmender Zylinderdruckfestigkeit unterproportional zu. Diesen Zusammenhang zeigt Abbildung 5-7. Für die Referenzmischungen liegt die Spaltzugfestigkeit bei etwa 11 % der Druckfestigkeit, während sie bei den polymerhaltigen Betonen nur rund 8 % der Druckfestigkeit beträgt.

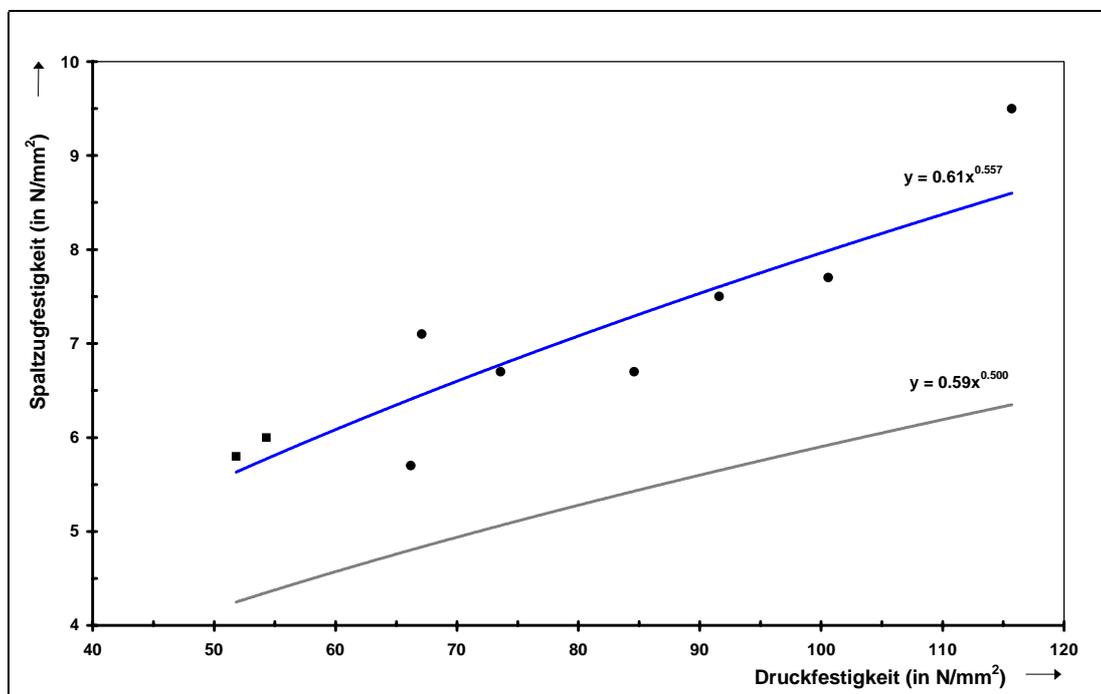


Abbildung 5-7. Zusammenhang zwischen Spaltzug- und Druckfestigkeit nach 28 Tagen. Die Würfeldruckfestigkeiten wurden in Zylinderdruckfestigkeiten (Durchmesser: 150 mm, Höhe: 300 mm) umgerechnet.

■: Null-Mischungen; ●: polymerhaltige Betone,  
Die untere Linie beschreibt die vom ACI 1984 gefundene Korrelation für hochfeste Betone.

Die dynamischen E-Moduln der untersuchten Betone sind erwartungsgemäß hoch, wobei die Art der Zuschläge einen deutlichen Einfluß zeigt. Danach weist zum Beispiel die Mischung R 00 P42 mit einer Druckfestigkeit nach 28 Tagen von 92.1 N/mm<sup>2</sup> und Sand und Kies als Zuschlag einen E-Modul von 45800 N/mm<sup>2</sup> auf.

Beton vergleichbarer Festigkeit mit gebrochenem Korn, G 00 P42, hat dagegen einen E-Modul von  $55750 \text{ N/mm}^2$ . Dieser Anstieg ist in erster Linie auf die Verwendung von Brechsand zurückzuführen. Die Betone, deren Zuschläge sich aus Brechsand und Kies zusammensetzen, zeigen vergleichbare Werte auf wie die brechsand- und splitthaltigen. Abbildung 5-8 dokumentiert die Abhängigkeit des E-Moduls von der Würfeldruckfestigkeit.

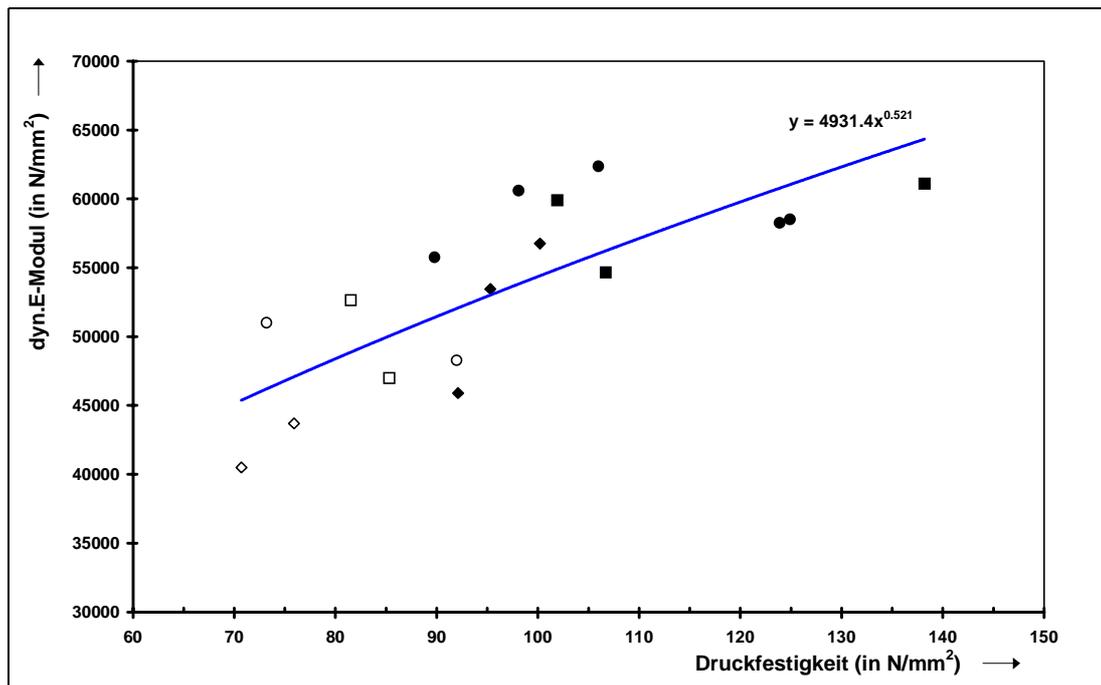


Abbildung 5-8. Zusammenhang zwischen dynamischem E-Modul und Druckfestigkeit nach 28 Tagen.

- : polymerhaltige Betone mit Brechsand 0/2 und Splitt 0/16
- ◆: polymerhaltige Betone mit Sand 0/2 und Kies 2/16
- : polymerhaltige Betone mit Sand 0/2 und Splitt 2/16
- nicht ausgefüllte Symbole: entsprechende polymerfreie Betone

Der Einfluß des Wasser/Zement-Wertes auf den Beton-E-Modul ist in diesen Untersuchungen vernachlässigbar. Die Polymere, insbesondere P23 sowie P42, erzeugen einen Anstieg der dynamischen E-Moduln, der niedriger ist als der Anstieg der Druckfestigkeiten. Diesen Zusammenhang macht Abbildung 5-9 deutlich. Dargestellt sind die relativen w/z-Werte sowie Druckfestigkeiten und dynamische E-Moduln nach 28 Tagen, bezogen auf die jeweiligen Null-Mischungen. Der Zusatz von 10 M.-% Silicastaub zu den polymermodifizierten Betonen führt zu keiner signifikanten Änderung der E-Moduln. Davon abweichend verhält sich Flugasche. Hier ist eine

Erhöhung der E-Modul-Werte von 20 ... 35 % festzustellen, je nach Art der eingesetzten Zuschläge.

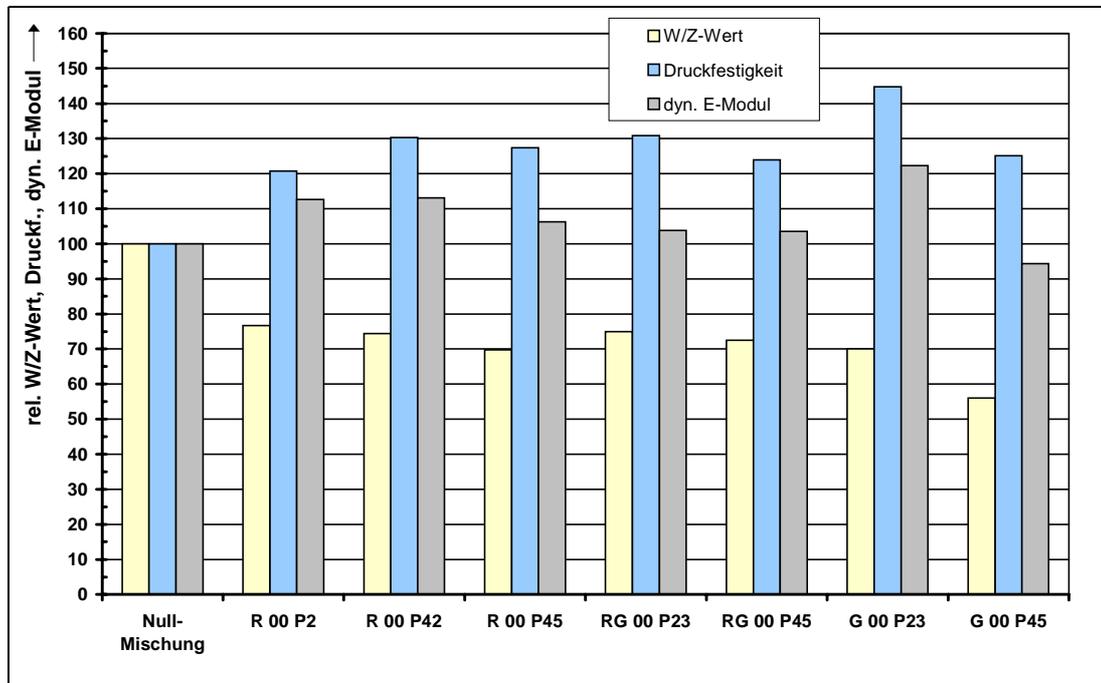


Abbildung 5-9. Relativer W/Z-Wert, Druckfestigkeit und dynamischer E-Modul von polymermodifizierten Betonen nach 28 Tagen bezogen auf die vergleichbaren Null-Mischungen

RG : Rundkorn 0/2, Gebrochenes Korn 2/16

G : Gebrochenes Korn 0/16

R : Rundkorn 0/16

00 : 450 kg/m<sup>3</sup> CEM I 42.5 R, Werk C

P23, 45 : Polymer 23, 45 (2 M.-%)

Die statischen E-Moduln von ausgewählten Betonen liegen um 10 ... 24 % unter den dynamischen E-Moduln, wobei auch hier die Art des Zuschlags und der Zusatz von Polymeren die wichtigsten Einflußgrößen sind.

Eine schlechtere Nachbehandlung führt sowohl bei den polymerhaltigen als auch bei den polymerfreien Proben zu einer Erniedrigung der Festbetonrohddichten und damit verbunden zu niedrigeren Biegezug- und Druckfestigkeiten. Die 7-Tage-Druckfestigkeiten sind um bis zu 20 % reduziert. Diese Tendenz ist ebenfalls bei den 28 Tagen gelagerten Betonen festzustellen.

### 5.1.3.2 Hygrische Kennwerte

In Tabelle 8-32 im Anhang sind die Ergebnisse aufgeführt. Die mittleren Eindringtiefen, die sich nach Prüfung der Wasserdurchlässigkeit ergaben, korrelieren mit den Druckfestigkeiten. Dieses im wesentlichen auf Strömungsvorgängen basierende Prüfverfahren kann die Effekte, die sich durch die Modifizierung mit Polymeren oder die Zugabe von Zusatzstoffen ergeben, nicht differenziert genug beschreiben. Es ist geeigneter zur Charakterisierung von Betongefügen mit höherer Porosität.

Das Quellen und Schwinden der hochfesten Betone liegt insgesamt auf einem niedrigen Niveau. Der Zuschlag hat ähnlich wie auf den E-Modul einen deutlichen Einfluß auf das Verformungsverhalten (vgl. Abbildung 5-10 und Tabelle 8-33 im Anhang). Die basalthaltigen Mischungen (Breckkorn) setzen dem 1. Schwinden einen höheren Widerstand entgegen als die quarzhaltigen (Rundkorn) bzw. deren Zuschlag sich aus einer Kombination aus Basalt und Quarz zusammensetzt.

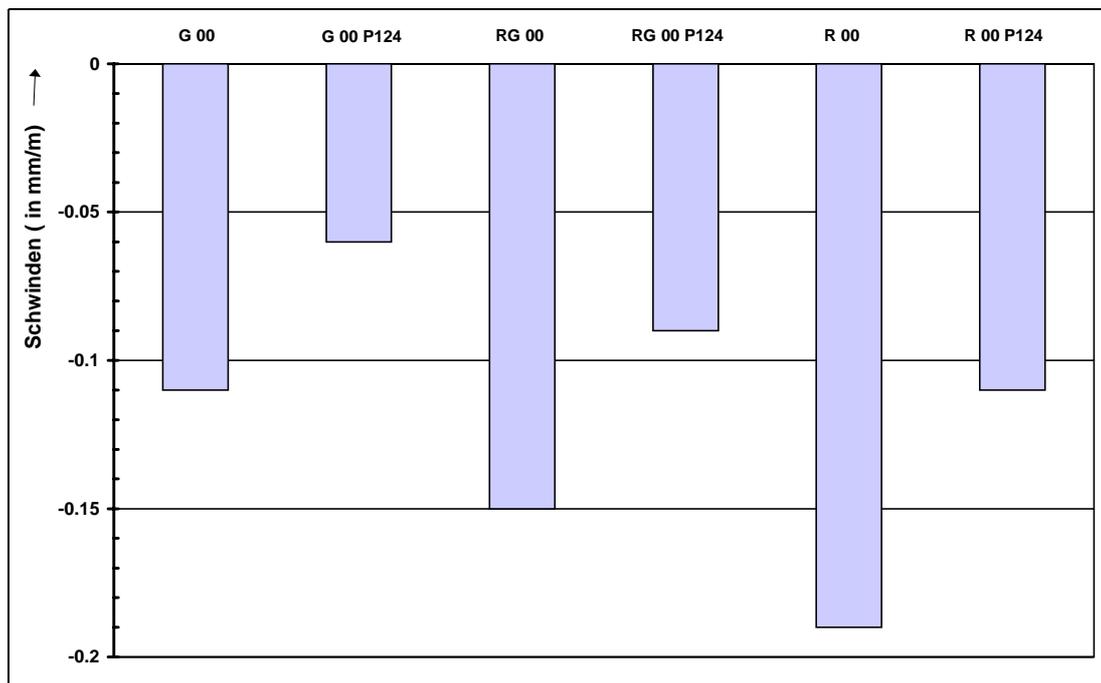


Abbildung 5-10. Einfluß der Zuschlagart auf das 1. Schwinden  
 G : gebrochenes Korn 0/16  
 RG : Rundkorn 0/2, Gebrochenes Korn 2/16  
 R : Rundkorn 0/16  
 00 : 450 kg/m<sup>3</sup> CEM I 42.5, Werk C  
 P124 : Polymer 124 (2 M.-%)

Die Polymere, insbesondere P23 und P124, reduzieren das Quellen und Schwinden. Zum Teil läßt sich das auf den niedrigeren Wassergehalt der Betone zurückführen. Jedoch ist das Volumen der Betonmatrix etwas größer, was zu höheren Schwindwerten führt. Der erste Effekt ist offensichtlich ausgeprägter als der zweite. Die verzögerte Erhärtung durch den Kunststoff P42 ruft bei einem Vergleich der modifizierten Betone die größten Volumenänderungen hervor. Zusatzstoffe wie Mikrosilica und speziell Flugasche erhöhen das Schwinden. Auffallend ist die geringe Quellneigung der polymerhaltigen Mischungen. Während das Quellen bei den Referenzbetonen nach der ersten Austrocknung (1. Schwinden) 43 ... 64 % der vorangegangenen Schwindverformung ausmacht, liegen die Werte bei den kunststoffmodifizierten Proben zwischen 0 und 40 %. Eine Ausnahme stellt die feinteilhaltige Mischung G 10 M P23 mit 50 % dar, die neben einem CEM I 52.5 R noch Mikrosilica enthält. Das 2. Schwinden ist deutlich niedriger als das erste. Es können die gleichen Tendenzen wie oben beschrieben, festgestellt werden.

### 5.1.3.3 Untersuchung der Widerstandsfähigkeit

Die Ergebnisse enthalten die Tabellen 8-34 bis 8-38 im Anhang. Mit Diesel, Toluol und Dichlormethan als Prüfflüssigkeiten zur Bestimmung der Dichtigkeit ergeben sich folgende Tendenzen: Die ausgewählten Betone zeigen erwartungsgemäß niedrige Eindringmengen und -tiefen. Der theoretische, lineare Zusammenhang zwischen der Eindringmenge und der Quadratwurzel der Zeit wird durch die Untersuchungen bestätigt (siehe Kapitel 2.5.3.1). Die kleinsten Eindringkoeffizienten,  $0.079 \dots 0.085 \text{ l}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0.5})$ , und damit den höchsten Eindringwiderstand bei den drei Referenzflüssigkeiten weist der mit Mikrosilica und dem Polymer P23 hergestellte Splittsandbeton auf. Geringfügig höhere Werte lassen sich messen, wenn kein Zusatzstoff sondern nur Polymere auf Polyurethanbasis bzw. die handelsübliche Styrolacrylatdispersion eingesetzt werden. Insgesamt liegen die Eindringmengen bei Toluol etwas höher als bei Dichlormethan und Diesel. Die Abbildungen 5-11 und 5-12 vergleichen die Eindringmengen  $E_{168}$  nach 7 Tagen für die drei Prüfflüssigkeiten.

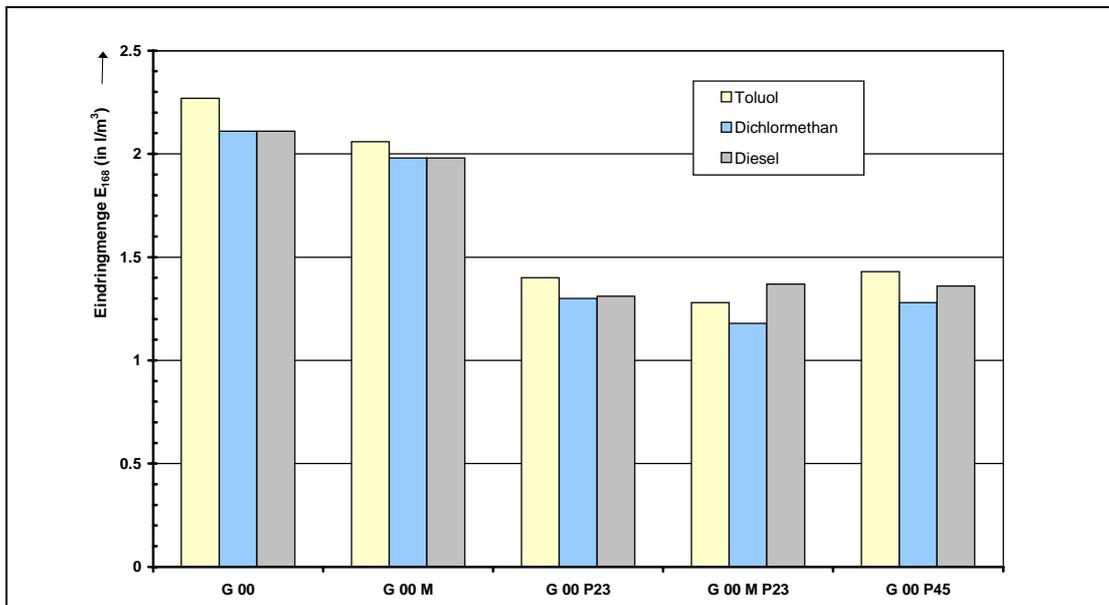


Abbildung 5-11. Eindringmengen  $E_{168}$  für Toluol, Dichlormethan und Diesel bei den Splittbrechsandbetonen nach 7 Tagen

RG : Rundkorn 0/2, Gebrochenes Korn 2/16

00 :  $450 \text{ kg/m}^3$  CEM I 42.5, Werk C

M : Mikrosilica, 10 M-% (Feststoff)

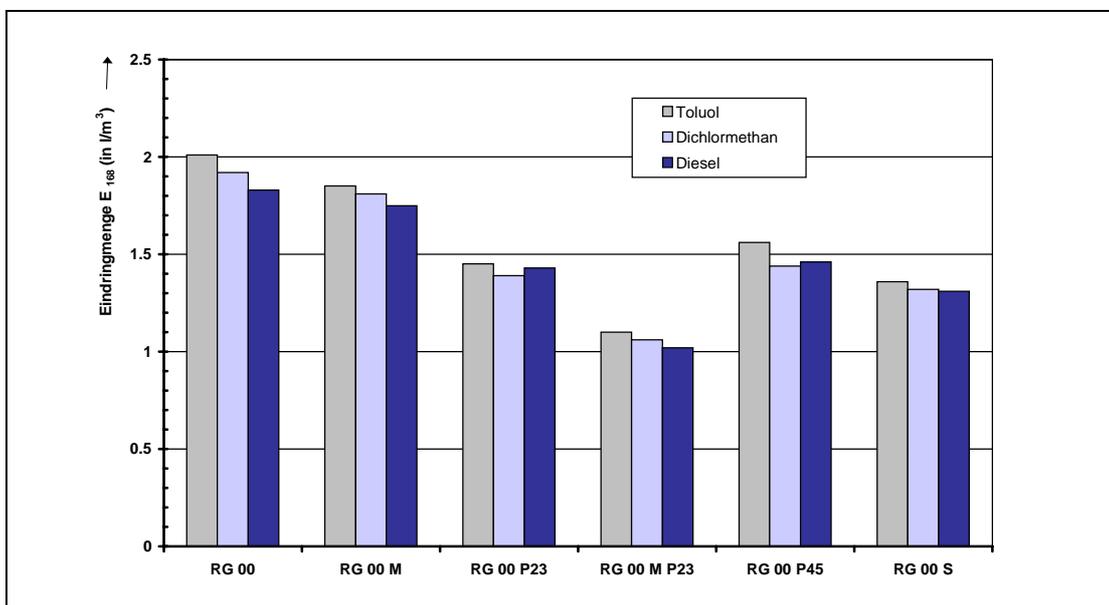


Abbildung 5-12. Eindringmengen  $E_{168}$  für Toluol, Dichlormethan und Diesel bei den Splittsandbetonen nach 7 Tagen

RG : Rundkorn 0/2, Gebrochenes Korn 2/16

00 :  $450 \text{ kg/m}^3$  CEM I 42.5, Werk C

M : Mikrosilica, 10 M-% (Feststoff)

S : handelsübliche Kunststoffdispersion, 10 M-% (Feststoff)

Unabhängig von der jeweiligen Prüfflüssigkeit erweisen sich die Eindringmenge und der w/z-Wert als gut korrelierbare Größen. Einen weiteren Hinweis zur Abschätzung der Betondichtigkeit gibt der Hydratationsgrad  $\alpha$ , der näherungsweise aus dem Verhältnis der Druckfestigkeiten im Alter von 7 und 28 Tagen bestimmt werden kann. So weist beispielsweise die polymermodifizierte Mischung G 00 P23 einen Wert von 86 % auf, der entsprechende Null-Beton nur 71 %.

Gegenüber dem lösenden Angriff von 10 %iger Essigsäure zeigen die Hochleistungsbetone ein ähnlich resistentes Verhalten (siehe Tabelle 8-39 im Anhang). Es wird eine maximale Schädigungstiefe von 2.4 mm bei der splittbrechsandhaltigen Null-Mischung gemessen und 1.6 mm bei der modifizierten Probe mit dem Polymer P23 und Mikrosilica. Der Verschleißwiderstand der Betone kann durch die Verwendung von Polymeren und die damit verbundene Wassereinsparung gegenüber den unmodifizierten Proben um bis zu 25 % reduziert werden (siehe Tabelle 8-40 im Anhang). Die Bestimmung des Frost-Tausalz-Widerstandes nach dem VDZ-Würfel- und dem CDF-Verfahren von ausgewählten Betonproben bestätigt die früheren Beobachtungen von STARK 1993b und SIEBEL 1992, daß beide Methoden für die Prüfung geeignet sind. Der Gewichtsverlust nimmt mit wachsender Zahl an Frost-Tauwechseln je nach Beton unterschiedlich, aber im allgemeinen kontinuierlich zu. Er liegt nach 50 Frost-Tauwechseln (Würfelverfahren) insgesamt zwischen 0.01 und 1.22 M.-%. In den Abbildungen 5-13 und 5-14 sowie in den Tabellen 8-41 und 8-42 im Anhang sind die Ergebnisse wiedergegeben. Zu beachten ist die verschiedene Skalierung der Ordinate.

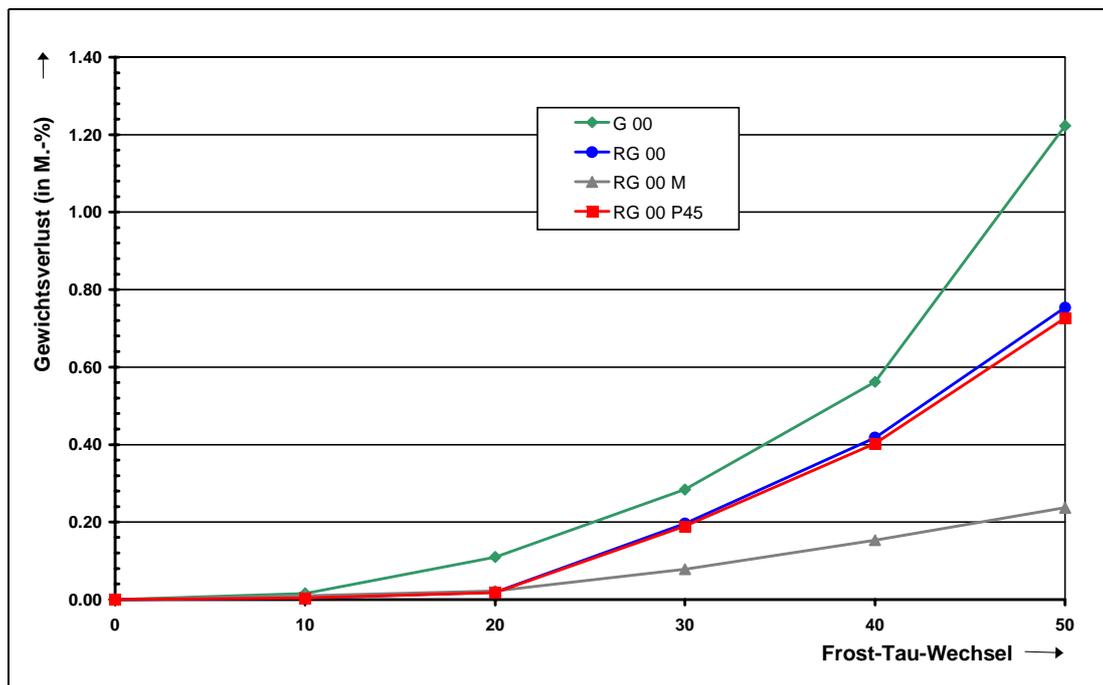


Abbildung 5-13. Gewichtsverlust bei der Frost-Tausalz-Prüfung nach dem Würfelverfahren

RG : Rundkorn 0/2, Gebrochenes Korn 2/16

G : Gebrochenes Korn 0/16

00 : 450 kg/m<sup>3</sup> CEM I 42.5, Werk C

M : Mikrosilica, 10 M.-% (Feststoff)

P45 : Polymer 45 (2 M.-%)

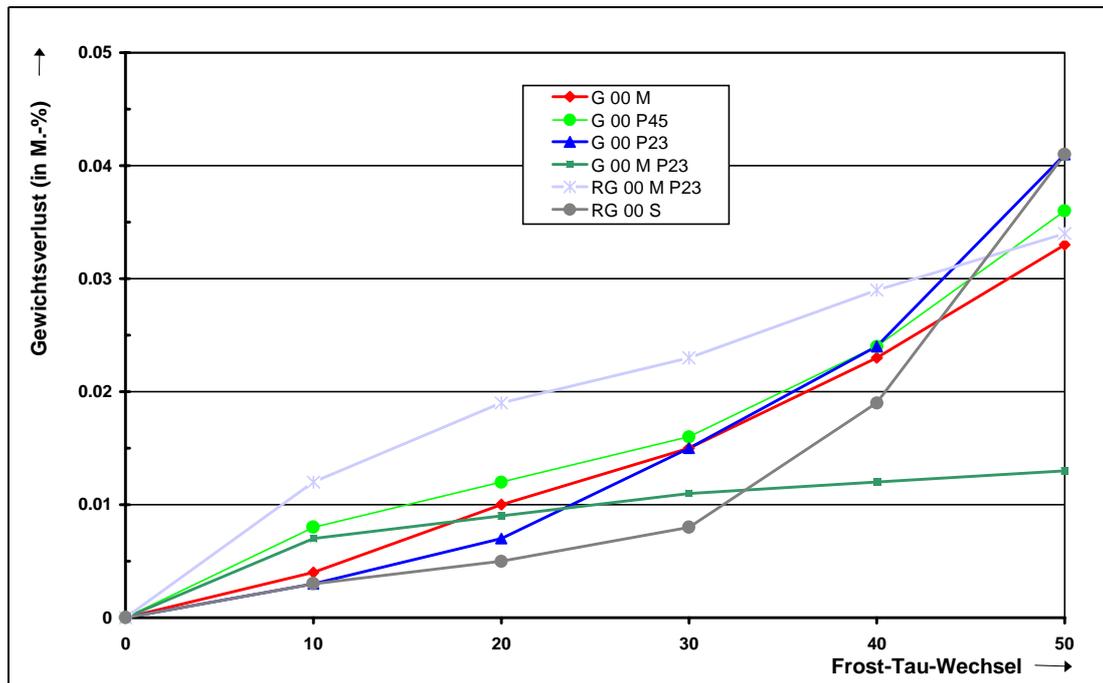


Abbildung 5-14. Gewichtsverlust bei der Frost-Tausalz-Prüfung nach dem Würfelverfahren

RG : Rundkorn 0/2, Gebrochenes Korn 2/16

G : Gebrochenes Korn 0/16

00 : 450 kg/m<sup>3</sup> CEM I 42.5, Werk C

M : Mikrosilica, 10 M.-% (Feststoff)

P45 : Polymer 45 (2 M.-%)

S : handelsübl. Kunststoffdispersion, 10 M.-% (Feststoff)

Die an zwei Betonen nach dem CDF-Verfahren geprüfte Widerstandsfähigkeit führt ebenfalls zu sehr niedrigen Abtragsraten, 153 g/m<sup>2</sup> bei der Null-Mischung und 36 g/m<sup>2</sup> bei dem modifizierten, mikrosilicahaltigen Beton. In jedem Fall unterschreiten die Werte das in der RILEM 1994 formulierte CDF-Widerstandskriterium für dauerhafte Betone von 1500 g/m<sup>2</sup> nach 28 Frost-Tau-Wechseln. Die bewitterte Seite zeigt bei beiden Proben nur wenige, kleinflächige Abplatzungen. Risse oder die Abwitterung von Zuschlagspartikeln sind nicht zu erkennen. Zwischen der Menge durch kapillares Saugen aufgenommenen Tausalzlösung und dem später ermittelten Frost-Tausalz-Widerstand ist sowohl bei dem Würfel- als auch dem CDF-Verfahren ein direkter Zusammenhang erkennbar.

### 5.1.4 Diskussion der Ergebnisse

In der vorliegenden Arbeit wurden fünf Polymere auf Polyetherpolyurethanbasis, P2, P23, P42, P45, P124, zur Entwicklung von Hochleistungsbetonen eingesetzt. Als Bindemittel kam ein handelsüblicher CEM I 42,5 R bzw. CEM I 52.5 R zum Einsatz, die sich durch einen hohen  $C_3S$ - und  $C_3A$ -Gehalt auszeichneten. Nach SARKAR 1992 resultiert aus einem hohen  $C_3A$ -Gehalt ein höherer Wasseranspruch des Frischbetons. Untersuchungen am Mörtel bestätigten dieses Ergebnis nicht, vielmehr überwog der Einfluß des hohen  $C_3S$ -Anteils. Die Betone wurden einheitlich auf eine plastische Konsistenz eingestellt. Exemplarisch erfolgte die Untersuchung kunststoffmodifizierter Proben mit gleichen w/z-Werten wie die Referenzbetone aber folglicheweise weicherer Konsistenz. Die Kunststoffe bewirkten bei einer Dosierung von 2 M.-% in verschiedenen zusammengesetzten Grundmischungen eine Reduktion des Wasserbedarfs von 22 ... 40 % gegenüber den jeweiligen Null-Mischungen. Nachteilig zu beurteilen ist die Einarbeitung der Kunststoffe in den Beton. Eine gezielte Dosierung war nicht möglich und der in der Literatur häufig beschriebene Effekt, daß eine bessere Verflüssigung erzielt wird, wenn zuerst die Ausgangsmaterialien vorgegäßt und erst dann die Zugabe des Fließmittels erfolgt, konnte aus den in Kapitel 3.2.5 beschriebenen Gründen nicht genutzt werden (GRUBE 1997, CHIOCCHIO 1985).

Die Polymere besaßen eine besondere Affinität zu der Zuschlagskombination Brechsand und Splitt. Die Wassereinsparungen im Vergleich zum Null-Beton waren hier am größten. Eine besondere Bedeutung kam dem Zusatz an Feinanteilen zu. Durch die Zusatzstoffe Mikrosilica und Flugasche nahm der Wasserbedarf der modifizierten Mischungen zum Teil deutlich ab, bei den Referenzmischungen dagegen stieg er an. Eine Erhöhung des Zementgehaltes und dessen Mahlfeinheit führte in jedem Fall zu höheren w/z-Werten. Offensichtlich bewirkten die Polymere eine gute Dispergierung insbesondere von Mikrosilica in die Hohlräume zwischen den Zementpartikeln. Wasser wird verdrängt und steht so für eine weitere Verflüssigung zur Verfügung. Zu dem gleichen Ergebnis kommt ALFES 1989.

Ein Vergleich der verflüssigenden Eigenschaften der Polyurethanderivate mit den in der Literatur beschriebenen gängigen Fließmitteln auf melaminharz-, naphthalinsulfonsäure- oder carboxylatbasis erweist sich als schwierig, da eine Reihe äußerer Einflußfaktoren u. a. Zementgehalt, Zuschläge, Mischintensität, Betontemperatur die

Wirkung beeinflussen. COLLEPARDI 1994 spricht bei Fließmitteln im allgemeinen von einer Wassereinsparung von 20 ... 30 %. Die Polymere führten bei ausreichender Verdichtungsenergie keine zusätzlichen Luftporen ein. Nach BONZEL 1983 und AİTCIN 1994 können Plastifizierer eine Luftporenbildung zur Folge haben.

Die Festigkeitsentwicklung der Betone läßt sich folgendermaßen charakterisieren: Der Erhärtungsbeginn bis zu einer Stunde nach der Herstellung wurde von den untersuchten Polymeren P23, P42 sowie P124 verzögert und so eine längere Verarbeitbarkeit ermöglicht. Abgesehen von P42 beeinträchtigten die Kunststoffe die Ein-Tages-Festigkeitswerte nicht. Die entsprechend DIN 1045 an einen Hochleistungsbeton gestellte Anforderung einer Würfeldruckfestigkeit nach 28 Tagen von über  $75 \text{ N/mm}^2$  konnte mit Ausnahme einiger Null-Mischungen von allen untersuchten Betonen erreicht werden. Mit gerundeten Zuschlägen ließen sich Druckfestigkeiten bis maximal  $100 \text{ N/mm}^2$  erzielen, der Bruch verlief durch das Gestein. Dieses Ergebnis liegt damit zwischen denen in der Literatur beschriebenen Werten von  $85 \text{ N/mm}^2$  und  $120 \text{ N/mm}^2$  (BAUBERATUNG 1997, FELSCH 1993). Mit der Reduktion des Wassergehaltes durch die Kunststoffe war erwartungsgemäß ein deutlicher Festigkeitsanstieg verbunden, der nicht allein auf der Absenkung des w/z-Wertes beruhte, sondern die Polymere trugen selbst zur Steigerung bei. Dieser Anteil machte bis zu 15 % der Gesamtfestigkeit aus. Von den obengenannten, handelsüblichen Plastifizierern oder den von SCHULZE 1991 beschriebenen thermoplastischen Polymeren ist diese Wirkung nicht bekannt. Die Endfestigkeit war im Prinzip nach 28 Tagen erreicht. Eine Ausnahme bildete die Mischung G 11 M P23, zusammengesetzt aus Brechsand, Splitt, Mikrosilica, Polymer und  $550 \text{ kg/m}^3$  eines CEM I 52.5 R. Hier fand bis zu einem Jahr eine deutliche Nacherhärtung statt.

Mit zunehmender Hydratationsdauer nahm der Einfluß von Mikrosilica auf die Festigkeitsentwicklung der Betone zu. Bereits nach 7 Tagen wurden deutlich höhere Bruchenergien gemessen. Die puzzolanischen Eigenschaften und die Füllerwirkung führten offensichtlich zu dem u. a. von KÖNIG 1992 beschriebenen, verbesserten Kontakt zwischen Zementstein und Zuschlag. Dagegen war die Wirkung der Steinkohlenflugasche im Festbeton gekennzeichnet durch eine relativ langsame Reaktion. Die Festigkeiten blieben hinter denen der mikrosilicahaltigen zurück. Bei SCHIEBL 1990 werden erst nach 6 Monaten den Referenzmischungen vergleichbare Werte erreicht. Die Kombination aus Mikro- und Nanosilica wurde gewählt um noch fei-

ne Zwickel im Betongefüge zu verfüllen. Sie führte bei der Null-Mischung zu dem erwarteten Festigkeitsgewinn, nicht jedoch in Kombination mit dem Polymer P23. Vermutlich lag eine Unverträglichkeit zwischen beiden Komponenten vor. Eine gute Nachbehandlung d. h. den jungen Beton vor Austrocknung zu schützen wirkte sich positiv auf die Festigkeitsentwicklung aus. In der Literatur wird die gleiche Meinung vertreten (BENTUR 1989, SCHRAGE 1992).

Die Biegezugfestigkeiten der Hochleistungsbetone korrelierten mit den Druckfestigkeiten, mit Ausnahme des Splittsandbetons mit der Styrolacrylatdispersion. Es wurden der Null-Mischung vergleichbare Druckfestigkeiten gemessen, die Biegezugfestigkeit lag deutlich darüber. Dies entspricht den Angaben des Herstellers. Mit steigender Bruchenergie zeigten die Betone ein sprödes Verhalten, ablesbar an den hohen dynamischen und statischen E-Moduln. Der E-Modul nahm nicht proportional mit der Druckfestigkeit zu, wenn die Betone als Zusatzmittel Polymere enthielten. Eine weitere wichtige Einflußgröße war die Art der Zuschläge. Bei gleicher Betonfestigkeit wurden mit Basaltsplitt höhere E-Moduln gemessen als mit Kies. Zu dem gleichen Ergebnis kommt KERN 1993.

Das Schwindverhalten von Hochleistungsbetonen wird in der Literatur differenziert betrachtet. Je niedriger die w/z-Werte um so größer die Selbstaustrocknung und damit der Anteil der Volumenabnahme durch das chemische Schwinden (KÖNIG 1993). Gleichzeitig verringert sich durch die niedrigen Wassergehalte und die hohe Dichtigkeit das Trocknungsschwinden von hochfesten Betonen gegenüber normalfesten Betonen. Die von ALFES 1989 beschriebene Korrelation zwischen der Verformbarkeit des Zuschlags und den Schwindverformungen des Zementsteins konnte in den eigenen Versuchen bestätigt werden. Zuschlag mit höherem E-Modul setzte den Volumenänderungen des Zementsteins einen höheren Widerstand entgegen. CZERNIN 1977 gibt für übliche Betonzusammensetzungen Gesamtschwindmaße von 0.1 ... 0.8 mm/m an. Die im Rahmen dieser Arbeit gefundenen Volumenänderungen durch Schwinden von maximal 0.30 mm/m lagen auf einem niedrigen Niveau. Offensichtlich wurde das chemische Schwinden durch die anderen, obengenannten Einflußgrößen kompensiert.

Die Widerstandsfähigkeit eines Betons gegenüber eindringenden Gasen und Flüssigkeiten, mechanische Beanspruchung sowie Frost-Tausalzwechselln wird wesentlich

bestimmt durch die Kapillarporosität. Durch die Reduktion des Wassergehaltes durch die Polymere wird sowohl der Porenraum als auch die Porengröße reduziert. Zusatzstoffe wie Flugasche und insbesondere Mikrosilica tragen durch ihre Füllerwirkung und ihre puzzolanischen Eigenschaften zu einer weiteren Abdichtung des Betongefüges bei. Die hohe Dichtigkeit der entwickelten polyurethanmodifizierten Hochleistungsbetone äußerte sich in niedrigen Eindringtiefen organischer Lösungsmittel, einem hohen Verschleiß- und Frost-Tausalz-Widerstand.

Der bestimmende Transportmechanismus bei den Eindringversuchen war die kapillare Flüssigkeitsaufnahme. Durch die Verringerung des w/z-Wertes von 0.40 auf 0.30 nahmen die Eindringtiefen um ca. 22 % ab und bei einer Verringerung von 0.40 auf 0.21 um 45 %. Zu den Eindringversuchen liegen keine direkt vergleichbaren Versuchsergebnisse vor. SCHIEBL 1996 findet bei einer Reduktion des w/z-Wertes von 0.60 auf 0.50 um ca. 35 % niedrigere Eindringtiefen. Versuche von GRUBE 1990 zeigen, daß mit sinkendem Wassergehalt die Eindringmengen nicht proportional verringert werden. Die Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes nach dem CDF- und dem Würfelverfahren führte bei den untersuchten Betonen in beiden Fällen zu niedrigen Abwitterungsraten. Damit werden die Untersuchungen von PERENCHIO 1978 bestätigt, daß hochfester Beton auch ohne künstliche Luftporen einen hohen Widerstand gegenüber Frost-Tausalz-Beanspruchung aufweist.

### 5.1.5 Zusammenfassung

Das Ziel dieses Untersuchungsabschnittes, die Entwicklung von verbesserten Hochleistungsbetonen durch Zusatz von Polymeren auf Polyurethanbasis, wurde erreicht. Hochleistungsbeton bedeutet dabei neben einer hohen Festigkeit auch eine hohe Dichtigkeit. Die Auswahl von fünf Kunststoffen unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung erfolgte unter Berücksichtigung der Mörtelversuche (vgl. Kapitel 3). Die optimale Zugabemenge, 2 M.-%, wurde in Vorversuchen ermittelt. Die Zusammenstellung der übrigen Ausgangsmaterialien wurde optimiert im Hinblick auf eine hohe angestrebte Festigkeit. Bei dem standardmäßig eingesetzten Zement handelte es sich um einen CEM I 42.5 R. Der Zementgehalt betrug in der Regel  $450 \text{ kg/m}^3$ , exemplarisch wurden Betone hergestellt mit  $550 \text{ kg/m}^3$  und/oder einem CEM I 52.5 R aus dem gleichen Werk wie der oben genannte Zement. Die Sieblinie der

Zuschläge, AB<sub>16</sub>, blieb konstant, es variierte deren Zusammensetzung. In einer Untersuchungsreihe wurde eine Kombination aus Quarzsand und Kies verwendet, in einer zweiten Sand und Basaltsplitt und in der dritten Brechsand und Splitt aus Basalt. Als Zusatzstoffe kamen 10 M.-% Mikrosilica, Flugasche oder eine handelsübliche Styrolacrylatdispersion zum Einsatz.

Bei gleicher Konsistenz wie bei der Referenzmischung bewirkten die Polyetherpolyurethane eine deutliche Absenkung des Wassergehaltes und sorgten für eine Stabilisierung des Frischbetons. Die Wassereinsparung betrug zwischen 22 und 40 % und lag über den in der Literatur angegebenen Werten von Fließmitteln auf Melamin- bzw. Naphtalinbasis. Im Vergleich zu normalfesten Betonen mußte eine höhere Verdichtungsenergie aufgebracht werden, um den hochfesten Beton zu entlüften. Deswegen wurde die Konsistenz, insbesondere bei den Splittbetonen, besser durch das Verdichtungsmaß beschrieben als durch das Ausbreitmaß. Die Kunststoffe verlängerten die Verarbeitbarkeit des Frischbetons, ohne die Ein-Tages-Festigkeiten zu beeinträchtigen. Dieses Verhalten ist in der Praxis im Transportbetonbereich erwünscht. Gemäß DIN 1045 waren alle modifizierten Betone als hochfeste Betone einzustufen. Die Biegezugfestigkeit und der dynamische E-Modul nahmen mit steigender Druckfestigkeit nicht proportional, sondern geringer zu. Faktoren, die den E-Modul beeinflussten wie der w/z-Wert, der Zuschlag, der Zusatzstoff hatten auch Auswirkungen auf das Quellen und Schwinden der Hochleistungsbetone. Insgesamt lagen die Volumenänderungen auf einem niedrigen Niveau, begründet durch die niedrigen Wassergehalte und die hohe Dichtigkeit, die ein Austrocknen des Betons verringert. Eine gute Nachbehandlung sorgte für eine entsprechende Festigkeitssteigerung. Zur Klärung der Frage, ob die hohen Festigkeiten auch zur entsprechender Dichtigkeit der Betone führten, wurden Prüfmethode angewandt, die direkt oder indirekt die Kapillarporosität kennzeichneten wie kapillare Wasseraufnahme, Frost-Tausalz-Widerstand, Eindringen von organischen Lösungsmitteln. Mit der Absenkung des w/z-Wertes durch die Polyurethane war eine erhöhte Widerstandsfähigkeit verbunden. Auch ohne Zusatz von Luftporenbildnern erwiesen sich die Hochleistungsbetone als resistent gegenüber Frost-Tausalz-Beanspruchung.

Durch Vorversuche sowie eine sorgfältige Planung der Mischungszusammensetzung können die Eigenschaften der Betone gezielt beeinflusst werden. Mit den gleichen Ausgangsmaterialien wie für normalfesten Beton ließ sich auch hochfester Beton herstellen. Die stärkste Verflüssigung wurde mit den Polymeren P23 und P124 erreicht.

Ein CEM I 42.5 R und ein Zementgehalt von  $450 \text{ kg/m}^3$  in Kombination mit 10 M.-% Mikrosilica sorgten für eine genügend feste Bindemittelmatrix zu frühen Prüfterminen. Die Styrolacrylatdispersion verbesserte nicht die mechanischen Kennwerte, sondern hatte in erster Linie einen abdichtenden Effekt. Zu den niedrigsten w/z-Werten und dem besten Verbund zum Zementstein führte der Zuschlag, der sich aus Rundkorn von 0 ... 4 mm aus Quarz und Basaltsplitt von 4 ... 16 mm zusammensetzte.

## 5.2 Dränbeton

In den folgenden Abschnitten wird die Entwicklung von Dränbeton für den Straßenbau dargestellt. Dränbeton ist definitionsgemäß ein offenporiger Beton mit einem haufwerksporigen Gefüge. Er besitzt gerade soviel Zementleim oder Feinmörtel, daß die Zuschlagskörner umhüllt und miteinander verkittet, aber die Hohlräume zwischen den Körnern nach dem Verdichten nicht auffüllt (DRINKGERN 1989). DIN 1045 gilt für diese Art von Beton nicht. Dränbeton wird traditionell u. a. für die Herstellung von Betonfilterrohren, die Entwässerung von Böschungen und die Ummantelung von Entwässerungs- oder Versorgungsleitungen verwendet (HERMANN 1993). Die Entwicklung von hohlraumreichen Belägen als Dickschicht für den Straßenbau begann mit Dränasphalt oder "Flüsterasphalt". Gegenüber Asphalt weist Beton eine höhere Dauerhaftigkeit und Verformungsstabilität auf. 1989 wurde auf der niederländischen Autobahn A 2 Maastricht - Eindhoven zum ersten Mal Dränbeton als lärm-mindernder Belag auf einer Autobahn eingesetzt, in Deutschland 1995 auf einem 100 m langen Abschnitt der Rheintal-Autobahn bei Bruchsal (VOLLPRACHT 1995).

Die Vorteile eines offenporigen Straßenbelags aus Dränbeton oder Dränasphalt liegen in der Reduktion des Verkehrslärms, der Entsiegelung von Verkehrsflächen und der hohen Verkehrssicherheit durch eine gute Griffigkeit der Oberfläche. Nach Untersuchungen des Forschungsinstitutes Geräusche und Erschütterungen (KÖLLMANN 1994) wird bei einem Hohlraumgehalt des Betons von 20 Vol.-% der Schall-druckpegel um 5 dB (A) reduziert. Dies ist in erster Linie darauf zurückzuführen, daß die komprimierte Luft unter dem Reifen nicht mehr durch die Profilrillen entweicht

Dränbeton weist Rohdichten zwischen ca. 1.8 und 2.0 kg/dm<sup>3</sup> auf und kann somit als Leichtbeton betrachtet werden. Die Haufwerksporigkeit wird erzielt, indem Zuschlag einer Korngruppe, meistens Edelsplitt, verwendet wird. Eine gegenläufige Tendenz zum geforderten Hohlraumgehalt von mindestens 20 Vol.-% zeigt die Druckfestigkeit. Das Regelwerk für den Bau von Fahrbahndecken aus Beton - ZTV Beton-StB 93 - sieht eine mittlere Druckfestigkeit nach 28 Tagen, bestimmt an Würfeln mit einer Kantenlänge von 200 mm, von 30 N/mm<sup>2</sup> und eine Biegezugfestigkeit von 4.0 N/mm<sup>2</sup> vor. Wegen der hohen physikalischen und chemischen Beanspruchung (Festigkeit, Frost-Tausalz, Verschleiß) wird Dränbeton mit Kunststoffen modifiziert. In der Praxis kommen Dispersionen auf Basis eines Styrolbutadiencopolymers oder Styrolacrylsäureesters zum Einsatz. Die Einsatzmengen liegen zwischen 17 M.-% und 20 M.-%, bezogen auf den Zementgehalt. Im Rahmen dieser Arbeit wurden zur Modifizierung der Betone Polymere auf Polyurethanbasis in einer Konzentration von 2 M.-% eingesetzt.

## **5.2.1 Verwendete Materialien**

### **5.2.1.1 Bindemittel**

Es wurde ein CEM I 42.5 R aus dem Werk C verwendet. Die Analyse befindet sich im Anhang, in Tabelle 8-2.

### **5.2.1.2 Zuschlag**

Bei den eingesetzten Zuschlägen handelte es sich um Edelsplitt (Diabas) der Korngruppe 5/8 und Kies (Quarz) der Körnung 4/8 (vgl. Kapitel 5.1.1.2). Um die Einflüsse einer unterschiedlichen Eigenfeuchte auszuschließen, wurden die Zuschläge bei 110 °C im Trockenschrank getrocknet. Die Sieblinien sind in den Abbildungen 8-13 und 8-14 im Anhang zu finden.

### 5.2.1.3 Zusatzmittel

Folgende Zusatzmittel fanden Verwendung:

- Polymere auf Polyetherpolyurethanbasis: P2, P23, P42
- Copolymerisatdispersion aus Styrol und Acrylsäureester (s. Kapitel 5.1.1.4)
- Verdicker auf Polyacrylatbasis
- Netzmittel
- Verzögerer auf Phosphatbasis

### 5.2.1.4 Betonherstellung

Bindemittel und Zuschlag wurden in einem Zwangsmischer eine Minute trocken vorgemischt. Anschließend wurde die Kunststoffdispersion, Wasser und gegebenenfalls weitere Zusatzmittel zugegeben und der Mischvorgang vier Minuten fortgesetzt.

### 5.2.1.5 Nachbehandlung

Die Probekörper lagerten einen Tag in der Schalung und bis zum jeweiligen Prüftermin im Klima 20/60.

### 5.2.1.6 Versuchsprogramm

Die Mischungszusammensetzung erfolgte nach vorheriger Stoffraumrechnung, ausgehend von  $350 \text{ kg/m}^3$  bzw.  $380 \text{ kg/m}^3$  Zement, 2 M.-% Polymer bzw. 10 M.-% Kunststoffdispersion (Feststoff) und einem angestrebten Hohlraumgehalt von 20 Vol.-%. Der Wasseranteil der Dispersion wurde auf den w/z-Wert angerechnet. Die Konsistenz der Betone, bestimmt über das Verdichtungsmaß, sollte zwischen 1.30 und 1.35 liegen. Als Null-Mischung diente ein mit der handelsüblichen Kunststoffdispersion vergüteter Beton. Die Druckfestigkeiten wurden an Würfeln mit einer Kantenlänge von 200 mm ermittelt. Die Zusammensetzung der Proben sowie deren Abkürzungen sind im Anhang in Tabelle 8-44 erläutert.

### 5.2.2 Frischbetonuntersuchungen

Die Frischbetoneigenschaften der entwickelten Dränbetone befinden sich im Anhang in Tabelle 8-44. Mit den Polymeren auf Polyurethanbasis lassen sich bei einer Dosierung von 2 M.-% vergleichbare bzw. niedrigere w/z-Werte erzielen, als mit der handelsüblichen Styrolacrylatdispersion. Der Kunststoff P23 bewirkt die größte Wassereinsparung. Eine unmodifizierte Probe ist als direkte Referenzmischung nicht geeignet. Die Neigung des Zementleims zur Sedimentation durch das offenporige Gefüge des Betons korreliert nicht mit den Wassergehalten der jeweiligen Mischungen. Vielmehr kommt es auf die stabilisierenden Eigenschaften der Kunststoffzusätze selbst an. Einen weiteren Einfluß hat die Art des verwendeten Zuschlags. Splitt mit seiner unregelmäßigen und rauhen Oberfläche wirkt der Sedimentation entgegen. Ein Zementgehalt von  $350 \text{ kg/m}^3$  erscheint ausreichend für die punktförmige Verkittung der Zuschlagskörner. Bei einem höheren Anteil,  $380 \text{ kg/m}^3$ , neigt der Beton zur Entmischung. Der Verzögerer besitzt zusätzlich eine leicht verflüssigende Wirkung und förderte das Absetzen. Nur der Verdicker A erhöht in den untersuchten Mischungen die Viskosität, der Verdicker B und das Netzmittel wirken in Kombination mit dem Polymer P42 erstarrungsbeschleunigend. Die Frischbetonrohdsichten der hergestellten Dränbetone variieren zwischen  $1.85 \text{ kg/dm}^3$  und  $2.19 \text{ kg/dm}^3$ .

### 5.2.3 Festbetonuntersuchungen

Die Ergebnisse der Festbetonuntersuchungen lassen sich wie folgt zusammenfassen. Erwartungsgemäß korrelieren die Druckfestigkeiten mit dem Hohlraumgehalt der Betone. Ein Verhältnis  $\beta_{D28}/\text{Hohlraumgehalt}$  von 1.41 ... 1.90 ist als günstig anzusehen (vgl. Abbildung 5-15). Diese Betone genügen den Anforderungen der ZTV Beton-StB 93 und weisen außerdem eine Porosität von über 20 Vol.-% auf. Das Polymer P42 hat eine leicht verzögernde Wirkung, die sich gegenüber P23 in niedrigeren Anfangsfestigkeiten bemerkbar machte. Die Werte nach 28 Tagen werden nicht beeinflusst. P2 bewirkt einen Festigkeitsverlust zu jedem Prüftermin ebenso wie die beiden Verdicker und das Netzmittel. Die Biegezugfestigkeit des styrolacrylathaltigen Betons ist vergleichbar mit denen der polyurethanmodifizierten Betone. Gleiche Tendenzen wie bei der Druckfestigkeit sind beim dynamischen E-Modul festzustellen. Die statisch gemessenen E-Moduln ergeben ca. 20 % niedrigere

Werte als die dynamisch bestimmten. Gegenüber Frost-Tausalz-Beanspruchung zeigen die modifizierten Betone eine gute Widerstandsfähigkeit. Die Daten der Festbetoneigenschaften sind den Tabellen 8-45 und 8-46 im Anhang zu entnehmen.

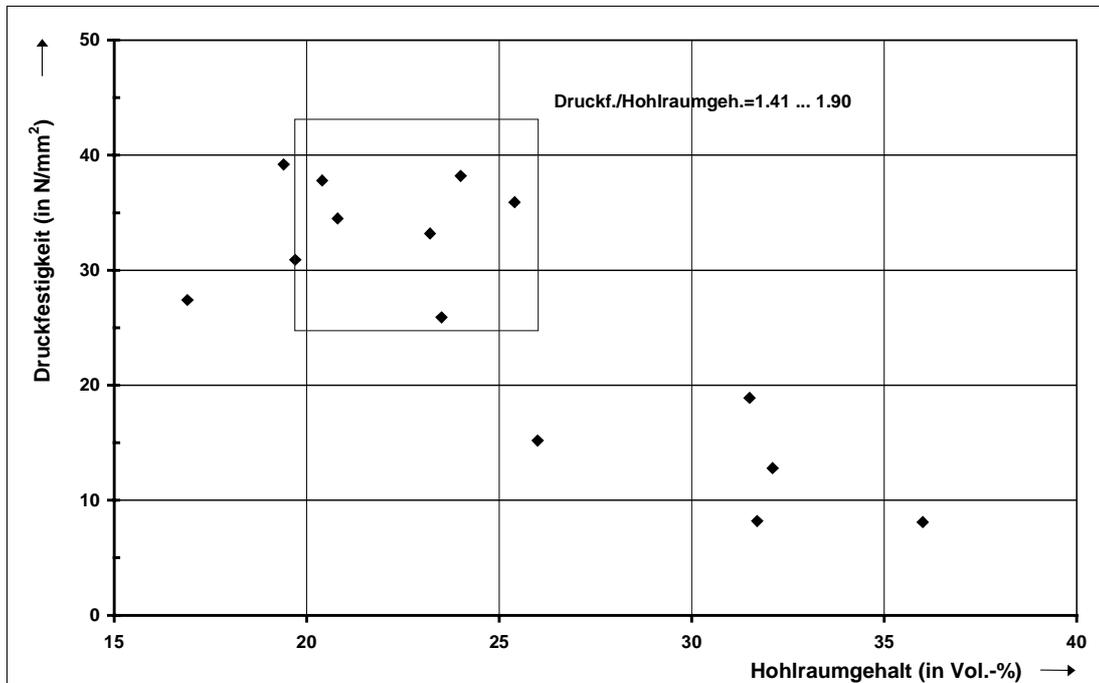


Abbildung 5-15. Zusammenhang zwischen Hohlraumgehalt und der Druckfestigkeit der Dränbetone nach 28 Tagen

### 5.2.4 Zusammenfassung

Dränbetone für den Straßenbau, auch Flüsterbetone genannt, wurden entwickelt, um den Verkehrslärm zu vermindern. Hohe Anforderungen (Festigkeit, Verschleiß, Frost-Tausalzangriff) an den Baustoff machen die Modifizierung mit Polymeren erforderlich. Der Einsatz dieser haufwerksporigen Betone in der Praxis befindet sich derzeit noch in der Erprobungsphase und ist ausgewiesenen Teststrecken vorbehalten. Aus diesem Grund sind in der Literatur nur wenige Daten über mechanische Eigenschaften veröffentlicht. Ergebnisse von Langzeituntersuchungen liegen noch nicht vor. In dieser Arbeit wurden drei chemisch verschieden zusammengesetzte Polymere auf Polyurethanbasis auf ihre Einsatzmöglichkeit in Dränbeton getestet. Die Auswahl der Kunststoffe erfolgte auf Grund der Ergebnisse vorangegangener Mörteluntersuchungen. Im Gegensatz zu bisher verwendeten Dispersionen auf Styrol- bzw.

---

acrylat- bzw. Styrolbutadienbasis, deren Dosierung 17 M.-% bzw. 20 M.-% betrug, sollte die Einsatzmenge auf 2 M.-% begrenzt sein. Als Null-Beton diene eine entsprechende styrolacrylathaltige Mischung.

Eine gute Schallabsorption durch den Beton wird erreicht bei einem Hohlraumgehalt  $\geq 20$  Vol.-%. Die mechanischen Kennwerte regelt weitgehend die ZTV Beton-StB 93. Porosität und Festigkeiten zeigten erwartungsgemäß eine gegenläufige Tendenz. Bei einer Relation der Druckfestigkeit nach 28 Tagen zum Hohlraumgehalt von 1.41 ... 1.90 wurden die Anforderungen erfüllt. Neben einer guten Verflüssigung durch die Zusatzmittel spielte die Stabilisierung des Zementleims eine wichtige Rolle. Dadurch wird einerseits verhindert, daß sich der Feinmörtel absetzt, zum anderen ist ein guter "Zusammenhalt" innerhalb des Betongefüges gewährleistet. Eigens dafür eingesetzte Verdicker auf Acrylatbasis bzw. Netzmittel erbrachten nicht die gewünschte Verbesserung, vielmehr wurden die Festigkeiten reduziert. Die Verwendung von Splitt als Zuschlag anstelle von Kies sowie die Begrenzung des Bindemittelgehaltes wirkten einer Entmischung entgegen. Zusammenfassend beurteilt führten die mit den Polymeren P23 und P42 modifizierten Splittbetone zu den besten verarbeitungs- und mechanischen Eigenschaften. Aufnahmen mit einem Stereomikroskop bei 31-facher Vergrößerung zeigten eine homogene Verteilung der Hohlräume über den gesamten Querschnitt des Probekörpers sowie eine punktförmige Verkittung der einzelnen Zuschlagskörner mit Zementstein (vgl. Abbildung 5-16).



Abbildung 5-16. Dränbetonoberfläche (31-fach)

Die Ergebnisse belegen, daß speziell entwickelte Polymere auf Polyurethanbasis zur Herstellung von Dränbetonen für den Straßenbau geeignet sind. Gegenüber einer handelsüblichen Styrolacrylatdispersion konnte die Einsatzmenge deutlich reduziert werden ohne Beeinträchtigung der mechanischen Eigenschaften.

## 6 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit gelang es, ein Polymer auf Polyurethanbasis für die bauaufsichtliche Zulassung als Fließmittel bzw. Betonverflüssiger zu entwickeln. Um dieses Ziel zu erreichen, wurden die Untersuchungen in drei Schritte gegliedert:

- Auswahl geeigneter Polymere
- Optimierung der Mörtelzusammensetzung
- Entwicklung von Hochleistungs- und Dränbeton

### *1) Auswahl geeigneter Polymere*

In der Screening-Phase wurden durch Variation von Art und Menge der eingesetzten Ausgangskomponenten bei verschiedenen Reaktionsbedingungen Polyetherpolyurethane mit unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung und unterschiedlichem Hydrophilierungsgrad (= Gehalt an hydrophilen Ethylenoxideinheiten) bei der Fa. Bayer AG hergestellt und die daraus resultierenden Auswirkungen auf die Frisch- und Festmörteleigenschaften untersucht. Es handelte sich um Polymere auf

- Basis von Tolylendiisocyanat
- Diisocyanat- und Polyisocyanat-Prepolymere
- isocyanurathaltige Polyisocyanate auf Diisocyanatohexanbasis
- Polyisocyanate mit einer Allophanatstruktur, basierend auf einem aliphatischen oder einem cycloaliphatischen Diisocyanatohexan

Die Entwicklungsprodukte lagen als farblose klare bzw. gelblich klare Flüssigkeiten mit Viskositäten (23 °C) von 240 ... 8200 mPa·s vor. Alle untersuchten Polyurethane waren bei Raumtemperatur filmbildend. Um eine gleichmäßige Verteilung und damit die Ausbildung eines homogenen Polymergerüsts innerhalb der anorganischen Bindemittelmatrix zu erreichen, war es notwendig, die Polymere im Zugabewasser vorzudispersieren. Der mittlere Teilchendurchmesser in der wässrigen Lösung betrug 10.5 nm. Zur Untersuchung der Polymereigenschaften wurden Normmörtel nach DIN EN 196 hergestellt. Die Mörtel wiesen einheitlich eine plastische Konsistenz auf. Als Bindemittel kam ein CEM I 42.5 R zum Einsatz, die Polymerkonzentration betrug 2 M.-%, bezogen auf den Bindemittelgehalt. Dies entsprach einem k/z-Wert von 0.02.

Die Eigenschaften der polymermodifizierten Mörtel waren geprägt von der chemischen Zusammensetzung der Polyisocyanate. Isocyanurathaltige Polyisocyanate sowie Polyisocyanate mit Allophanatstruktur basierend auf einem cycloaliphatischen Diisocyanatohexan hatten die stärkste verflüssigende Wirkung. Die Wassereinsparung betrug im Vergleich zu einer Null-Probe bei Verwendung der Polymere P23 und P124 jeweils 30 %. Wegen der günstigen Herstellungsbedingungen wurden bevorzugt isocyanurathaltige Polyisocyanate untersucht. Durch Optimierung des Hydrophilierungsgrades und des Gehaltes an freien NCO-Gruppen gelang es innerhalb dieser Stoffklasse ein Polymer (P124) zu entwickeln, daß die Anfangsfestigkeit des Mörtels nicht beeinträchtigte und gleichzeitig eine gute verflüssigende Wirkung besaß. Außerdem wurde eine ausreichende Mischbarkeit des an sich hydrophoben Polyisocyanats mit dem wäßrigen, anorganischen Bindemittelsystem erreicht. Die Neigung zu Entmischungen ("Bluten") konnte ebenfalls minimiert werden. Zu Beginn der Entwicklung wurden Entschäumer und Polymer getrennt voneinander dem Zugabewasser zugefügt, im weiteren Verlauf erfolgte die Formulierung eines ein-komponentigen Systems. Dadurch wurde ein übermäßiger Eintrag von Luftporen verhindert.

Die Absenkung des w/z-Wertes bewirkte eine Erhöhung der mechanischen Kennwerte, insbesondere der Druckfestigkeit. Die Festigkeitssteigerung betrug bis zu 60 %. Der Anstieg des dynamischen E-Moduls blieb dahinter zurück. Mittels Raster-elektronenmikroskopie und Quecksilberdruckporosimetrie wurde eine Gefügeverfeinerung bei den modifizierten Mörteln nachgewiesen. Die Gesamtporosität war erniedrigt und die Porenradien hin zu kleineren Werten verschoben. Neben der Reduktion des Wassergehaltes trugen zwei weitere, durch die Modifizierung hervorgerufene Effekte zu der höheren Dichtigkeit und damit Festigkeit der Mörtel bei. Zum einen führte der niedrige Teilchendurchmesser des Polymers dazu, daß feine Zwickel innerhalb des Mörtelgefüges ausgefüllt wurden. Es bildete sich ein mit Hydratationsprodukten des Zementes belegter Polymerfilm aus. Zum anderen wurde durch den Zusatz der Hydratationsgrad der Mörtel erhöht, wie  $^{29}\text{Si}$ -NMR-spektroskopische Untersuchungen zeigen. Andere Polymere neigen durch die stark alkalische Umgebung in zementgebundenen Systemen zur Verseifung. Die entwickelten Polyisocyanate erwiesen sich als hydrolysebeständig.

Polyisocyanate auf Toluylendiisocyanatbasis, Isocyanatprepolymere sowie aliphatische Polyisocyanate mit Allophanatstruktur erfüllten nicht die technischen Anforderungen, die an ein Fließmittel bzw. Verflüssiger gestellt werden. Erstere bewirkten ein Bluten der Mörtel und trugen Luftporen ein, Polymere auf Basis der beiden letztgenannten Polyisocyanatklassen besaßen keine ausreichende verflüssigende Wirkung.

Nach Abschluß der Screening-Phase wurde das Entwicklungsprodukt P124 für eine spätere Praxisanwendung ausgewählt.

### *2) Optimierung der Mörtelzusammensetzung*

Als Vorversuche zu den Betonentwicklungen erfolgte eine Optimierung der Mörtelzusammensetzung im Hinblick auf eine hohe Festigkeit und Dichtigkeit. In die Untersuchungen wurden Zemente unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung und Mahlfeinheit, reine Klinkerphasen sowie verschiedene Zusatzstoffe einbezogen. Weiterhin wurde die Polymerkonzentration variiert. Als Zusatzstoffe kamen inerte Füller wie Kalkstein-, Glas- und Basaltmehl und Puzzolane wie Mikro- und Nanosilica und Steinkohlenflugasche zum Einsatz. Die Zugabemenge betrug 5, 7.5 oder 10 M.-%, bezogen auf den Bindemittelgehalt, mit Ausnahme von Nanosilica, das nur in einer Konzentration von 5 M.-% dosiert wurde. Die nach DIN EN 196 hergestellten Normmörtel wiesen die gleiche Konsistenz und demzufolge unterschiedliche w/z-Werte auf.

#### ◦ Variation des Bindemittels

Wichtige Einflußgrößen auf die Wirkung der Polymere waren der Alkali- und Alit-Gehalt des Zementklinkers und die Mahlfeinheit. Ein hoher Alkaligehalt bewirkte eine Verzögerung der Zementhydratation und erhöhte in besonderem Maße den Wasserbedarf modifizierter Mörtel. Es besteht die Vermutung, daß die Alkaliionen mit dem Polymer einen Komplex in Form eines Kronenethers ausbilden und beide Komponenten deswegen für die Zementabbindung nicht mehr zur Verfügung stehen. Die Kombination aus einem alkaliarmen Zement mit Polymer führte zu einer deutlichen Abdichtung des Gefüges, die in hohen Festigkeiten, niedrigen Carbonatisierungstiefen und hohen  $\mu$ -Werten zum Ausdruck kam. Eine leichte Verzögerung ging auch von der Klinkerphase Alit aus. Der Nachweis wurde durch kalorimetrische und  $^{29}\text{Si}$ -NMR-spektroskopische Untersuchungen von polymerhaltigen Alitpasten erbracht.

Die Verzögerung führte zu keiner Beeinträchtigung der Festigkeitsentwicklung, sondern machte eine längere Verarbeitungsdauer möglich. Als günstig stellte sich eine Mahlfineinheit des Zementes von 3500 ... 4000  $\text{cm}^2/\text{g}$  heraus. Die Polymere eigneten sich ebenso für die Anwendung in hüttensandhaltigen Mörteln. Auswirkungen der Zusatzmittel auf die Hydratation des Tricalciumaluminat-Sulfatträgersystems konnten nicht festgestellt werden. Tendenziell korrelierten die mechanischen Werte der Mörtel mit deren w/z-Werten.

◦ Verwendung von Zusatzstoffen

Die Füller Basalt-, Kalkstein- und Glasmehl führten im wesentlichen nur zu einer Verbesserung der Verarbeitungseigenschaften der Mörtel d. h. sie verminderten das Entmischen und erhöhten das Zusammenhaltevermögen. Eine optimale Dosierung der Zusatzstoffe lag bei 7.5 M.-%. Die Eigenschaften der polymermodifizierten Mörtel konnten durch Mikrosilica gezielt verbessert werden. Aus dem Füllereffekt, der puzzolanischen Reaktion und der dichteren Übergangszone resultierten hohe Festigkeiten, niedrige Porositäten und damit verbunden eine hohe Dauerhaftigkeit. Nachteilig zu beurteilen ist das vergleichsweise hohe Schwinden. Die Wirkung der Steinkohlenflugasche war gekennzeichnet durch eine langsame Festigkeitsentwicklung.

◦ Variation der Polymerkonzentration

Eine optimale Verflüssigung und Verbesserung der mechanischen Eigenschaften der Mörtel wurde bei einer Dosierung der Polymere von 2 M.-% bezogen auf den Bindemittelgehalt erzielt. Niedrigere Konzentrationen, 0.5, 1 und 1.5 M.-% führten zu einer entsprechend abgeschwächten Wassereinsparung. Zugabemengen von 4, 6 und 8 M.-% sollten zum einen aus Gründen der Wirtschaftlichkeit vermieden werden, zum anderen wurde die Zementhydratation zu stark verzögert.

Durch Variation des Bindemittels und der Polymerkonzentration sowie durch die Verwendung von Zusatzstoffen war es möglich, die Festigkeit und Dichtigkeit der Mörtel zu verbessern.

*3) Entwicklung von Hochleistungs- und Dränbeton*

Die Eignung der Polymere wurde für zwei Anwendungen in der Baupraxis geprüft, zum einen für Hochleistungsbeton, zum anderen für Dränbeton. Hierbei wurden die

Ergebnisse aus den vorangehenden Abschnitten und der Literaturbetrachtung berücksichtigt.

◦ Hochleistungsbeton

Bei der Entwicklung von Hochleistungsbeton wurden die Mahlfineinheit des Zementes, die Art der Zuschläge und der Zusatzstoffe variiert. Als Bindemittel kamen ein alkaliarmer, alitreicher CEM I 42.5 R bzw. CEM I 52.5 R zum Einsatz. Der Zuschlag setzte sich entweder aus einer Kombination von Brechsand und Splitt aus Basalt, Sand und Splitt oder Sand und Quarzkies zusammen. Die Sieblinie, AB<sub>16</sub>, blieb konstant. Als Zusatzstoffe wurden 10 M.-% Mikrosilica bzw. Flugasche eingesetzt, als Zusatzmittel die Polymere P23 und P124 in einer Konzentration von 2 M.-%. Die Wassereinsparung lag zwischen 22 und 40 %. Alle modifizierten Betone waren gemäß DIN 1045 als hochfest einzustufen. Maximale Festigkeiten, 140 N/mm<sup>2</sup>, wurden bei einem Beton erzielt, der sich aus Polymer, 450 kg/m<sup>2</sup> eines CEM I 42.5 R, Mikrosilica und Zuschlag bestehend aus Quarzsand und Splitt zusammensetzte. Verantwortlich dafür war u. a. die gute Raumauffüllung. Mikrosilica mit einem durchschnittlichen Teilchendurchmesser von 0.1 µm und das Polymer, mittlerer Teilchendurchmesser 0.01 µm, füllten feine Zwickel zwischen den Zementkörnern (mittlerer Teilchendurchmesser 10 µm) aus. Die Steigerung des statischen und dynamischen E-Moduls blieb hinter der der Festigkeit zurück. Aus dem geringen Wassergehalt und der hohen Dichtigkeit des Betons resultierten niedrige Schwindwerte. Eine gute Nachbehandlung stellte sich als wichtig heraus.

Zur Klärung der Frage, ob die hohen Festigkeiten auch zur entsprechender Dauerhaftigkeit der Betone führten, wurden Prüfmethode angewandt, die direkt oder indirekt die Kapillarporosität kennzeichneten wie kapillare Wasseraufnahme, Frost-Tausalzwehstand sowie das Eindringen organischer Lösungsmittel. Die polymermodifizierten Betone zeichneten sich durch niedrige Eindringtiefen, einen hohen Verschleiß- und Frost-Tausalzwehstand aus. Auch ohne Luftporenbildner unterschritten die Werte das in der RILEM-RECOMMENDATION DRAFT 1994 formulierte CDF-Widerstandskriterium für dauerhafte Betone von 1500 g/m<sup>2</sup> nach 28 Frost-Tau-Wechseln. Negative Auswirkungen auf die Betoneigenschaften durch die niedrigen w/z-Werte, wie sie in der Literatur beschrieben sind, konnten nicht festgestellt werden.

---

- Dränbeton

Die Vorteile eines offenporigen Straßenbelags aus Dränbeton liegen in der Reduktion des Verkehrslärms, der Entsigelung von Verkehrsflächen und der hohen Verkehrssicherheit durch eine gute Griffigkeit der Oberfläche. Hohe Anforderungen bezüglich Festigkeit, Verschleiß und Frost-Tausalzangriff erfordern die Modifizierung mit Polymeren. Durch Optimierung der Betonrezeptur wurde ein Dränbeton entwickelt, der neben einer ausreichenden Festigkeit einen Hohlraumgehalt von > 20 Vol.-% aufwies. Er setzte sich aus Edelsplitt (Diabas) der Korngruppe 5/8, einem CEM I 42.5 R und 2 M.-% Polymer zusammen. Durch die Verwendung von Polyurethan konnten die Einsatzmengen, die nötig sind zur Verbesserung der Verarbeitbarkeit und Reduktion des w/z-Wertes, erheblich gesenkt werden. Stereomikroskopische Aufnahmen zeigten eine punktförmige Verkittung der einzelnen Zuschlagskörner mit dem Zementstein.

Mit speziell entwickelten Polymeren auf Polyetherpolyurethanbasis ließen sich die Eigenschaften von Hochleistungs- und Dränbetonen, hergestellt mit handelsüblichen Materialien und betonüblicher Verarbeitungstechnik, deutlich verbessern.

## 7 Literaturverzeichnis

- ACI 1984 ACI Committee 362: State of the art report on high-strength concrete, ACI Journal 4 (1984), S. 364-411.
- AİTCIN 1987a Aİtcin, P.-C.: Retardation effect of superplasticizer on different cement fractions, Cement and Concrete Research 17 (1987), S. 995-999.
- AİTCIN 1987b Aİtcin, P.-C.; Sarkar, S.L.: Dissolution rate of silica fume in very high strength concrete, Cement and Concrete Research 17 (1987), S. 591-601.
- AİTCIN 1990 Aİtcin, P.-C.; Mehta, P.K.: Effect of coarse-aggregate characteristics on mechanical properties of high-strength concrete, ACI Materials Journal 87 (1990), S. 103-105.
- AİTCIN 1994 Aİtcin, P.C.; Jolicour, C.; MacGregor, J.G.; Superplasticizers: How they work and why they occasionally don't, Concrete International 8 (1994), S. 54-52.
- AİTCIN 1997 Aİtcin, P.C.: The art and science of high-performance concrete, Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Conference on Superplasticizer and other chemical Admixtures in Concrete, Rom, 1997, Mario Collepardi Symposium, S. 107-126.
- ALFES 1989 Alfes, C.: Hochfeste, verformungsarme Betone mit Silica-Staub, Betonwerk- und Fertigteiltechnik 11 (1989), S. 62-71.
- ALTNER 1989 Altner, W.; Richter T.: Stofflich-technologische Grundlagen und Anwendung hochfester Betone, aus: Hochfester Beton: Grundlagen und Anwendung, Berlin DDR Bauinfo, 1989, S. 5-29.

- 
- BACHE 1981                      Bache, H.H.: Densified Cement/Ultrafine Particle Based Materials, Proceedings of the 2<sup>th</sup> International Conference on Superplasticizers in Concrete, Ottawa, 1981, S. 1-35.
- BAUBERATUNG 1997              Bauberatung      Zement:      Hochfester      Beton/Hochleistungsbeton, Zement-Merkblatt Beton-technik, Entwurf 6.2.1997.
- BECHTHOLD 1996                Bechthold, R.; Wagner J.-P.: Verwendung von Silikatzusätzen im Beton, Sonderdruck aus beton 46 (1996), S. 216-221.
- BELL 1990                        Bell, G.M.M.; Bensted, J.; Glasser, F.P.; Lachowski, E.E.; Roberts, D.R.; Taylor, M.J.: Study of calcium silicate hydrates by solid state high resolution <sup>29</sup>Si nuclear magnetic resonance, Advances in Cement Research 3 (1990), S. 23-37.
- BENTUR 1987                      Bentur, A., Goldman, A., Cohen, M. D.: The contribution of the transition zone to the strength of high quality silica fume concrete, Materials Research Society Proceedings 114 (1987), S. 97-103.
- BENTUR 1989                      Bentur, A.; Goldman, A.: Curing effects, strength and physical properties of high strength silica fume concretes, Journal of Materials in Civil Engineering 1 (1989), S. 46-58.
- BENTUR 1991                      Bentur, A.: Microstructure of high-strength concrete, Darmstädter Massivbau-Seminar, 1991, Band 6, S. 245-257.
- BILLHARDT 1971                Billhardt, H.W.: Über den Einfluß der Alkalien und Sulfate auf das Erhärten von Zement, Zement-Kalk-Gips 24 (1971), S. 91.
- BOGUE 1955                      Bogue, H.R.: The chemistry of portland cement, Reinhold Publishing Corporation, 2.Auflage New York 1955.
- BONZEL 1977                      Bonzel, J.; Siebel, E.: Neuere Untersuchungen über den Frost-Tausalz-Widerstand von Beton, beton 4 (1977), S. 153-158.

- 
- BONZEL 1983                      Bonzel, J.; Siebel, E.: Zusammensetzung und Eigenschaften von leicht verarbeitbarem Beton mit Fließmittel, beton 4 (1983), S. 137-144.
- BREITENBÜCHER 1990              Breitenbücher, R.: Hochfeste Betone mit Mikrosilica - Verbesserung des Verbundes zwischen Matrix und Zuschlag, bauingenieur 65 (1990), S. 426.
- BREITENBÜCHER 1996              Breitenbücher, R.: Hochleistungsbeton - Neue Anwendungsmöglichkeiten, Zement und Beton 1 (1996), S. 5-8.
- BUIL 1984                          Buil, M.; Paillere, A.M.; Roussel, B.: High strength mortars containing condensed silica fume, Cement and Concrete Research 14 (1984), S. 693-704.
- BVK 1993                          Bundesverband Kraftwerksnebenprodukte: Optimieren von Beton nach DIN 1045 und DIN V ENV 206 mit Betonzusatzstoff Steinkohlenflugasche, BVK-Betontechnische Empfehlungen 1993.
- CARLES-GIBERGUES 1973          Carles-Gibergues, A., Stambolieva, R., Vaquier, A.: Role initial des sulfates d'une cendre volante dans son caractere pouzzolanique, RILEM Materiaux et Constructions 6 (1973), S. 29-38.
- CEB/FIP 1990                      CEP/FIP: High strength concrete - state of the art, Bulletin d'information, No. 197, Lausanne (1990), S. 16-22.
- CHANDRA 1995                      Chandra, S.: Historical background of polymers used in concrete, Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Congress on Polymers in Concrete, Oostende, Vol.1, 1995, S. 3-11
- CHIOCCHIO 1985                    Chiocchio, G.; Paolini, A.E.: Optimum time for adding superplasticizers to portland cement pastes, Cement and Concrete Research 15 (1985), S. 901-908.
- COLLEPARDI 1994                  Collepardi, M.: Advances in chemical admixtures for concrete, Advances in Cement and Concrete 28 (1994), S. 257-291.
- COOK 1989                          Cook, J.E.: 10.000 psi concrete, Concrete International 6 (1989), S. 45-51.

- 
- CZERNIN 1977 Czernin, W.: Zementchemie für Bauingenieure, Bauverlag GmbH, Wiesbaden, Berlin, 1977.
- DANIELSEN 1987 Danielsen, S.W.: Optimizing aggregate properties for high strength concrete, Proceedings of the International Conference of Utilization of high strength Concrete, Stavanger, Vol. 2, 1987, S. 73-84.
- D'ANS-LAX 1992 D'Ans-Lax, R.: Taschenbuch für Chemiker und Physiker, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, London, Paris, Tokyo, Hong Kong, Barcelona, Budapest, 1992, Hrsg. M.D. Lechner, Band 1 Physikalisch-chemische Daten, 1992.
- DARTSCH 1992 Dartsch, B.; Lutze, D.: Einsatz von Steinkohlenflugasche im Beton- und Fertigteilwerk, Betonwerk- und Fertigteiltechnik 1 (1992), S. 72-80.
- DE LARRARD 1989 De Larrard, F.: Ultrafine particles for the making of very high strength concretes, Cement and Concrete Research 9 (1989), S. 161-165.
- DE LARRARD 1996 De Larrard, F.: A method for proportioning high-strength concrete mixtures, Cement, concrete and aggregates 12 (1990), S. 47-52.
- DIAMOND 1996 Diamond, S., Wang, Y.: A quantitative image analysis study of the influence of superplasticizer on cement paste microstructure, Proceedings of the 18<sup>th</sup> International Conference on Cement Microscopy, Houston, 1996, S. 465-479.
- DIEDERICHS 1983 Diederichs, U.; Schneider, U.: Eigenschaften und Verwendung von Normalbeton mit Basalt-Zuschlag, Betonwerk- und Fertigteiltechnik 1 (1983), S. 36-40.
- DIETERICH 1987 Dieterich, D.: Poly(urethane)[Poly(carbaminsäureester)], aus: Methoden der organischen Chemie, Georg Thieme Verlag, Stuttgart, New York, Band E20, 1987, S. 1561-1757.
- DRINKGERN 1989 Drinkgern, G.: Dränbeton. Aufbau, Eigenschaften und Anwendung, beton 39 (1989), S. 105-110.
- ECHTE 1998 Echte, A.: Handbuch der technischen Polymerchemie, Verlag Chemie, Weinheim, 1998.

- 
- FAGERLUND 1977 Fagerlund, G.: The critical degree of saturation method of assessing the free/thaw resistance of concrete, RILEM Materials and Construction 10 (1980), S. 217-229.
- FELDMAN 1966 Feldman, R.F.: Density and porosity studies of hydrated portland cement, Cement Technology 1 (1972), S. 5-14.
- FELDMAN 1981 Feldman, R.F.: Pore structure formation during hydration of fly-ash and slag cement blends, Material research society Proceeding, Symposium N: Effects of Flyash Incorporation in Cement and Concrete, Hrsg. S. Diamond, Boston, 1981, S. 124-133.
- FELDMAN 1985 Feldman, R.F., Cheng-Yi, H.: Hydration reactions on portland cement - Silica fume blends, Cement and Concrete Research 15 (1985), S. 585-592.
- FELSCH 1986 Felsch, K.: Einfluß von Betonzusatzmitteln auf die Verarbeitbarkeit und Festigkeit von Splittbeton, Die Naturstein-Industrie 5 (1986), S. 15-19.
- FELSCH 1993 Felsch, K.; Lottmann, S.; Böing, R.: Hochfester Beton, Zement, Beton und Baustoffe, FEB-Berichte, Heidelberger Zement AG, Forschung, Entwicklung und Beratung, 1993, Heft 2, S. 4-9.
- FRANKE 1941 Franke, B.: Bestimmung von Calciumoxid und Calciumhydroxid neben wasserfreiem und wasserhaltigem Calciumsilikat, Zeitschrift für anorganische und allgemeine Chemie 247 (1941), S. 180-184.
- FUJII 1985 Fujii, A.; Tanaka, H.; Iizuka, M.: Slump control by reactive polymer dispersant, Review of the 39<sup>th</sup> general Meeting of Cement Association, Tokyo, 1985, S 72-75.
- FUKUDA 1990 Fukuda, M.; Mizunuma, T.; Izumi, T.; Iizuka, M.; Hisaka, M.M.: Slump control and properties of concrete with a new superplasticizer I: Laboratory studies and tests methods, Proceedings of the International RILEM Symposium on Admixtures for Concrete. Improvement of properties, London, 1990, S. 10-19.

- 
- GAO 1999 Gao, X.F.; Lo, Y.; Tam, C.M.; Chung, C.Y.: analysis of the infrared spectrum and microstructure of hardened cement paste, *Cement and Concrete Research* 29 (1999), S. 805-812.
- GHOSH 1980 Ghosh, S.; Handoo, S.K.: Infrared and raman spectral studies in cement and concrete, *Cement and Concrete Research* 10 (1980), S. 771-782.
- GJÖRV 1990 Gjörv, O.E.: Abrasion resistance of high-strength concrete pavements, *Concrete International* 18 (1990), S. 45-48.
- GRAF 1954 Graf, O.: Festigkeiten und Elastizität von Beton mit hoher Festigkeit, *Schriftenreihe Deutscher Ausschuß für Stahlbeton*, Ernst & Sohn, Heft 113, Berlin, 1954.
- GRIMMER 1996 Grimmer, A.-R.: <sup>29</sup>Si-Festkörper-NMR-Untersuchungen an Calciumsilicaten und ihren Hydratationsprodukten, GDCh-Tagung, Fulda, 1996, S. 47-51.
- GROBKURTH 1989a Großkurth, K.P.: Polymermodifizierter zementgebundener Beton als Konstruktionswerkstoff, *bauingenieur* 64 (1989) S. 173-179.
- GROBKURTH 1989b Großkurth, K.P.; Konietzko, A.: Thermoplastische Polymeradditive in Baustoffen, *Kunststoffe* 5 (1989), S. 426-431.
- GRUBE 1990 Grube, H.; Spanka, G.: Dichtigkeit von Beton gegenüber organischen Flüssigkeiten, *beton* 40 (1990), S. 148-151.
- GRUBE 1997 Grube, H.; Thielen, G.; Spanka, G.: Regelung der Konsistenz von Beton durch Fließmittel, *beton* 8 (1997), S. 470-475.
- GÜNZLER 1983 Günzler, H.; Böck, H.: IR-Spektroskopie, Verlag Chemie, Weinheim, 1983.
- GUERRINI 1997 Guerrini, G.L.; Biolzi, L.; Cassar, L.; Colombet, P.: Superplasticizer and mechanical properties of a very high-performance concrete, *Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Conference on Superplasticizer and other chemical Admixtures in Concrete*, Rom, 1997, Supplementary papers, S. 1-12.

- 
- HÄRDTL 1995                      Hårdtl, R.: Veränderung des Betongefüges durch die Wirkung von Steinkohlenflugasche und ihr Einfluß auf die Betoneigenschaften, Schriftenreihe Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Beuth Verlag GmbH, Heft 448, Berlin, 1995.
- HANSEN 1986                      Hansen, T.C.: Physical structure of hardened cement paste. A classical approach, Matériaux et Constructions 19 (1986), S. 423-436.
- HEINRICH 1983                    Heinrich,W.: Neue Fließmittel für Splittbetone, Die Naturstein-Industrie 5 (1983), S. 21-25.
- HELLAND 1987                    Helland, S.: Utilization of High Strength/High Performance Concrete, Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Symposium on the Utilization of High Strength/High Performance Concrete, Darmstadt, 1987, Vol. 1, S. 67-74.
- HERFURTH 1988                   Herfurth, G.: Microsilica-Stäube als Betonzusatzstoff, Beton- und Stahlbetonbau 6 (1988), S. 172-177.
- HERMANN 1993                   Hermann, K.: Sickerbetone-ihre Herstellung, ihre Eigenschaften und ihre Verwendung, Cement-Bulletin 61 (1993), S. 1-8
- HERMANN 1995                   Hermann, K.: Zusatzstoffe: Flugaschen, Teil 3, Cement-Bulletin 63 (1995), S.3-7.
- HILSDORF 1986                   Hilsdorf, H.K.; Günter, M.: Einfluß von Nachbehandlung und Zementart auf den Frost-Tausalz-Widerstand von Beton, Beton- und Stahlbetonbau 81 (1986), S. 57-62.
- HUBER 1993                      Huber, H.: Hochleistungsbeton - internationaler Stand und Folgerungen, Zement und Beton 3 (1993), S. 2-4.
- JACOBSEN 1996                   Jacobsen, S.; Sellevold, E.J.; Matala, S.: Frost-durability of high strength concrete: effect of internal cracking on ice formation, Cement and Concrete Research 26 (1996), S. 919-931.
- KEIL 1971                         Keil, F.: Zement. Herstellung und Eigenschaften, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1971.

- 
- KERN 1993                      Kern, E.: Technologie des hochfesten Betons, beton 43 (1993), S. 109-115.
- KNÖFEL 1993                    Knöfel, D.; Schubert, P. (Hrsg.): Handbuch Mörtel und Steingängungsstoffe in der Denkmalpflege, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 1993.
- KÖLLMANN 1994                Köllmann, A.; Ivannikov, A.: Spektrale Geräuschzusammensetzung bei statistischen Vorbeifahrten auf Autobahnen, Fige GmbH 1994.
- KÖNIG 1991                    König, G.: Hochfester Beton - Neue Möglichkeiten für das Bauen mit Beton, Seminar Hochfester Beton, Darmstadt, 1991, S. 55-69.
- KÖNIG 1992                    König, G.; Held, M.: Hochfester Beton bis B 125 - Ein geeigneter Baustoff für hochbelastete Druckglieder, Beton- und Stahlbetonbau 87 (1992), S. 41-45.
- KÖNIG 1993                    König, G.; Bergner, H.; Grimm, R.; Simesch, G.: Utilization of High-Strength Concrete in Europe, Proceedings of the Symposium High-Strength Concrete, Lillehammer, 1993, S. 45-56.
- KOKKILA 1990                 Kokkila, A.: Interaction of aggregate and cement paste in high strength concrete, Proceedings of the 43<sup>th</sup> Meeting of RILEM, Espoo, 1990, S. 9-26.
- KOLONKO 1977                Kolonko, K.: Über die Wirkung von Kunstharzdispersionen in zementgebundenen Mörteln, Kunststoff-Anwendung auf Spezialgebieten im Bauwesen, Lehrgang Technische Akademie Esslingen, Ostfildern, 1977, S. 88-94.
- KOTTAS 1964                  Kottas, H.: Das Resonanzverfahren zur Messung mechanischer Schwingungen und Materialeigenschaften, Zeitschrift für Instrumentenkunde 72 (1964), S. 65-70.
- KRELL 1986                    Krell, J.; Grube, H.: Zur Bestimmung der Carbonatisierungstiefe von Mörtel und Beton, beton 36 (1986), S. 29-40.

- 
- LAAS 1994 Laas, H.-J.; Halpaap, R.; Pedain, J.: Zur Synthese aliphatischer Polyisocyanate-Lackpolyisocyanate mit Biuret-, Isocyanurat- oder Urettdionstruktur, farbe + lack 100 (1994), S. 330-335.
- LANGE 1995 Lange, H.; Scholtan, W.: Bestimmung der Teilchengrößenverteilung von Latices mit der Ultrazentrifuge, Particle & Particle Systems Characterization 12 (1995), S. 148-157.
- LEHMANN 1965 Lehmann, H.; Roesky, W.: Festigkeitsentwicklung von Portland- und Hüttenzementen bei 20, 5 und 1 °C, Tonindustriezeitung und Keramische Rundschau 89 (1965), S. 749-759.
- LINDER 1992 Linder, R.: Silica für Beton-Bauteile und -waren?, Betonwerk und Fertigteiltechnik 2(1992), S. 63-68.
- LOCHER 1976 Locher, F.W.; Richartz, W., Sprung, S.: Erstarren von Zement, Teil 1: Reaktion und Gefügeentwicklung, Zement-Kalk-Gips 10 (1976), S. 435-442.
- LUKAS 1976 Lukas, W.: The influence of an Austrian fly ash on the reaction processes in the clinker phases of portland-cements, RILEM Materials and Construction 53 (1975), S: 331-337.
- MAAGE 1992 Maage, M.; Berg, T.: Setting time of concrete influenced by silica fume and water reducer at different temperatures, Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Conference on Flyash, Silica fume, Slag and natural Pozzolans in Concrete, Istanbul, 1992, Supplementary papers, S. 451-464.
- MACIEL 1996 Maciel, C.E.: Encyclopedia of nuclear magnetic resonance, John Wiley & Sons, Chichester, New York Brisbane, Toronto, Singapore, 1996.
- MACPHEE 1998 Macphee, D.E.; Lachowski, E.E.: Cement components and their phase relations, aus: Lea's chemistry of Cement and Concrete, Kapitel 3, John Wiley & Sons Inc., New York, 1998.
- MALHOTRA 1984 Malhotra, V.M.: Use of mineral admixtures for specialized concretes, Concrete International 18 (1984), S. 19-24.

- 
- MALHOTRA 1997 Malhotra, V.M.: Innovative application of superplasticizer in concrete, Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Conference Superplasticizer and other chemical Admixture in Concrete, Rom, Mario Collepardi Symposium, 1997, S. 271-314.
- MANNS 1990 Manns, W.: Mikrosilica, ein neuer Betonzusatzstoff nach DIN 1045, Tiefbau Ingenieurbau Straßenbau 32 (1990), S. 67-70.
- MASSAZZA 1980 Massazza, F.: Effect of superplasticizers on the C<sub>3</sub>A hydration, Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Symposium on the Chemistry of Cement, Paris, Vol. 4, 1980, S. 529-534.
- MEHTA 1976 Mehta, P.K.; Mechanism of expansion associated with ettringite formation, Cement and Concrete Research 3 (1973), S. 1-65.
- MEHTA 1985 Mehta, P.K.: Studies on chemical resistance of low water/cement ratio concretes, Cement and Concrete Research 15 (1985), S. 969-978.
- MEHTA 1989 Mehta, P.K.; Asselanis, J.; ,P.-C.: Aïtcin, P.-C.: Effect of curing conditions on the compressive strength and elastic modulus of very high-strength concrete, Cement, Concrete and Aggregates 34 (1989), S. 80-83.
- MELAND 1983 Meland, I.; Bjoergum, O.; Krane, J.; Justnes, H.: A <sup>29</sup>Si-MAS NMR study of the pozzolanic activity of condensed silica fume and the hydration of di- and tricalcium silicates, Advances in Cement Research 3 (1983), S. 111-116.
- MIEDLER 1993 Miedler, K.: Hochleistungsbeton, Prüfergebnisse zur Dauerhaftigkeit, Zement und Beton 3 (1993), S. 14-17.
- NIEMEYER 1981 Niemeyer, W.: Natursteinsplitte zur Herstellung von Beton, Betonwerk- und Fertigerteiltechnik 6 (1981), S. 332-340.

- 
- OHAMA 1984                      Ohama, Y.: Polymer-modified Mortars and Concrete, aus: Concrete admixtures handbook, Hrsg. V. S. Ramachandran, Park Ridge, New Jersey, USA 1984, S. 337-429.
- ODLER 1982                      Odler, I.; Stassinopoulos, E.N.: Über die Zusammensetzung der Porenflüssigkeit hydratisierter Zementpasten, TIZ-Fachberichte 106 (1982), S. 394-401.
- ODLER 1983                      Odler, I.: Effect of alkalies on portland cement hydration, Part II: Alkalies present in form of sulphates, Cement and Concrete Research 13 (1983), S. 771-777.
- ODLER 1998                      Odler, I.: Hydration, Setting and Hardening of Portland Cement, aus: Lea's chemistry of Cement and Concrete, Kapitel 6, John Wiley & Sons Inc., New York, 1998.
- PASCHMANN 1994                Paschmann, H.; Grube, H.: Einfluß mineralischer und organischer Zusatzstoffe auf die Dichtigkeit gegenüber organischen Flüssigkeiten und auf weitere Eigenschaften des Betons, beton 44 (1994), S. 24-29.
- PASCHMANN 1995a              Paschmann, H.; Grube, H.,Thielen, G.: Untersuchungen zum Eindringen von Flüssigkeiten und Gasen in Beton sowie zum chemischen Widerstand von Beton, Schriftenreihe Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Beuth Verlag GmbH, Heft 450, Berlin, 1995.
- PASCHMANN 1995b              Paschmann, H.; Grube, H.; Thielen, G.: Untersuchungen zum Eindringen von Flüssigkeiten in Beton sowie zur Verbesserung der Dichtheit des Betons, Schriftenreihe Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Beuth Verlag GmbH, Heft 450, Berlin, 1995.
- PEDERSEN 1988                Pedersen, N.: Wear resistant concrete for pavements, Concrete International 8 (1988), S. 53-58.
- PERENCHIO 1978                Perenchio, W.F.; Kliegr, P.: Some physucal properties of high-strength concrete, Bulletin RD 056.01 T, 1978.

- 
- PLOWMAN 1981                      Plowman, C.; Cabrera, J.G.: The influence of pulverised fuel ash on the hydration reactions of calcium aluminates, Material research society proceeding, Symposium N: Effects of Flyash Incorporation in Cement and Concrete, Hrsg. S. Diamond, Boston, 1981, S. 71-81.
- PLOWMAN 1984                      Plowman, C.; Cabrera, J.C.: Hydration of portland cement, Cement and Concrete Research 14 (1984), S. 238-244.
- POWERS 1947                        Powers, T.C.; Brownyard, T.L.: Studies of the physical properties of hardened portland cement, Journal of the American Concrete Institute 42 (1947), S. 101-132.
- RAMACHANDRAN 1984                Ramachandran, V.S.: Use of superplasticizers in concrete, *il cemento* 3 (1987), S. 273-298.
- RAMACHANDRAN 1995                Ramachandran, V.S.; Lowery, M.S., Malhotra, V.M.: Behaviour of ASTM Type V cement hydrated in the presence of sulfonated melamine formaldehyde, Material and Structures 28 (1995), S. 133-138.
- RANC 1990                            Ranc, R.: Interactions entre les réducteurs d'eau plastifiants et les ciments, Ciments, Bétons, Plâtres, Chaux 78 (1990), S. 19-21.
- RAUEN 1976                         Rauen, A.: Zum Wirkungsmechanismus von Betonverflüssigern auf der Basis von wasserlöslichen Melaminharzen, Cement and Concrete Research 6 (1976), S. 57-62.
- RAYMENT 1982                        Rayment, P.L.: The effect of pulverized-fuel ash on the c/s molar ratio and alkali content of calcium silicate hydrates in cement, Cement and Concrete Research 12 (1982), S. 133-140.
- REGOURD 1983                        Regourd, M.: Pozzolanic Reactivity of condensed silica fume, Aus: Aïtcin, P.-C.: Condensed silica fume, les Editions de L'Universite de Sherbrooke, Canada, 1983.

- 
- REINHARDT 1997                      Reinhardt, H.W.; Weber S.: Improved durability of high strength concrete due to autogenous curing, Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Conference on Durability of Concrete, Sydney, 1997, S. 93-122.
- RIFFEL 1996                              Riffel, S.: Lärmindernde Fahrbahnbeläge aus Beton mit dichtem und offenporigem Gefüge, Lehrgang Lärmindernde Fahrbahnbeläge aus Beton mit dichtem und offenporigem Gefüge, Esslingen, 1996, S. 1-22.
- RILEM 1994                              Rilem-Recommendation Draft: Prüfverfahren des Frost-Tau-Widerstandes von Beton mit Wasser (CF) oder mit Taumittel-Lösung (CDF), Betonwerk- und Fertigteiltechnik 12 (1994), S 94-99.
- ROMBERG 1978                          Romberg, H.: Zementsteinporen und Betoneigenschaften , Beton-Information 5 (1978), S. 50-55.
- ROSTÁSY 1960                          Rostásy, F.S.: Zur Theorie der Austrocknung und des Schwindens zementgebundener Massen, Zement-Kalk-Gips 13 (1960), S. 93-103.
- SANDVIK 1993                          Sanvik, M.; Irgens, P.: Erfahrungen mit hochfestem Beton in der Nordsee, Zement und Beton 3 (1993), S. 5-13.
- SARKAR 1992                              Sarkar, S.L.; Baalbaki, M.: The influence of the type of cement on the properties and microstructure of high-performance concrete, Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Congress on the Chemistry of Cement, New Delhi, Vol. 2, 1992, S. 110-115.
- SCHAUERTE 1994                          Schauerte, K.: Isocyanates, aus: Polyurethane handbook, Hrsg. G. Oertel, Carl Hanser Verlag, Munich, Vienna, New York, 1994.
- SCHIEBL 1990                              Schießl, P.: Wirkung von Steinkohlenflugaschen in Beton, beton 12 (1990), S. 519-523.
- SCHIEBL 1993a                          Schießl, P.; Härdtl, R.: Steinkohlenflugasche im Beton, beton 12 (1993), S. 644-648.

- 
- SCHIEßL 1993b Schießl, P.; Alfes, C.; Sybertz, F.; Vannahme, S.: Verwendung von Kunststoffdispersionen als Zusatzstoff für Beton nach DIN 1045 bei Einwirkung umweltgefährdender Flüssigkeiten, *bauingenieur* 68 (1993), S. 19-26.
- SCHIEßL 1994a Schießl, P.: Verwendung von künstlichen Puzzolanen als Zusatzstoff im Beton, Phase 1 Grundsätze der Wirksamkeit, Teil B: 'Mikrosilica', Forschungsbericht Nr. 344-1B, 1994, IRB Verlag, Stuttgart, 1994.
- SCHIEßL 1994b Schießl, P.: Verwendung von künstlichen Puzzolanen als Zusatzstoff im Beton, Phase 2 Wirksamkeit im Beton, Forschungsbericht Nr. 344-2, 1994, IRB Verlag, Stuttgart, 1994.
- SCHIEßL 1996 Schießl, P.; Rößler, G.: Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung einer Styrol-Acrylat-Dispersion als Betonzusatzstoff, *bauingenieur* 17 (1996), S. 489-495.
- SCHIEßL 1997 Schießl, P.; Meng, B.: The reaction of silica fume at early ages, *Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Congress on the Chemistry of Cement*, Göteborg, 1997, Vol. 3, S. 3ii105-3ii109.
- SCHMELTER 1995 Schmelter, U.: Hydration of high-strength concrete. First results and future projects, *Darmstadt concrete* 10 (1995), S. 18-19.
- SMOLCYK 1961 Smolcyk, H.-G.: Die Ettringit-Phasen im Hochofenzement, *Zement-Kalk-Gips* 14 (1961), S. 277-284.
- SCHNABL 1991 Schnabl, L.: Betonzusatzmittel - Was leisten sie wirklich? *Zement-Kalk-Gips* 17 (1978), S. 121-129.
- SCHNEIDER 1993 Schneider, U.: Betontechnologie und praktische Anwendung von Hochleistungsbeton, *Zement und Beton* 3 (1993), S. 18-24.
- SCHÖNBERG 1988 Schönberg, M.: Verfahren zur Einteilung chemischer Medien in Hauptgruppen, Höchst AG, Frankfurt, 1988.

- 
- SCHOLZ 1986 Scholz, H.; Holzapfel, T., Bartsch, P.: Mineralogische Zusammensetzung von Steinkohlenflugaschen, TIZ-Fachberichte 110 (1986), S. 47-51.
- SCHOLZ 1999 Scholz, W., Hiese, W. (Hrsg.): Baustoffkenntnis, Werner Verlag, Düsseldorf 1999.
- SCHORN 1990 Schorn, H.: Beton mit Kunststoffen und andere Instandsetzungsbaustoffe, Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften, Berlin, 1990.
- SCHRAGE 1992 Schrage, I.; Sticha, J.; Mohr, B.: Ein Ausgangsrezept für hochfesten Beton, Beton- und Stahlbetonbau 87 (1992), S. 158-159.
- SCHRAGE 1994 Schrage, I.: Hochfester Beton, Teil 1 Betontechnologie und Betoneigenschaften, Schriftenreihe Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Beuth Verlag GmbH, Heft 438, Berlin, 1994.
- SCHULZE 1991 Schulze, J.: Thermoplastische Polymere. Modifizierung von Mörteln und Betonen, beton 41 (1991), S 232-237.
- SELLEVOLD 1982 Sellevold, E.J.; Bager, D.H.; Klitgaard, A., Jensen E.; Knudsen, T.: Silica fume - cement pastes: hydration and pore structure, Report No. 82.610, Division of Building materials, The Norwegian Institute of Technology, Trondheim, Norway 1982.
- SELLEVOLD 1996 Sellevold, E.J.; Jacobsen, S.: Self healing of HSC after deterioration by freeze/thaw, Cement and Concrete Research 26 (1996), S. 55-62.
- SETZER 1991 Setzer, M.; Schrage, I.: Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes von Betonpflastersteinen, Betonwerk- und Fertigteiltechnik 6 (1991), S. 58-69.
- SETZER 1994 Setzer, M.: Entwicklung und Präzision eines Prüfverfahrens zum Frost-Tausalz-Widerstand, Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar 40 (1994), S. 87-93.
- SIEBEL 1992 Siebel, E.: Frost- und Frosttausalzwiderstand von Beton, beton 9 (1992), S. 496-501.

- 
- SINGH 1989 Singh, N.B.: Effect of melment on the hydration of white portland cement, *Cement and Concrete Research* 19 (1989), S. 547-553.
- SMOLCYK 1961 Smolcyk, H.-G.: Die Ettringit-Phasen im Hochofenzement, *Zement-Kalk-Gips* 14 (1961), S. 277-281.
- SPANKA 1995 Spanka G.; Grube, H.; Thielen, G.: Wirkungsmechanismus verflüssigender Zusatzmittel, *beton* 11 (1995), S. 802- 808.
- SPRINGENSCHMID 1993 Springenschmid, R.; Schrage, I.: Hochfester Beton: Zeitabhängige Verformungen, Reißempfindlichkeit und Widerstand gegen chemische Einwirkungen, Vortragsband: Arbeitstagung Deutscher Beton-Verein, Wiesbaden, 1993, S. 46-50.
- SPRINGENSCHMID 1996 Springenschmid, R.; Schrage, I.: Versuche über das Kriechen und Schwinden hochfesten Betons, *Beton- und Stahlbetonbau* 91 (1996), S. 30-36.
- STARK 1993a Stark, J.; Nicolay, J.: Dauerhaftigkeit von Weißbeton B 85, *beton* 9 (1993), S. 444-448.
- STARK 1993b Stark, J.; Ludwig, H.-M.: Erfahrungen mit dem CDF-Verfahren zur Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes von Beton, *Betonwerk- und Fertigteiltechnik* 11 (1993), S. 48-55.
- STARK 1994 Stark, J.; Ludwig, H.-M.: Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand von Beton - ein rein physikalisches Problem, *Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar* 40 (1994), S. 95-104.
- STARK 1995 Stark, J.; Wicht, B.: Dauerhaftigkeit von Beton, *Schriften der Hochschule für Architektur und Bauwesen, Weimar*, 1995.
- STARK 1996 Stark, J.: Zusammenhänge zwischen Zementhydratation und Dauerhaftigkeit von Beton, *Bauchemie heute, Festschrift Knöfel, Dissertations Druck Darmstadt*, 1996, S. 135-152.

- 
- STEVELS 1964                      Stevels, J.M.; Stein, N.: Influence of silica on the hydration of  $C_3S$ , Journal of Applied Chemistry 6 (1964), S. 338-346.
- SYBERTZ 1993                      Sybertz, F.: Beurteilung der Wirksamkeit von Steinkohlenflugaschen als Betonzusatzstoff, Schriftenreihe des Deutschen Ausschuß für Stahlbeton, Beuth Verlag GmbH, Heft 434, Berlin, 1993.
- TACHIBANA 1990                    Tachibana, D.: High-strength concrete incorporating several admixtures, Proceedings of the 2<sup>th</sup> Symposium of Utilization of High Strength Concrete, Berkeley, 1990, Vol. 5, S. 32-36.
- TAYLOR 1985                      Taylor, H.F.W., Mohan, K., Moir, G.K.: Analytical study of pure and extended portland cement pastes, Part 1: Pure portland cement pastes; Part 2: Fly ash and slag cement pastes, Journal of the American Ceramic Society 68 (1985), S. 680-690.
- TAYLOR 1997                      Taylor, H.F.W.: Cement Chemistry, Thomas Telford Publishing, London, 1997.
- TENOUTASSE 1990                Tenoutasse, N.; Moulin, E.: Influence of water-cement ratio on concrete microstructure, Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Conference on Cement Microscopy, Vancouver, 1990, S. 323-338.
- TRAETTEBERG 1978                Traetteberg, A.: Silica Fume as a pozzolanic Material, *il cemento* 3 (1978), S: 369-376.
- UCHIKAWA 1980                    Uchikawa, H.; Uchida, S.: Influence of pozzolana on the hydration of  $C_3A$ , Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Congress on the Chemistry of Cement, Paris, 1980, Vol. 3, S. IV24-IV29.
- UMLAUF 1997                      Umlauf, R.: Rheologische Eigenschaften von Zementleimen und deren Beeinflussung, *Bauchemie Kongreß*, Nürnberg, 1997, S. 8-14.
- URHAN 1987                      Urhan, S.: Alkali Silica and pozzolanic reactions in concrete, Part 1: Interpretation of published results and a hypothesis concerning the mechanisms, *Cement and Concrete Research* 17 (1987), S. 141-152.

- 
- VERNET 1992a Vernet, C.; Noworyta, G.: Conductometric test for cement-admixtures systems, Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Congress on the Chemistry of Cement, New Delhi, Vol. 5, 1992, S. 627-633.
- VERNET 1992B Vernet, C.; Noworyta, G.: Interactions des adjuvants avec l'hydratation du C<sub>3</sub>A: points de vue chimique et rhéologique, Journée Technique "Les couples ciment/adjuvant", Technodes S.A., Guerville, 1992, S. 65-70.
- VON HALASZ 1945 Von Halasz, R.: Bauten aus Stahlbetonfertigteilen der Preußischen Bergwerks- und Hütten AG, Die Bau-technik 23 (1945), S. 1-8.
- VOLLPRACHT 1995 Vollbracht, A.: Dränbeton erstmals auf Autobahn eingebaut, Straße und Autobahn 41 (1995), S. 41.
- WÄCHTLER 1984 Wächtler, H.-J.; Ilgner, R.; Feldrappe, D.: Thermo-analytische Untersuchungen in der Zementchemie (Kalorimetrie), Silikattechnik 35 (1984), S. 234-237.
- WAGNER 1996 Wagner, J.-P.; Hauck, H.G.: Nanosilica - ein Zusatz für dauerhaften Beton, Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar 40 (1994), S. 183-187.
- WALZ 1966 Walz, K.: Über die Herstellung von Betonen höchster Festigkeit, beton 8 (1966), S. 339-340.
- WASHBURN 1921 Washburn, E.W.: The dynamics of capillary flow. The physical Review, second series 17 (1921), S. 273-283.
- WESCHE 1991 Wesche, K.: Fly ash in Concrete, Properties and Performance, RILEM Technical Committee 67-FAB, Chapman & Hall, London, 1991.
- WIERIG 1963 Wierig, H.J.: Ein einfaches Verfahren zur Messung der Wasserdampfdurchlässigkeit von Mörtel und Beton, Zement-Kalk-Gips 16 (1963), S. 125-130.

- 
- WIRPSZA 1994                      Wirpsza, Z.: Polyurethanes Chemistry, Technology and applications, Hrsg. T.J. Kemp, Ellis Horwood, New York, London, Toronto, Sydney, Tokyo, Singapore, 1994.
- WISCHERS 1990                      Wischers, G.; Sprung, S.: Verbesserung des Sulfatwiderstands von Beton durch Zusatz von Steinkohlenflugasche- Sachstandsbericht Mai 1989, beton 2 (1990), S. 62-66.
- WITTEKIND 1960                      Wittekind, W.: Sulfatbeständige Zemente und ihre Prüfung, Zement-Kalk-Gips 13 (1960), S. 565-572.
- XU 1993                                XU, Z.; Tang, M.; Beaudoin, J.J.: An ideal structuralmodel for very low porosity cementitious systems, Cement and Concrete Research 23 (1993), S. 378-380.
- YOUNG 1984                          Young, J.F.; Wu, Z.-Q.: The hydration of tricalcium silicate in the presence of colloidal silica, Journal of Material Science 19 (1984), S. 3477-3484.

---

**Verwendete Prüfvorschriften und Normen**

- DIN EN 196            Prüfverfahren für Zement  
Teil 1: Bestimmung der Festigkeit, Dezember 1994  
Teil 3: Bestimmung der Erstarrungszeiten und der Raumbeständigkeit, Mai 1995  
Teil 6: Bestimmung der Mahlfeinheit, März 1990
- DIN 1045            Beton und Stahlbeton, Juli 1988
- DIN 1048            Prüfverfahren für Beton  
Teil 1: Frischbeton, Juni 1991  
Teil 5: Festbeton, gesondert hergestellte Probekörper, Juni 1991
- DIN 1164            Zement  
Teil 6: Bestimmung der Raumbeständigkeit, Juni 1985
- DIN 4226            Zuschlag für Beton  
Teil 1: Zuschlag mit dichtem Gefüge; Begriffe, Bezeichnung und Anforderungen, April 1983  
Teil 3: Prüfung von Zuschlag mit dichtem oder porigem Gefüge, April 1983
- DIN 18 555           Prüfung von Mörteln mit mineralischen Bindemitteln  
Teil 2: Frischmörtel mit dichten Zuschlägen; Bestimmung der Konsistenz, der Rohdichte und des Luftgehaltes, September 1982  
Teil 7: Frischmörtel; Bestimmung des Wasserrückhaltevermögens nach der Filterplattenmethode  
Teil 8: Frischmörtel; Bestimmung der Verarbeitbarkeitszeit und der Korrigierbarkeitszeit von Dünnbettmörteln für Mauerwerk, November 1987
- DIN 18 999           Betontechnik  
Teil 6: Bestimmung der Wasserausfällung (Bluten), Mai 1998
- DIN 52 108           Prüfung anorganischer nichtmetallischer Werkstoffe: Verschleißprüfung mit der Schleifscheibe nach Böhme, August 1988

**Fortsetzung****Verwendete Prüfvorschriften und Normen**

DIN 52 615	Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit von Bau- und Dämmstoffen, November 1987
DIN 53 230	Bewertungssystem für die Auswertung von Prüfungen, April 1983
DIN 53 384	Prüfung von Kunststoffen; Künstliches Bewittern oder Bestrahlen in Geräten, April 1984
TP BE-PCC 1990	Technische Lieferbedingungen für Betonersatzsysteme aus Zementmörtel/Beton mit Kunststoffzusatz, 1990
ZTV Beton-StB 93	Zusätzliche technische Vorschriften für Beton der Deutschen Bundesbahn, 1993

## 8 Anhang

Tabelle 8-1.	Liste der verwendeten Abkürzungen
a	Ausbreitmaß
$\beta_{BZ}$	Biegezugfestigkeit
$\beta_D$	Druckfestigkeit
$\beta_{SZ}$	Spaltzugfestigkeit
BM	Basaltmehl
BV	Betonverflüssiger
$\delta$	Chemische Verschiebung
$C_3A$	Tricalciumaluminat, $Ca_3Al_2O_6$
$C_2(A, F)$	Calciumaluminatferrit, $Ca_2(Al_2, Fe_2)O_5$
$C_2S$	Dicalciumsilikat, $Ca_2SiO_4$
$C_3S$	Tricalciumsilikat, $Ca_3SiO_5$
D-Summe	Durchgangssumme
DTA	Differentialthermoanalyse
$E_{dyn}$	dynamischer Elastizitätsmodul
$E_{stat}$	statischer Elastizitätsmodul
$\epsilon_q$	Quellen
$\epsilon_{s1}$	1. Schwinden
$\epsilon_{s2}$	2. Schwinden
$E_x$	Eindringmenge nach x Stunden
FM	Fließmittel
FTW	Frost-Tauwechsel
FTSW	Frost-Tausalz widerstand
GM	Glasmehl
k-Wert	Körnungsziffer
k.A.	keine Angabe
Kd1, 2	handelsübliche Kunststoffdispersion 1, 2
k/z-Wert	Kunststoff/Zement-Wert
KSt II	Kalkstandard $100 CaO/(2.80 SiO_2 + 1.18 Al_2O_3 + 0.65 Fe_2O_3)$
KStM	Kalksteinmehl

## 8 Anhang

---

Fortsetzung von  
Tabelle 8-1.      Liste der verwendeten Abkürzungen

M.-%	Masseprozent
MS	Mikrosilica
$\mu$	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl, $\mu$ -Wert
n.b.	nicht bestimmt
NS	Nanosilica
p	Luftporengehalt
$\rho$	Rohdichte
P1, 2, 3 ...	Polymer 1, 2, 3, ...
PI	Polyisocyanat
PUR	Polyurethan
$Q^{0..4}$	Kondensationsgrad der Silikate
SFA	Steinkohlenflugasche
SM	Silikatmodul $\text{SiO}_2/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$
TG	Thermogravimetrie
TM	Tonerdemodul $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$
V	Verzögerer
v	Verdichtungsmaß
Vol.-%	Volumenprozent
WRV	Wasserrückhaltevermögen
w/z-Wert	Wasser/Zement-Wert

## 8 Anhang

Tabelle 8-2. Chemische Analysen, Mahlfineinheiten und technische Kennwerte der Bindemittel

	Oxidkonzentration								spez. Oberfl. n. BLAINE cm <sup>2</sup> /g	Phasenberechnung nach BOGUE 1955				KSt II M.-%	SM M.-%	TM M.-%	Rohdichte g/cm <sup>3</sup>
	M.-%									M.-%							
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	GV		C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>2</sub> (A,F)				
<b>Werk A</b>																	
CEM I 32.5 R	62.3	21.4	5.1	2.8	2.2	1.1	0.8	k.A.	(2800±100)	45.0	27.3	8.9	8.3	92.1	2.7	1.9	3.21
CEM I 42.5 R	62.3	20.2	5.5	2.8	3.3	1.2	0.9	k.A.	(3500±100)	50.3	20.1	9.0	9.9	95.5	2.3	1.7	3.18
CEM II/A-S 42.5 R	59.4	23.2	7.0	2.2	2.4	2.4	0.8	k.A.	(4000±100)	-	-	-	-	78.6	2.7	2.6	3.21
CEM III/A 42.5 R	54.0	25.6	7.7	3.0	2.3	3.7	0.7	k.A.	(4000±100)	-	-	-	-	65.5	2.6	3.4	3.19
<b>Werk B</b>																	
CEM I 42.5 R	61.6	17.7	6.0	3.1	4.4	0.8	0.9	2.6	(3600±100)	69.6	8.5	8.5	13.4	104.5	1.7	1.4	3.20
<b>Werk C</b>																	
CEM I 42.5 R	66.2	20.6	6.0	k.A.	2.9	0.8	0.5	1.0	(3200±100)	69.9	5.7	11.0	8.9	100.2	2.3	2.1	3.20
CEM I 52.5 R	66.7	21.0	6.4	k.A.	3.1	0.9	0.5	1.0	(5600±100)	77.1	0.2	10.0	8.7	102.7	2.4	2.0	3.13
<b>Werk D</b>																	
CEM I 42.5 R	63.1	20.0	5.7	3.9	3.2	1.7	1.6	2.1	(4000±100)	62.0	10.6	9.5	9.7	99.3	2.2	1.8	3.18
<b>Werk E</b>																	
CEM I 32.5 R	64.2	21.4	7.2	3.0	2.4	1.3	1.8	k.A.	(3100±100)	46.9	26.0	15.0	7.3	93.1	2.2	3.0	3.17
<b>Werk F</b>																	
CEM I 52.5 R	66.5	22.8	3.7	3.3	1.4	0.7	0.7	1.1	(4800±100)	61.1	19.2	7.6	4.2	92.9	4.5	2.6	3.15
<b>Werk G</b>																	
CEM I 32.5 R-NW/HS	60.6	19.5	4.4	2.5	7.1	1.7	0.7	2.3	(2800±100)	58.7	17.2	0	21.0	96.1	1.7	0.6	3.16
<b>Selbsth. PZ-Klinker *</b>	70.8	22.6	3.1	0	2.8	0.4	0.1	-	(3000±100)	69.0	16.0	1.0	14.0	103.4	3.8	1.1	3.21

\*: quantitative Bestimmung der Phasenzusammensetzung durch Punktzählung

## 8 Anhang

Tabelle 8-3. Chemische Analysen, Mahlfineinheiten und Rohdichten der Zusatzstoffe

	Oxidkonzentration M.-%									spez. Oberfl. n. BLAINE cm <sup>2</sup> /g	Rohdichte g/cm <sup>3</sup>
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaCO <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	GV		
Steinkohlenflugasche	-	52.0	27.0	-	9.0	3.0	-	4.0	-	(3600±100)	2.27
Glasmehl	9.8	71.4	2.3	-	0.5	0.9	13.9	0.9	-	(3400±100)	2.57
Kalksteinmehl	55.2	0.5	0.2	98.5	0.2	0.4	-	-	43.5	(3200±100)	2.73
Basaltmehl	10.8	44.5	12.8	-	12.1	12.8	2.5	-	-	(3200±100)	3.15
Mikrosilica	0.1-5.0	88-98	0.5-3.0	-	-	0.5-1.5	-	0.4-1.0	0.7-2.5	20 m <sup>2</sup> /g*	2.04 ... 2.47*
Nanosilica	100 M.-% amorphes SiO <sub>2</sub>									200 m <sup>2</sup> /g*	2.04 ... 2.47*

\*) : SCHIEBL 1994a



## 8 Anhang

Tabelle 8-5. Frischmörteleigenschaften der mit Polymeren (2 M.-%) unterschiedlicher chemischer Basis modifizierten Mörtel

Probe	w/z-Wert	Luftporengehalt Vol.-%	Wasserrück- haltevermögen M.-%	Rohdichte kg/dm <sup>3</sup>	"Bluten" *)
Null-Mischung	0.47	5.8	77.7	2.21	0
P1	0.40	5.5	82.5	2.23	3
P2	0.36	7.5	92.6	2.25	5
P3	0.40	14.5	87.4	2.04	0
P4	0.44	11.0	80.0	2.09	0
P5	0.42	5.6	89.3	2.25	0
P6	0.43	9.9	85.0	2.14	0
P7	0.45	5.6	83.6	2.25	0
P8	0.50	6.8	80.2	2.18	0
P9	0.51	7.1	77.6	2.17	0
P10	0.49	6.7	78.0	2.18	0
P11	0.42	6.0	79.6	2.23	0
P12	0.46	7.6	78.7	2.18	0
P13	0.36	n.b.	n.b.	n.b.	4
P14	0.36	n.b.	n.b.	n.b.	4
P15	0.36	n.b.	n.b.	n.b.	4
P16	0.36	n.b.	n.b.	n.b.	4
P17	0.36	n.b.	n.b.	n.b.	0
P18	0.40	n.b.	n.b.	n.b.	0
P19	0.37	n.b.	n.b.	n.b.	1
P20	0.36	5.1	n.b.	2.32	0
P21	0.41	6.8	n.b.	2.25	0
P22	0.34	5.8	n.b.	2.26	1
P23	0.33	5.2	94.1	2.33	1
P24	0.36	7.0	n.b.	2.16	0
P25	0.44	7.8	n.b.	2.18	0
P26	0.44	6.6	n.b.	2.21	0
P27	0.42	6.4	n.b.	2.22	0
P28	0.45	7.4	n.b.	2.18	0
P29	0.42	7.4	n.b.	2.21	0
P30	0.41	7.3	n.b.	2.21	0

\*) : 0: keine Wasserabsonderung, 1-5: zunehmende Wasserabsonderung der Mörtel nach Verdichtung (Beurteilung nach DIN 53 230)

## 8 Anhang

Fortsetzung von

Tabelle 8-5 Frischmörteleigenschaften der mit Polymeren (2 M.-%) unterschiedlicher chemischer Basis modifizierten Mörtel

Probe	w/z-Wert	Luftporengehalt Vol.-%	Wasserrück- haltevermögen M.-%	Rohdichte kg/dm <sup>3</sup>	"Bluten" *)
P31	0.41	7.1	87.6	2.21	0
P32	0.45	8.6	n.b.	2.15	0
P33	0.46	6.1	n.b.	2.20	0
P34	0.48	10.4	n.b.	2.10	0
P35	0.46	8.6	n.b.	2.15	0
P36	0.46	7.7	n.b.	2.17	0
P37	0.42	7.8	n.b.	2.19	0
P38	0.42	8.2	n.b.	2.18	0
P39	0.42	9.8	n.b.	2.15	0
P40	0.37	6.0	n.b.	2.28	0
P41	0.37	8.5	n.b.	2.20	0
P42	0.35	5.1	93.5	2.27	3
P43	0.36	5.4	n.b.	2.28	0
P44	0.35	3.7	n.b.	2.33	3
P45	0.33	2.7	n.b.	2.36	3
P46	0.35	4.1	n.b.	2.31	0
P47	0.37	4.1	n.b.	2.26	1
P48	0.33	4.4	n.b.	2.33	1
P49	0.35	4.9	n.b.	2.30	2
P50	0.39	n.b.	n.b.	n.b.	2
P51	0.41	n.b.	n.b.	n.b.	2
P52	0.37	n.b.	n.b.	n.b.	2
P53	0.46	n.b.	n.b.	n.b.	0
P54	0.36	n.b.	n.b.	n.b.	3
P55	0.37	n.b.	n.b.	n.b.	3
P56	0.36	n.b.	n.b.	n.b.	3
P57	0.37	n.b.	n.b.	n.b.	3
P58	0.43	n.b.	n.b.	n.b.	0
P59	0.43	n.b.	n.b.	n.b.	0
P60	0.41	n.b.	n.b.	n.b.	0

\*) : 0: keine Wasserabsonderung, 1-5: zunehmende Wasserabsonderung der Mörtel nach Verdichtung (Beurteilung nach DIN 53 230)

## 8 Anhang

Fortsetzung von  
Tabelle 8-5. Frischmörteleigenschaften der mit Polymeren unterschiedlicher chemischer Basis modifizierten Mörtel

Probe	w/z-Wert	Luftporengehalt Vol.-%	Wasserrück- haltevermögen M.-%	Rohdichte kg/dm <sup>3</sup>	"Bluten" *)
P61	0.41	n.b.	n.b.	n.b.	0
P62	0.42	n.b.	n.b.	n.b.	0
P63	0.41	n.b.	n.b.	n.b.	0
P64	0.37	n.b.	n.b.	n.b.	1
P65	0.36	n.b.	n.b.	n.b.	1
P66	0.40	n.b.	n.b.	n.b.	0
P67	0.41	n.b.	n.b.	n.b.	0
P68	0.40	n.b.	n.b.	n.b.	0
P69	0.40	n.b.	n.b.	n.b.	0
P70	0.36	n.b.	n.b.	n.b.	1
P71	0.36	n.b.	n.b.	n.b.	1
P72	0.35	n.b.	n.b.	n.b.	1
P73	0.35	n.b.	n.b.	n.b.	1
P74	0.39	n.b.	n.b.	n.b.	0
P75	0.38	n.b.	n.b.	n.b.	0
P76	0.35	n.b.	n.b.	n.b.	3
P77	0.34	n.b.	n.b.	n.b.	3
P78	0.33	n.b.	n.b.	n.b.	1
P79	0.34	n.b.	n.b.	n.b.	4
P80	0.33	n.b.	n.b.	n.b.	4
P81	0.34	n.b.	n.b.	n.b.	4
P82	0.34	n.b.	n.b.	n.b.	4
P83	0.33	n.b.	n.b.	n.b.	2
P84	0.32	n.b.	n.b.	n.b.	2
P85	0.32	n.b.	n.b.	n.b.	2
P86	0.32	n.b.	n.b.	n.b.	2
P87	0.32	n.b.	n.b.	n.b.	1
P88	0.37	n.b.	n.b.	n.b.	0
P89	0.45	n.b.	n.b.	n.b.	0
P90	0.34	n.b.	n.b.	n.b.	0

\*) : O: keine Wasserabsonderung, 1-5: zunehmende Wasserabsonderung der Mörtel nach Verdichtung (Beurteilung nach DIN 53 230)

## 8 Anhang

Fortsetzung von

Tabelle 8-5. Frischmörteleigenschaften der mit Polymeren (2 M.-%) unterschiedlicher chemischer Basis modifizierten Mörtel

Probe	w/z-Wert	Luftporengehalt Vol.-%	Wasserrück- haltevermögen M.-%	Rohdichte kg/dm <sup>3</sup>	"Bluten" *)
P91	0.33	n.b.	n.b.	n.b.	1
P92	0.33	n.b.	n.b.	n.b.	1
P93	0.33	n.b.	n.b.	n.b.	1
P94	0.33	n.b.	n.b.	n.b.	1
P95	0.33	n.b.	n.b.	n.b.	1
P96	0.46	n.b.	n.b.	n.b.	0
P97	0.45	n.b.	n.b.	n.b.	0
P98	0.44	n.b.	n.b.	n.b.	0
P99	0.37	n.b.	n.b.	n.b.	1
P100	0.34	n.b.	n.b.	n.b.	0
P101	0.33	n.b.	n.b.	n.b.	1
P102	0.37	n.b.	n.b.	n.b.	0
P103	0.32	n.b.	n.b.	n.b.	2
P104	0.32	n.b.	n.b.	n.b.	1
P105	0.37	n.b.	n.b.	n.b.	0
P106	0.33	n.b.	n.b.	n.b.	3
P107	0.33	n.b.	n.b.	n.b.	3
P108	0.32	n.b.	n.b.	n.b.	2
P109	0.32	n.b.	n.b.	n.b.	1
P110	0.33	4.4	n.b.	n.b.	0
P111	0.35	n.b.	n.b.	n.b.	0
P112	0.37	n.b.	n.b.	n.b.	0
P113	0.39	n.b.	n.b.	n.b.	0
P114	0.38	n.b.	n.b.	n.b.	0
P115	0.40	n.b.	n.b.	n.b.	0
P116	0.39	n.b.	n.b.	n.b.	0
P117	0.39	n.b.	n.b.	n.b.	0
P118	0.41	n.b.	n.b.	n.b.	0
P119	0.40	n.b.	n.b.	n.b.	0
P120	0.32	4.5	n.b.	2.20	0
P121	0.33	4.1	n.b.	2.21	0
P122	0.35	5.0	n.b.	2.18	0
P123	0.36	7.1	n.b.	2.12	0
P124	0.33	4.3	93.1	2.38	0

\*) : O: keine Wasserabsonderung, 1-5: zunehmende Wasserabsonderung der Mörtel nach Verdichtung (Beurteilung nach DIN 53 230)

## 8 Anhang

Tabelle 8-6. Festmörteleigenschaften der mit Polymeren (2 M.-%) unterschiedlicher chemischer Basis modifizierten Mörtel

Probe	w/z- Wert	$\beta_{BZ}$ N/mm <sup>2</sup>		$\beta_D$ N/mm <sup>2</sup>		$E_{dyn}$ N/mm <sup>2</sup>		entschalbar nach *)
		7d	28d	7d	28d	7d	28d	
Null- Mischung	0.47	7.54	9.44	47.5	65.8	38700	37700	1
P1	0.40	7.58	9.26	46.7	68.2	37650	38500	3w
P2	0.36	7.63	9.80	58.3	80.4	46050	47200	2
P3	0.40	6.19	9.56	36.2	51.8	33000	32950	2w
P4	0.44	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
P5	0.42	7.84	10.79	48.9	72.9	40400	41550	3w
P6	0.43	7.49	10.29	45.4	60.5	37400	36400	3w
P7	0.45	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
P8	0.50	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
P9	0.51	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
P10	0.49	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
P11	0.42	8.57	9.30	59.0	73.8	41750	40800	3
P12	0.46	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
P13	0.36	6.48	8.26	60.9	80.9	48050	49350	1w
P14	0.36	7.40	7.95	63.2	78.7	48450	47950	1w
P15	0.36	6.60	7.27	63.0	82.6	48550	47400	1w
P16	0.36	6.73	7.49	63.0	82.6	47900	47250	1w
P17	0.36	10.91	11.84	74.6	89.9	48350	48500	1
P18	0.40	9.63	9.83	60.6	79.0	43150	45000	4
P19	0.37	10.10	12.81	76.2	91.3	45200	49100	1
P20	0.36	10.43	10.82	68.3	89.5	49050	47100	1w
P21	0.41	9.71	10.47	61.5	87.6	43250	45200	3
P22	0.34	10.48	11.04	75.9	80.4	48350	43800	3
P23	0.33	10.64	11.59	78.4	94.5	50950	50300	1
P24	0.36	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
P25	0.44	7.63	9.19	42.0	63.9	36850	38200	3w
P26	0.44	8.06	10.36	44.6	66.5	38300	39450	5
P27	0.42	8.08	10.53	46.2	70.6	38650	40800	5
P28	0.45	7.40	10.09	44.6	64.8	37200	38100	4
P29	0.42	7.66	10.41	48.8	70.8	39200	40950	5
P30	0.41	9.85	10.17	60.1	83.4	43000	45050	3

\*) w: noch weich

## 8 Anhang

Fortsetzung von

Tabelle 8-6. Festmörteleigenschaften der mit Polymeren (2 M.-%) unterschiedlicher chemischer Basis modifizierten Mörtel

Probe	w/z- Wert	$\beta_{BZ}$ N/mm <sup>2</sup>		$\beta_D$ N/mm <sup>2</sup>		$E_{dyn}$ N/mm <sup>2</sup>		entschalbar nach *)
		7d	28d	7d	28d	7d	28d	
P31	0.41	9.68	10.39	60.8	85.3	43100	45150	3
P32	0.45	7.23	8.13	41.9	59.3	39300	37600	2w
P33	0.46	7.30	8.35	46.7	62.3	29100	38850	1
P34	0.48	6.12	7.55	34.0	54.2	29100	34200	2
P35	0.46	6.80	6.78	37.4	45.7	35300	35150	3
P36	0.46	6.89	7.07	41.4	62.1	36950	38250	2
P37	0.42	7.48	9.46	50.8	67.6	39500	40000	3
P38	0.42	7.84	9.06	49.7	68.0	39950	40650	3
P39	0.42	7.59	10.22	47.7	65.0	38500	39100	3
P40	0.37	10.53	13.18	77.7	96.4	48950	49200	1
P41	0.37	8.59	10.64	57.2	77.4	43150	43900	3
P42	0.35	10.44	13.33	80.6	101.6	50050	51850	3
P43	0.36	10.75	13.94	73.2	98.2	47500	49300	3
P44	0.35	9.80	11.83	71.8	98.5	50800	51850	3w
P45	0.33	10.46	11.75	75.5	97.9	50900	50400	3w
P46	0.35	10.46	11.65	76.6	97.2	50250	50000	4
P47	0.37	11.16	11.55	71.2	91.5	48550	49150	4
P48	0.33	11.32	14.21	88.3	107.6	53700	53000	1
P49	0.35	8.91	11.54	71.7	89.3	49100	47700	3
P50	0.39	9.39	n.b.	62.1	n.b.	46800	n.b.	3
P51	0.41	9.27	n.b.	60.0	n.b.	45050	n.b.	3
P52	0.37	10.14	n.b.	70.5	n.b.	49300	n.b.	3
P53	0.46	7.64	n.b.	41.9	n.b.	39600	n.b.	3
P54	0.36	8.09	n.b.	63.1	n.b.	49400	n.b.	4
P55	0.37	7.83	n.b.	66.3	n.b.	49350	n.b.	4
P56	0.36	8.19	n.b.	64.8	n.b.	49450	n.b.	4
P57	0.37	7.74	n.b.	61.0	n.b.	47950	n.b.	4
P58	0.43	6.96	n.b.	50.0	n.b.	42900	n.b.	2
P59	0.43	8.16	n.b.	49.3	n.b.	42400	n.b.	3
P60	0.41	8.53	n.b.	51.2	n.b.	42900	n.b.	2

\*) w: noch weich

## 8 Anhang

Fortsetzung von

Tabelle 8-6. Festmörteleigenschaften der mit Polymeren (2 M.-%) unterschiedlicher chemischer Basis modifizierten Mörtel

Probe	w/z- Wert	$\beta_{BZ}$ N/mm <sup>2</sup>		$\beta_D$ N/mm <sup>2</sup>		$E_{dyn}$ N/mm <sup>2</sup>		entschalbar nach *)
		7d	28d	7d	28d	7d	28d	
P61	0.41	7.82	n.b.	47.8	n.b.	40800	n.b.	1
P62	0.42	8.22	n.b.	48.4	n.b.	42300	n.b.	1
P63	0.41	7.94	n.b.	52.5	n.b.	43550	n.b.	1
P64	0.37	8.56	n.b.	63.0	n.b.	47450	n.b.	3
P65	0.36	9.00	10.45	63.5	87.3	46450	49250	3
P66	0.40	8.11	n.b.	52.8	n.b.	44100	n.b.	1
P67	0.41	7.60	n.b.	51.7	n.b.	43100	n.b.	1
P68	0.40	8.55	n.b.	56.7	n.b.	44700	n.b.	1
P69	0.40	8.27	n.b.	53.4	n.b.	44150	n.b.	1
P70	0.36	8.57	9.18	65.9	83.0	49150	48200	3
P71	0.36	9.46	8.90	63.1	83.7	48100	48500	3
P72	0.35	9.08	9.09	71.9	85.1	50000	49500	3
P73	0.35	9.35	8.80	67.6	89.1	50200	49300	3
P74	0.39	8.61	7.32	57.7	81.3	44600	48050	3
P75	0.38	9.45	n.b.	59.0	n.b.	45600	n.b.	3
P76	0.35	9.81	9.28	75.5	96.4	51150	53000	3
P77	0.34	10.13	10.01	81.2	101.7	52300	56500	3
P78	0.33	11.41	10.02	83.1	105.2	53100	57250	3
P79	0.34	8.55	8.48	71.3	95.4	50800	52750	3
P80	0.33	9.76	8.42	76.1	95.0	50900	52550	3
P81	0.34	9.75	9.91	78.1	93.8	53400	52350	2
P82	0.34	10.23	10.28	79.0	93.2	53150	52550	2
P83	0.33	11.35	10.33	79.1	95.0	54250	52600	2
P84	0.32	10.14	9.88	79.7	100.3	53050	53600	2
P85	0.32	10.64	9.77	83.0	103.1	53400	54450	2
P86	0.32	10.81	10.55	79.7	101.6	52850	54300	1
P87	0.32	11.43	10.28	80.5	101.0	54150	52450	1
P88	0.37	8.82	10.77	68.2	87.4	48450	48750	1
P89	0.45	7.53	8.47	51.9	65.3	41950	42300	1
P90	0.34	10.18	10.70	77.4	98.6	52450	51150	1

\*) w: noch weich

## 8 Anhang

Fortsetzung von

Tabelle 8-6. Festmörteleigenschaften der mit Polymeren (2 M.-%) unterschiedlicher chemischer Basis modifizierten Mörtel

Probe	w/z- Wert	$\beta_{BZ}$ N/mm <sup>2</sup>		$\beta_D$ N/mm <sup>2</sup>		$E_{dyn}$ N/mm <sup>2</sup>		entschalbar nach d
		7d	28d	7d	28d	7d	28d	
P91	0.33	10.80	11.95	79.0	97.0	53700	53050	1
P92	0.33	10.88	11.79	79.4	98.0	53850	53100	1
P93	0.33	11.11	11.88	77.0	94.5	52750	52100	1
P94	0.33	10.49	11.45	76.7	92.4	51100	51700	1
P95	0.33	10.11	11.07	75.0	94.8	50700	51450	1
P96	0.46	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	1
P97	0.45	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	1
P98	0.44	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	1
P99	0.37	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	2
P100	0.34	10.92	11.78	71.4	93.9	49200	51100	1
P101	0.33	10.36	10.77	75.9	91.7	52900	52250	2
P102	0.37	10.06	n.b.	74.8	n.b.	49200	n.b.	1
P103	0.32	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	1
P104	0.32	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	1
P105	0.37	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	1
P106	0.33	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	2
P107	0.33	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	2
P108	0.32	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	2
P109	0.32	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	1
P110	0.33	9.56	11.37	78.4	93.8	49850	46650	1
P111	0.35	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	1
P112	0.37	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	1
P113	0.39	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	1
P114	0.38	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	1
P115	0.40	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	1
P116	0.39	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	1
P117	0.39	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	1
P118	0.41	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	1
P119	0.40	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	1
P120	0.32	9.42	n.b.	77.9	n.b.	49650	n.b.	1
P121	0.33	10.15	n.b.	81.6	n.b.	50550	n.b.	1
P122	0.35	8.69	n.b.	74.2	n.b.	47500	n.b.	1
P123	0.36	7.86	n.b.	71.9	n.b.	47450	n.b.	1
P124	0.33	9.89	11.37	80.7	93.8	50400	53000	1

## 8 Anhang

---

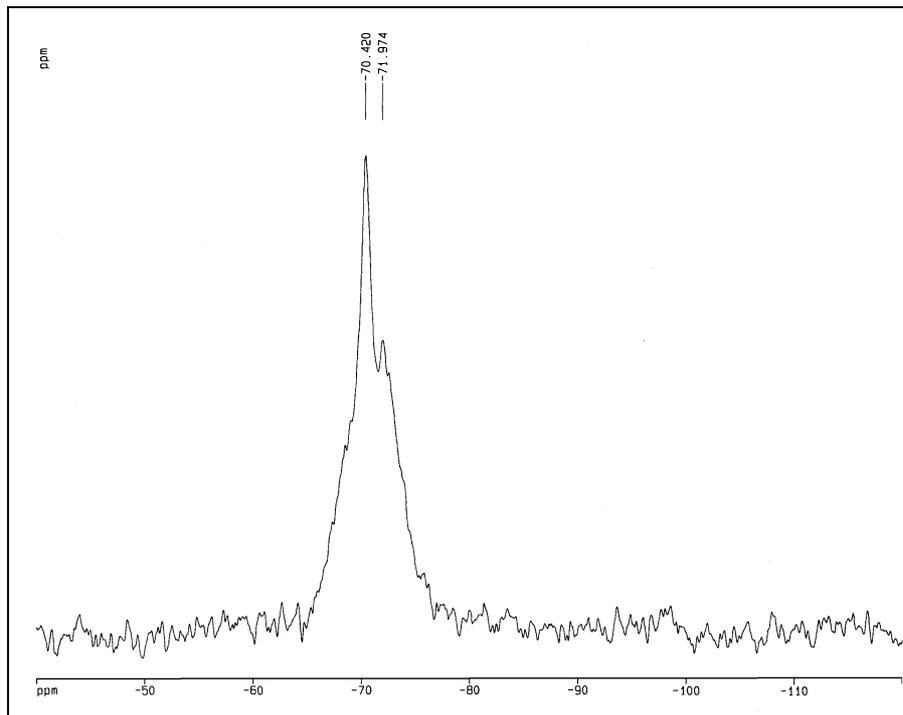


Abbildung 8-1.  $^{29}\text{Si}$ -NMR Spektrum des CEM I 42.5 R, Werk C

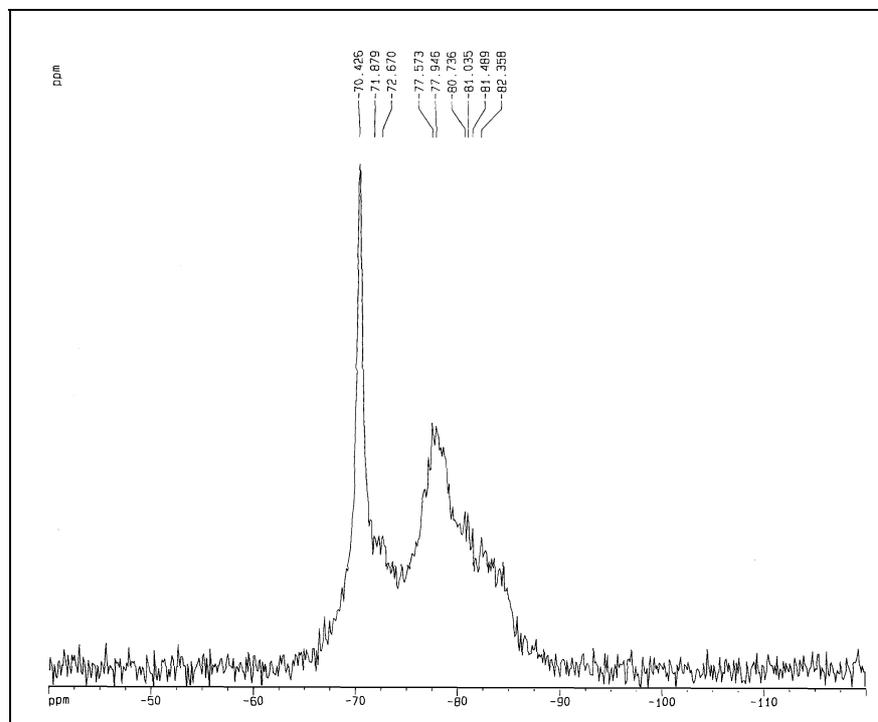


Abbildung 8-2.  $^{29}\text{Si}$ -NMR Spektrum des hydratisierten CEM I 42.5 R nach 28 Tagen  
w/z-Wert: 0.50

## 8 Anhang

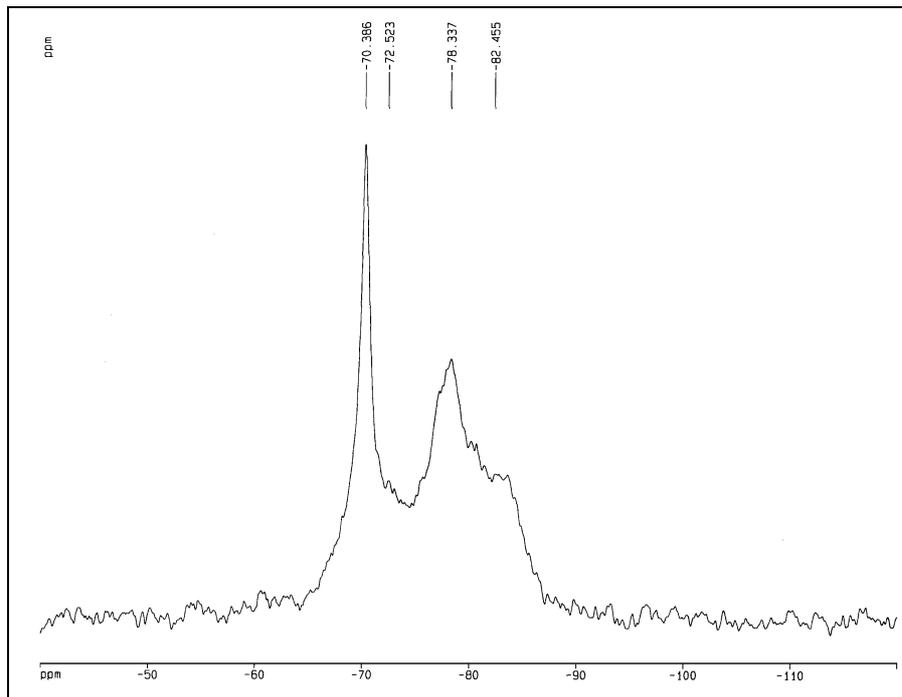


Abbildung 8-3.  $^{29}\text{Si}$ -NMR Spektrum des hydratisierten CEM I 42.5 R, Werk C mit 2 M.-% P124 nach 28 Tagen; w/z-Wert: 0.50

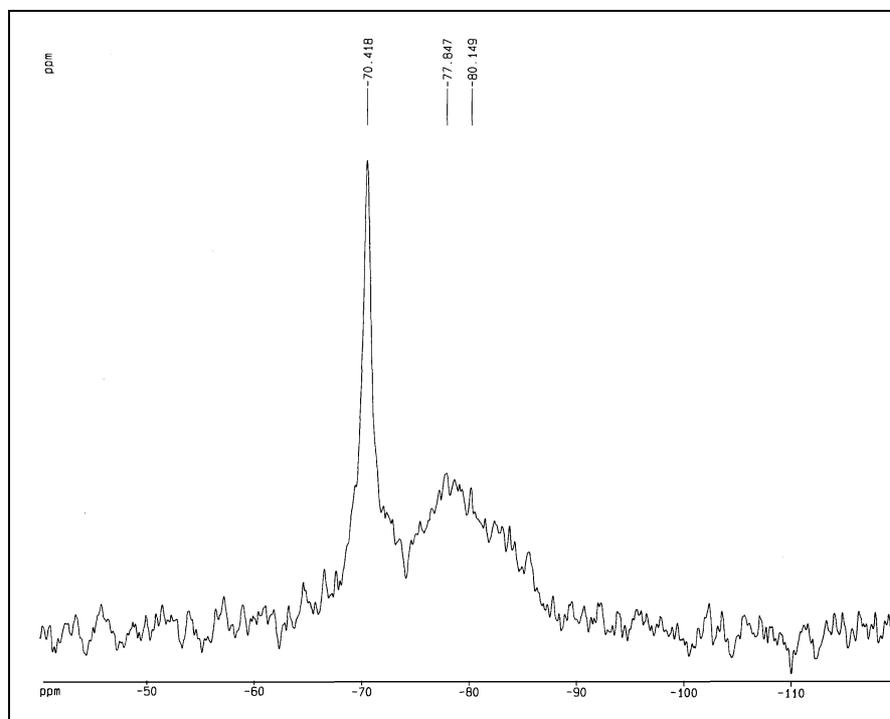


Abbildung 8-4.  $^{29}\text{Si}$ -NMR Spektrum des hydratisierten CEM I 42.5 R, Werk C mit 2 M.-% eines handelsüblichen Fließmittels nach 28 Tagen; w/z-Wert: 0.50

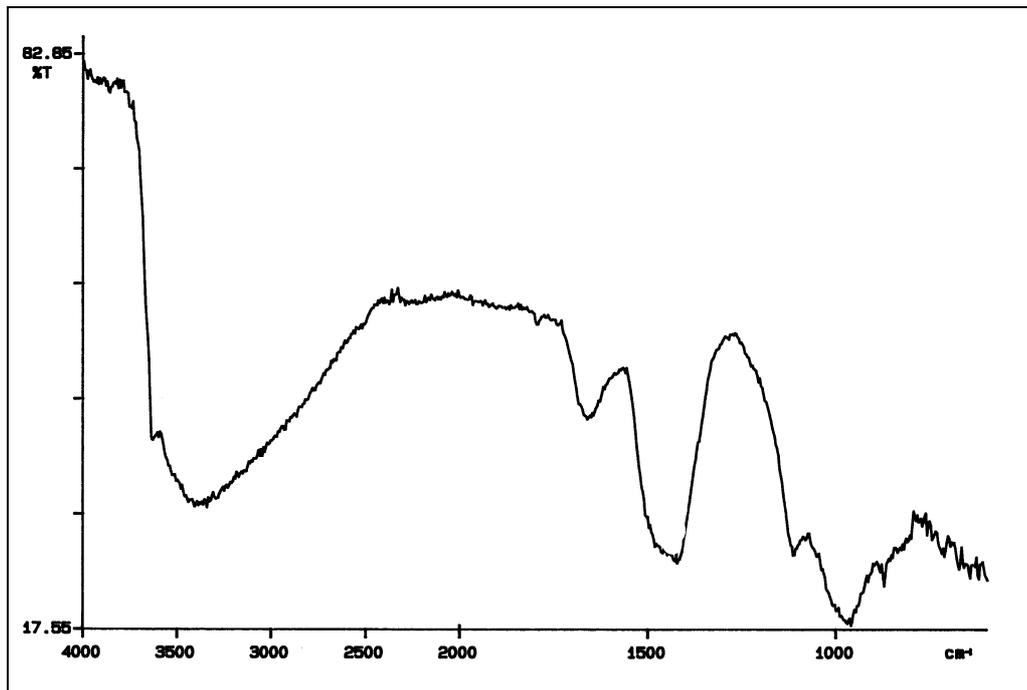


Abbildung 8-5. IR-Spektrum des hydratisierten CEM I 42.5 R, Werk C nach 28 Tagen  
w/z-Wert: 0.50

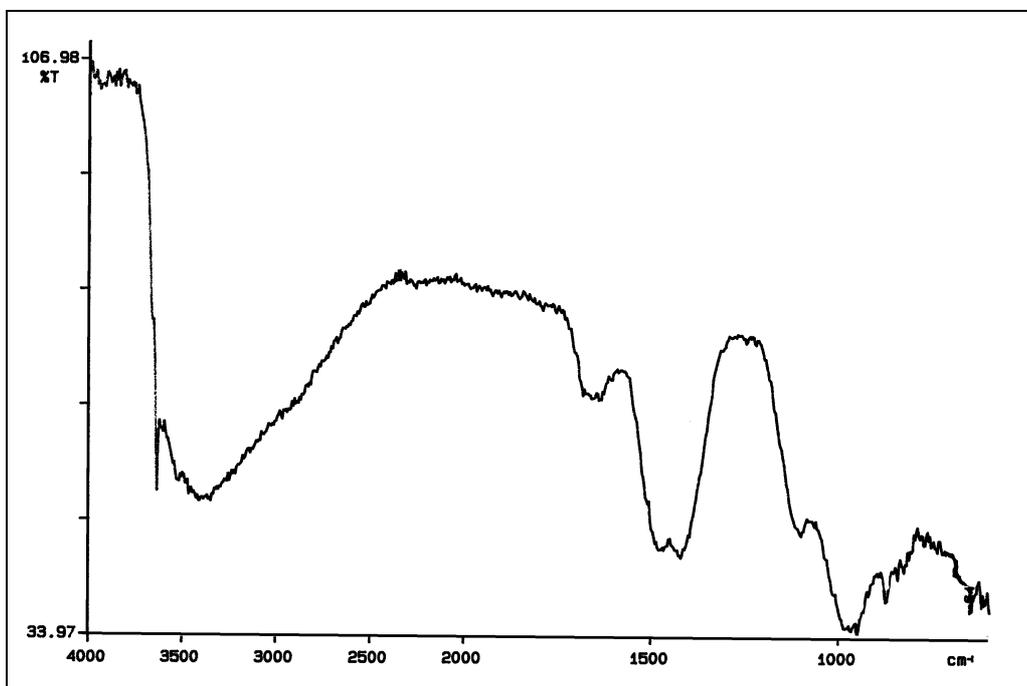


Abbildung 8-6. IR-Spektrum des hydratisierten CEM I 42.5 R, Werk C mit 2 M.-% P124  
nach 28 Tagen; w/z-Wert: 0.50

## 8 Anhang

Tabelle 8-7. Intgrale Massenverteilung\*) in 10 %-Schritten einer wäßrigen Polymerlösung (10 %ig, P108) und Spezifische Oberfläche nach Bestimmung mit der Ultrazentrifuge

Teilchendurchmesser µm	Integrale Massenverteilung %
0.0009	d <sub>0</sub>
0.0063	d <sub>10</sub>
0.0076	d <sub>20</sub>
0.0085	d <sub>30</sub>
0.0092	d <sub>40</sub>
0.0099	d <sub>50</sub>
0.0105	d <sub>60</sub>
0.0112	d <sub>70</sub>
0.0120	d <sub>80</sub>
0.0130	d <sub>90</sub>
0.0168	d <sub>100</sub>
Spezifische Oberfläche m <sup>2</sup> /g	8.10 · 10 <sup>2</sup>

\*) z. B. d<sub>10</sub>: der Durchmesser der zu 10 % der integralen Massenverteilungskurve gehört

Tabelle 8-8. Längenänderungen polymermodifizierter Mörtel (2 M.-% Polymer) zur Prüfung des Sulfatwiderstandes nach Lagerung in einer gesättigten Ca(OH)<sub>2</sub>-Lösung (Referenzserie) bzw. 4.4 %iger Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-Lösung

Probe	w/z-Wert	ε <sub>Q</sub> (Lag. in ges. Ca(OH) <sub>2</sub> -Lsg.) mm/m	ε <sub>Q</sub> (Lag. in 4.4 %iger Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> -Lsg.) mm/m
Null-Mischung	0.47	0.17	0.33
P2	0.36	0.15	0.24
P23	0.33	0.10	0.20
P42	0.41	0.13	0.25
P124	0.33	0.11	0.20

## 8 Anhang

Tabelle 8-9. Mechanische Kennwerte nach Prüfung der Verseifungsbeständigkeit von polyurethanmodifizierten Mörteln (2 M.-%) und zweier Mörtel mit handelsüblichen Kunststoffdispersionen (Kd1: 20 M.-%, Kd2: 17 M.-%)  
 Lagerung A: bis zum 7. Tag unter Wasser bei 20 °C  
 bis zum 28. Tag im Klima 23/50  
 bis zum 56. Tag in ges. Ca(OH)<sub>2</sub>-Lsg. bei (50±2) °C  
 bis zum 90. Tag im Klima 23/50  
 Lagerung B: bis zum 7. Tag unter Wasser  
 bis zum 90. Tag im Klima 23 °C/50 % r. L.

Probe	w/z-Wert	$\beta_{BZ}$ N/mm <sup>2</sup>		$\beta_D$ N/mm <sup>2</sup>		$E_{dyn}$ N/mm <sup>2</sup>	
		Lager. A	Lager. B	Lager. A	Lager. B	Lager. A	Lager. B
Null-Mischung	0.49	9.43	9.73	87.1	71.6	42700	38000
P1	0.42	10.25	11.34	66.5	77.8	45250	44250
P2	0.36	9.64	10.58	101.3	93.1	48300	47300
P17	0.42	10.49	11.33	92.6	76.9	46250	42650
P20	0.41	10.77	10.44	93.1	77.3	46250	43350
P23	0.35	10.84	11.68	115.9	93.1	51900	48800
P42	0.42	9.44	10.17	87.8	74.3	44200	41100
P124	0.33	10.77	11.60	110.9	92.6	50850	48550
Kd1	0.40	11.57	15.44	73.3	71.0	39850	37550
Kd2	0.41	11.71	13.69	73.4	63.7	40650	38550

## 8 Anhang

Tabelle 8-10. Längenänderungen nach Prüfung der Verseifungsbeständigkeit von polyurethanmodifizierten Mörteln (2 M.-%) und zweier Mörtel mit handelsüblichen Kunststoffdispersionen (Kd1: 20 M.-%, Kd2: 17 M.-%)

Lagerung A: bis zum 7. Tag unter Wasser bei 20 °C

bis zum 28. Tag im Klima 23/50

bis zum 56. Tag in ges. Ca(OH)<sub>2</sub>-Lsg. bei (50±2) °C

bis zum 90. Tag im Klima 23/50

Lagerung B: bis zum 7. Tag unter Wasser

bis zum 90. Tag im Klima 23 °C/50 % r. L.

Probe	w/z-Wert	Lagerung A			Lagerung B
		$\epsilon_{s1}$	$\epsilon_Q$	$\epsilon_{s2}$	$\epsilon_{s1}$
		mm/m			mm/m
Null-Mischung	0.49	-0.49	0.70	-0.68	-0.68
P1	0.42	-0.59	0.66	-0.65	-0.89
P2	0.36	-0.39	0.57	-0.51	-0.50
P17	0.42	-0.43	0.66	-0.61	-0.70
P20	0.41	-0.55	0.63	-0.57	-0.70
P23	0.35	-0.43	0.64	-0.57	-1.55
P42	0.42	-0.53	0.65	-0.94	-0.67
Kd1	0.40	-0.50	0.66	-0.59	-0.79
Kd2	0.41	-0.47	0.35	-0.31	-0.63

## 8 Anhang

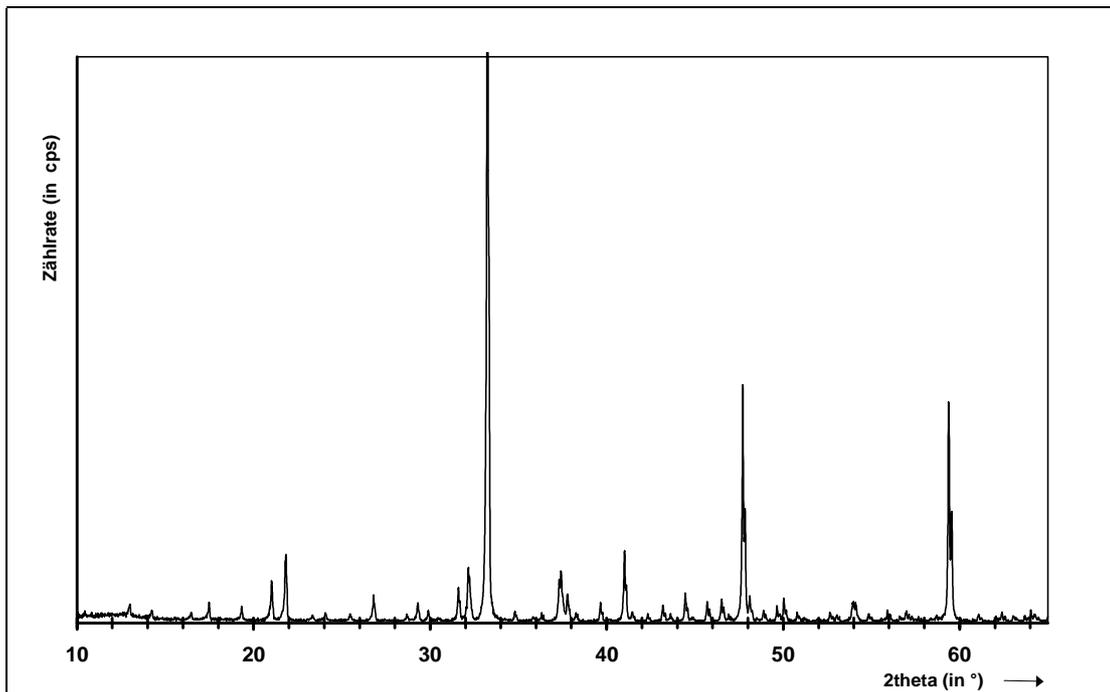


Abbildung 8-7. Röntgendiffraktogramm  $C_3A$ -Klinkerphase

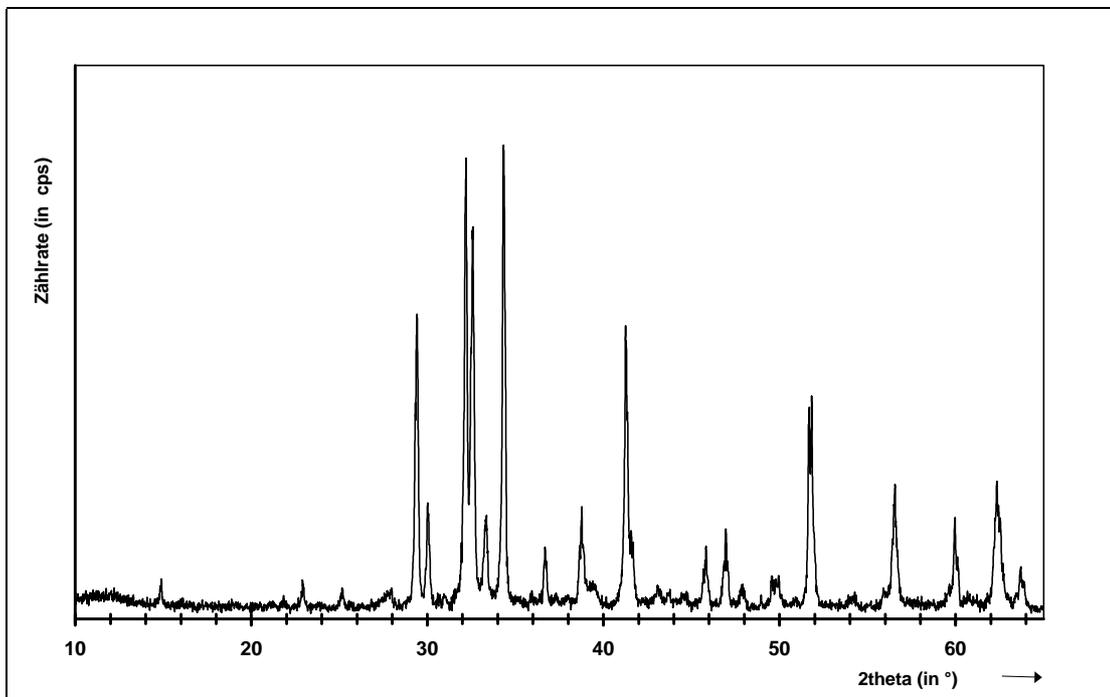


Abbildung 8-8. Röntgendiffraktogramm Alit-Klinkerphase

## 8 Anhang

---

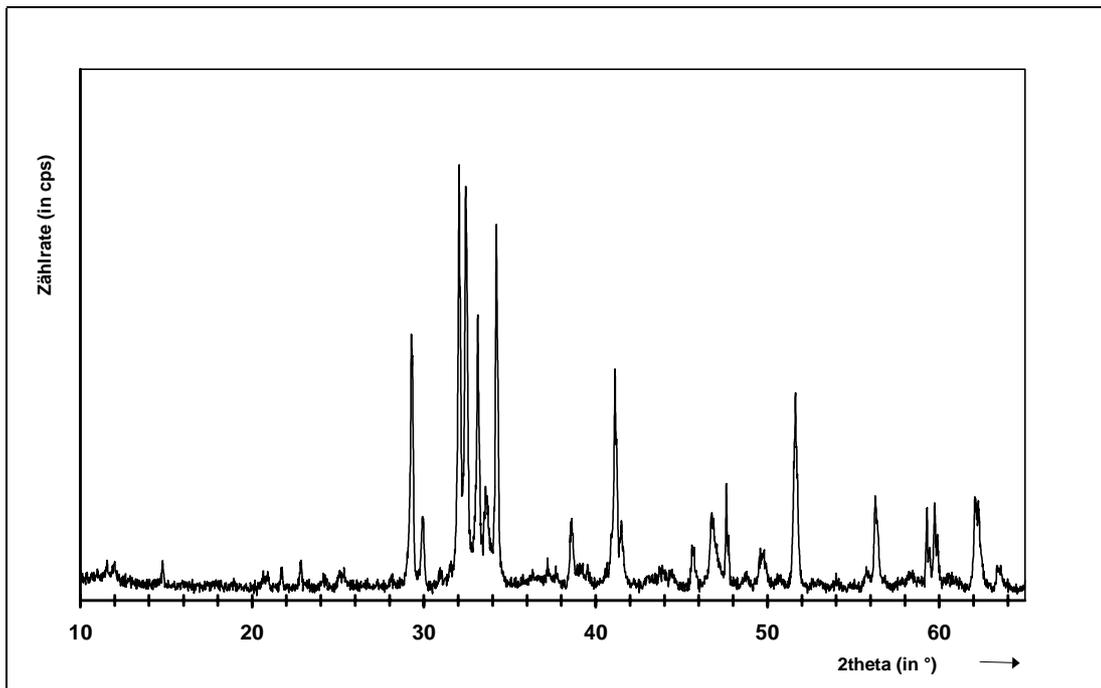


Abbildung 8-9. Röntgendiffraktogramm PZ-Klinker mit 10 % C<sub>3</sub>A

## 8 Anhang

Tabelle 8-11. Wasseranspruch, Ausschalzeiten und mechanische Kennwerte polymermodifizierter Mörtel (2 M.-%) mit verschiedenen Bindemitteln

Probe	w/z-Wert	$\beta_{BZ}$ N/mm <sup>2</sup>		$\beta_D$ N/mm <sup>2</sup>		$E_{dyn}$ N/mm <sup>2</sup>		entschalb. nach *) d
		7d	28d	7d	28d	7d	28d	
		<b>Werk A</b>						
CEM I 32.5 R								
Null-Mischung	0.51	5.35	6.05	35.8	51.0	35850	36050	1
P2	0.43	5.89	6.64	40.5	59.2	39000	41100	1
P23	0.42	6.98	8.97	52.9	69.8	39050	42750	1
P42	0.38	7.77	9.97	54.1	70.5	39700	43050	2
CEM I 42.5 R								
Null-Mischung	0.49	7.65	9.43	56.9	67.5	36900	37300	1
P2	0.39	7.14	8.43	73.6	82.6	44050	46050	1w
P23	0.40	9.79	11.41	75.9	91.9	43800	46200	1
P42	0.41	9.74	11.30	74.2	91.2	45600	46000	3
CEM II/A-S 42.5 R								
Null-Mischung	0.49	6.92	8.12	52.1	62.6	35450	35700	1
P2	0.39	9.45	10.34	76.9	87.2	43950	46300	2
P23	0.40	7.90	9.77	74.2	83.0	42000	44250	1
P42	0.40	8.45	10.12	73.8	84.5	42300	44500	3
CEM III/A 42.5 R								
Null-Mischung	0.49	6.87	7.45	48.6	66.0	37300	37050	1
P2	0.38	8.46	9.50	74.4	91.8	46000	46350	2w
P23	0.40	8.39	9.68	75.8	86.2	45850	45500	1
P42	0.39	9.00	10.10	75.4	87.5	43700	46000	3
<b>Werk B</b>								
CEM I 42.5 R								
Null-Mischung	0.47	7.54	9.44	47.5	65.8	38700	37700	1
P2	0.36	7.63	9.80	58.3	80.4	46050	47200	1w
P23	0.33	10.64	11.59	78.4	94.5	50950	50300	1
P42	0.35	10.44	13.33	80.6	101.6	50050	51850	3
<b>Werk C</b>								
CEM I 42.5 R								
Null-Mischung	0.48	5.89	7.70	48.3	67.5	38000	38250	1
P2	0.39	7.45	9.53	80.3	92.1	45250	46400	1w
P23	0.34	7.35	9.98	83.4	94.5	45300	46500	1
P42	0.37	8.68	10.85	85.3	98.3	46000	48050	2
CEM I 52.5 R								
Null-Mischung	0.52	6.99	8.87	50.9	70.4	38450	39350	1
P2	0.42	8.85	10.57	82.3	96.3	42000	43350	1
P23	0.38	7.85	9.91	88.4	109.2	46050	47300	1
P42	0.39	7.69	9.63	86.5	102.3	45800	46950	2

\*) w: noch weich

## 8 Anhang

Fortsetzung von

Tabelle 8-11. Wasseranspruch, Ausschalzeiten und mechanische Kennwerte polymermodifizierter Mörtel (2 M.-%) mit verschiedenen Bindemitteln

Probe	w/z-Wert	$\beta_{BZ}$ N/mm <sup>2</sup>		$\beta_D$ N/mm <sup>2</sup>		$E_{dyn}$ N/mm <sup>2</sup>		entschalb. nach d
		7d	28d	7d	28d	7d	28d	
		<b>Werk D</b>						
CEM I 42.5 R								
Null-Mischung	0.50	5.80	6.95	46.9	65.1	36500	38350	1
P2	0.43	7.10	8.93	47.2	68.3	39850	41150	2
P23	0.44	8.54	9.52	53.2	75.6	39500	43050	1
P42	0.44	8.79	9.74	53.0	78.1	40000	44000	3

Tabelle 8-12. Wasserbedarf und Erstarrungszeiten polymermodifizierter Zementleime (2 M.-%)

Probe	w/z-Wert	Erstarrungsbeginn h:min	Erstarrungsende h:min.
<b>Werk B</b>			
CEM I 42.5 R			
Null-Mischung	0.280	1:35	2:45
P100 2 %	0.182	2:25	3:30
P124 2 %	0.139	2:40	3:40
<b>Werk C</b>			
CEM I 42.5 R			
Null-Mischung	0.261	1:55	3:10
P124 2 %	0.122	2:50	3:50
<b>Werk E</b>			
CEM I 32.5 R			
Null-Mischung	0.284	2:25	3:25
P124 2 %	0.136	4:30	9:45
<b>Werk F</b>			
CEM I 52.5 R			
Null-Mischung	0.352	1:25	4:10
P124 2 %	0.150	4:45	5:20
<b>Werk G</b>			
CEM I 32.5 R-NW/HS			
Null-Mischung	0.246	3:40	5:20
P124 2 %	0.146	4:00	6:55
<b>Selbsth. Klinker</b>			
Kl.+0 % C <sub>3</sub> A+Sulf.	0.290	6:05	> 10 h
Kl.+0 % C <sub>3</sub> A+Sulf.+P124	0.290	7:20	> 10 h
Kl.+10 % C <sub>3</sub> A+Sulf.	0.290	3:00	4:20
Kl.+10 % C <sub>3</sub> A+Sulfat.+P124	0.290	4:50	6:10
Kl.+20 % C <sub>3</sub> A+Sulf.	0.290	3:00	4:30
Kl.+20 % C <sub>3</sub> A+Sulf.+P124	0.290	4:55	6:20

## 8 Anhang

Tabelle 8-13. Ergebnisse der Quecksilberdruckporosimetrie polymermodifizierter Mörtel (2 M.-%) mit verschiedenen Bindemitteln

Probe	Roh- dichte g/cm <sup>3</sup>	Rein- dichte g/cm <sup>3</sup>	Porosität Vol.-%	Luft- poren Vol.-%	Kapillar- poren Vol.-%	Gel- poren Vol.-%	mittl. Porenr. µm
<b>Werk A</b>							
CEM I 32.5 R							
Null-Mischung	2.08	2.49	16.8	5.3	9.0	2.5	0.046
P2	2.13	2.53	15.5	5.5	7.4	2.6	0.045
P23	2.16	2.53	14.8	4.2	8.3	2.3	0.043
P42	2.17	2.55	14.7	4.3	7.9	2.5	0.044
CEM I 42.5 R							
Null-Mischung	2.10	2.50	16.2	4.4	9.7	2.1	0.061
P2	2.17	2.52	13.7	4.5	7.1	2.1	0.047
P23	2.18	2.51	13.3	4.1	7.1	2.1	0.047
P42	2.18	2.50	13.5	4.2	7.2	2.1	0.048
CEM II/A-S 42.5 R							
Null-Mischung	2.12	2.52	16.2	4.5	9.3	2.4	0.050
P2	2.26	2.59	13.5	4.1	7.2	2.2	0.040
P23	2.17	2.49	13.7	4.2	7.3	2.2	0.040
P42	2.20	2.53	13.4	4.1	7.0	2.3	0.041
CEM III/A 42.5 R							
Null-Mischung	2.09	2.51	16.6	5.1	8.6	2.9	0.041
P2	2.15	2.48	13.4	3.9	6.9	2.6	0.033
P23	2.14	2.50	14.2	5.2	6.5	2.5	0.034
P42	2.15	2.51	14.1	4.8	6.7	2.6	0.033
<b>Werk B</b>							
CEM I 42.5 R							
Null-Mischung	2.11	2.56	17.4	2.8	9.6	5.0	0.064
P2	2.24	2.57	12.7	2.7	6.3	3.7	0.056
P23	2.20	2.51	12.6	3.8	6.5	2.3	0.042
P42	2.22	2.53	12.6	3.4	6.4	2.8	0.048

## 8 Anhang

Fortsetzung von

Tabelle 8-13. Ergebnisse der Quecksilberdruckporosimtrie polymermodifizierter Mörtel (2 M.-%) mit verschiedenen Bindemitteln

Probe	Roh- dichte g/cm <sup>3</sup>	Rein- dichte g/cm <sup>3</sup>	Porosität Vol.-%	Luft- poren Vol.-%	Kapillar- poren Vol.-%	Gel- poren Vol.-%	mittl. Poren- µm
<b>Werk C</b>							
CEM I 42.5 R							
Null-Mischung	2.09	2.47	15.1	4.0	9.1	2.1	0.058
P2	2.17	2.50	13.3	4.9	6.8	1.6	0.064
P23	2.18	2.47	11.3	3.7	6.2	1.4	0.054
P42	2.18	2.48	12.5	4.6	6.4	1.5	0.052
CEM I 52.5 R							
Null-Mischung	2.09	2.48	15.7	3.8	9.7	2.2	0.052
P2	2.17	2.47	12.4	4.1	6.8	1.5	0.059
P23	2.18	2.47	11.9	4.3	6.2	1.4	0.062
P42	2.16	2.46	12.3	4.2	6.4	1.7	0.058
<b>Werk D</b>							
CEM I 42.5 R							
Null-Mischung	2.08	2.48	16.1	4.1	10.0	2.1	0.060
P2	2.14	2.50	14.8	4.5	8.3	2.0	0.057
P23	2.13	2.48	14.2	3.8	8.3	2.1	0.045
P42	2.14	2.48	14.1	4.0	8.1	2.0	0.052

Tabelle 8-14. µ-Werte und Carbonatisierungstiefen polymermodifizierter Mörtel (2 M.-%) mit verschiedenen Bindemitteln

Probe	w/z-Wert	µ-Wert	Carbonatisierungstiefe mm		
			1 Monat	2 Monate	3 Monate
<b>Werk B</b>					
CEM I 42.5 R					
Null-Mischung	0.47	109	3.39	4.81	5.41
P2	0.36	299	3.14	4.13	5.33
P23	0.33	410	2.99	2.76	2.01
P42	0.35	244	3.68	3.99	4.07
<b>Werk C</b>					
CEM I 42.5 R					
Null-Mischung	0.48	103	2.33	2.11	2.28
P2	0.39	372	3.27	2.70	3.04
P23	0.34	474	2.63	2.01	1.54
P42	0.37	348	3.48	3.77	3.82

## 8 Anhang

Tabelle 8-15. Frischmörteleigenschaften polymermodifizierter Mörtel mit verschiedenen Zusatzstoffen

Probe	w/z-Wert	Luftporengehalt Vol.-%	Rohdichte g/cm <sup>3</sup>	Wasserrückhaltevermögen M.-%
MS 5	0.51	4.9	2.22	n.b.
P1 MS5	0.45	5.4	2.20	n.b.
P2 MS 5	0.34	7.6	2.30	n.b.
P23 MS 5	0.33	5.2	2.30	n.b.
P42 MS 5	0.43	6.8	2.21	n.b.
MS 7.5	0.54	4.2	2.22	93.9
P1 MS 7.5	0.48	4.8	2.23	n.b.
P2 MS 7.5	0.36	6.8	2.26	98.0
P23 MS 7.5	0.32	5.8	2.31	98.4
P42 MS 7.5	0.44	6.8	2.20	n.b.
MS 10	0.58	4.1	2.21	n.b.
P1 MS 10	0.49	5.0	2.22	n.b.
P2 MS 10	0.37	6.0	2.30	n.b.
P23 MS 10	0.32	4.8	2.37	n.b.
P42 MS 10	0.45	6.8	2.19	n.b.
FM NS 5	0.49	6.8	2.16	98.9
FM P1 NS 5	0.46	4.0	2.26	n.b.
FM P2 NS 5	0.42	5.6	2.28	n.b.
FM P23 NS 5	0.36	5.0	2.32	97.9
FM P42 NS 5	0.40	4.5	2.26	n.b.
BM 5	0.48	4.9	2.25	n.b.
P1 BM 5	0.42	5.0	2.25	n.b.
P23 BM 5	0.35	4.5	2.28	n.b.
BM 10	0.49	4.6	2.26	n.b.
P1 BM 10	0.43	5.0	2.25	n.b.
P23 BM 10	0.35	4.4	2.27	n.b.

## 8 Anhang

---

Fortsetzung von  
Tabelle 8-15. Frischmörteleigenschaften polymermodifizierter Mörtel mit verschiedenen Zusatzstoffen

Probe	w/z-Wert	Luftporengehalt Vol.-%	Rohdichte g/cm <sup>3</sup>	Wasserrückhaltevermögen M.-%
KStM 5	0.48	6.2	2.21	n.b.
P1 KStM 5	0.43	6.8	2.20	n.b.
P2 KStM 5	0.35	5.7	2.30	n.b.
P23 KStM 5	0.34	5.9	2.31	n.b.
P42 KStM 5	0.40	6.7	2.23	n.b.
KStM 7.5	0.49	6.7	2.22	n.b.
P1 KStM 7.5	0.44	5.8	2.24	n.b.
P2 KStM 7.5	0.36	5.5	2.32	n.b.
P23 KStM 7.5	0.35	4.3	2.32	n.b.
P42 KStM 7.5	0.40	6.9	2.24	n.b.
KStM 10	0.49	6.5	2.22	91.7
P1 KStM 10	0.43	5.9	2.25	n.b.
P2 KStM 10	0.37	6.0	2.30	n.b.
P23 KStM 10	0.35	4.4	2.31	97.4
P42 KStM 10	0.40	6.6	2.24	n.b.
Null-Mischung	0.47	5.8	2.21	77.7
P1	0.40	5.5	2.23	82.5
P2	0.36	7.5	2.25	92.6
P23	0.33	5.2	2.33	94.1
P42	0.41	5.1	2.27	93.5

## 8 Anhang

Tabelle 8-16. Festmörteleigenschaften polymermodifizierter Mörtel mit verschiedenen Zusatzstoffen

Probe	w/z- Wert	$\beta_{BZ}$ N/mm <sup>2</sup>		$\beta_D$ N/mm <sup>2</sup>		$E_{dyn}$ N/mm <sup>2</sup>		entschalb. nach d
		7d	28d	7d	28d	7d	28d	
MS 5	0.51	n.b.	8.79	n.b.	70.2	n.b.	36350	1
P1 MS5	0.45	n.b.	11.42	n.b.	74.4	n.b.	39700	4
P2 MS 5	0.34	n.b.	11.13	n.b.	109.7	n.b.	51350	2
P23 MS 5	0.33	n.b.	11.74	n.b.	114.5	n.b.	51450	1
P42 MS 5	0.43	n.b.	10.92	n.b.	79.8	n.b.	42000	2
MS 7.5	0.54	7.23	8.20	50.9	67.8	36800	36750	1
P1 MS 7.5	0.48	n.b.	9.80	n.b.	74.1	n.b.	38450	4
P2 MS 7.5	0.36	9.85	11.00	85.1	111.9	50700	50700	2
P23 MS 7.5	0.32	13.08	13.21	91.3	115.7	51300	52450	1
P42 MS 7.5	0.44	n.b.	8.60	n.b.	81.4	n.b.	41050	2
MS 10	0.58	n.b.	7.42	n.b.	62.9	n.b.	32450	1
P1 MS 10	0.49	n.b.	9.63	n.b.	76.5	n.b.	39850	4
P2 MS 10	0.37	n.b.	10.35	n.b.	110.4	n.b.	48800	2
P23 MS 10	0.32	n.b.	11.69	n.b.	114.6	n.b.	49900	1
P42 MS 10	0.45	n.b.	7.63	n.b.	81.9	n.b.	43600	2
FM NS 5	0.49	6.58	8.85	64.9	79.2	38900	36400	1
FM P1 NS 5	0.46	n.b.	11.61	n.b.	86.9	n.b.	41550	1
FM P2 NS 5	0.42	8.11	11.43	75.9	97.7	46150	42750	1
FM P23 NS 5	0.36	9.86	10.41	86.9	106.3	48750	48300	1
FM P42 NS 5	0.40	n.b.	11.77	n.b.	99.9	n.b.	44600	1
BM 5	0.48	n.b.	8.65	n.b.	76.2	n.b.	39800	1
P1 BM 5	0.42	n.b.	10.92	n.b.	75.8	n.b.	42450	4
P23 BM 5	0.35	n.b.	10.41	n.b.	98.8	n.b.	50150	1
BM 10	0.49	n.b.	9.28	n.b.	73.4	n.b.	39150	1
P1 BM 10	0.43	n.b.	10.58	n.b.	72.9	n.b.	37250	4
P23 BM 10	0.35	n.b.	12.68	n.b.	98.7	n.b.	49950	1

## 8 Anhang

Fortsetzung von

Tabelle 8-16. Festmörteleigenschaften polymermodifizierter Mörtel mit verschiedenen Zusatzstoffen

Probe	w/z- Wert	$\beta_{BZ}$ N/mm <sup>2</sup>		$\beta_D$ N/mm <sup>2</sup>		$E_{dyn}$ N/mm <sup>2</sup>		entschalb. nach d
		7d	28d	7d	28d	7d	28d	
FA 5	0.48	n.b.	8.30	n.b.	75.1	n.b.	40350	1
P1 FA 5	0.42	n.b.	11.20	n.b.	77.3	n.b.	42900	5
P2 FA 5	0.36	n.b.	10.64	n.b.	91.0	n.b.	37000	2
P23 FA 5	0.34	n.b.	11.79	n.b.	102.8	n.b.	51750	1
P42 FA 5	0.39	n.b.	11.09	n.b.	79.0	n.b.	41600	1
FA 7.5	0.48	8.09	8.89	56.9	73.6	41100	39800	1
P1 FA 7.5	0.43	n.b.	10.63	n.b.	73.7	n.b.	42250	5
P2 FA 7.5	0.36	9.31	10.48	71.5	89.9	49450	43550	2
P23 FA 7.5	0.35	9.42	12.35	75.3	106.9	49600	51650	1
P42 FA 7.5	0.40	n.b.	10.16	n.b.	75.9	n.b.	41550	1
FA 10	0.49	n.b.	8.96	n.b.	72.1	n.b.	39000	1
P1 FA 10	0.40	n.b.	10.05	n.b.	72.1	n.b.	41250	5
P2 FA 10	0.36	n.b.	10.03	n.b.	92.1	n.b.	42200	2
P23 FA 10	0.35	n.b.	12.27	n.b.	105.3	n.b.	49950	1
P42 FA 10	0.40	n.b.	10.16	n.b.	76.5	n.b.	42050	1
GM 5	0.48	n.b.	8.96	n.b.	70.3	n.b.	38700	1
P1 GM 5	0.43	n.b.	10.41	n.b.	73.9	n.b.	41300	6
P2 GM 5	0.36	n.b.	9.56	n.b.	92.5	n.b.	49300	2
P23 GM 5	0.35	n.b.	9.53	n.b.	101.2	n.b.	50600	1
P42 GM 5	0.39	n.b.	10.25	n.b.	76.1	n.b.	43450	1
GM 7.5	0.49	n.b.	9.36	n.b.	72.4	n.b.	38650	1
P1 GM 7.5	0.43	n.b.	9.56	n.b.	74.9	n.b.	40000	6
P2 GM 7.5	0.40	n.b.	10.16	n.b.	91.8	n.b.	49200	2
P23 GM 7.5	0.36	n.b.	11.42	n.b.	98.3	n.b.	49550	1
P42 GM 7.5	0.36	n.b.	10.97	n.b.	80.4	n.b.	44050	1
GM 10	0.40	n.b.	8.86	n.b.	71.4	n.b.	38100	1
P1 GM 10	0.43	n.b.	11.10	n.b.	74.4	n.b.	37350	6
P2 GM 10	0.36	n.b.	9.76	n.b.	89.9	n.b.	47300	2
P23 GM 10	0.35	n.b.	9.78	n.b.	96.6	n.b.	49050	1
P42 GM 10	0.40	n.b.	10.60	n.b.	77.1	n.b.	42550	1

## 8 Anhang

Fortsetzung von  
Tabelle 8-16. Festmörteleigenschaften polymermodifizierter Mörtel mit verschiedenen Zusatzstoffen

Probe	w/z- Wert	$\beta_{BZ}$ N/mm <sup>2</sup>		$\beta_D$ N/mm <sup>2</sup>		$E_{dyn}$ N/mm <sup>2</sup>		entschalb. nach d
		7d	28d	7d	28d	7d	28d	
KStM 5	0.48	n.b.	9.20	n.b.	71.9	n.b.	38000	1
P1 KStM 5	0.43	n.b.	10.83	n.b.	74.6	n.b.	42400	2
P2 KStM 5	0.35	n.b.	9.87	n.b.	88.9	n.b.	47400	2
P23 KStM 5	0.34	n.b.	9.72	n.b.	97.6	n.b.	51500	1
P42 KStM 5	0.40	n.b.	10.63	n.b.	78.4	n.b.	43550	2
KStM 7.5	0.49	n.b.	8.98	n.b.	72.3	n.b.	40000	1
P1 KStM 7.5	0.44	n.b.	11.55	n.b.	76.2	n.b.	43400	2
P2 KStM 7.5	0.36	n.b.	11.11	n.b.	93.2	n.b.	49150	2
P23 KStM 7.5	0.35	n.b.	10.99	n.b.	95.4	n.b.	51200	1
P42 KStM 7.5	0.40	n.b.	10.79	n.b.	76.0	n.b.	43550	2
KStM 10	0.49	8.07	9.52	57.8	69.4	41100	40200	1
P1 KStM 10	0.43	n.b.	10.42	n.b.	74.4	n.b.	37650	2
P2 KStM 10	0.37	n.b.	10.43	n.b.	92.8	n.b.	50300	2
P23 KStM 10	0.35	10.53	10.59	81.9	98.9	50450	50200	1
P42 KStM 10	0.40	n.b.	9.84	n.b.	78.0	n.b.	43050	2
Null-M.	0.47	7.54	9.44	47.5	65.8	38700	37700	1
P1	0.40	7.58	9.26	46.7	68.2	37650	38500	3
P2	0.36	7.63	9.80	58.3	80.4	46050	47200	2
P23	0.33	10.64	11.59	78.4	94.5	50950	50300	1
P42	0.41	10.44	13.33	80.6	101.6	50050	51850	3

## 8 Anhang

Tabelle 8-17. Ergebnisse der Quecksilberdruckporosimetrie polymermodifizierter Mörtel (2 M.-%) mit verschiedenen Zusatzstoffen

Probe	Rohdichte g/cm <sup>3</sup>	Reindichte g/cm <sup>3</sup>	Porosität Vol.-%	Luftporen Vol.-%	Kapillarporen Vol.-%	Gelporen Vol.-%	mittl. Porenr. µm
MS 7.5	2.06	2.49	17.2	3.6	7.7	5.9	0.061
P2 MS 7.5	2.23	2.52	11.7	3.4	2.9	5.4	0.049
P23 MS 7.5	2.24	2.52	11.3	3.7	2.5	5.1	0.041
MS 10	2.04	2.43	15.9	2.7	8.8	4.4	0.075
P23 MS 10	2.29	2.52	9.1	2.6	3.3	3.2	0.047
P42 MS 110	2.16	2.45	11.9	3.1	4.2	4.6	0.051
FM NS 5	2.09	2.49	16.0	3.7	3.5	8.8	0.042
FM P2 NS 5	2.08	2.39	13.3	3.3	1.6	8.4	0.036
FM P23 NS 5	2.22	2.52	11.9	3.6	2.1	6.2	0.038
FA 7.5	2.15	2.54	15.5	3.5	7.0	5.0	0.060
P2 FA 7.5	2.24	2.57	12.9	4.1	3.6	5.2	0.045
P23 FA 7.5	2.23	2.55	12.6	3.8	3.7	5.1	0.048
KStM 10	2.11	2.53	16.4	3.6	7.4	5.4	0.065
P23 KStM 10	2.22	2.55	13.1	3.7	4.4	5.0	0.052
Null-Mischung	2.11	2.56	17.4	2.8	9.6	4.5	0.064
P1	2.13	2.55	16.7	3.2	7.2	6.3	0.044
P2	2.24	2.57	12.7	2.7	6.3	3.7	0.056
P23	2.24	2.56	12.5	3.3	6.2	3.0	0.060
P42	2.23	2.55	12.5	3.4	6.2	2.9	0.066

## 8 Anhang

---

Tabelle 8-18. Längenänderungen polymermodifizierter Mörtel (2 M.-%) mit verschiedenen Zusatzstoffen

Probe	w/z-Wert	$\epsilon_{s1}$	$\epsilon_Q$	$\epsilon_{s2}$
		mm/m		
MS 7.5	0.54	-0.84	0.42	-0.51
P23 MS 7.5	0.32	-0.32	0.07	-0.12
P2 MS 7.5	0.36	-0.38	0.09	-0.17
FM NS 5	0.49	-1.10	0.57	-0.72
FM P23 NS 5	0.36	-0.56	0.26	-0.38
FM P2 NS 5	0.42	-0.69	0.19	-0.52
FA 7.5	0.48	-0.50	0.23	-0.44
P23 FA 7.5	0.44	-0.29	0.14	-0.19
P2 FA 7.5	0.40	-0.43	0.09	-0.36
KStM 10	0.49	-0.65	0.38	-0.47
P23 KStM 10	0.40	-0.33	0.14	-0.21
Null-Mischung	0.47	-0.70	0.39	-0.52
P1	0.40	-0.53	0.14	-0.40
P2	0.36	-0.11	0.28	-0.05
P23	0.33	-0.23	0.19	-0.15
P42	0.41	-0.30	0.23	-0.18

## 8 Anhang

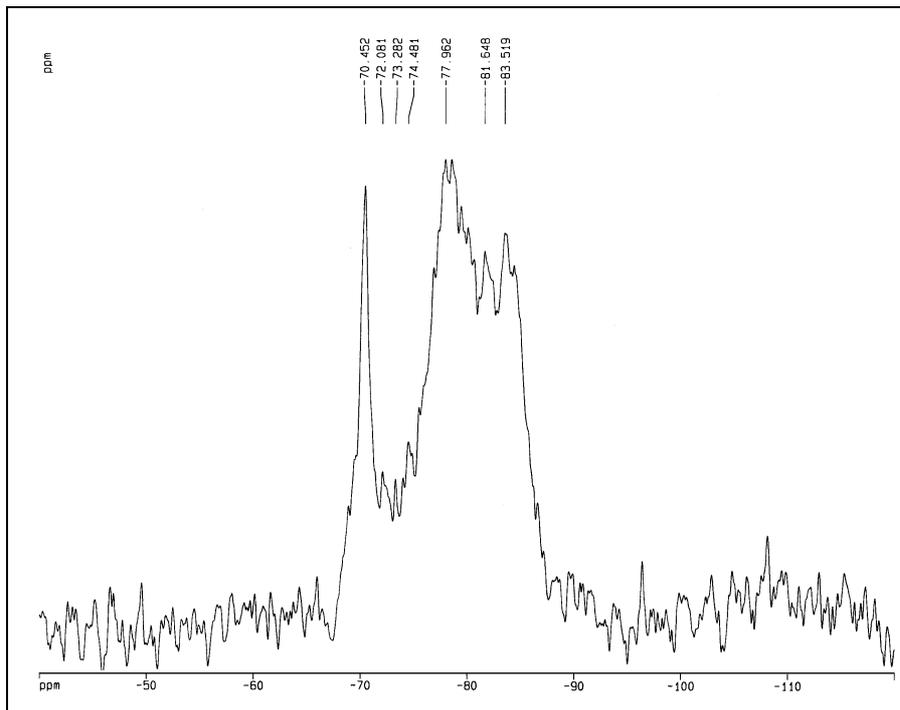


Abbildung 8-10.  $^{29}\text{Si}$ -NMR Spektrum der Null-Mischung mit 10 M.-% Mikrosilica nach 28 Tagen, w/z-Wert: 0.50

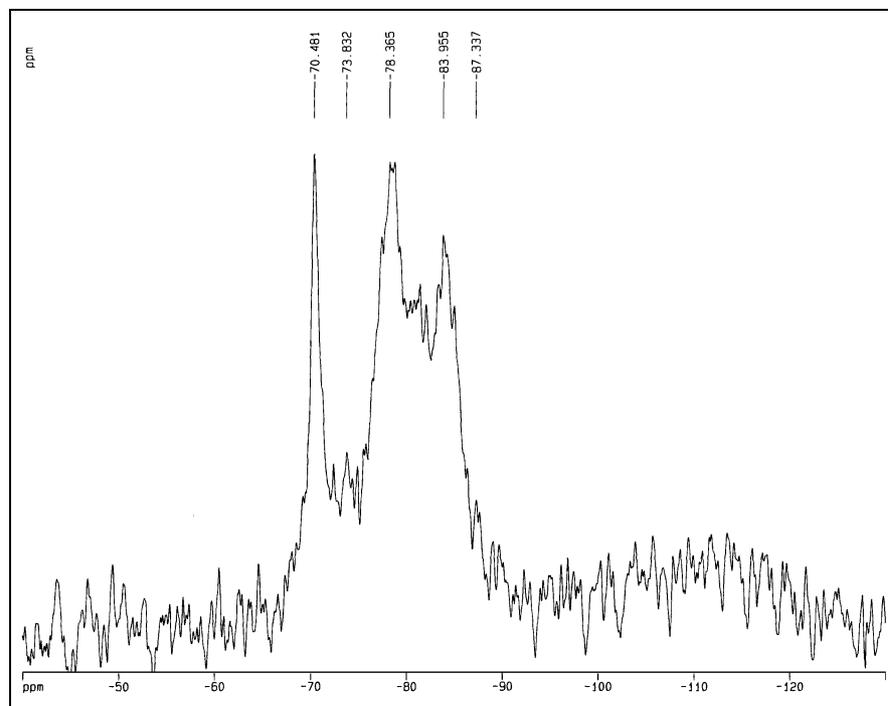


Abbildung 8-11.  $^{29}\text{Si}$ -NMR Spektrum der modifizierten Zementpaste (2 M.-% P124) mit 10 M.-% Mikrosilica nach 28 Tagen, w/z-Wert: 0.50

## 8 Anhang

Tabelle 8-19. Frost-Tausalz widerstand polymermodifizierter Mörtel (2 M.-%) mit verschiedenen Zusatzstoffen

Probe	w/z-Wert	10 FTW M.-%	20 FTW M.-%	30 FTW M.-%	40 FTW M.-%	50 FTW M.-%	Gesamt M.-%
MS 7.5	0.54	0.53	0.67	1.82	3.39	13.38	19.79
P2 MS 7.5	0.36	0.06	0.06	0.10	0.21	0.22	0.65
P23 MS 7.5	0.32	0.02	0.02	0.03	0.06	0.07	0.20
P42 MS 7.5	0.44	0.55	0.60	0.52	0.53	0.64	2.84
MS 10	0.58	1.48	1.96	2.71	7.02	21.53	34.70
P2 MS 10	0.37	0.41	0.40	0.32	0.31	0.28	1.72
P23 MS 10	0.32	0.24	0.09	0.11	0.06	0.07	0.57
P42 MS 10	0.45	0.39	0.43	0.39	0.42	0.30	1.93
FM NS 5	0.49	1.41	1.59	3.74	6.42	12.75	25.91
FM P2 NS 5	0.42	0.91	1.08	1.31	1.73	2.08	7.11
FM P23 NS 5	0.36	0.23	0.18	0.19	0.21	0.21	1.02
FA 7.5	0.48	1.36	3.80	6.03	9.57	15.92	36.68
P2 FA 7.5	0.40	1.14	1.76	1.69	1.74	1.78	8.11
P23 FA 7.5	0.44	0.30	0.60	1.00	0.99	1.35	4.24
P42 FA 7.5	0.40	0.15	0.67	1.40	1.40	1.45	5.07
KStM 10	0.49	1.63	3.31	5.30	5.46	5.76	21.46
P23 KStM 10	0.40	0.39	0.57	0.61	0.57	0.53	2.67
Null-M.	0.47	3.62	5.17	3.91	3.41	5.65	21.76
P2	0.36	1.16	1.58	2.83	3.38	5.33	14.28
P23	0.33	0.51	0.60	0.71	0.94	1.49	4.25
P42	0.35	1.11	1.45	1.93	2.03	2.98	9.50

## 8 Anhang

Tabelle 8-20.  $\mu$ -Werte und Carbonatisierungstiefen polymermodifizierter Mörtel (2 M.-%) mit verschiedenen Zusatzstoffen

Probe	w/z-Wert	$\mu$ -Wert	Carbonatisierungstiefe mm		
			1 Monat	2 Monate	3 Monate
MS 7.5	0.54	141	4.6	5.3	5.7
P2 MS 7.5	0.36	990	3.3	4.2	4.9
P23 MS 7.5	0.32	1061	2.2	3.3	4.4
P42 MS 7.5	0.44	n.b.	3.8	4.3	4.5
MS 10	0.58	n.b.	4.3	5.5	6.4
P2 MS 10	0.37	n.b.	4.1	4.4	4.5
P23 MS 10	0.32	n.b.	3.7	4.2	4.5
P42 MS 10	0.45	n.b.	3.9	4.2	4.5
FA 7.5	0.48	117	2.8	3.7	4.7
P2 FA 7.5	0.40	344	3.2	3.4	3.7
P23 FA 7.5	0.44	431	3.4	3.9	4.0
P42 FA 7.5	0.40	n.b.	3.9	4.2	4.5
Null-Mischung	0.47	109	3.4	4.8	5.4
P2	0.36	299	3.1	4.1	5.3
P23	0.33	410	3.0	2.8	2.0
P42	0.35	244	3.7	4.0	4.1

## 8 Anhang

Tabelle 8-21. Frischmörteleigenschaften polymermodifizierter Mörtel mit verschiedenen Polymerkonzentrationen

Probe	w/z-Wert	Luftporengehalt Vol.-%	Rohdichte g/cm <sup>3</sup>	Wasserrückhaltevermögen M.-%
Null-Mischung	0.47	5.8	2.21	77.7
P1 2 %	0.40	5.5	2.23	82.5
P1 4 %	0.46	6.3	2.28	81.5
P1 6 %	0.53	4.6	2.17	77.3
P1 8 %	0.65	3.9	2.15	72.6
P2 2 %	0.36	7.5	2.25	92.6
P2 4 %	0.35	5.6	2.21	88.4
P2 6 %	0.35	4.5	2.25	86.4
P2 8 %	0.35	4.2	2.26	79.8
P23 2 %	0.33	5.2	2.33	94.1
P23 4 %	0.33	5.9	2.24	89.7
P23 6 %	0.33	3.5	2.25	91.3
P23 8 %	0.32	3.4	2.27	88.4
P42 2 %	0.35	5.1	2.27	93.5
P42 4 %	0.34	5.4	2.20	88.3
P42 6 %	0.33	5.6	2.23	90.5
P42 8 %	0.30	4.9	2.19	92.3
P100 0.5 %	0.43	n.b.	n.b.	n.b.
P100 1 %	0.40	n.b.	n.b.	n.b.
P100 1.5 %	0.37	n.b.	n.b.	n.b.
P100 2 %	0.34	n.b.	n.b.	n.b.
P100 2.5 %	0.33	n.b.	n.b.	n.b.
P100 4 %	0.32	n.b.	n.b.	n.b.
P124 0.5 %	0.40	n.b.	n.b.	n.b.
P124 1 %	0.37	n.b.	n.b.	n.b.
P124 2 %	0.33	4.3	2.38	93.1
P124 4 %	0.32	n.b.	n.b.	n.b.

## 8 Anhang

Tabelle 8-22. Festmörteleigenschaften polymermodifizierter Mörtel mit verschiedenen Polymerkonzentrationen

Probe	w/z-Wert	$\beta_{BZ}$ N/mm <sup>2</sup>		$\beta_D$ N/mm <sup>2</sup>		$E_{dyn}$ N/mm <sup>2</sup>		entschalb. nach *)
		7d	28d	7d	28d	7d	28d	
Null-M.	0.47	7.54	9.44	47.5	65.8	38700	37700	1
P1 2 %	0.40	7.58	9.26	46.7	68.2	37650	38500	3w
P1 4 %	0.46	8.16	5.15	38.2	36.6	36400	30350	4
P1 6 %	0.53	8.56	7.22	40.2	54.1	35500	31050	5
P1 8 %	0.65	8.58	5.64	40.6	37.3	34200	25900	5
P2 2 %	0.36	7.63	9.80	58.3	80.4	46050	47200	2
P2 4 %	0.35	7.42	10.47	65.9	84.3	47650	46600	2
P2 6 %	0.38	6.80	9.55	52.3	71.8	43550	41600	2
P2 8 %	0.35	6.54	7.74	38.8	58.6	37700	40250	2
P23 2 %	0.33	10.64	11.59	78.4	94.5	50950	50300	1
P23 4 %	0.33	8.95	7.75	65.5	85.6	48300	47250	2
P23 6 %	0.33	8.62	7.92	64.8	80.7	45550	45900	3
P23 8 %	0.32	10.07	7.43	61.8	81.8	44600	48050	3
P42 2 %	0.35	10.44	13.33	80.6	101.6	50050	51850	3
P42 4 %	0.34	7.29	8.81	63.0	90.1	45800	50050	6
P42 6 %	0.33	n.m.	6.63	n.m.	91.8	n.m.	49800	8
P42 8 %	0.30	n.m.	6.43	n.m.	89.3	n.m.	48650	8
P100 0.5 %	0.43	8.94	9.64	61.0	80.7	46300	49300	1
P100 1 %	0.40	9.79	10.36	64.6	86.1	47850	51000	1
P100 1.5 %	0.37	9.63	10.68	66.8	88.4	48450	51350	1
P100 2 %	0.34	10.92	11.78	71.4	93.9	49200	51100	1
P100 2.5 %	0.36	10.87	10.75	70.5	92.1	51300	51000	1
P100 4 %	0.32	9.97	9.04	68.5	87.5	50450	50900	1
P124 0.5 %	0.40	n.b.	6.75	n.b.	56.9	n.b.	32000	1
P124 1 %	0.37	n.b.	8.67	n.b.	83.0	n.b.	50100	1
P124 2 %	0.33	9.89	11.37	80.7	93.8	50400	53000	1
P124 4 %	0.32	n.b.	9.74	n.b.	77.4	n.b.	43250	1

\*) w: noch weich

## 8 Anhang

Tabelle 8-23. Ergebnisse der Quecksilberporosimetrie polymermodifizierter Mörtel mit verschiedenen Polymerkonzentrationen

Probe	Roh- dichte g/cm <sup>3</sup>	Rein- dichte g/cm <sup>3</sup>	Porosität Vol.-%	Luft- poren Vol.-%	Kapillar- poren Vol.-%	Gel- poren Vol.-%	Mittlerer Porenr. µm
Null-M.	2.11	2.56	17.4	2.8	9.6	4.5	0.064
P1 2 %	2.13	2.55	16.7	3.2	7.2	6.3	0.044
P1 4 %	1.94	2.49	20.7	6.0	9.5	5.2	0.050
P1 6 %	2.06	2.49	17.5	2.8	9.5	5.2	0.059
P1 8 %	1.94	2.47	21.4	3.1	13.0	5.3	0.080
P2 2 %	2.24	2.57	12.7	2.7	6.3	3.7	0.056
P2 4 %	2.22	2.54	12.5	3.1	4.8	4.6	0.045
P2 6 %	2.19	2.52	12.8	3.2	5.2	4.4	0.050
P2 8 %	2.17	2.52	13.7	3.2	5.3	5.2	0.044
P23 2 %	2.24	2.56	12.5	3.3	6.2	3.0	0.060
P23 4 %	2.25	2.55	11.7	3.0	4.6	4.1	0.047
P23 6 %	2.22	2.54	12.5	3.4	5.2	3.9	0.075
P23 8 %	2.23	2.54	12.2	3.4	4.4	4.4	0.049
P42 2 %	2.23	2.55	12.5	3.4	6.2	2.9	0.066
P42 4 %	2.15	2.51	14.5	3.1	6.1	5.3	0.046
P42 6 %	2.26	2.56	11.6	3.0	3.9	4.7	0.039
P42 8 %	2.26	2.55	11.6	3.0	3.7	4.9	0.038

## 8 Anhang

---

Tabelle 8-24. Längenänderungen polymermodifizierter Mörtel mit verschiedenen Polymerkonzentrationen

Probe	w/z-Wert	$\epsilon_{s1}$	$\epsilon_0$	$\epsilon_{s2}$
		mm/m		
Null-Mischung	0.47	-0.70	0.39	-0.52
P1 2 %	0.40	-0.53	0.14	-0.40
P1 4 %	0.46	-0.47	0.20	-0.39
P1 6 %	0.53	-0.88	0.38	-0.70
P1 8 %	0.65	-0.91	0.41	-0.82
P2 2 %	0.36	-0.11	0.28	-0.05
P2 4 %	0.35	-0.52	0.23	-0.43
P2 6 %	0.38	-0.47	0.21	-0.33
P2 8 %	0.35	-0.66	0.26	-0.49
P23 2 %	0.33	-0.23	0.19	-0.15
P23 4 %	0.33	-0.42	0.16	-0.30
P23 6 %	0.33	-0.39	0.11	-0.28
P23 8 %	0.32	-0.52	0.18	-0.42
P42 2 %	0.35	-0.30	0.23	-0.18
P42 4 %	0.34	-0.51	0.22	-0.38
P42 6 %	0.33	-0.48	0.17	-0.37
P42 8 %	0.30	-0.56	0.18	-0.43

## 8 Anhang

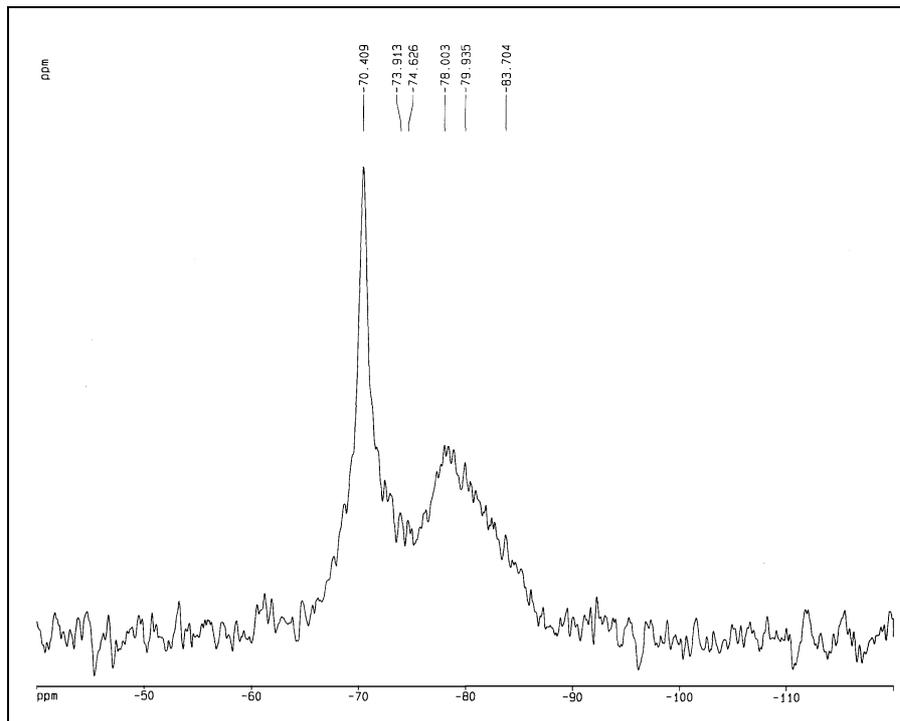


Abbildung 8-12.  $^{29}\text{Si}$ -NMR Spektrum der modifizierten Zementpaste (4 M.-% P124) nach 28 Tagen, w/z-Wert: 0.50

Tabelle 8-25. Frost-Tausalzwerstand polymermodifizierter Mörtel mit verschiedenen Polymerkonzentrationen

Probe	w/z-Wert	10 FTW M.-%	20 FTW M.-%	30 FTW M.-%	40 FTW M.-%	50 FTW M.-%	Gesamt M.-%
Null-Misch	0.47	1.60	2.61	3.91	5.36	5.77	19.25
P1 2 %	0.40	4.37	4.80	2.53	2.83	4.97	19.50
P1 4 %	0.46	3.09	8.01	12.56	10.96	11.58	46.21
P1 6 %	0.53	3.69	10.44	23.13	15.66	18.23	71.15
P1 8 %	0.65	7.97	15.36	15.79	11.45	16.31	66.88
P2 2 %	0.36	1.16	1.58	2.83	3.38	5.33	14.28
P2 4 %	0.35	1.27	2.22	1.87	3.92	2.85	12.13
P2 6 %	0.38	1.47	2.94	5.10	5.55	5.89	20.95
P2 8 %	0.35	0.93	1.89	1.90	6.67	3.65	15.04
P23 2 %	0.33	0.51	0.60	0.71	0.94	1.49	4.25
P23 4 %	0.33	0.46	0.46	0.83	0.52	0.62	2.89
P23 6 %	0.33	0.59	0.69	0.97	1.08	0.91	4.24
P23 8 %	0.32	0.40	0.55	0.66	0.80	0.86	3.27
P42 2 %	0.35	1.11	1.45	1.93	2.03	2.98	9.50
P42 4 %	0.34	1.54	3.93	3.67	2.85	4.03	16.02
P42 6 %	0.33	0.78	3.72	3.57	4.77	4.68	17.52
P42 8 %	0.30	0.70	1.45	3.14	3.86	4.14	13.29

## 8 Anhang

---

Tabelle 8-26. Kornzusammensetzung des gebrochenen Zuschlags bestehend aus Brechsand und Basaltspitt

Korngröße mm	Anteil M.-%
0 ... 0.125	2.2
0.125 ... 0.25	2.3
0.25 ... 2	35.3
2 ... 5	12.3
5 ... 8	11.1
8 ... 11	18.1
11 ... 16	18.7
k-Wert	3.57
D-Summe	543

Tabelle 8-27. Kornzusammensetzung des Rundkornzuschlags bestehend aus Quarzsand und -kies

Korngröße mm	Anteil M.-%
0 ... 2	40.0
2 ... 8	23.0
8 ... 16	37.0
k-Wert	3.48
D-Summe	552

## 8 Anhang

Tabelle 8-28. Betonzusammensetzung

Mischung	Zement kg/m <sup>3</sup>		W/Z- Wert	Konsistenz	Zusatzstoff kg/m <sup>3</sup>			Zusatzmittel kg/m <sup>3</sup>			Zuschlag kg/m <sup>3</sup>		
	CEM I 42.5 R	CEM I 52.5 R			Mikrosilica	Styrolacrylat- dispersion	Flugasche	Poly- urethan	Nano- silica	Verzögerer	Rundkorn	Rundkorn/ Gebr. Korn	Gebrochenes Korn
R 00	450		0.43	KP							1749.0		
R 10		450	0.45	KP							1725.6		
R 01	550		0.43	KP							1656.4		
R 11		550	0.46	KP							1491.0		
R 00 M	450		0.45	KP	45						1641.7		
R 10 M		450	0.45	KP	45						1622.3		
R 00 F	450		0.44	KP			45				1675.2		
R 10 F		450	0.45	KP			45				1655.2		
R 00 P2	450		0.33	KP				9			1855.4		
R 00 P23	450		0.33	KP				9			1855.4		
R 00 P23	450		0.43	KF				9			1737.9		
R 00 P42	450		0.32	KP				9			1867.1		
R 00 P45	450		0.30	KP				9			1890.6		
R 00 P124	450		0.31	KP				9			1878.9		
R 01 P23	550		0.34	KP				9			1673.3		
R 10 P23		450	0.33	KP				9			1847.2		
R 10 P124		450	0.32	KP				9			1858.9		
R 11 P23		550	0.33	KP				9			1677.7		
R 11 P124		550	0.33	KP				9			1677.7		
R 00 M P23	450		0.20	KP	45			9			1924.2		
R 00 F P23	450		0.22	KP			45	9			1933.5		
R 01 M P23	550		0.23	KP	45			9			1747.3		
RG 00	450		0.40	KP								1912.2	
RG 11		550	0.44	KP								1638.9	
RG 00 M	450		0.43	KP	45							1783.7	
RG 00 F	450		0.42	KP			45					1831.8	
RG 00 S	450		0.30	KP		45						1917.0	
RG 00 P23	450		0.30	KP				9				2038.9	
RG 00 P42	450		0.31	KP				9				2026.2	
RG 00 P45	450		0.29	KR				9				2051.9	
RG 00 P124	450		0.29	KP				9				2051.9	
RG 00 M P23	450		0.21	KP	45			9				2062.3	
RG 00 F P23	450		0.20	KP			45	9				2110.4	
RG 11 M P23		550	0.29	KF	45			9				1780.6	
RG 00 S P23	450		0.21	KP		36		9				2055.5	

## 8 Anhang

Fortsetzung von  
Tabelle 8-28. Betonzusammensetzung

Mischung	Zement kg/m <sup>3</sup>		w/z- Wert	Konsistenz	Zusatzstoff kg/m <sup>3</sup>			Zusatzmittel kg/m <sup>3</sup>			Zuschlag kg/m <sup>3</sup>		
	CEM I 42.5 R	CEM I 52.5 R			Mikrosilica	Styrolacrylat- dispersion	Flugasche	Poly- urethan	Nano- silica	Verzögerer	Rundkorn	Rundkorn/ Gebr. Korn	Gebrochenes Korn
G 00	450		0.50	KP									1871.4
G 10		450	0.52	KP									1835.4
G 11		550	0.52	KP									1587.9
G 00 M	450		0.47	KP	45								1816.4
G 10 M		450	0.45	KP	45								1833.7
G 00 M	450		0.56	KF	45								1696.9
G 00 F	450		0.44	KP			45						1893.3
G 00 M N	450		0.49	KP	36				9				1789.9
G 00 P2	450		0.35	KP				9					2070.5
G 00 P23	450		0.35	KP				9					2070.5
G 10 P23		450	0.34	KP				9					2048.0
G 00 P42	450		0.39	KP				9					2017.4
G 00 P45	450		0.28	KP				9					2163.5
G 00 P124	450		0.30	KP				9					2136.9
G 00 V	450		0.50	KP						4.5			1816.4
G 00 P42 V	450		0.34	KP						4.5			2083.8
G 00 M V	450		0.45	KP	45					4.5			1843.0
G 00 M P2	450		0.33	KP	45			9					2002.3
G 00 M P23	450		0.27	KR	45			9					2081.9
G 10 M P23		450	0.24	KP	45			9					2046.1
G 11 M P23		550	0.29	KR	45			9					1866.3
G 00 M P42	450		0.44	KF	45			9					1856.2
G 00 M P124	450		0.29	KF	45			9					2055.4
G 00 F P42	450		0.34	KP			45	9					2026.1
G 00 M P42 V	450		0.29	KP	45			9		4.5			2055.4
G 00 M N P23	450		0.27	KP	36			9	9				2100.9

Erläuterung der Abkürzungen:

**R:** Rundkorn 0/16

**0:** CEM I 42.5 R **0:** 450 kg/m<sup>3</sup> Zement

**M:** Mikrosilica

**z. B. P2** Polyurethan 2

**RG:** Rundkorn 0/2, Gebrochenes Korn 2/16

**1:** CEM I 52.5 R **1:** 550 kg/m<sup>3</sup> Zement

**S:** Styrolacrylatdispersion

**V:** Verzögerer

**G:** Gebrochenes Korn 0/16

**F:** Flugasche

**N:** Nanosilica

## 8 Anhang

Tabelle 8-29. Frischbetoneigenschaften

Mischung	w/z-Wert	Verdichtungsmaß	Ausbreitmaß mm			Luftporengehalt Vol.-%	Frischbetonrohddichte kg/m <sup>3</sup>
			nach der Herstellung	nach 30 Minuten	nach 60 Minuten		
R 00	0.43	1.14	365	310	nicht bestimmbar	3.60	2.35
R 10	0.45	1.15	n.b.	n.b.	n.b.	3.30	2.40
R 01	0.43	1.16	n.b.	n.b.	n.b.	3.40	2.42
R 11	0.46	1.17	n.b.	n.b.	n.b.	3.75	2.31
R 00 M	0.45	1.16	350	315	nicht bestimmbar	3.60	2.38
R 10 M	0.45	1.17	n.b.	n.b.	n.b.	3.70	2.34
R 00 F	0.44	1.15	n.b.	n.b.	n.b.	3.50	2.40
R 10 F	0.45	1.16	n.b.	n.b.	n.b.	3.55	2.35
R 00 P2	0.33	1.10	n.b.	n.b.	n.b.	2.50	2.50
R 00 P23	0.33	1.08	370	345	330	2.35	2.53
R 00 P23	0.43	1.04	n.b.	n.b.	n.b.	1.90	2.60
R 00 P42	0.32	1.08	n.b.	n.b.	n.b.	2.80	2.41
R 00 P45	0.30	1.07	n.b.	n.b.	n.b.	2.30	2.54
R 00 P124	0.31	1.06	430	425	420	2.00	2.62
R 01 P23	0.34	1.09	n.b.	n.b.	n.b.	2.10	2.60
R 10 P23	0.33	1.10	n.b.	n.b.	n.b.	2.00	2.62
R 10 P124	0.32	1.09	n.b.	n.b.	n.b.	1.95	2.61
R 11 P23	0.33	1.11	n.b.	n.b.	n.b.	2.00	2.58
R 11 P124	0.33	1.10	n.b.	n.b.	n.b.	1.85	2.64
R 00 M P23	0.20	1.12	370	345	340	2.10	2.52
R 00 F P23	0.22	1.11	n.b.	n.b.	n.b.	2.15	2.50
R 01 M P23	0.23	1.13	n.b.	n.b.	n.b.	2.30	2.51
RG 00	0.40	1.15	350	305	nicht bestimmbar	2.40	2.53
RG 11	0.44	1.14	n.b.	n.b.	n.b.	2.45	2.50
RG 00 M	0.43	1.12	n.b.	n.b.	n.b.	2.50	2.45
RG 00 F	0.42	1.14	n.b.	n.b.	n.b.	2.55	2.41
RG 00 S	0.30	1.14	n.b.	n.b.	n.b.	3.20	2.53
RG 00 P23	0.30	1.10	365	345	335	2.10	2.50
RG 00 P42	0.31	1.11	n.b.	n.b.	n.b.	2.00	2.58
RG 00 P45	0.29	1.06	n.b.	n.b.	n.b.	1.70	2.63
RG 00 P124	0.29	1.09	n.b.	n.b.	n.b.	1.90	2.57
RG 00 M P23	0.21	1.12	n.b.	n.b.	n.b.	2.40	2.64
RG 00 F P23	0.20	1.11	n.b.	n.b.	n.b.	1.95	2.58
RG 11 M P23	0.29	n.b.	550	535	480	1.10	2.54
RG 00 S P23	0.21	1.10	n.b.	n.b.	n.b.	6.50	2.46

## 8 Anhang

Fortsetzung von  
Tabelle 8-29. Frischbetoneigenschaften

Mischung	w/z-Wert	Verdichtungsmaß	Ausbreitmaß mm			Luftporengehalt Vol.-%	Frischbetonrohddichte kg/m <sup>3</sup>
			nach der Herstellung	nach 30 Minuten	nach 60 Minuten		
G 00	0.50	1.11	385	305	nicht bestimmbar	1.20	2.58
G 10	0.52	1.13	n.b.	n.b.	n.b.	1.80	2.56
G 11	0.52	1.14	n.b.	n.b.	n.b.	1.70	2.58
G 00 M	0.47	1.18	370	310	nicht bestimmbar	2.40	2.54
G 10 M	0.45	1.13	n.b.	n.b.	n.b.	2.40	2.52
G 00 M	0.56	n.b.	580	475	350	1.10	2.50
G 00 F	0.44	1.12	n.b.	n.b.	n.b.	1.50	2.56
G 00 M N	0.49	1.13	n.b.	n.b.	n.b.	2.50	2.50
G 00 P2	0.35	1.17	n.b.	n.b.	n.b.	1.00	2.65
G 00 P23	0.35	1.14	365	315	310	1.10	2.66
G 10 P23	0.34	1.09	n.b.	n.b.	n.b.	1.10	2.67
G 00 P42	0.39	1.09	n.b.	n.b.	n.b.	0.35	2.65
G 00 P45	0.28	1.18	n.b.	n.b.	n.b.	1.70	2.71
G 00 P124	0.30	1.13	360	325	325	0.80	2.70
G 00 V	0.50	1.09	n.b.	n.b.	n.b.	0.65	2.58
G 00 P42 V	0.34	1.10	n.b.	n.b.	n.b.	1.00	2.60
G 00 M V	0.45	1.12	n.b.	n.b.	n.b.	3.00	2.53
G 00 M P2	0.33	1.08	n.b.	n.b.	n.b.	3.10	2.61
G 00 M P23	0.27	1.05	410	360	335	1.00	2.68
G 10 M P23	0.24	1.17	n.b.	n.b.	n.b.	1.50	2.72
G 11 M P23	0.29	1.04	n.b.	n.b.	n.b.	1.20	2.68
G 00 M P42	0.44	n.b.	530	480	455	1.10	2.57
G 00 M P124	0.29	n.b.	535	490	475	1.05	2.62
G 00 FP42	0.34	1.10	n.b.	n.b.	n.b.	1.70	2.62
G 00 M P42 V	0.29	1.15	n.b.	n.b.	n.b.	3.00	2.63
G 00 M N P23	0.27	1.12	n.b.	n.b.	n.b.	2.90	2.66

## 8 Anhang

Tabelle 8-30. Festbetoneigenschaften; Lagerung: 7 Tage unter Wasser, bis zum Prüftermin im Normklima 20/65

Mischung	Festbetonrohddichte kg/m <sup>3</sup>			Druckfestigkeit N/mm <sup>2</sup>			Biegezugfestigkeit N/mm <sup>2</sup>	Dynamischer E-Modul N/mm <sup>2</sup>			$\frac{E_{dyn28}}{\beta_{28}}$
	nach 1 Tag	nach 7 Tagen	nach 28 Tagen	nach 1 Tag	nach 7 Tagen	nach 28 Tagen	nach 28 Tagen	nach 1 Tag	nach 7 Tagen	nach 28 Tagen	
R 00	2.36	2.35	2.35	30.5	54.2	70.7	8.1	23950	36100	40500	573
R 10	2.38	2.39	2.40	34.4	56.4	72.8	8.7	26400	36900	42000	577
R 01	n.b.	2.40	2.40	n.b.	56.0	71.2	n.b.	n.b.	36650	41900	588
R 11	n.b.	2.30	2.30	n.b.	50.7	68.2	n.b.	n.b.	35450	40300	591
R 00 M	2.37	2.38	2.39	33.8	59.2	75.9	8.9	26000	37650	43700	576
R 10 M	n.b.	2.35	2.35	n.b.	60.2	76.7	9.3	n.b.	37900	43950	573
R 00 F	n.b.	2.39	2.40	n.b.	54.0	73.0	n.b.	n.b.	36350	42600	584
R 10 F	n.b.	2.35	2.36	n.b.	56.9	72.9	n.b.	n.b.	36800	42100	576
R 00 P2	n.b.	2.49	2.51	n.b.	70.5	85.3	n.b.	n.b.	41000	45650	535
R 00 P23	2.51	2.54	2.55	42.8	79.7	95.3	10.5	35900	43000	53450	561
R 00 P23 KR	n.b.	2.60	2.60	45.3	80.9	96.4	10.9	37000	44000	52100	540
R 00 P42	n.b.	2.43	2.42	n.b.	74.7	92.1	n.b.	n.b.	41800	45800	497
R 00 P45	n.b.	2.44	2.45	n.b.	75.3	90.1	n.b.	n.b.	42050	43050	478
R 00 P124	2.58	2.58	2.60	48.5	82.9	97.6	11.0	39650	45000	55050	564
R 01 P23	n.b.	2.57	2.59	n.b.	79.1	96.4	n.b.	n.b.	43450	54600	566
R 10 P23	n.b.	2.62	2.62	n.b.	84.1	96.5	11.2	n.b.	46350	55000	570
R 10 P124	n.b.	2.60	2.60	n.b.	83.8	97.6	11.4	n.b.	46300	55950	573
R 11 P23	n.b.	2.59	2.59	n.b.	84.1	96.9	n.b.	n.b.	46300	56000	578
R 11 P124	n.b.	2.63	2.63	n.b.	85.8	98.2	n.b.	n.b.	46650	55350	564
R 00 M P23	2.50	2.51	2.51	47.2	86.3	100.2	11.9	39850	46700	56750	566
R 00 F P23	n.b.	2.52	2.53	n.b.	75.8	94.7	n.b.	n.b.	42800	55050	581
R 10 M P23	n.b.	2.49	2.48	n.b.	65.9	86.4	n.b.	n.b.	44000	47050	545
RG 00	2.52	2.53	2.52	34.5	66.4	81.5	8.3	26800	48050	52650	646
RG 11	2.50	2.50	2.50	36.2	64.2	85.9	n.b.	28150	43800	46350	540
RG 00 M	2.46	2.46	2.47	35.8	68.9	85.3	9.4	28000	48400	47000	551
RG 00 F	n.b.	2.38	2.39	n.b.	64.3	78.4	n.b.	n.b.	43700	44000	561
RG 00 S	n.b.	2.52	2.52	n.b.	68.4	79.1	10.5	n.b.	46500	46450	587
RG 00 P23	2.47	2.48	2.49	43.9	95.3	106.7	10.7	36250	55050	54650	512
RG 00 P42	n.b.	2.60	2.59	n.b.	88.4	101.9	n.b.	n.b.	54250	59900	588
RG 00 P45	n.b.	2.63	2.62	n.b.	90.1	101.0	10.3	n.b.	54800	54550	540
RG 00 P124	2.54	2.56	2.56	49.1	96.9	107.5	11.4	40000	55300	55000	512
RG 00 M P23	2.62	2.63	2.63	44.8	115.6	138.2	13.5	37050	58850	61100	442
RG 00 F P23	n.b.	2.56	2.57	n.b.	93.6	102.8	n.b.	n.b.	55000	59600	580
RG 11 M P23	2.59	2.59	2.59	47.9	121.3	128.7	n.b.	39600	57050	59900	465
RG 00 S P23	n.b.	2.53	2.52	n.b.	77.3	80.2	13.4	n.b.	48050	48150	599

## 8 Anhang

Fortsetzung von  
Tabelle 8-30. Festbetoneigenschaften, Lagerung: 7 Tage unter Wasser, bis zum Prüftermin im Normklima 20/65

Mischung	Festbetonrohddichte kg/m <sup>3</sup>			Druckfestigkeit N/mm <sup>2</sup>			Biegezugfestigkeit N/mm <sup>2</sup>	Dynamischer E-Modul N/mm <sup>2</sup>			$\frac{E_{dyn.28}}{\beta_{0.28}}$
	nach 1 Tag	nach 7 Tagen	nach 28 Tagen	nach 1 Tag	nach 7 Tagen	nach 28 Tagen	nach 28 Tagen	nach 1 Tag	nach 7 Tagen	nach 28 Tagen	
G 00	2.57	2.58	2.60	32.6	52.2	73.2	8.3	25500	45300	51000	696
G 10	n.b.	2.59	2.57	n.b.	68.5	80.4	9.3	n.b.	48900	50300	626
G 11	n.b.	2.57	2.58	n.b.	70.2	84.3	n.b.	n.b.	49500	50650	601
G 00 M	2.56	2.57	2.54	40.2	63.8	92.0	9.2	35000	44450	48250	524
G 10 M	n.b.	2.54	2.52	n.b.	67.6	89.8	9.8	n.b.	45200	46300	516
G 00 M KF	n.b.	2.51	2.47	n.b.	42.5	69.0	n.b.	n.b.	39700	41400	600
G 00 F	n.b.	2.59	2.58	n.b.	62.0	84.0	n.b.	n.b.	49050	50700	604
G 00 M N	n.b.	2.67	2.67	n.b.	112.3	120.8	n.b.	n.b.	55550	57700	478
G 00 P2	n.b.	2.69	2.69	n.b.	81.1	98.1	n.b.	n.b.	53500	60600	618
G 00 P23	2.68	2.69	2.69	50.2	90.8	106.0	11.3	38250	56200	62350	588
G 10 P23	n.b.	2.71	2.69	n.b.	113.2	116.9	11.9	n.b.	56800	62300	536
G 00 P42	2.64	2.66	2.66	30.8	56.9	89.8	n.b.	25000	48100	55750	621
G 00 P45	n.b.	2.69	2.70	n.b.	64.9	91.6	11.5	n.b.	43250	48100	525
G 00 P124	2.66	2.68	2.68	52.3	115.3	124.8	11.8	38600	57000	58650	470
G 00 V	2.48	2.60	2.59	29.7	52.3	76.0	n.b.	25150	44350	46200	608
G 00 P42 V	2.60	2.64	2.64	21.9	49.9	94.1	n.b.	22000	44700	48600	516
G 00 M V	n.b.	2.55	2.53	n.b.	59.0	83.4	n.b.	n.b.	44000	47950	572
G 00 M P2	n.b.	2.66	2.64	n.b.	94.2	119.1	n.b.	n.b.	55400	59250	497
G 00 M P23	2.65	2.66	2.67	46.3	96.7	123.9	12.5	37450	54350	58250	470
G 10 M P23	n.b.	2.71	2.71	n.b.	119.8	130.1	13.4	n.b.	62650	62750	482
G 11 M P23	n.b.	2.66	2.67	n.b.	108.9	120.7	n.b.	n.b.	54300	58000	481
G 00 M P42	n.b.	2.60	2.59	n.b.	59.1	89.1	n.b.	n.b.	42800	48950	549
G 00 M P124	2.62	2.62	2.63	48.9	98.8	124.9	13.0	38000	54400	58500	468
G 00 F P42	n.b.	2.64	2.65	n.b.	81.5	107.4	n.b.	n.b.	50500	55300	515
G 00 M P42 V	2.64	2.65	2.64	33.8	91.8	122.6	n.b.	26550	58100	61000	498
G 00 M N P23	n.b.	2.52	2.52	n.b.	64.5	87.2	n.b.	n.b.	43500	44800	514

## 8 Anhang

Tabelle 8-31. Festbetoneigenschaften, Lagerung: 1 Tag in der Schalung bei 20 °C/95 % rel. F., anschließend in Folie bei Normklima 20/65

Mischung	Festbetonrohddichte kg/m <sup>3</sup>		Druckfestigkeit N/mm <sup>2</sup>		Biegezugfestigkeit N/mm <sup>2</sup>	Dynamischer E-Modul N/mm <sup>2</sup>		$\frac{E_{dyn.28}}{\beta_{D28}}$
	nach 7 Tagen	nach 28 Tagen	nach 7 Tagen	nach 28 Tagen	nach 28 Tagen	nach 7 Tagen	nach 28 Tagen	
R 00	2.33	2.34	48.5	63.7	7.6	33850	35850	563
R 00 M	2.36	2.37	50.4	64.8	7.5	34550	36200	559
R 00 P23	2.52	2.52	74.5	87.9	9.1	42450	45000	512
R 00 P124	2.55	2.56	77.3	91.1	10.0	42850	44750	491
R 00 M P23	2.48	2.50	80.2	95.8	10.3	44050	49950	521
RG 00	2.51	2.52	54.8	76.4	n.b.	37050	42450	556
RG 00 M	2.38	2.38	62.1	76.5	n.b.	43450	45150	590
RG 00 P23	2.49	2.49	85.8	98.9	n.b.	48750	57650	583
RG 00 M P23	2.63	2.65	107.4	120.2	n.b.	53250	56900	473
G 00	2.57	2.59	46.5	61.9	7.0	41300	47550	696
G 00 P23	2.69	2.69	84.6	100.0	10.9	52450	52450	525
G 00 P42	2.60	2.66	56.7	85.0	8.9	45300	55550	653
G 00 M	2.54	2.53	54.0	78.4	8.0	40150	45050	575
G 00 M P23	2.62	2.64	89.5	114.5	10.9	47450	54600	475

## 8 Anhang

---

Tabelle 8-32. Mittlere Eindringtiefen nach Prüfung der Wasserundurchlässigkeit

Mischung	w/z-Wert	Mittlere Eindringtiefe mm
R 00	0.43	24
R 00 P23	0.33	19
RG 00	0.40	22
RG 00 M	0.43	20
RG 00 P23	0.30	18
RG 00 M P23	0.21	10
G 00	0.50	23
G 00 M	0.47	13
G 00 P23	0.35	11
G 00 M P23	0.27	10

Tabelle 8-33. Längenänderungen der Betone

Probe	w/z-Wert	$\epsilon_{s1}$	$\epsilon_Q$	$\epsilon_{s2}$
		mm/m		
R 00	0.43	-0.19	0.09	-0.10
R 00 P42	0.32	-0.16	0.03	-0.03
R 00 P124	0.31	-0.14	0.02	-0.02
RG 00	0.40	-0.15	0.09	-0.10
RG 00 P23	0.30	-0.15	0.022	-0.02
RG 00 P42	0.31	-0.16	0.03	-0.02
RG 00 P45	0.29	-0.08	0.01	-0.02
RG 00 S	0.30	-0.17	0.03	-0.04
RG 00 M	0.43	-0.14	0.04	-0.03
RG 00 M P23	0.21	-0.13	0.01	-0.01
RG 00 S P23	0.21	-0.06	0.01	-0.02
G 00	0.50	-0.11	0.07	-0.10
G 10	0.52	-0.24	0.12	-0.14
G 00 P2	0.35	-0.07	0.02	-0.01
G 00 P23	0.35	-0.05	0.02	-0.01
G 10 P23	0.34	-0.08	0.02	-0.01
G 00 P42	0.39	-0.12	0.00	-0.02
G 00 P45	0.28	-0.08	0.01	-0.03
G 00 P124	0.30	-0.06	0.01	-0.02

## 8 Anhang

Fortsetzung von  
Tabelle 8-33. Längenänderungen der Betone

Probe	w/z-Wert	$\epsilon_{s1}$	$\epsilon_Q$	$\epsilon_{s2}$
		mm/m		
G 00 M	0.47	-0.13	0.07	-0.08
G 00 F	0.44	-0.15	0.08	-0.08
G 00 M N	0.49	-0.11	0.06	-0.06
G 10 M	0.45	-0.20	0.06	-0.04
G 00 M P23	0.27	-0.14	0.02	-0.01
G 10 M P23	0.24	-0.08	0.04	-0.04
G 00 M N P23	0.27	-0.12	0.00	-0.02

Tabelle 8-34. Kennwerte der Prüfflüssigkeiten (D'ANS-LAX 1992)

Flüssigkeit	Dichte $\rho$ kg/dm <sup>3</sup>	Oberflächenspannung $\sigma$ mN/m	Dyn. Viskosität $\eta$ mNs/m <sup>2</sup>	$(\sigma/\eta)^{0.5}$ m <sup>0.5</sup> /s <sup>0.5</sup>
Diesel	0.832	28.9	16.8	1.31
Toluol	0.866	28.4	0.588	6.90
Dichlormethan	1.325	28.0	0.435	7.76

Tabelle 8-35. Ergebnisse der Eindringprüfung mit Toluol

Probe	wz-Wert	Eindringtiefe mm	Eindringmenge l/m <sup>3</sup>						
			7d	1d	2d	3d	4d	5d	6d
G 00	0.50	50	0.86	1.21	1.49	1.72	1.91	2.10	2.27
G 00 M	0.47	39	0.78	1.10	1.35	1.56	1.74	1.91	2.06
G 00 P23	0.35	24	0.53	0.75	0.92	1.06	1.18	1.30	1.40
G 00 M P23	0.27	15	0.48	0.69	0.84	0.97	1.08	1.19	1.28
G 00 P45	0.28	20	0.54	0.76	0.93	1.08	1.20	1.32	1.43
RG 00	0.40	44	0.76	1.07	1.32	1.52	1.70	1.86	2.01
RG 00 M	0.43	30	0.70	0.99	1.21	1.40	1.57	1.72	1.85
RG 00 S	0.30	14	0.51	0.73	0.89	1.03	1.15	1.26	1.36
RG 00 P23	0.30	16	0.55	0.78	0.95	1.10	1.23	1.34	1.45
RG 00 M P23	0.21	13	0.42	0.59	0.72	0.83	0.93	1.02	1.10
RG 00 P45	0.29	24	0.59	0.83	1.02	1.18	1.31	1.44	1.56

## 8 Anhang

Tabelle 8-36. Ergebnisse der Eindringprüfung mit Dichlormethan

Probe	wz-Wert	Eindringtiefe mm	Eindringmenge l/m <sup>3</sup>						
			7d	1d	2d	3d	4d	5d	6d
G 00	0.50	48	0.80	1.13	1.38	1.60	1.79	1.96	2.11
G 00 M	0.47	40	0.75	1.06	1.30	1.50	1.68	1.84	1.98
G 00 P23	0.35	22	0.49	0.69	0.85	0.98	1.10	1.20	1.30
G 00 M P23	0.27	13	0.45	0.63	0.77	0.89	1.00	1.09	1.18
G 00 P45	0.28	n.b.	0.48	0.69	0.84	0.97	1.08	1.19	1.28
RG 00	0.40	46	0.73	1.03	1.26	1.45	1.62	1.78	1.92
RG 00 M	0.43	34	0.69	0.97	1.19	1.37	1.53	1.68	1.81
RG 00 S	0.30	18	0.50	0.71	0.87	1.00	1.12	1.22	1.32
RG 00 P23	0.30	15	0.52	0.74	0.91	1.05	1.17	1.28	1.39
RG 00 M P23	0.21	10	0.40	0.57	0.70	0.80	0.90	0.98	1.06
RG 00 P45	0.29	19	0.54	0.77	0.94	1.09	1.22	1.33	1.44

Tabelle 8-37. Ergebnisse der Eindringprüfung mit Diesel

Probe	wz-Wert	Eindringtiefe mm	Eindringmenge l/m <sup>3</sup>						
			7d	1d	2d	3d	4d	5d	6d
G 00	0.50	57	0.80	1.13	1.38	1.60	1.79	1.96	2.11
G 00 M	0.47	37	0.75	1.06	1.30	1.50	1.68	1.84	1.98
G 00 P23	0.35	20	0.49	0.70	0.86	0.99	1.11	1.21	1.31
G 00 M P23	0.27	18	0.52	0.73	0.90	1.04	1.16	1.27	1.37
G 00 P45	0.28	26	0.51	0.73	0.89	1.03	1.15	1.26	1.36
RG 00	0.40	17	0.69	0.98	1.20	1.38	1.54	1.69	1.83
RG 00 M	0.43	36	0.66	0.94	1.15	1.32	1.48	1.62	1.75
RG 00 S	0.30	21	0.49	0.70	0.86	0.99	1.11	1.21	1.31
RG 00 P23	0.30	19	0.54	0.76	0.93	1.08	1.20	1.32	1.43
RG 00 M P23	0.21	10	0.39	0.55	0.67	0.77	0.87	0.95	1.02
RG 00 P45	0.29	28	0.55	0.78	0.96	1.11	1.24	1.36	1.46

## 8 Anhang

Tabelle 8-38. Eindringkoeffizienten und Eindringmengen der Prüfflüssigkeiten Toluol, Dichlormethan und Diesel

Probe	w/z-Wert	Eindringkoeffizient $l/(m^2h^{0.5})$			Eindringmenge nach 7 Tagen $l/m^3$		
		Toluol	Dichlormethan	Diesel	Toluol	Dichlormethan	Diesel
G 00	0.50	0.175	0.163	0.163	2.27	2.11	2.11
G 00 M	0.47	0.159	0.153	0.153	2.06	1.98	1.98
G 00 P23	0.35	0.108	0.100	0.101	1.40	1.30	1.31
G 00 M P23	0.27	0.099	0.091	0.106	1.28	1.18	1.37
G 00 P45	0.28	0.110	0.099	0.105	1.43	1.28	1.36
RG 00	0.40	0.155	0.148	0.141	2.01	1.92	1.83
RG 00 S	0.30	0.105	0.102	0.101	1.36	1.32	1.31
RG 00 P23	0.30	0.112	0.107	0.110	1.45	1.39	1.43
RG 00 M P23	0.21	0.085	0.082	0.079	1.10	1.06	1.02
RG 00 P45	0.29	0.120	0.111	0.113	1.56	1.44	1.46

Tabelle 8-39. Schädigungstiefen nach lösendem Angriff von 10%iger Essigsäure

Probe	w/z-Wert	Schädigungstiefe mm
G 00	0.50	2.4
G 00 M	0.47	2.1
G 00 P23	0.35	1.8
G 00 P45	0.28	1.7
G 00 M P23	0.27	1.6
RG 00	0.40	2.0
R 00 M	0.43	1.9
RG 00 S	0.30	2.0
RG 00 P23	0.30	1.4
RG 00 P45	0.29	1.5
RG 00 M P23	0.21	1.3

## 8 Anhang

---

Tabelle 8-40. Dickenverlust nach der Verschleißprüfung mit der Schleifscheibe nach Böhme

Probe	w/z-Wert	Dickenverlust mm
RG 00	0.40	2.21
R 00 M	0.43	2.03
RG 00 S	0.30	1.80
RG 00 P23	0.30	1.71
RG 00 P45	0.29	1.83
RG 00 M P23	0.21	1.70

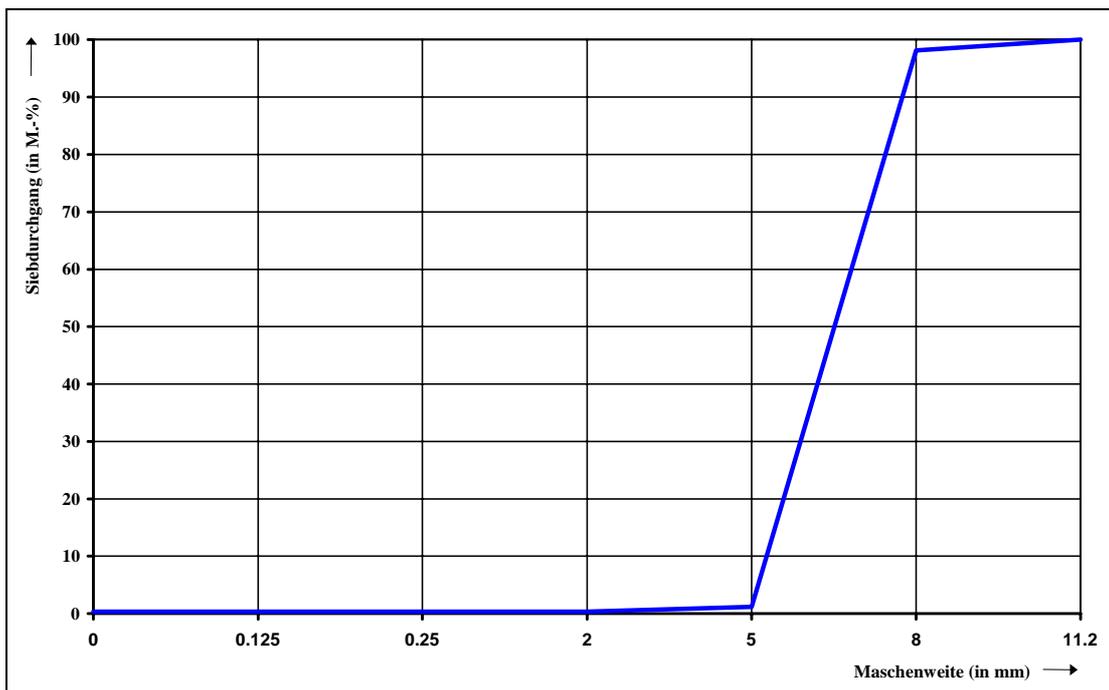
Tabelle 8-41. Prüfung des Frost-Tausalz widerstandes nach dem VDZ-Würfelverfahren - nach 14-tägiger Vorlagerung durch kapillares Saugen aufgenommene NaCl-Lösung

Probe	w/z-Wert	Aufgenommene 3 %ige NaCl-Lösung M.-%
G 00	0.50	0.60
G 00 M	0.47	0.30
G 00 P23	0.35	0.21
G 00 P45	0.28	0.30
G 00 M P23	0.24	0.11
RG 00	0.40	0.39
RG 00 M	0.43	0.25
RG 00 S	0.30	0.23
RG 00 P23	0.30	0.21
RG 00 P45	0.29	0.27
RG 00 M P23	0.21	0.19

## 8 Anhang

Tabelle 8-42. Abwitterungen nach Prüfung des Frost-Tausalz widerstandes nach dem VDZ-Würfelverfahren

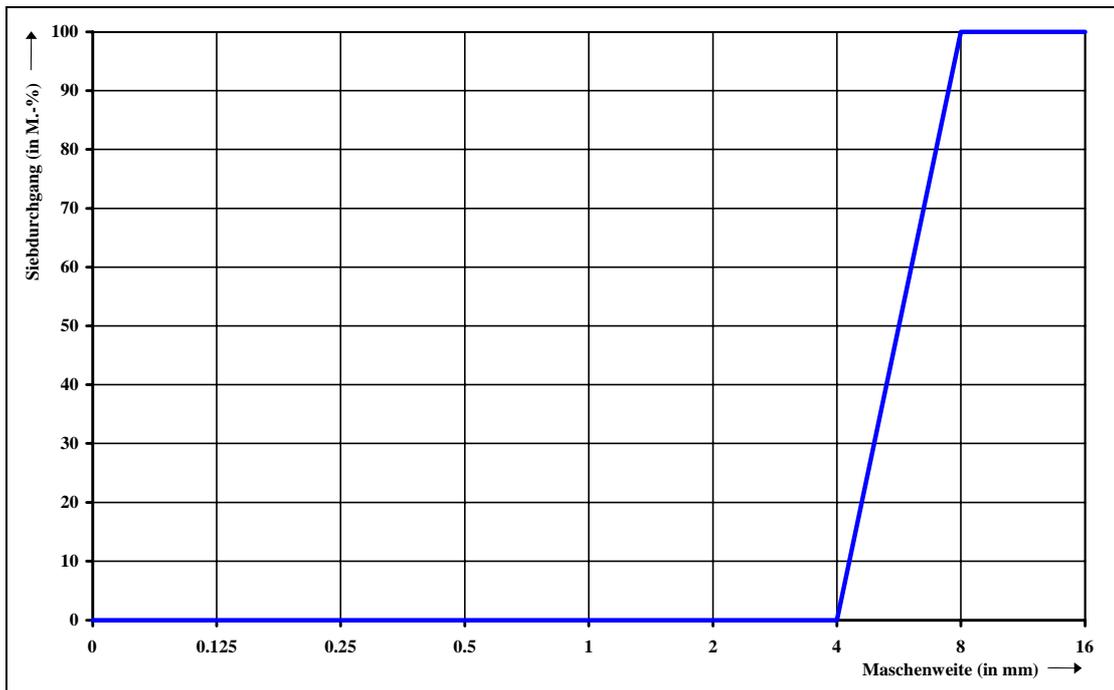
Probe	Gewichtsverlust in M.-%					
	10 FTSW	20 FTSW	30 FTSW	40 FTSW	50 FTSW	Gesamt
G 00	0.016	0.094	0.174	0.278	0.661	1.22
G 00 M	0.004	0.006	0.005	0.008	0.010	0.03
G 00 P23	0.003	0.004	0.008	0.009	0.017	0.04
G 00 P45	0.008	0.004	0.004	0.008	0.012	0.04
G 00 M P23	0.007	0.002	0.002	0.001	0.001	0.01
RG 00	0.004	0.015	0.177	0.222	0.336	0.75
RG 00 M	0.010	0.012	0.056	0.075	0.084	0.24
RG 00 S	0.003	0.002	0.003	0.011	0.022	0.04
RG 00 P23	0.004	0.003	0.003	0.010	0.015	0.04
RG 00 P45	0.004	0.014	0.171	0.214	0.324	0.73
RG 00 M P23	0.012	0.007	0.005	0.006	0.005	0.04



Sieblochweite mm	0.125	0.250	0.500	2.0	5.0	8.0	11.2
Durchgang M.-%	0.3	0.3	0.3	0.3	1.2	98.1	100

Abbildung 8-13. Siebline Edelplitt 5/8 für Dränbeton

## 8 Anhang



Sieblochweite mm	0.125	0.250	0.500	1.0	2.0	4.0	8.0	16.0
Durchgang M.-%	0	0	0	0	0	0	100	100

Abbildung 8-14. Sieblinie Quarzsand 4/8 für Dränbeton

Tabelle 8-43. Eigenschaften der Zuschläge für Dränbeton

	Rohdichte kg/m <sup>3</sup>	k-Wert	Gehalt abschlämmb. Bestandt. nach DIN 4226 Teil 3 M.-%	Durchgang n. Frostprüfung nach DIN 4226 Teil 3 M.-%
Edelsplitt 5/8	2.74	5.0	0.7	0.5
Kies 4/8	2.54	5.0	0.3	0.2

## 8 Anhang

Tabelle 8-44. Zusammensetzung der Dränbetone

Mischung	Zement CEM I 42,5 R  kg/m <sup>3</sup>	w/z- Wert	Konsistenz	Zusatzmittel kg/m <sup>3</sup>						Zuschlag	
				Poly- urethan	Kunststoff- dispersion	Verzögerer	Verdicker A	Verdicker B	Netzmittel	Quarz 4/8	Edelsplitt 5/8
G 0 S	350	0.26	KS		35						1547.1
G 0 P2	350	0.24	KS	7.0							1643.0
G 0 P23	350	0.19	KS	7.0							1690.9
G 1 P23	380	0.22	KS	7.6							1617.3
G 0 P23 V0.4	350	0.18	KS	7.0		1.4					1700.5
G 0 P42	350	0.23	KS	7.0							1652.5
G 0 P42 DA0.1	350	0.33	KS	7.0			0.35				1556.6
G 0 P42 DB0.1	350	0.38	KS	7.0				0.35			1508.7
G 0 P42 V0.4 N0.1	350	0.25	KS	7.0		1.4			0.35		1633.4
G 0 P42 V0.4 N0.2	350	0.25	KS	7.0		1.4			0.70		1633.4
G 0 P42 V0.4 N0.3	350	0.25	KS	7.0		1.4			1.05		1633.4
G 0 P42 V0.4 DA0.2 N0.3	350	0.27	KS	7.0		1.4	0.70		1.05		1614.2
G 0 P42 V0.4 DA0.4 N0.05	350	0.30	KS	7.0		1.4	1.40		0.18		1585.4
R 0 P23	350	0.21	KS	7.0						1549.7	
R 0 P42	350	0.25	KS	7.0						1514.1	

Erläuterung der Abkürzungen:

**R:** Rundkorn 4/8      **0:** 350 kg/m<sup>3</sup> CEM I 42.5 R      **z. B. P2:** Polyurethan 2      **DB:** Verdicker B auf Acrylatbasis  
**G:** Gebrochenes Korn 5/8      **1:** 380 kg/m<sup>3</sup> CEM I 42.5 R      **V:** Verzögerer auf Phosphatbasis      **N:** Netzmittel  
**DA:** Verdicker A auf Acrylatbasis

## 8 Anhang

Tabelle 8-45. Frischbetoneigenschaften der Dränbetone

Probe	w/z-Wert	Verdichtungsmaß $v$	Frischbetonrohddichte $\rho_{b,h}$ kg/dm <sup>3</sup>
G 0 S	0.26	1.25	2.05
G 0 P2	0.24	1.37	1.92
G 0 P23	0.19	1.25	1.92
G 1 P23	0.22	1.26	2.11
G 0 P23 V0.4	0.18	1.23	2.16
G 0 P42	0.23	1.25	1.97
G 0 P42 DA0.1	0.33	1.39	2.05
G 0 P42 DB0.1	0.38	1.28	2.10
G 0 P42 V0.4 N0.1	0.25	1.28	2.11
G 0 P42 V0.4 N0.2	0.25	1.29	1.95
G 0 P42 V0.4 N0.3	0.25	1.26	1.99
G 0 P42 V0.4 DA0.2 N0.3	0.27	1.33	1.96
G 0 P42 V0.4 DA0.4 N0.05	0.30	1.31	1.85
R 0 P23	0.21	1.28	2.19
R 0 P42	0.25	1.23	2.09

Tabelle 8-46. Festbetoneigenschaften der Dränbetone

Probe	Hohlraumgehalt Vol.-%	Druckfestigkeit $\beta_D$ N/mm <sup>2</sup>		Biegezugf. $\beta_{BZ}$ N/mm <sup>2</sup>	Dyn. E-Modul $E_{dyn.}$ N/mm <sup>2</sup>	
		7 d	28 d		7 d	28 d
G 0 S	20.8	21.4	34.5	6.85	22600	25200
G 0 P2	31.5	12.1	18.9	4.04	13900	19450
G 0 P23	24.0	23.0	38.2	4.92	21800	25400
G 1 P23	19.7	24.1	30.9	5.78	22800	27150
G 0 P23 V0.4	23.2	23.1	33.2	4.86	25000	30900
G 0 P42	25.4	18.5	35.9	7.25	20300	25000
G 0 P42 DA0.1	23.5	16.4	25.9	5.37	20100	25950
G 0 P42 DB0.1	16.9	17.0	27.4	5.86	20100	27200
G 0 P42 V0.4 N0.1	32.1	n.b.	12.8	n.b.	n.b.	17000
G 0 P42 V0.4 N0.2	36.0	n.b.	8.1	n.b.	n.b.	16000
G 0 P42 V0.4 N0.3	31.7	n.b.	8.2	n.b.	n.b.	16200
G 0 P42 V0.4 DA0.2 N0.3	26.0	4.3	15.2	n.b.	12200	14700
R 0 P23	19.4	23.4	39.2	7.44	24250	25850
R 0 P42	20.4	19.3	37.8	6.93	20600	26050

## 8 Anhang

Tabelle 8-47. Festbetoneigenschaften der Dränbetone

Probe	Rohdichte		stat. E-Modul	Abwitterungen n. 50 FTW M.-%	$\beta_{D28}/$ Hohlraumgeh.
	kg/dm <sup>3</sup>		E <sub>stat</sub> N/mm <sup>2</sup>		
	7 d	28 d	28 d		
G 0 S	2.07	2.02	17800	4.90	1.66
G 0 P2	1.90	1.91	14050	6.68	0.6
G 0 P23	1.91	1.91	18200	4.39	1.60
R 0 P23	2.16	2.19	18500	4.00	2.02
G 1 P23	2.08	2.10	n.b.	4.75	1.57
G 0 P23 V0.4	2.09	2.10	n.b.	n.b.	1.43
G 0 P42	1.92	1.93	18000	5.23	1.41
R 0 P42	2.09	2.04	18050	4.70	1.90
G 0 P42 DA0.1	2.03	2.00	n.b.	n.b.	1.10
G 0 P42 DB0.1	2.15	2.07	n.b.	n.b.	1.62
G 0 P42 V0.4 N0.1	n.b.	2.08	n.b.	n.b.	0.40
G 0 P42 V0.4 N0.2	n.b.	1.99	n.b.	n.b.	0.23
G 0 P42 V0.4 N0.3	n.b.	2.06	n.b.	n.b.	0.26
G 0 P42 V0.4 DA0.2 N0.3	1.94	1.91	n.b.	n.b.	0.59