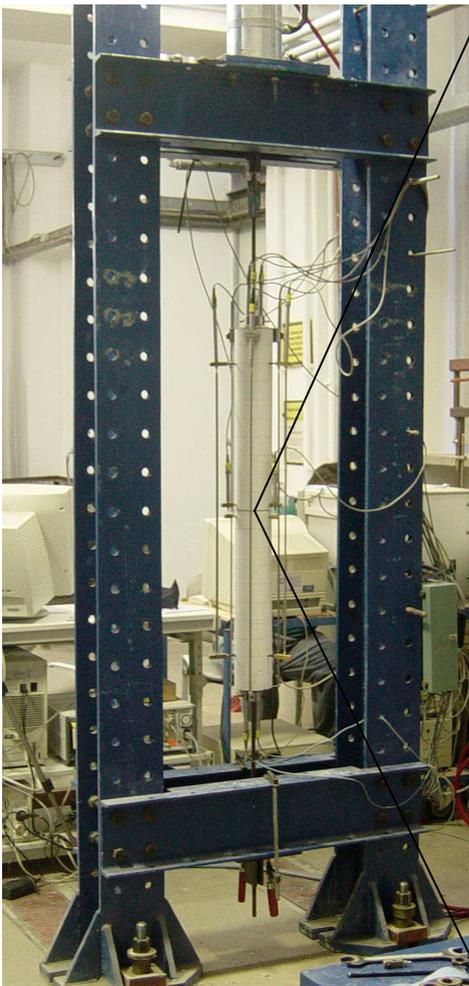


Aspekte der kohäsiven und adhäsiven Eigenschaften von PCC

Dissertation



Aspekte der kohäsiven und adhäsiven Eigenschaften von PCC

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur

an der Fakultät Bauingenieurwesen der
Bauhaus-Universität Weimar

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Kay Andre Bode

Gutachter: 1. Prof. Dr. -Ing. Andrea Dimmig-Osburg
 2. Prof. Dr.-Ing. Klaus P. Grosskurth
 3. Prof. Dr. Dionys Van Gemert

Tag der Disputation: 16.02.2009

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde an der Bauhaus-Universität Weimar.

Teilweise basieren die Ergebnisse auf Untersuchungen, die im Rahmen des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Sonderforschungsbereiches 524 „Werkstoffe und Konstruktionen für die Revitalisierung von Bauwerken“ im Teilprojekt B3 „Dauerhaftigkeit polymermodifizierter Mörtel und Betone“ durchgeführt wurden.

Ich möchte mich an dieser Stelle bei allen Mitarbeitern des F. A. Finger-Institutes für die Unterstützung bedanken, die durch ihre Diskussionsbereitschaft, ihre Hilfe bei der Organisation und der Bewältigung der zahlreichen praktischen Aufgaben sowie ihre motivierenden Argumente Anteil an dieser Arbeit haben. Insbesondere Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Jochen Stark möchte ich für die Möglichkeit danken, am F. A. Finger-Institut zu arbeiten und die Chance zur Promotion bekommen zu haben.

Mein besonderer Dank gilt meiner Mentorin Frau Prof. Dr.-Ing. Andrea Dimmig-Osburg, ohne deren beharrliches Drängen diese Arbeit wohl noch nicht fertig gestellt worden wäre. Die vielen anregenden Diskussionen, ihr Vertrauen in meine Fähigkeiten und die Möglichkeit, von ihren Erfahrungen zu lernen gaben letztlich den Ausschlag dazu.

Ebenso möchte ich mich bei meiner Familie bedanken. Trotz dem sie vor allem in letzter Zeit viel auf mich verzichten mussten, haben sie es an mentaler Unterstützung nicht mangeln lassen.

Kay Andre Bode
Erfurt, Juli 2008

Aspekte der kohäsiven und adhäsiven Eigenschaften von PCC

Inhalt	I
Abkürzungsverzeichnis	IV
1 Einleitung	1
2 Materialien und Stoffsysteme für die Versuche ...	4
2.1 Ausgangsstoffe	4
2.1.1 Zemente	4
2.1.2 Kunststoffe	5
2.1.3 Gesteinskörnungen	5
2.1.4 Zusatzmittel und -stoffe	6
2.2 Rezepturen	6
2.2.1 Übersicht	6
2.2.2 Lagerungsarten	8
2.2.3 Frischmörtel- und Frischbetonkennwerte	9
2.2.4 Festmörtel- und Festbetonkennwerte	12
3 Untersuchungsschwerpunkte	19
4 Längenänderungsverhalten kunststoffmodifizierter Zementsteine und PCC	21
4.1 Literaturübersicht	21
4.2 Bestimmung des Quellens und Schwindens an PCC nach DIN 52450	24
4.3 Thermische Längenänderung von PCC	27
4.4 Bestimmung des frühen Quellens und Schwindens von PCC in einer modifizierten Schwindrinne	28
4.4.1 Versuchsaufbau mit und ohne seitliche Behinderung	28

4.4.2	Versuchsbedingungen	30
4.4.3	Ergebnisse	32
4.5	<i>Bestimmung des Schwindens von kunststoffmodifizierten Zementsteinen</i>	33
4.6	<i>Versuche zum Einfluss des Längenänderungsverhaltens von kunststoffmodifizierten Zementsteinen auf den Haftverbund</i>	35
4.6.1	Entwicklung des dynamischen E-Moduls der Zementsteine	35
4.6.2	Entwicklung der Zugfestigkeit der Zementsteine	36
4.6.3	Modellversuche zum Haftverbund von kunststoffmodifizierten Zementsteinen	37
5	Kohäsion in PCC bei Belastung	41
5.1	<i>Literaturübersicht</i>	41
5.2	<i>Einfluss der Kunststoffe auf die PCC-Matrix</i>	45
5.3	<i>Verhalten von PCC unter Kurzzeitbelastung</i>	50
5.3.1	Druckbeanspruchung	50
5.3.2	Zugbeanspruchung	52
5.3.3	Biegezugbeanspruchung	54
5.4	<i>Verhalten von PCC unter andauernder Druckbelastung</i>	57
5.5	<i>Haftverbund des modifizierten Zementsteines zur Gesteinskörnung nach Belastung</i>	59
5.6	<i>Bedeutung der Kunststoffmodifikation für die Biegezugfestigkeit bei unterschiedlichen Temperaturen</i>	64
6.	Frost-Taumittel-Widerstand der PCC	67
6.1	<i>Literaturübersicht</i>	67
6.2	<i>Frost-Tausalz-Widerstand und innere Schädigung mittels CDF-/CIF-Verfahren</i>	69
6.2.1	Versuchsbedingungen	69

6.2.2 Porenradienverteilung	71
6.2.3 kapillare Lösungsaufnahme	72
6.2.4 Abwitterung	73
6.2.5 Relativer dynamischer E-Modul	75
6.3 <i>Schädigungsprofil mittels Ultraschallrastermessungen</i>	76
6.4 <i>Einfluss organischer Taumittel</i>	80
6.4.1 CDF-Test mit unterschiedlichen Taumitteln	80
6.4.2 Wirkung unterschiedlicher Taumittel auf die Polymerfilme	81
6.5 <i>Untersuchungen zur Sättigungsfähigkeit von PCC</i>	83
7 Adhäsiver Haftverbund von PCC zu Beton	86
7.1 <i>Literaturübersicht</i>	86
7.2 <i>Untersuchungen zur Verkürzung des Frost-Tau-Regimes nach RILI-SIB</i>	87
7.3 <i>Untersuchungen zum Einfluss der Probengeometrie</i> ...	89
7.4 <i>Untersuchungen zum Einfluss des Aufbringens des Beschichtungsmörtels</i>	94
7.5 <i>Untersuchungen zum Einfluss einer Salzbelastung</i>	96
7.5.1 Belasteter Untergrund	96
7.5.2 Belastete Beschichtung	98
8 Zusammenfassung und Ausblick	100
9 Literatur	104
Abbildungsverzeichnis	115
Tabellenverzeichnis	118

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
AC	Acrylharze
AF	Ausgleichsfeucht
AY	Acrylharze
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CaCO ₃	Calciumcarbonat
Ca(OH) ₂	Calciumhydroxid
CDF	Capillary suction of deicing solution and Freeze-thaw test
CIF	Capillary suction, internal damage and Freeze-thaw test
CO ₂	Kohlendioxid
CSH	Calcium-Silikat-Hydrat
D	Durchmesser
DFG	Deutsche Forschungs-Gemeinschaft
DMS	Dehnmessstreifen
E-Modul	Elastizitätsmodul
ESEM	Electron Scanning Microscopy
EVA	Ethylen-Vinylacetat-Copolymer
F	frei beweglich gelagert
FTSW	Frost-Tausalz-Wechsel
FTW	Frost-Tau-Wechsel
h	Höhe
i. A.	im Allgemeinen
i. d. R.	in der Regel
IWT	induktiver Wegaufnehmer
KS	Kunststoff
LF	Luftfeuchtigkeit
li	links
MFT	Mindestfilmtemperatur
MK	Oberdorlaer Muschelkalk
MP	Messpunkt
NaCl	Natriumchlorid
o. ä.	oder ähnliches
PCC	Polymer modified Cement Concrete
PCE	Polycarboxylatether
PMMA	Polymethylmethacrylat
p/z	Polymer/Zement-Verhältnis
re	rechts
rel.	relative
REM	Raster-Elektronen-Mikroskop

RILI-SIB	Richtlinie Schutz und Instandsetzen von Betonbauteilen
S-AY	Styrol-Acrylatharze
SB	Styrol-Buthadien
SBR	Styrol-Buthadien-Kautschuke
spez.	Spezifisch
SS	Seeberger Sandstein
Tab.	Tabelle
u. ä.	und ähnliche
vks	vor kapillarem Saugen
w/z	Wasser/Zement-Verhältnis
Z	mit Zwang gelagert
z. B.	zum Beispiel
ZS	Zementstein
ZTV-ING	Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten

1 Einleitung

In der nationalen und internationalen Fachliteratur für das Bauwesen wird die Abkürzung **PCC** für verschiedene Anwendungen genutzt. In dieser Arbeit bezieht sie sich auf *Polymer modified Cement Concrete*, also mit Kunststoffen modifizierte Mörtel und Betone. Hierfür hat sich diese Abkürzung auch international durchgesetzt. Sie bezeichnet Baustoffe, die neben dem mineralischen Bindemittel Zement auch Kunststoffe enthalten. Dies können Thermoplaste auf Dispersionsbasis oder in Form redispergierbarer Pulver sein oder Duroplaste, z. B. in Form von Epoxidharzemulsionen. Zement und Kunststoff erzielen im späteren Mörtel bzw. Beton eine gemeinschaftliche Bindemittelwirkung [1][2][3].

Auf dem heutigen Baustoffmarkt sind die PCC fest etabliert. Insbesondere für spezielle Anwendungen in der Instandsetzung und Sanierung von Betonbauteilen, als Beschichtung mit höherer chemischer und mechanischer Beständigkeit oder im Neubau bei erhöhter Anforderung an die Dichtigkeit – in fast allen Bereichen sind Anwendungsmöglichkeiten zu finden. Neben der für einige Anwendungen (z. B. nach ZTV-ING) vorgeschriebenen Verwendung von PCC muss zunehmend auch das Kosten – Nutzen – Verhältnis als Entscheidungskriterium für die Verwendung von PCC herangezogen werden. Unter Beachtung des geringeren Wartungs- und Sanierungsaufwandes infolge der i. Allg. besseren Dauerhaftigkeit können sich die höheren Investitionskosten für einen PCC durchaus rechnen.

Besonders durch die Verwendung redispergierbarer Pulver besteht die Möglichkeit, die Kunststoffe herstellerseitig direkt dem Bindemittel oder dem Werk trockenmörtel zuzugeben. Dadurch ergeben sich für den Anwender beim Anmischen kaum Unterschiede zum unmodifizierten Mörtel und Beton, abgesehen von der notwendigen Reifezeit zum Redispergieren des Kunststoffes. Bei der Auswahl und der Verarbeitung jedoch führen einerseits Unkenntnis beim Umgang mit diesen Materialien bzw. über deren Besonderheiten, andererseits die stetige Weiterentwicklung und Veränderung der Produkte ohne detaillierte Informationen an die Verarbeiter zu Problemen.

Wiederholter Gegenstand von Schadensfällen ist das Versagen des Haftverbundes zu anderer Bausubstanz. Da PCC häufig als dünne Schutzschicht auf vorhandenen Beton aufgetragen werden, führt ein Versagen der Adhäsion früher oder später auch zu einem Versagen dieser Schutzfunktion. Umgekehrt kann ein Versagen des Schutzes infolge von Rissen im PCC auch im Nachhinein zum Ablösen der Beschichtung führen. Ursächlich für dieses kohäsive Versagen sind dabei i. d. R. die Auswahl falscher bzw. nicht aufeinander abgestimmter Baustoffsysteme oder schlicht Verarbeitungsfehler [E1].

Das Ziel dieser Arbeit war es zu untersuchen, welchen Einfluss die kohäsiven und adhäsiven Eigenschaften von PCC auf deren Dauerhaftigkeit, insbesondere bei der Anwendung als Beschichtungsmaterial, haben. Dazu wurden vier maßgebliche Schwerpunkte bearbeitet.

Eine zentrale Rolle für die Dauerhaftigkeit eines Beschichtungsmaterials spielt dessen **Längenänderungsverhalten**. Der Betrag der positiven und negativen Längenänderungen ist bestimmend für die Spannungen, die im Beschichtungsmaterial entstehen können. Sind die auftretenden Spannungen höher als die Zugfestigkeit des PCC erfolgt der Spannungsabbau durch Risse. Es kommt also zum Kohäsionsversagen im Mörtel. Wird der PCC als Beschich-

tungsmaterial genutzt, werden die Spannungen im Idealfall über die Verbundebene zum Beschichtungsuntergrund übertragen. Übersteigen dabei diese Spannungen die maximal aufnehmbaren Verbundspannungen, kommt es zum Adhäsionsversagen zwischen Beschichtung und Untergrund [4].

In der Literatur finden sich widersprüchliche Angaben zum Längenänderungsverhalten von PCC. Vielfach wird über eine Reduzierung des Schwindens berichtet [5]. Andere [6] und insbesondere eigene Untersuchungen [E2] bestätigten das Gegenteil. Das Längenänderungsverhalten von PCC wird im Wesentlichen von zwei Einwirkungen, den thermischen und den hygri-schen, sowie der Hydratation bestimmt. Die Auswirkungen auf verschiedene PCC werden in zahlreichen standardisierten sowie in eigenen Versuchen ermittelt. In Modellversuchen werden die Effekte des Längenänderungsverhaltens kunststoffmodifizierter Zementsteine auf den Haftverbund zu einer Gesteinskörnung untersucht. Dadurch werden Rückschlüsse auf die Kohäsion innerhalb der PCC durch die Beschreibung des adhäsiven Verbundes zwischen Zementsteinmatrix und Gesteinskörnung gezogen. Es galt herauszustellen, welcher Unterschied im Längenänderungsverhalten der PCC gegenüber nicht kunststoffmodifizierten Mörteln besteht.

Neben der Längenänderung sind auch die Festigkeitseigenschaften der PCC bedeutsam für deren Dauerhaftigkeit. In einer Vielzahl von Publikationen (u. a. [6][7][E3]) wurden dazu bereits Untersuchungsergebnisse vorgestellt. Diese lassen sich im Wesentlichen so zusammenfassen: die Druckfestigkeit wird kaum bzw. geringfügig negativ beeinflusst, die Zug- und Biegezugfestigkeit wird i. d. R. erhöht. In dieser Arbeit werden die Festigkeitseigenschaften kunststoffmodifizierter Mörtel und Betone nicht nur von der mechanischen Seite betrachtet. Der Focus liegt vielmehr auf der Beschreibung der durch die Kunststoffe beeinflussten **kohäsiven Eigenschaften bei mechanischer Belastung**. Es wird das Verhalten der polymeren Matrix nach einer Kurzzeitbelastung untersucht. Damit werden die Vorgänge, die letztlich zu einer Beeinflussung der Festigkeitseigenschaften führen, dargestellt. In diesem Zusammenhang wird auch der Einfluss der Temperatur auf die Festigkeit der PCC betrachtet.

Die Untersuchung des **Frost-Taumittel-Widerstandes** mittels CDF- bzw. CIF-Verfahrens ist eine gute Möglichkeit, neben der Beurteilung der Dauerhaftigkeit auch Rückschlüsse auf die kohäsiven als auch, im mikroskopischen Maßstab betrachtet, die adhäsiven Eigenschaften der PCC zu ziehen. Damit ist gemeint, dass die Kohäsion von PCC durch deren adhäsive Eigenschaften zwischen kunststoffmodifizierter Zementsteinmatrix und Gesteinskörnern maßgeblich bestimmt wird. Einerseits kann bei starkem Abfall des relativen dynamischen E-Moduls von einer geringeren Kohäsion des PCC ausgegangen werden. Dies würde dann bei einem Mörtel eher zu Rissen führen, über die wiederum betonaggressive Medien eindringen können. Im Gegensatz dazu deutet ein konstant bleibender relativer dynamischer E-Modul auf eine hohe Kohäsion und damit, bei Anwendung des PCC als Beschichtungsmaterial, auf ein höheres adhäsives Versagensrisiko der Beschichtung hin. Andererseits stellt eine höhere Abwitterung, also sozusagen das schichtenweise kohäsive Versagen, eine Gefahr bei dünnen Beschichtungen dar. Dies könnte noch durch die Anwendung anderer Taumittel (z. B. organischer) verstärkt werden. Unter diesen Gesichtspunkten wurden Untersuchungen auf der Basis des CDF-Testes sowie zur Lösungsaufnahmefähigkeit der PCC durchgeführt.

Der **adhäsive Verbund von PCC** zu Beton ist von vielen Faktoren abhängig. In der Literatur sind mehrere Publikationen zum Einfluss der Untergrundrauigkeit, der Nachbehandlung, der Schichtdicke oder der Wasseraufnahme zu finden [8][9]. Kaum betrachtet wurde dagegen die Art des Aufbringens oder der Einfluss der Probengeometrie bei Laborversuchen. Diese sowie der Einfluss einer Salzbelastung des Untergrundes bzw. der Beschichtung wurden untersucht.

Im Ergebnis der Arbeit wurden materialspezifische Erkenntnisse gewonnen, die den Umgang mit PCC als Beschichtungsmörtel bzw. -beton sicherer machen und zu einer Verringerung von Schäden beitragen sollen.

Ein Teil der durchgeführten Untersuchungen wurde im Rahmen des Teilprojektes B3 „Dauerhaftigkeit polymermodifizierter Mörtel und Betone“ des von der DFG geförderten Sonderforschungsbereiches 524 „Werkstoffe und Konstruktionen für die Revitalisierung von Bauwerken“ realisiert.

2 Materialien und Stoffsysteme

2.1 Ausgangsstoffe

2.1.1 Zemente

Für die Herstellung von PCC ist es üblich, Portlandzemente höherer Festigkeitsklassen zu verwenden. Da i. Allg. die Hydratation durch Kunststoffe verzögert wird, werden Zemente höherer Festigkeitsklassen benötigt, um trotzdem die geforderten Frühfestigkeiten zu erreichen. Für die in dieser Arbeit durchgeführten Mörtel- und Zementsteinuntersuchungen wurde deshalb ein CEM I 42,5 R verwendet. Mit seiner hohen Frühfestigkeit von ca. 38 N/mm² nach 2 Tagen und einer 28 Tage-Festigkeit von 57 N/mm² (Tab. 2-1) erfüllt er die Anforderungen der DIN EN 197-1 [R1], welche eine Festigkeit nach 28 Tagen zwischen 45 N/mm² und 62,5 N/mm² fordert.

Speziell für die Untersuchungen zum Frost-Taumittel-Widerstand wurde außerdem ein CEM III/A 42,5 verwendet, welcher zwar mit 15 N/mm² nach 2 Tagen eine wesentlich geringere Frühfestigkeit als der CEM I 42,5 R aufweist. Die Festigkeiten von 27 N/mm² nach 7 Tagen bzw. 53 N/mm² nach 28 Tagen (Tab. 2-1) befinden sich jedoch im Bereich der Festlegungen nach DIN EN 197-4 [R2]. Die Auswahl dieses Zementes wurde getroffen, da speziell CEM III – Zemente hinsichtlich der Frost-Tausalz-Beständigkeit aufgrund der erhöhten Abwitterung ihrer Carbonatphasen eher kritisch bewertet werden. Durch die Modifikation mit Kunststoffen sollte es möglich sein, die Dauerhaftigkeit markant zu steigern.

Einige Untersuchungen zur Kohäsion in PCC unter Belastung wurden an Betonen durchgeführt, die mit einem CEM I 32,5 R hergestellt wurden. Der Wesentliche Entscheidungsgrund für diesen Zement war, dass es ein preiswerter Massenzement ist, der im Ingenieurbau häufig zur Anwendung kommt. Die erreichbaren Festigkeiten sind i. d. R. für die Anforderungen ausreichend. Deshalb erschien es sinnvoll, kunststoffmodifizierte Betone mit diesem Zement zu untersuchen, um Vergleiche zu realen Anwendungen ziehen zu können.

Tab. 2-1: charakteristische Zementkennwerte

		CEM I 32,5 R	CEM I 42,5 R	CEM III/A 42,5
Dichte	[g/cm ³]	3,114	3,097	3,027
spez. Oberfläche (Blain)	[cm ² /g]	3390	4460	3700
Erstarrungsbeginn	[h:min]	2:00	2:55	3:40
Erstarrungsende	[h:min]	2:30	4:10	4:15
Druckfestigkeit, 2 d	[N/mm ²]	26,2	38	15
Druckfestigkeit, 7 d	[N/mm ²]	40,7	49	27
Druckfestigkeit, 28 d	[N/mm ²]	49,1	57	53
Biegezugfestigkeit, 2 d	[N/mm ²]	5,4	7,0	3,9
Biegezugfestigkeit, 7 d	[N/mm ²]	6,6	8,0	5,9
Biegezugfestigkeit, 28 d	[N/mm ²]	8,3	8,5	8,6
Glühverlust	[%]	2,2	2,9	2,4

2.1.2 Kunststoffe

Die Untersuchungen wurden mit zwei Kunststoffen unterschiedlicher Lieferform aber ähnlicher Hauptbestandteile durchgeführt. Es handelt sich um Copolymere auf Basis von Styren und Acrylsäureester. Kunststoff 1 (KS 1) ist ein redispergierbares Pulver mit Entschäumern und Polyvinylalkohol als Schutzkolloid sowie Antibackmittel. Kunststoff 2 (KS 2) ist eine 50%-ige Dispersion und enthält außerdem ionische Emulgatoren als oberflächenaktive Stoffe und Entschäumer. Die Mindestfilmbildungstemperatur (MFT) von KS 1 beträgt 5 °C, die von KS 2 beträgt 30 °C. Das bedeutet, dass sich beim KS 2 unter normalen Laborklimabedingungen von 20 °C kein zugfester Kunststofffilm ausbilden kann. Somit wäre eigentlich die in der Literatur [1][10] beschriebene positive Wirkung einer Kunststoffmodifikation, die eine Filmbildung voraussetzt, beim KS 2 nicht möglich.

Beide Kunststoffe sind in ihrer jeweiligen Lieferform handelsübliche Produkte und ausdrücklich für den Einsatz mit hydraulisch erhärtenden Bindemitteln wie Zement geeignet. Weitere charakteristische Kennwerte sind in Tab. 2-2 dargestellt.

Tab. 2-2: charakteristische Kennwerte der verwendeten Kunststoffe

		Kunststoff 1 (KS 1)	Kunststoff 2 (KS 2)
Lieferform		redispergierbares Pulver	Dispersion
Hauptbestandteile		Styren Acrylsäureester	Styren Acrylsäureester
Zusätze		Polyvinylalkohol Antibackmittel Entschäumer	oberflächenaktive Stoffe Entschäumer
Feststoffgehalt	[%]	99 ± 1	50 ± 2
MFT	[°C]	5	30
Teilchengröße (Herstellerangabe)	[µm]	max. 400 (als Pulver) 0,5 – 10 (Redispergation)	0,15 – 0,25
mittlere Teilchen- größe	[µm]	0,75 (Redispergation)	0,085

2.1.3 Gesteinskörnungen

Als Gesteinskörnung wurde für die Mörteluntersuchungen CEN-Normsand nach EN 196-1 [R3] mit einem Größtkorn bis 2 mm verwendet. Dieser wurde in Abpackungen zu je 1350 g geliefert. Aufgrund der hohen Qualitätsanforderungen und einer regelmäßigen Kontrolle ist von einer hohen Gleichmäßigkeit hinsichtlich der Kornzusammensetzung auszugehen.

Die Rezepturen der Betonuntersuchungen wurden mit einem Sand bis 2 mm Größtkorn, Kies mit einem Größtkorn bis 8 mm sowie einem Splitt bis 16 mm Größtkorn erstellt. Die angestrebte Sieblinie lag zwischen A und B. Mineralogischer Hauptbestandteil des Sandes und des Kieses war wie beim Normsand auch Quarz, beim Splitt handelte es sich um Basalt.

2.1.4 Zusatzmittel und Zusatzstoffe

Die Mörteluntersuchungen sollten an Mischungen vergleichbarer Verarbeitbarkeit durchgeführt werden. Dazu war es notwendig, mit geeigneten Zusatzmitteln die Rezepturen anzupassen. Zum Erreichen einer festgelegten Konsistenz wurde das Fließmittel WOERMENT FM 375 (FM) / BV 375 (BV) verwendet, ein Produkt auf Basis von Polycarboxylatether (PCE). Zur Reduktion des Frischmörtelluftgehaltes, der insbesondere bei dem Einsatz des redispergierbaren Pulvers trotz bereits enthaltenen Entschäumers stark erhöht war, wurde der Entschäumer FOAMMASTER PD 1 eingesetzt. Dadurch konnte der Frischmörtelluftgehalt deutlich gesenkt werden.

Die Dosierung der eingesetzten Zusatzmittel erfolgte mit der jeweils geringsten möglichen Menge, um die vorher festgelegten Parameter des Ausbreitmaßes und des Frischmörtelluftgehaltes zu erreichen.

2.2 Rezepturen

2.2.1 Übersicht

Im Folgenden sind die verwendeten Mörtel- und Betonrezepturen dargestellt. Die durchgeführten Untersuchungen basierten ausnahmslos auf diesen Rezepturen.

Mörtelrezepturen:

Die Festlegungen der Zugabemengen für Fließmittel und Entschäumer basieren auf zahlreichen Frischmörteluntersuchungen. Sie kennzeichnen die Mindestzugabemenge, um die vorher definierten Frischbetoneigenschaften (Ausbreitmaß zwischen 150 mm und 180 mm und Frischmörtelluftgehalt < 5 %) zu erreichen.

Die Rezepturen wurden in Anlehnung an die Normmörtelmischung nach DIN EN 196-1 [R3] entworfen. Konstant waren immer der Zementgehalt von 450 g sowie der Gehalt an Normsand von 1350 g. Waren volumetrisch größere Mischungen notwendig, etwa für die Herstellung der Probekörper für den CDF-Test, wurde ein Vielfaches der jeweiligen modifizierten Normmörtelmischung hergestellt.

Abweichend von der Rezeptur nach DIN EN 196-1 betrug der Wasser / Zement-Wert (w/z) 0,40. Auf den Wasseranteil angerechnet wurde außerdem der Wassergehalt des Fließmittels und der Dispersion, sofern diese zugegeben wurden. Der Feststoffanteil der Zusatzmittel und -stoffe fand keine weitere Berücksichtigung. Die Polymer / Zement-Werte (p/z) wurden mit 0,05 bzw. 0,15 an der unteren (Mindestmaß, um ein zusammenhängendes Kunststoffnetzwerk im Mörtel / Beton auszubilden [11]) bzw. oberen (technisch relevant nach ökonomischen Gesichtspunkten) sinnvollen Dosiermenge orientiert. Sie beziehen sich auf den Feststoffanteil des jeweiligen Kunststoffes.

Tab. 2-3: Mörtelrezepturen mit CEM I 42,5 R

Bezeichnung	Kunststoffart	p/z-Wert	Pulver / Dispersion [g]	w/z-Wert	Wasser [g]	FM 375 [g]	PD 1 [g]
0 - 0,40	-	0	0	0,40	177,0	4,0	0
0 - 0,50	-	0	0	0,50	225,0	0	0
1-p/z=0,05	KS 1	0,05	22,5	0,40	178,5	2,0	0,5
1-p/z=0,15		0,15	67,5	0,40	179,5	1,0	1,0
2-p/z=0,05	KS 2	0,05	45	0,40	156,5	1,5	0
2-p/z=0,15		0,15	135	0,40	112,5	0	0

Tab. 2-4: Mörtelrezepturen mit CEM III/A 42,5

Bezeichnung	Kunststoffart	p/z-Wert	Pulver / Dispersion [g]	w/z-Wert	Wasser [g]	FM 375 [g]	PD 1 [g]
0 - 0,40	-	0	0	0,40	179,0	1,3	0
0 - 0,50	-	0	0	0,50	225,0	0	0
1-p/z=0,05	KS 1	0,05	22,5	0,40	179,0	1,5	0,5
1-p/z=0,15		0,15	67,5	0,40	179,5	1,0	3,0
2-p/z=0,05	KS 2	0,05	45	0,40	157,5	0	0
2-p/z=0,15		0,15	135	0,40	112,5	0	0

Betonrezepturen:

Die Basis für die Betonuntersuchungen bildete eine bereits erprobte Betonrezeptur mit plastischer Frischbetonkonsistenz. Der Zementgehalt betrug 350 kg/m³ und wurde für alle Rezepturen konstant gehalten. Der w/z-Wert war mit 0,50 festgelegt. Für die Modifikation mit Kunststoffen wurden deren Feststoffanteile in der Stoffraumrechnung berücksichtigt. Dadurch reduzierte sich der Anteil an Gesteinskörnung für die kunststoffmodifizierten Betone um ca. 127 kg/m³. Der Wasseranteil der Dispersion wurde ebenfalls auf den Gesamtwassergehalt angerechnet. Fließmittel bzw. Die Rezepturen waren also hinsichtlich der Verarbeitbarkeit nicht optimiert. Einerseits konnten so die Auswirkungen der Kunststoffmodifikationen auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften direkt beurteilt werden. Andererseits sollten insbesondere bei den Untersuchungen des kohäsiven Verbundes der PCC störende Einflüsse durch weitere Zusätze vermieden werden.

Tab. 2-5: Betonrezepturen mit CEM I 32,5 R

Bez.	Kunststoffart	p/z-Wert	Pulver / Dispersion [kg/m ³]	w/z-Wert	Wasser [kg/m ³]	Sand	Kies [kg/m ³]	Splitt [kg/m ³]
0-Probe	-	0	0	0,50	175	584,4	657,4	584,4
PCC 1	KS 1	0,15	52,5	0,50	175	543,6	611,6	543,6
PCC 2	KS 2	0,15	105	0,50	122,5	543,6	611,6	543,6

2.2.2 Lagerungsarten

Mörtelrezepturen

Zur Charakterisierung der Mörtelrezepturen wurde auch der Einfluss der Lagerungsart bis zum Prüftermin untersucht. Dazu wurden drei verschiedene Varianten festgelegt:

- | | | |
|---|---|--|
| A | - | 1 d in der Schalung, dann unter Wasser |
| B | - | 1 d in der Schalung, dann im Normalklima 20 °C, 65 % rel. Luftfeuchte |
| C | - | 1 d in der Schalung, dann 6 d unter Wasser, dann im Normalklima 20 °C, 65 % rel. Luftfeuchte |

Die Lagerung A stellt für die Zementphase die optimalen Bedingungen für eine gute Hydratation dar (keine Austrocknungsmöglichkeit, ausreichendes Wasserangebot). Für den Kunststoff hingegen scheinen diese Bedingungen erst einmal eher schlecht zu sein, da die Filmbildung der verwendeten thermoplastischen Kunststoffe auf der Austrocknung beruht. Ältere Modellvorstellungen von der Filmbildung [10][11] gehen davon aus, dass sich in Folge der Verringerung der flüssigen Phase der Abstand der darin stabilisierten Kunststoffpartikel verkürzt. Bei Berührung ist das Abstoßungspotential der Kunststoffteilchen praktisch Null. Bei weiterem Entzug der in den Zwischenräumen noch vorhandenen Flüssigkeit steigt der Kapillardruck auf die Kunststoffpartikel und sie beginnen, miteinander zu verschmelzen. Ist während dieses Prozesses die MFT überschritten, kommt es zur Ausbildung homogener zugfester Kunststofffilme. Diese Modellvorstellungen beruhen aber auf der Filmbildung an freien Dispersionen. In Mörteln und Betonen hingegen müssen noch andere Einflüsse berücksichtigt werden. Unter anderem herrscht hier ein hohes alkalisches Milieu. Wasser wird nicht nur über die Austrocknung „abgebaut“, sondern auch in Folge der Hydratation chemisch gebunden. Zudem stehen noch zahlreiche Oberflächen zur Verfügung (z. B. Zementpartikel, Gesteinskörner), an denen Kunststoffteilchen adsorbieren können. Diese sind dann nicht mehr in der flüssigen Phase verteilt. Der Filmbildungsprozess kann also auch unter scheinbar ungünstigen Bedingungen ablaufen [27].

Die Lagerung B repräsentiert das Optimum für die Filmbildung im Mörtel. Das Wasser wird einerseits durch die Hydratation, andererseits durch eine schnelle Austrocknung „verbraucht“. Für den Zementstein hingegen sind diese Bedingungen eher schlecht. Durch den raschen Wasserentzug kommt es zu Defiziten bei der Hydratation, worunter letztlich die Festigkeiten und die Dauerhaftigkeit leiden.

Einen Kompromiss stellt die Lagerung C dar. In den ersten 7 Tagen sind die Bedingungen für die Zementhydratation optimal. Danach herrschen gute Voraussetzungen dafür, dass die in der Flüssigphase verbliebenen Kunststoffteilchen einen homogenen Film bilden können. Diese Kunststofffilme werden sich allerdings im Wesentlichen an Porenwandungen, in Rissen oder sonstigen Hohlräumen bilden. Dort können sie lediglich den Zutritt flüssiger Medien in den Mörtel behindern und so die Dauerhaftigkeit positiv beeinflussen. Einen Festigkeitsbeitrag können die Filme an diesen Stellen eher nicht leisten.

Betonrezepturen:

Die Lagerung der Betonprobekörper erfolgte in Anlehnung an die Lagerung C der Mörtelprismen. Aufgrund der Probengröße der Dehnkörper (siehe Abschnitt 5.3.2) wurde die Wasserlagerung durch eine Folienlagerung ersetzt. Dazu wurden die Proben, nachdem sie einen Tag in der Schalung verblieben, für 6 Tage eng in Folien eingepackt. Anschließend wurden sie bis zur Prüfung im Normklima (20 °C, 65 % rel. Luftfeuchte) gelagert. Mit den Proben für die Druckversuche wurde ebenso verfahren.

2.2.3 Frischmörtel- und Frischbetonkennwerte

Mörtelrezepturen

Zur Charakterisierung der Frischmörtel wurden das Ausbreitmaß und dessen Änderung bis zu sechs Stunden, der Luftgehalt, die Rohdichte sowie das Wasserrückhaltevermögen bestimmt. Die Vorgaben zum Ausbreitmaß konnten bei fast allen Rezepturen erfüllt werden (Abb. 2-1; Abb. 2-2). Lediglich die mit KS 2 (Dispersion) und einem p/z -Wert von 0,15 modifizierten Rezepturen lagen deutlich darüber. Insbesondere beim CEM III zeigte sich eine extrem verflüssigende Wirkung. Trotzdem wurden beide Rezepturen in die Untersuchungen aufgenommen, um die Wirkung unterschiedlicher Kunststoffgehalte beurteilen zu können.

Für die kunststoffmodifizierten Rezepturen wurde der w/z -Wert auf 0,40 festgelegt. Ebenso wurde eine nicht modifizierte Rezeptur je Zementart mit einem w/z -Wert von 0,40 projiziert und mit dem Fließmittel auf das gewünschte Ausbreitmaß eingestellt, um die direkte Vergleichbarkeit bei konstantem w/z -Verhältnis zu gewährleisten. Zur Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit einer Normmörtelmischung nach DIN EN 196-1 wurde auch eine solche in die Untersuchungen einbezogen. Diese erfüllte ebenfalls die Vorgaben des Ausbreitmaßes mit 173 mm und einem Frischmörtelluftgehalt von 2,8 % (CEM I) bzw. 2,0 % (CEM III).

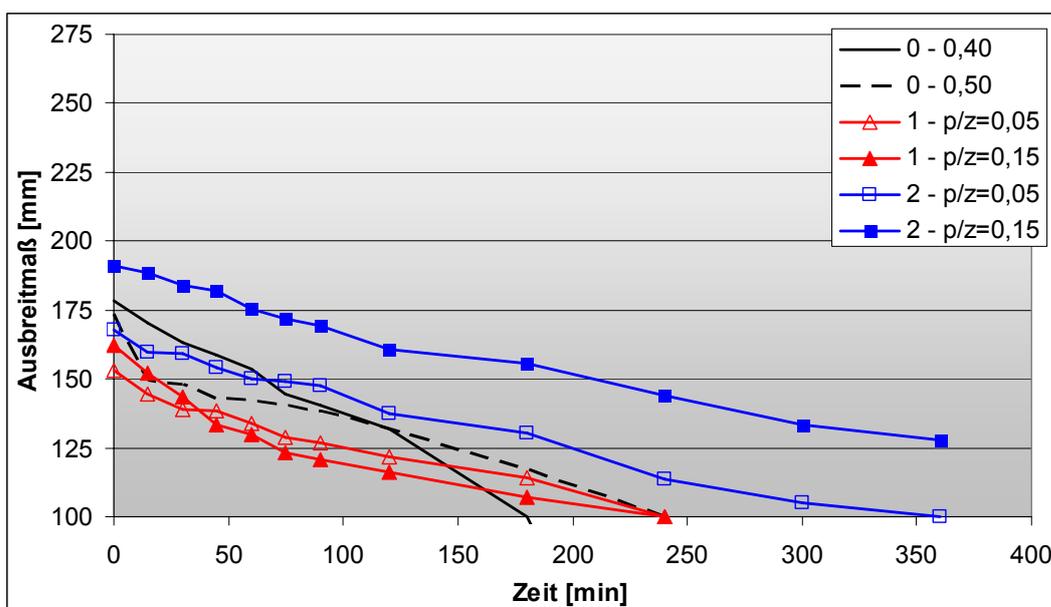


Abb. 2-1: Ausbreitmaßänderung der CEM I 42,5 R - Mörtel

Während bei den CEM I-Rezepturen die Kunststoffe tendenziell das Ansteifen im Vergleich zur nicht modifizierten Rezeptur gleichen w/z -Wertes verlangsamen, ist bei den CEM III-Rezepturen das Gegenteil zu beobachten. Hier ist ein deutliches Verkürzen der Verarbei-

tungszeiten zu erkennen. Lediglich die mit KS 2 und hohem p/z-Wert modifizierten Rezepturen weisen bei beiden Zementen auch noch nach 6 Stunden eine gewisse Verarbeitbarkeit auf. Vermutlich ist aufgrund der gröberen Struktur des CEM III nicht genügend flüssige Phase über einen längeren Zeitraum vorhanden, um alle Zwickel zwischen den Feststoffteilchen zu füllen und so ein Gleiten zu ermöglichen. Nach dem Anmischen ist der Flüssigkeitsanteil gerade noch hoch genug. Infolge der Hydratation wird dann weiteres Wasser gebunden. Dadurch kommt es zu einem Unterschreiten der Mindestflüssigkeitsmenge und zu einem rascheren Ansteifen, was jedoch noch nicht auf einen früheren Erstarrungsbeginn hindeutet.

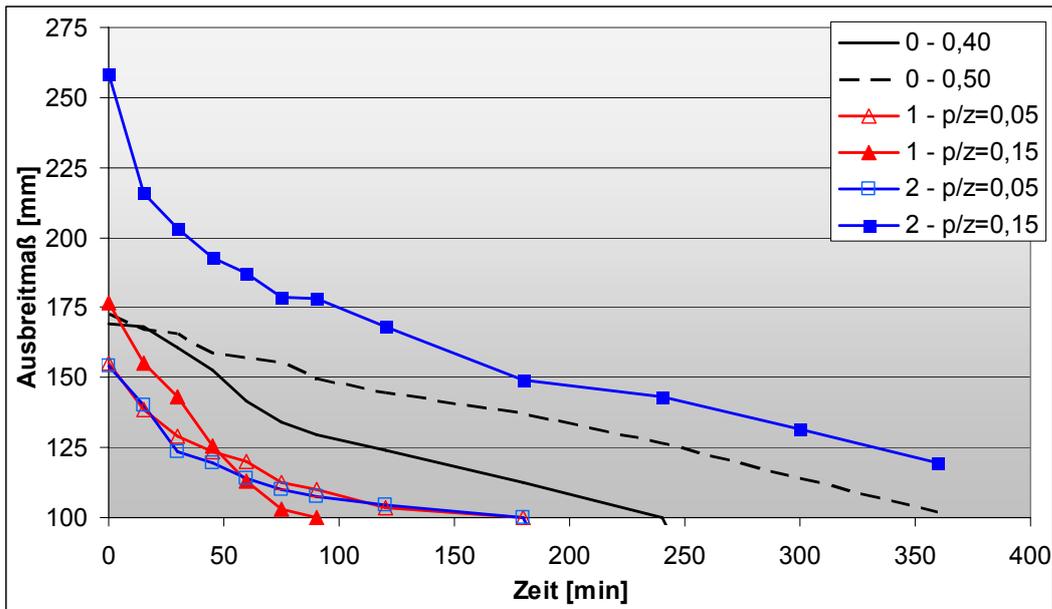


Abb. 2-2: Ausbreitmaßänderung der CEM III/A 42,5 – Mörtel

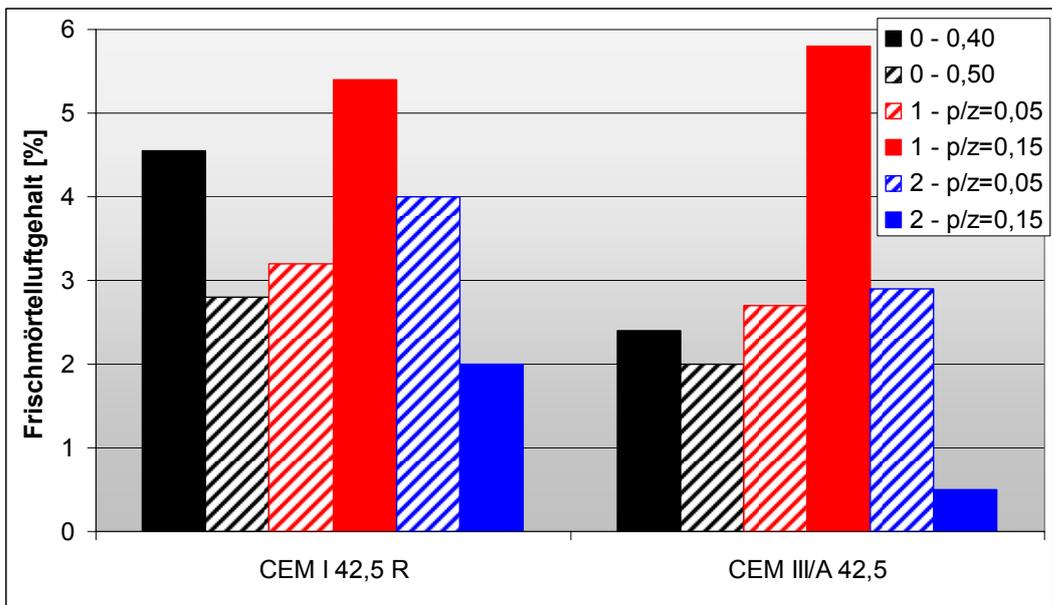


Abb. 2-3: Frishmörtelluftgehalte der Mörtel

Beim Frishmörtelluftgehalt (Abb. 2-3) ist auffällig, dass die Rezepturen mit KS 1 (Redispersionspulver) und hohem p/z-Wert die Vorgaben nicht erfüllten. Trotz der vom Hersteller empfohlenen Höchstzugabemenge des Entschäumers PD 1 zu dem bereits im Pulver enthalten

Entschäumer liegen die Werte über 5 %. Der Luftgehalt der mit KS 2 (Dispersion) und hohem p/z-Wert modifizierten Mörtel ist dagegen sehr gering. Aufgrund der stark verflüssigenden Wirkung sind diese Rezepturen in der Lage, sehr gut zu entlüften. Es war zu erwarten, dass sich hier ein sehr dichtes Gefüge ausbilden wird im Vergleich zu den KS 1-modifizierten Rezepturen. Bei diesen war mit einem sehr porösen Gefüge zu rechnen.

Das Wasserrückhaltevermögen (Abb. 2-4) wird durch die Kunststoffmodifikationen um ca. 5 % erhöht im Vergleich zu den nicht modifizierten Rezepturen gleichen w/z-Wertes. Beim Vergleich mit der Normmörtelmischung nach DIN EN 196-1 ergibt sich aber keine Änderung.

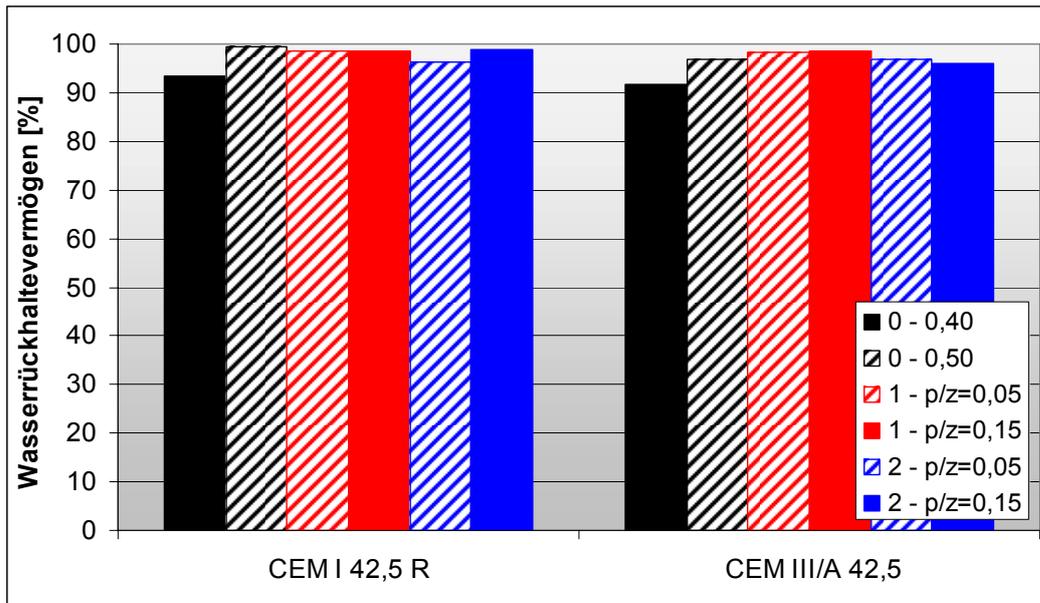


Abb. 2-4: Wasserrückhaltevermögen der Mörtel

Die Frischmörtelrohddichte änderte sich nur unwesentlich und betrug für die meisten Mörtel ca. 2,30 g/cm³. Lediglich bei den Rezepturen mit KS 1 und einem p/z-Wert von 0,15 reduzierte sie sich um ca. 0,10 g/cm³. Dies ist im Wesentlichen auf den erhöhten Frischmörtel-luftgehalt zurückzuführen, der bei diesen beiden Rezepturen den festgelegten Grenzwert von 5 % überschritt.

Betonrezepturen:

Die Frischbetone wurden ebenfalls hinsichtlich des Ausbreitmaßes, des Luftgehaltes und der Rohddichte charakterisiert. Hinzu kam noch die Bestimmung der Frischbetontemperatur. Die Prüfungen erfolgten nach DIN 1048-1 [R4].

Auch bei den Betonrezepturen war die verflüssigende Wirkung der Kunststoffe deutlich erkennbar, sogar extremer als bei den Mörtelrezepturen. Die Konsistenz erhöhte sich um 3 bzw. 4 Klassen (Tab. 2-6). Dies ist im Wesentlichen einerseits auf die Gesteinskörnung zurückzuführen, die infolge des erhöhten Größtkorns im Vergleich zum Mörtel weniger zu benetzende Oberfläche bietet. Andererseits ist auch die Oberfläche des für den Beton verwendeten CEM I 32,5 R geringer als die des CEM I 42,5 R für die Mörtelrezepturen. Es steht also weniger Gesamtoberfläche zur Verfügung, an der die Kunststoffteilchen adsorbieren können. Infolge dessen sind mehr Kunststoffteilchen verteilt im Anmachwasser und können so den „Kugellagereffekt“ erhöhen.

Tab. 2-6: *Frischbetonkennwerte*

		ohne KS	PCC 1	PCC 2
Ausbreitmaß	[cm]	40,5	60	>65
Konsistenzklasse		F2	F5	F6
Luftgehalt	[Vol-%]	1,5	5,9	0,4
Frischbetonrohddichte	[g/cm³]	2,41	2,28	2,37
Frischbetontemperatur	[°C]	20	20	20

Die kunststoffmodifizierten Mischungen zeigten trotzdem einen hohen inneren Zusammenhalt und waren gut verarbeitbar. Der mit Kunststoff 2 (Dispersion) modifizierte Beton war sehr fließfähig (F6). Befürchtungen, dass es dadurch zu Entmischungen, insbesondere zum Absinken der größeren Gesteinskörner in der Schalung kommen könnte, bestätigten sich nicht. Lediglich ein geringes Bluten konnte beobachtet werden. Dies führte dazu, dass sich bei den erhärteten Proben eine etwa 1 mm dicke Feinschlammeschicht an der Oberfläche abgesetzt hatte. Aufgrund der flüssigen Konsistenz hatte der PCC 2 einen sehr geringen Frischbetonluftgehalt, wogegen der PCC 1, hervorgerufen durch die schäumende Wirkung des modifizierenden Kunststoffpulvers, erwartungsgemäß den vergleichsweise höchsten Frischbetonluftgehalt mit 5,9 % hatte.

Ein Einfluss der Kunststoffmodifikationen auf die Frischbetontemperatur wurde nicht beobachtet.

Die Frischbetonrohddichte wurde durch die Kunststoffe teils deutlich reduziert. Bei der Modifikation mit KS 1 spielt dabei neben der geringeren Dichte der Kunststoffteilchen die bereits erwähnte schäumende Wirkung eine wesentliche Rolle.

2.2.4 Festmörtel- und Festbetonkennwerte

Mörtelrezepturen

Zur Charakterisierung der Festmörtel wurden die Rohdichten sowie die Biegezug- und Druckfestigkeiten nach 7 und 28 Tagen in Abhängigkeit von der Lagerungsart bestimmt. Diese Werte geben einen ersten Aufschluss über die Beeinflussung der Mörtel Eigenschaften durch die modifizierenden Kunststoffe.

Bei dem Vergleich der Rohdichten (Abb. 2-5; Abb. 2-6) sind kaum klare Tendenzen zu erkennen. Zu erwarten war, dass die Rohdichten der PCC infolge der niedrigeren Dichten der verwendeten Kunststoffe im Vergleich zu den nicht modifizierten Mörteln geringer sind. Dies ist jedoch nicht immer der Fall. Signifikante Unterschiede für die CEM I - Mörtel gibt es lediglich bei der Lagerung C (Wechselagerung) mit KS 1 und hohem p/z-Wert sowie KS 2 und niedrigem p/z-Wert. Für die CEM III - Mörtel sind diese signifikanten Unterschiede bei allen drei Lagerungsarten mit KS 1 und hohem p/z-Wert sowie KS 2 und niedrigem p/z-Wert zu erkennen. Der KS 1 mit hohem p/z-Wert hat trotz des bereits im Kunststoff eingesetzten und zusätzlich der Rezeptur beigefügten Entschäumers eine sehr hohe Porosität. Ähnliches gilt für den KS 2, hier aber für den niedrigen p/z-Wert. Die Rezeptur mit KS 2 und hohem p/z-Wert dagegen zeigt eine deutliche Verflüssigung. Dadurch ist der PCC in der Lage, sehr gut

zu entlüften und eine dichtere Struktur zu bilden. Die Porosität sinkt. Diese Tendenzen waren bereits aus den Frischmörtelkennwerten abzuleiten. Aufgrund der höheren Porosität in Verbindung mit der geringeren Dichte der Kunststoffe ergibt sich dann die geringere Rohdichte. Insgesamt bewegen sich die Rohdichten in einem sehr engen Spektrum zwischen 2,10 und 2,30 g/cm³.

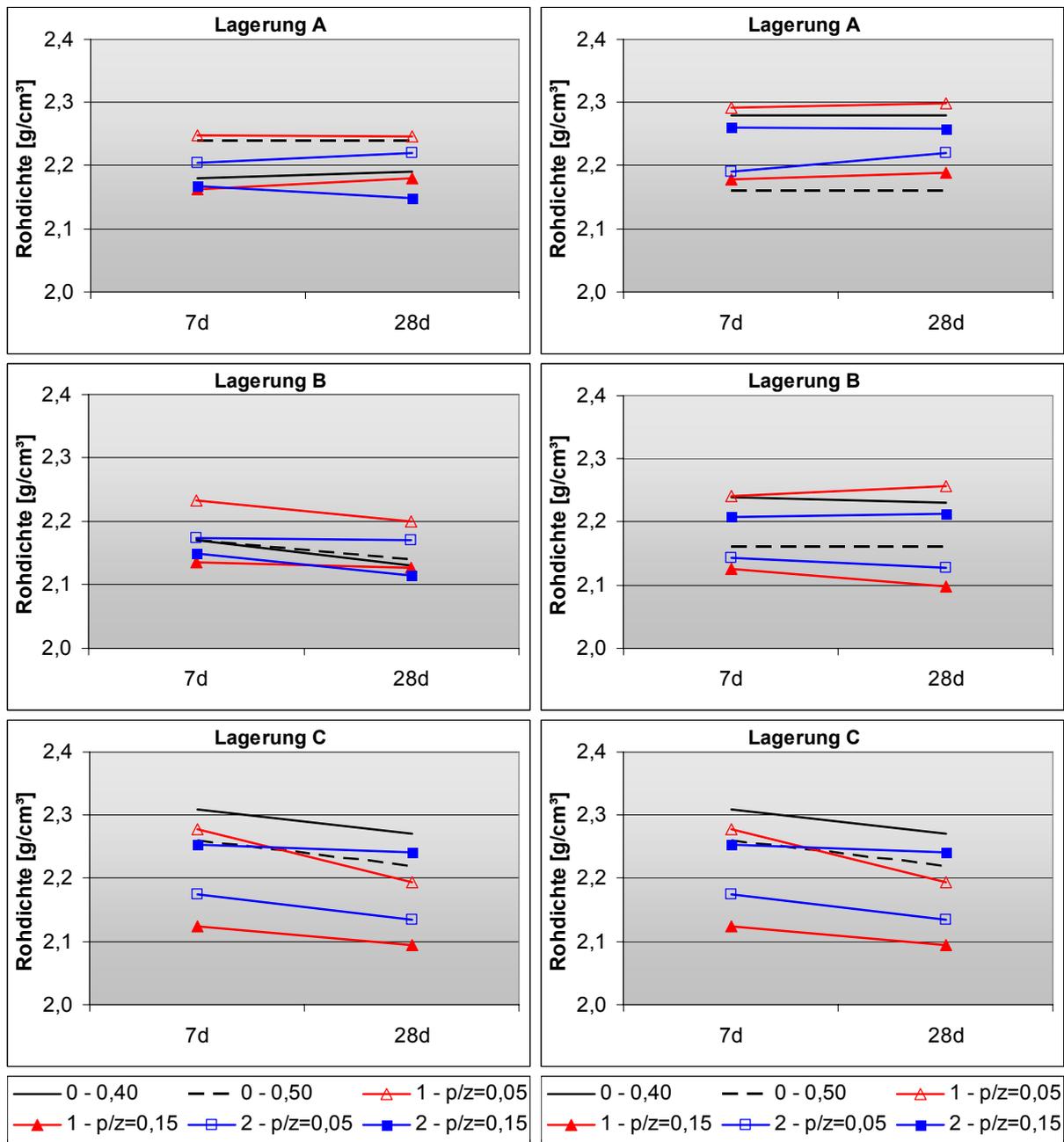


Abb. 2-5: Rohdichten CEM I – Mörtel

Abb. 2-6: Rohdichten CEM III/A – Mörtel

Die Auswertung der Biegezugfestigkeiten (Abb. 2-7; Abb. 2-8) zeigt dagegen einen deutlicheren Einfluss der verwendeten Kunststoffe. Die in der Literatur häufig zu findenden Aussagen, dass die Biegezugfestigkeit durch den Einsatz thermoplastischer Kunststoffe zu steigern ist (z. B. [1][6][10]), konnte auch hier bestätigt werden. Allerdings ist die Höhe der Steigerung sehr von den Lagerungsbedingungen, also letztlich den Erhärtungsbedingungen für den Zementstein und den Filmbildungsbedingungen für die Kunststoffe, abhängig.

Bei der Nasslagerung (Lagerung A) sind die Hydratationsbedingungen für den Zement ideal. Für die Entwicklung zugfester Filme der thermoplastischen Kunststoffe dagegen sind diese Bedingungen jedoch eher sehr schlecht. Folglich hängen die Festigkeitseigenschaften bei dieser Lagerung im Wesentlichen vom Zementstein ab. So war zu erwarten, dass die Biegezugfestigkeit durch die Kunststoffe kaum gesteigert werden würde. Dies konnte sowohl für den CEM I als auch für den CEM III/A bestätigt werden. Es sind keine signifikanten Unterschiede in den Biegezugfestigkeiten der unmodifizierten und der kunststoffmodifizierten Rezepturen zu erkennen. Auch der Erhärtungsverlauf wurde bei der Lagerung A nicht beeinflusst.

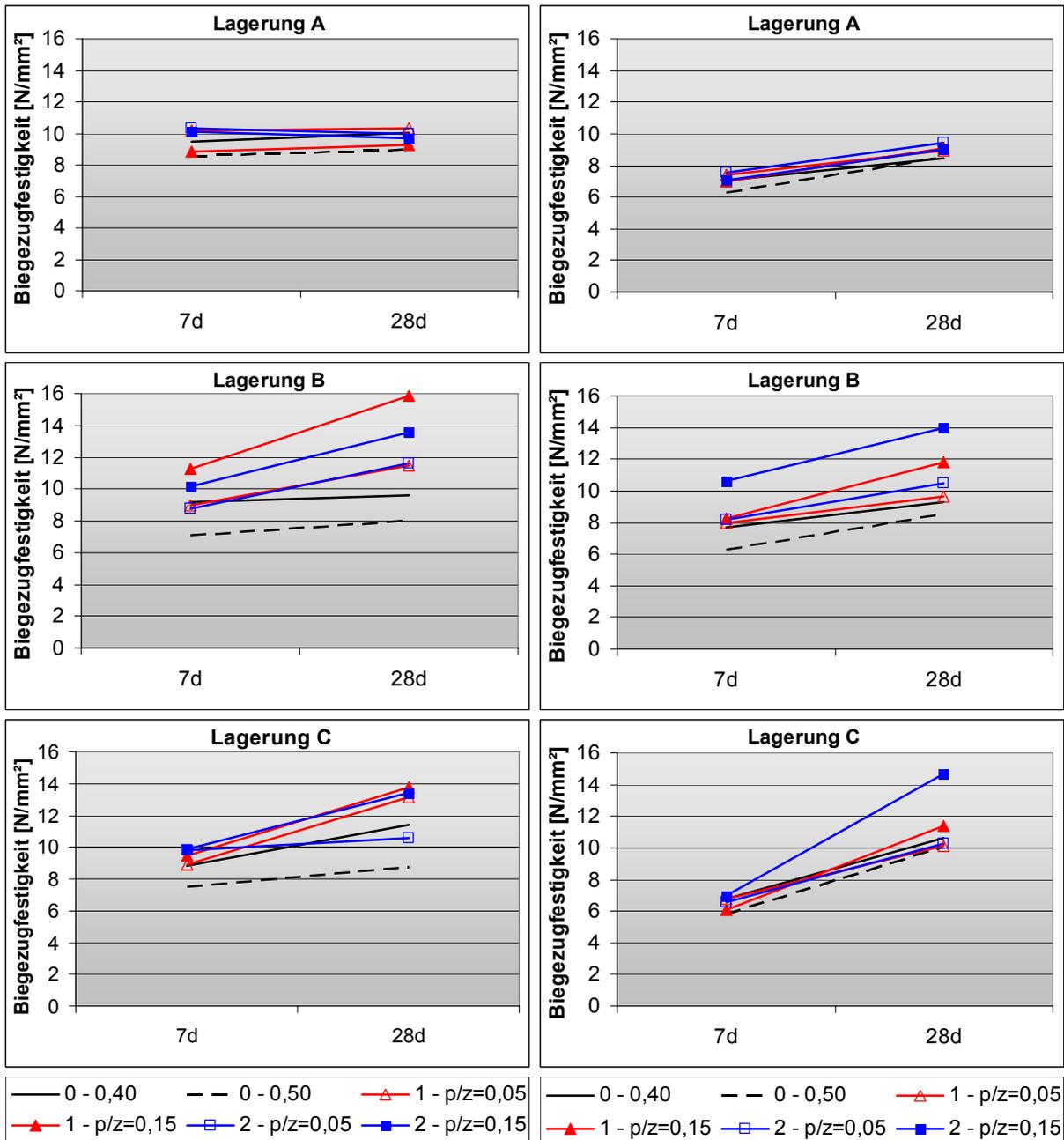


Abb. 2-7: Biegezugfestigkeiten CEM I – Mörtel **Abb. 2-8: Biegezugfestigkeiten CEM III/A – Mörtel**
Deutliche positive Auswirkungen der Kunststoffe sind bei der Lagerung B zu erkennen. Die Filmbildungsbedingungen sind zumindest für den KS 1 infolge der guten Austrocknungsbe-

dingungen zu einem frühen Zeitpunkt der Erhärtung sehr gut. Aber auch der KS 2 scheint von dieser Lagerungsart zu profitieren. Die Hydratation des Zementes wird eigentlich negativ beeinflusst, da der Zement praktisch „verdurstet“. Bei den CEM I-Rezepturen ist dies auch tendenziell zu beobachten, bei den CEM III-Rezepturen scheint dies aber keine Rolle zu spielen. Durch die Kunststoffmodifikationen sind jedoch ausnahmslos Verbesserungen zur reinen Wasserlagerung festzustellen. Bis zum 7. Tag sind die Steigerungen noch gering. Nach 28 Tagen jedoch betragen die Biegezugfestigkeiten teilweise mehr als 150 % der unmodifizierten Vergleichsproben. Weiterhin zeigt sich, dass mit steigendem Kunststoffgehalt auch die Biegezugfestigkeit steigt.

Der Erhärtungsverlauf vom 7. bis zum 28. Tag wird ebenfalls beeinflusst. Insbesondere bei den kunststoffmodifizierten CEM I - Mörteln ist ein tendenziell höherer Festigkeitsanstieg zu beobachten, als bei den unmodifizierten Rezepturen. Für die CEM III/A - Mörtel sind diese Tendenzen nur für die PCC mit hohem p/z-Wert zu erkennen. Wahrscheinlich ist dies auf das höhere Wasserrückhaltevermögen der kunststoffmodifizierten Mörtel in Verbindung mit der geringeren Kapillarporosität, die sich auf Grund des niedrigen w/z-Wertes einstellt, zurückzuführen. Dadurch sind die Hydratationsbedingungen für den Zement der modifizierten Rezepturen besser und es werden zusätzliche Festigkeitsreserven im Zementstein gebildet. Die Lagerung C bietet am Anfang gute Hydratationsbedingungen für den Zement. In der anschließenden Trockenlagerung soll dem Kunststoff die Möglichkeit gegeben werden, austrocknen und zu verfilmen [12]. Wie jedoch in der Literatur zu finden ist [61], erfolgt die Formierung der Filme in der Mörtelmatrix bereits sehr früh. Nach Konietzko [11] ist eine spätere Nachverfilmung nur bei deutlichem Überschreiten der MFT möglich. Es müsste also davon ausgegangen werden, dass es kaum positive Effekte durch die spätere Austrocknungsmöglichkeit geben wird. Tatsächlich kann die Biegezugfestigkeit bei der Lagerung C nur beim CEM I mit KS 1 und beiden p/z-Werten und mit KS 2 bei hohem p/z-Wert sowie beim CEM III/A mit KS 2 und hohem p/z-Wert signifikant gesteigert werden. Dies zeigt, dass trotz gegenteiliger Vermutungen auch spätere Trocknungseffekte durchaus zur Festigkeitssteigerung kunststoffmodifizierter Mörtel beitragen.

Ein weiterer bisher nicht betrachteter Aspekt ist die Tatsache, dass der KS 2 aufgrund seiner MFT von 30 °C eigentlich keine zugfesten Filme gebildet haben kann. Die Festigkeitsuntersuchungen wurden alle im Laborklima bei 20 °C durchgeführt. Trotzdem treten bei dem höheren p/z-Wert und da insbesondere beim CEM III/A enorme Steigerungen der Biegezugfestigkeiten auf. Dies kann mit der im Abschnitt 5.5 näher erläuterten Steigerung der spezifischen Adhäsion der modifizierten Zementsteinmatrix zur Gesteinskörnung, also letztlich mit der Steigerung der Kohäsion im Mörtel erklärt werden.

Zahlreiche Literaturangaben belegen, dass die Druckfestigkeit von Mörteln durch eine Kunststoffzugabe kaum bzw. geringfügig negativ beeinflusst wird [6][10][13]. Diese Aussagen können bestätigt werden. Bei CEM I - Mörteln gleicher Verarbeitbarkeit und gleichen w/z-Wertes ist kein Einfluss einer Kunststoffmodifikation feststellbar. Dabei ist es unerheblich, wie die Proben gelagert wurden. Die CEM III/A - Mörtel zeigen dagegen tendenziell eine Reduzierung der Druckfestigkeit um bis zu 40 % nach 28 Tagen. Eine besonders niedrige Druckfestigkeit im Vergleich zur nicht modifizierten Vergleichsmischung hat der PCC 1 mit einem p/z-Wert von 0,15. Dies ist im Wesentlichen auf die hohe Porosität infolge der schäu-

menden Wirkung des KS 1 zurückzuführen. Durch die zahlreichen Poren wird der Lastabtrag im Gefüge gestört und es kommt zu einem früheren Versagen.

Der Vergleich der Festmörteleigenschaften zeigt, dass der wesentliche Einfluss einer Kunststoffmodifikation die Steigerung der Biegezugfestigkeit ist. Voraussetzung ist jedoch, dass die Austrocknungsbedingungen für die Kunststoffe gegeben sind. Der Einfluss auf Rohdichte und Druckfestigkeit ist dagegen gering und kann mit geeigneten betontechnologischen Mitteln noch reduziert werden.

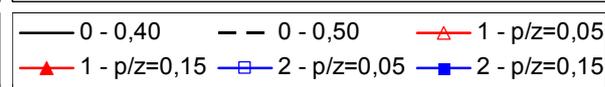
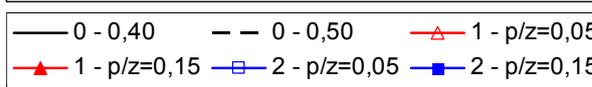
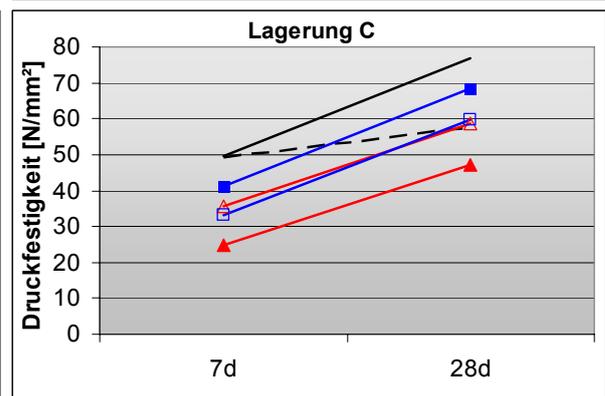
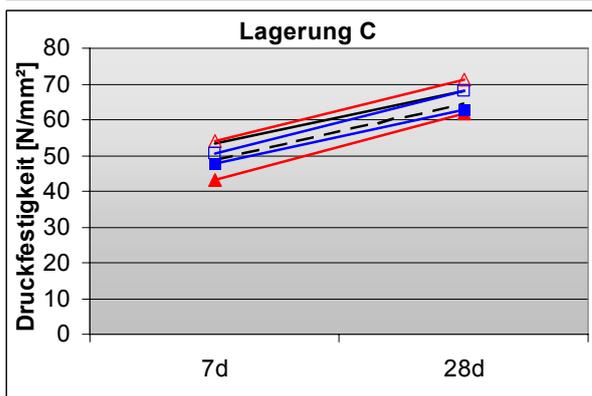
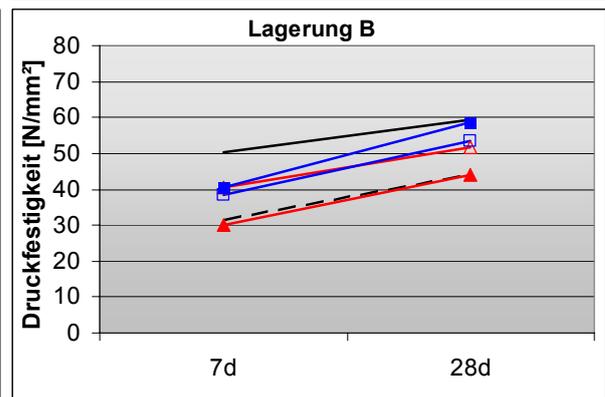
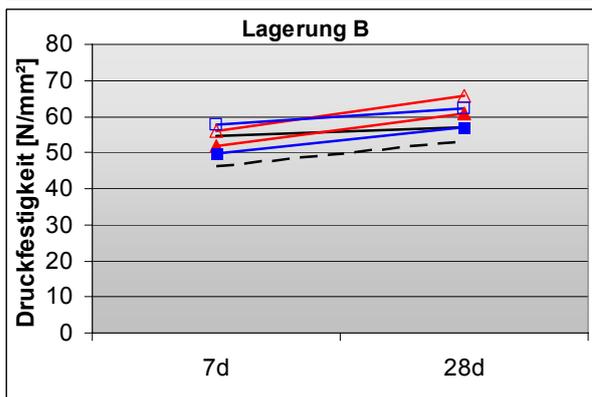
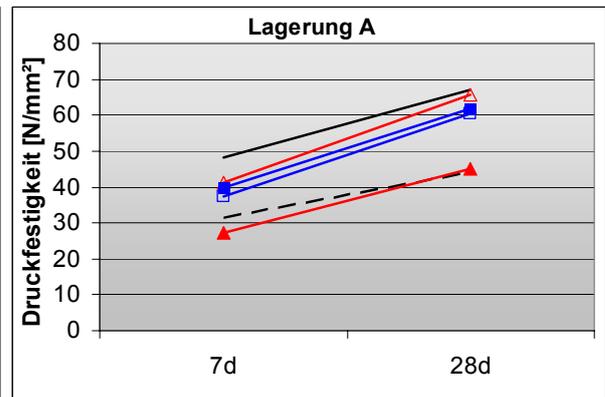
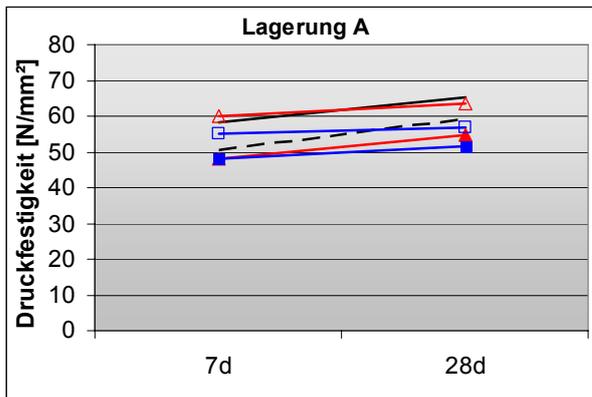


Abb. 2-9: Druckfestigkeiten CEM I – Mörtel

Abb. 2-10: Druckfestigkeiten CEM III/A – Mörtel

Betonrezepturen:

Für die Charakterisierung der Betonrezepturen wurden ebenfalls die Rohdichte sowie die Biegezug- und Druckfestigkeiten bestimmt. Da für diese Rezepturen ein Zement niedrigerer Festigkeitsklasse verwendet wurde, war es sinnvoll, den Erhärtungsverlauf zu späteren Prüfzeitpunkten zu charakterisieren. Die Kennwerte wurden nach 28 und 90 Tagen bestimmt. Zusätzlich wurden die Zugfestigkeit, die Reindichte, der statische Elastizitätsmodul, der Hydratationsgrad und die die Gesamtporosität berechnet (Tab. 2-7).

Die Reduzierung der Rohdichte der PCC im Vergleich zur unmodifizierten Betonmischung ist signifikant. Wie auch an der niedrigeren Reindichte zu erkennen, ist der wesentliche Grund dafür die geringere Dichte der Kunststoffe. Für den PCC 1 ist zusätzlich die hohe Porosität infolge der schäumenden Wirkung des Kunststoffes dafür verantwortlich, was sich in der Gesamtporosität widerspiegelt.

Tab. 2-7: Festbetonkennwerte

			ohne KS	PCC 1	PCC 2
Rohdichte		[g/cm³]	2,45	2,29	2,37
Reindichte		[g/cm³]	2,71	2,62	2,62
Gesamtporosität (berechnet)		[Vol-%]	9,61	12,83	9,66
statischer E-Modul		[N/mm²]	35700	21900	28200
Druckfestigkeit	28 d	[N/mm²]	37	26	33
	90 d	[N/mm²]	48	40	43
Zugfestigkeit	28 d	[N/mm²]	2,7	4,0	3,9
	90 d	[N/mm²]	3,4	5,9	6,4
Biegezugfestigkeit	28 d	[N/mm²]	4,4	6,9	4,8
	90 d	[N/mm²]	5,9	8,4	7,4
Hydratationsgrad	28 d	[%]	75,9	72,9	71,0
	90 d	[%]	79,7	77,2	72,6

Der statische E-Modul der PCC ist ebenfalls geringer als der der Vergleichsmischung. Dies ist eindeutig auf die Kunststoffe zurückzuführen und zeichnete sich bereits bei dem Vergleich der Rohdichten ab.

Bei der Gegenüberstellung der Festigkeiten zeigt sich ein ähnliches Bild wie bei den Mörteln. Zug- und Biegezugfestigkeit der PCC sind wesentlich höher als die der unmodifizierten Mischung. Zum einen bilden die Kunststofffilme statisch günstige Gerüstformationen in der Betonmatrix, welche bei Zugbeanspruchung aussteifend wirken und so den wenig zugfesten Beton stützen. Zum anderen wirken adhäsive Kräfte der Kunststoffpartikel insbesondere in der Kontaktzone zwischen Zementstein und Gesteinskörnung. Diese Zone stellt bei normalfesten Betonen die Schwachstelle bei Zugbelastungen dar. Infolge der Kunststoffe ist diese

Zone vermutlich dichter, was auf das Ausfüllen von Zwischenräumen mit Kunststoffpartikeln und dem Einfluss auf die Ausbildung der CSH-Phasen, welche kürzer sind, zurückzuführen ist. Dadurch können höhere Zugkräfte übertragen werden.

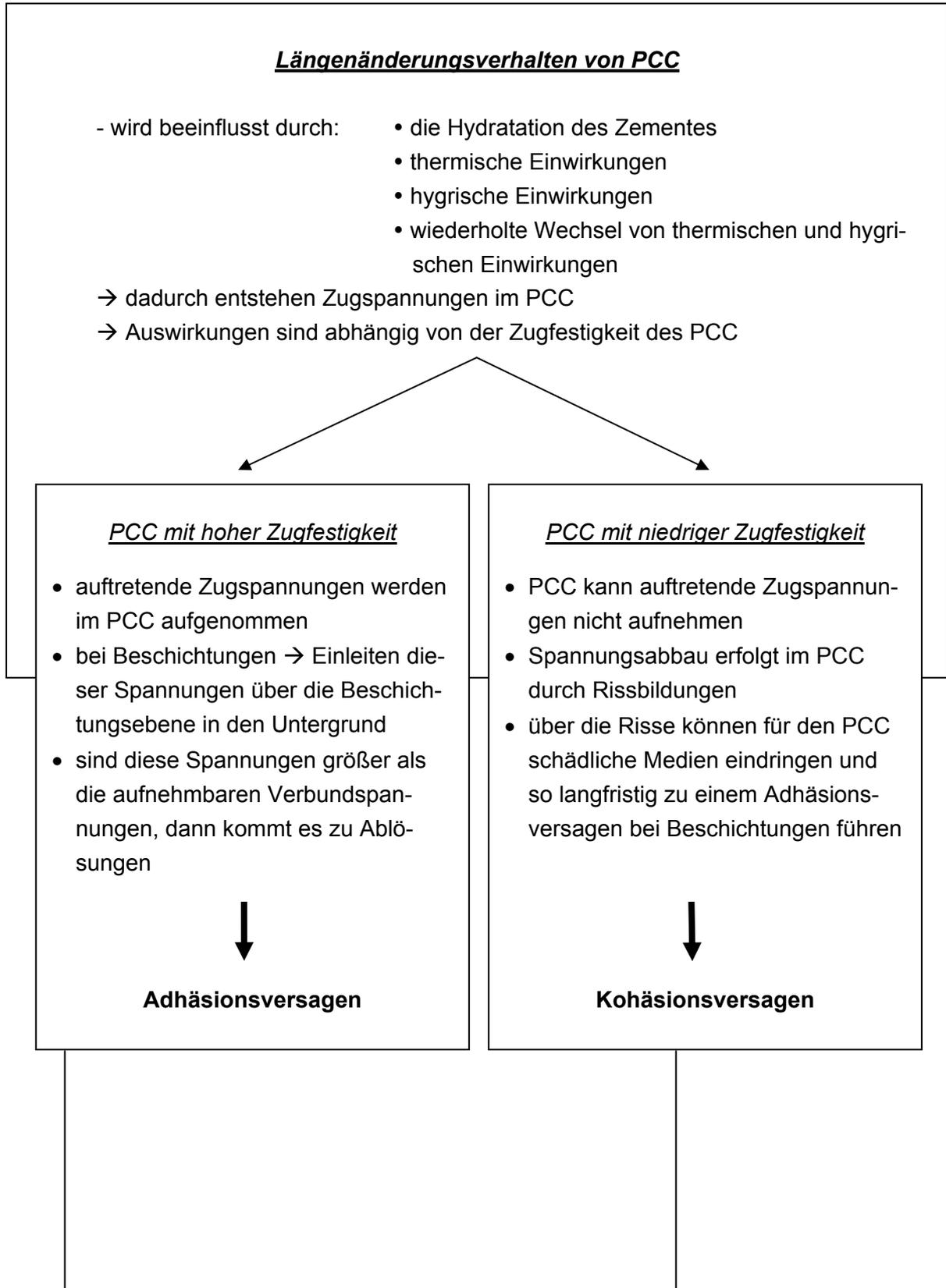
Die Druckfestigkeiten der PCC dagegen sind geringfügig niedriger. Dies ist beim PCC 1 im Wesentlichen auf die erhöhte Porosität zurückzuführen. Der PCC 2 weist jedoch die gleiche Porosität wie die Vergleichsmischung auf. Hier ist der Effekt wahrscheinlich auf den geringeren Hydratationsgrad zurückzuführen.

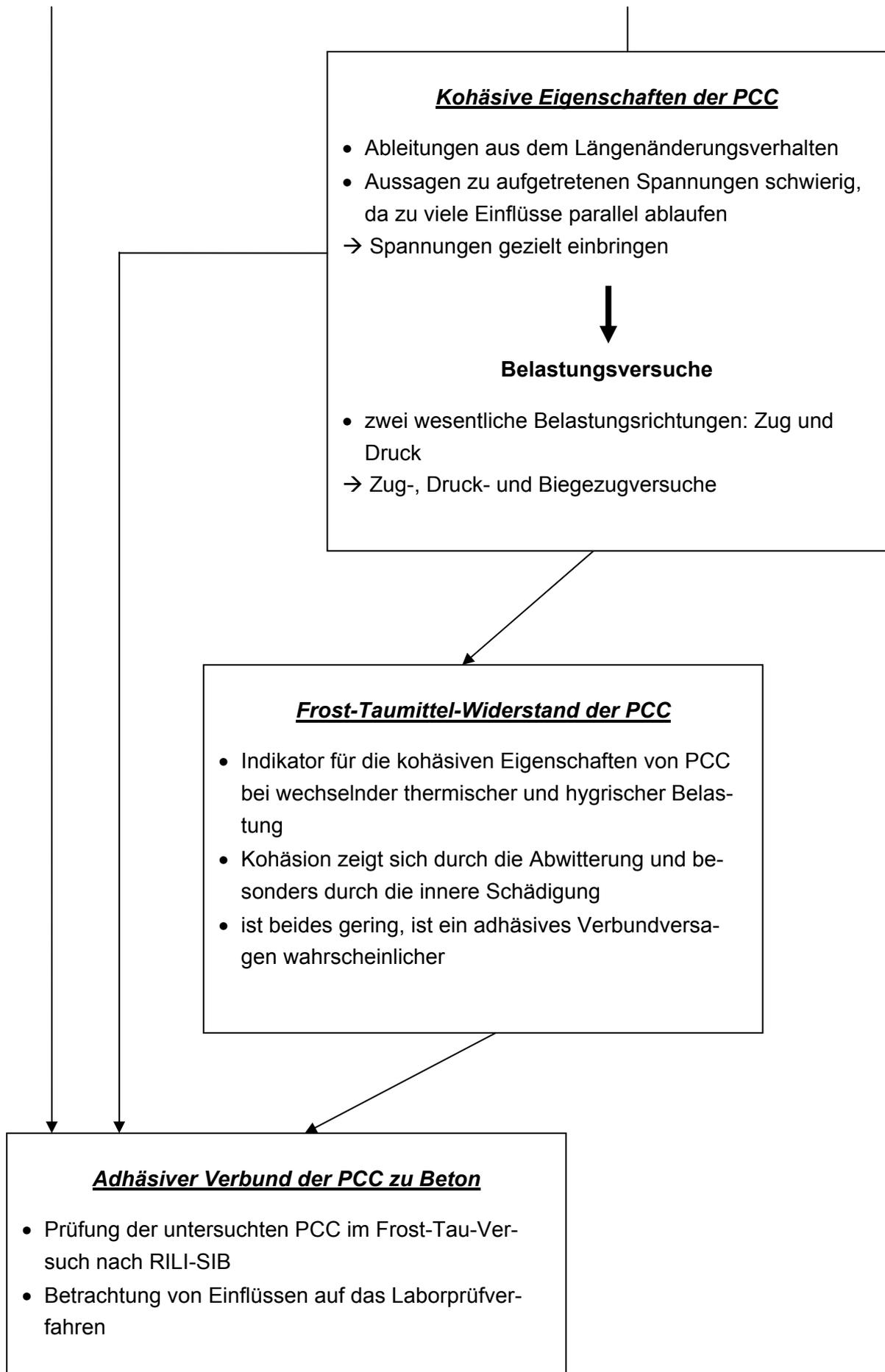
Der Vergleich der Hydratationsgrade zeigt, dass die Hydratation des Zementes durch die Kunststoffe negativ beeinflusst wird. Besonders beim PCC 2 kann auch nach 90 Tagen der anfängliche Hydratationsrückstand zur unmodifizierten Mischung nicht aufgeholt werden. Die Gründe dafür sind bereits im frühen Stadium der Erhärtung zu suchen. Beim PCC 1 ist dagegen ein ähnlicher Hydratationsfortschritt wie bei der Vergleichsmischung zu erkennen, wenn auch der Hydratationsgrad etwas zurückbleibt.

Es ist also auch für die Betonrezepturen festzustellen, dass sich der wesentliche Einfluss einer Kunststoffmodifikation in der Steigerung der Zug- und Biegezugfestigkeit auswirkt. Daneben ist ein weiterer deutlicher Einfluss auf den statischen E-Modul zu erkennen, der infolge der Kunststoffe gesenkt wird. Die ebenfalls deutliche Beeinflussung der Rohdichte ist bei diesen Rezepturen darauf zurückzuführen, dass es sich nicht um verarbeitungstechnisch optimierte Rezepturen handelt, sondern der Kunststoff lediglich als zusätzliche Komponente zugefügt wurde. Es ist anzunehmen, dass ähnlich den Mörtelrezepturen bei Einstellung einer gleichen Verarbeitbarkeit unter Ausnutzung der verflüssigenden Wirkung der Kunststoffe dieser Einfluss weit weniger deutlich ausfällt.

3 Untersuchungsschwerpunkte

Der Zusammenhang der wesentlichen Untersuchungsschwerpunkte soll am folgenden Organigramm verdeutlicht werden:





4 Längenänderungsverhalten kunststoffmodifizierter Zementsteine und PCC

4.1 Literaturübersicht

Zur Beschreibung des Längenänderungsverhaltens von zementgebundenen Baustoffen wird in der allgemeinen Literatur i. d. R. (u. a. [14][15]) der Begriff des „Schwindens“ verwendet. Dieser Vorgang beschreibt die Volumenverringerung dieser Baustoffe während der Erhärtung. Das Quellen hingegen wird selten beschrieben, da es i. Allg. nur bei Sonderbaustoffen, wie z. B. Quellzementen, von Bedeutung zu sein scheint. Eine Volumenvergrößerung kann jedoch auch infolge Wasseraufnahme, etwa durch Erhöhung der Luftfeuchtigkeit oder durch Temperaturerhöhung zu Stande kommen. Vielmehr unterliegt ein eingebauter Mörtel oder Beton tages- und jahreszeitlichen Klimaschwankungen, die zu einem ständig wechselnden Volumen führen.

Das Schwinden von zementgebundenen Baustoffen ist ein natürlicher Vorgang, der in vier Wirkmechanismen unterschieden werden kann (u. a. [12][13][54][73]):

- Frühschwinden (auch plastisches oder Kapillarschwinden)
Das Frühschwinden ist ein irreversibler Vorgang von baupraktischer Bedeutung. Auslösender Faktor ist das ungehinderte Abtrocknen des oberflächlichen Wassers des Mörtels/Betons in der frühen Phase der Erhärtung. In den entstehenden Porenräumen bilden sich Menisken aus. Der dadurch auftretende kapillare Unterdruck verursacht ein Verschieben von Feinstbestandteilen (Mehlkörnern, Zementpartikeln) und damit eine Volumenverringerung in der Oberflächenschicht. Dies führt zu Kapillarschwindrissen an der Oberfläche. Des Weiteren steht nicht mehr genügend Wasser für einen ausreichenden Hydratationsgrad der Oberflächenschicht zur Verfügung. So wird langfristig die Dauerhaftigkeit des Mörtels/Betons verringert. Eine wirksame Reduzierung des Frühschwindens lässt sich durch eine ausreichend lange und richtige Nachbehandlung, etwa durch Abdecken des frischen Mörtels/Betons oder dem längeren Belassen in der Schalung, realisieren.
- Trocknungsschwinden
Das Trocknungsschwinden beruht auf der Abgabe des Überschusswassers, also das weder chemisch noch physikalisch gebunden ist. Über die Zeit stellt sich ein Gleichgewicht der relativen Umgebungsfeuchte und der Mörtel-/Betonfeuchte ein, wobei sich über die Dicke des Bauteils zusätzlich ein Feuchtegradient ausbildet. Das Trocknungsschwinden des Betons steigt mit:
 - abnehmender relativer Umgebungsfeuchte
 - zunehmender Umgebungstemperatur
 - zunehmendem w/z-Wert

- zunehmendem Verhältnis von Oberfläche / Volumen
- zunehmender Mahlfeinheit des Zementes (zunehmendem Mehlkornanteil)
- sinkendem Alter bei Trocknungsbeginn

Um einem verstärkten Trocknungsschwinden entgegenzuwirken, ist eine gute Nachbehandlung unabdingbar.

- Hydratationsschwinden (auch chemisches oder Erhärtungsschwinden)
Das Hydratationsschwinden findet verstärkt in den ersten Tagen der Erhärtung statt. Die entstehenden Hydratationsprodukte des Zementes haben ein geringeres Volumen als die Ausgangsstoffe Zement und Wasser. Ursache dafür ist, dass ca. 25 % des chemisch gebundenen Wassers für das Volumen des entstehenden Zementsteines nicht wirksam werden. Infolge dessen kommt es zur Volumenkontraktion. Dem Hydratationsschwinden kann bei Verwendung normaler Zemente nicht entgegengewirkt werden.
- Carbonatisierungsschwinden
Auslöser für das Carbonatisierungsschwinden ist das Eindringen von Kohlendioxid (CO_2) aus der Umgebungsluft in die Mörtel-/Betonoberfläche. Dort kommt es zur Reaktion des CO_2 mit dem Calciumhydroxid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) in der Porenlösung und es bildet sich schwer lösliches Calciumcarbonat (CaCO_3). Das Volumen des gebildeten CaCO_3 ist geringer als das der Ausgangsstoffe. Die dadurch entstehenden Zugspannungen im Zementstein führen dazu, dass bestehende Schwindrisse aufgeweitet werden oder neue entstehen können. Das Carbonatisierungsschwinden ist i. d. R. auf die Mörtel-/Betonoberfläche beschränkt. Es nimmt zu mit steigendem CO_2 -Gehalt der Umgebungsluft und steigender Kapillarporosität der Mörtel-/Betonoberfläche, z. B. infolge höheren w/z-Wertes oder schlechter Nachbehandlung. Eine dichte Oberfläche reduziert das Risiko des Carbonatisierungsschwindens.

In den einschlägigen deutschen Regelwerken wird auf die Bestimmung der Längenänderung zementgebundener Baustoffe an mehreren Stellen eingegangen. In DIN 52450 [R5] und DIN EN 12617-4 [R6] wird die Vorgehensweise zur Ermittlung des Quellens und Schwindens von Baustoffen erläutert. Dabei wird ein Messen der Längenänderung bis zum 28. Tag (DIN 52450) vorgeschlagen bzw. bis zum 56. Tag (DIN EN 12617-4) vorgeschrieben. In der RILI-SIB 2001, Teil 4 [R7] ist für Zementmörtel und kunststoffmodifizierte Instandsetzungsbetone / -mörtel die Prüfung des Quellens und Schwindens nur noch bis zum 28. Tag vorgeschrieben, was als kritisch zu beurteilen ist. Nach der früheren Version der RILI-SIB 1992, Teil 4 [R8] waren diese Prüfungen noch bis zum 90. Tag durchzuführen. Allerdings entfiel die Bestimmung des Quellens für reine Zementmörtel. Wie in eigenen Untersuchungen festgestellt werden konnte [E2], ist die Zunahme des Schwindmaßes zwischen dem 28. und 90. Tag teilweise beträchtlich. Rezepturen, welche den Grenzwert für die maximal zulässige Längenänderung nach 28 Tagen aus [R7] einhielten ($\epsilon_{Q,28} = 0,30 \text{ ‰}$; $\epsilon_{S,28} = 0,90 \text{ ‰}$), überschritten den

alten Grenzwert aus [R8] nach 90 Tagen ($\epsilon_{Q,90} = 0,30 \text{ ‰}$; $\epsilon_{S,90} = 1,20 \text{ ‰}$) teilweise erheblich. Das langfristige Versagen einer etwaigen Beschichtung mit einer solchen Rezeptur ist dann sehr wahrscheinlich. Die ZTV-ING [R9] bezieht sich im Teil 3.4 auf die TP BE-PCC [R10], in welcher ebenfalls die Bestimmung des Quellens und Schwindens von PCC bis zum 90. Tag vorgeschrieben wird. Als Grenzwerte sind dabei die gleichen wie in [R8] festgelegt.

Die Bestimmung der thermischen Längenänderung zementgebundener Baustoffe findet in der DIN-Normung als auch in der RILI-SIB 2001 keine Beachtung. In RILI-SIB 1992, Teil 4 und auch in den TP BE-PCC ist jedoch ein Verfahren zur Bestimmung des Wärmeausdehnungskoeffizienten bzw. zur Bestimmung der thermischen Dehnung beschrieben. In den TL BE-PCC [R11] ist als Grenzwert für die Grundprüfung eine thermische Dehnung von maximal $15 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ festgelegt.

Wie bereits in der Einleitung erwähnt, finden sich in der Literatur widersprüchliche Angaben zum Einfluss einer Kunststoffmodifikation auf das Längenänderungsverhalten von PCC. Während einige, insbesondere ältere Quellen ein Reduzieren der Schwindneigung propagieren, wird in anderen Literaturquellen von gegenteiligen Beobachtungen berichtet.

KAWAKAMI ET AL. untersuchten in [16] die Längenänderung und die Spannungen im frühen Alter kunststoffmodifizierter SBR-, EVA- und AC-Mörtel. Ihre Untersuchungen zeigten, dass der Mörtel mit dem Kunststoff mit der geringsten MFT (EVA, MFT = 0 °C) die höchsten Verformungen aufwies. Der Einfluss des p/z-Wertes wurde am SBR-modifizierten Mörtel untersucht. Im Ergebnis der Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass bei steigendem Kunststoffgehalt bis 10 % ein Anstieg des Verhältnisses der Längenänderung zwischen 3 und 28 Tagen um mehr als das Doppelte zu verzeichnen war.

Ähnliches fanden MANGAT und LIMBACHIYA [17]. Ihre Untersuchungen an Reparaturmörteln beinhalteten auch ein AC-modifiziertes System, welches das höchste Schwindmaß aufwies. Bei der Betrachtung des Einflusses der relativen Luftfeuchte und der Exposition stellten sie fest, dass die Schwindmaße bei sinkender Luftfeuchte zu und bei Wasserlagerung abnahmen. Der wesentliche Teil des Schwindens fand bei allen drei untersuchten Mörteln in den ersten drei Wochen statt. Danach stiegen die Schwindwerte nur noch unwesentlich.

Zu ähnlichen Ergebnisse kommt auch Dimmig [6]. Sie stellte bei Untersuchungen an PCC, welche u. a. mit Styrol-Acrylat-Copolymeren modifiziert waren, fest, dass bei einem p/z-Wert von 0,15 das Schwinden gegenüber den mit einem p/z-Wert von 0,05 modifizierten PCC deutlich höher war.

In [18] stellten SASSE, BRAMESHUBER und RÖBLER ihre Ergebnisse zu Untersuchungen an PCC zum Einfluss unterschiedlicher Prüfkimate auf das Schwinden und die Festigkeit vor. Sie untersuchten vier handelsübliche PCC für die Instandsetzung von Beton und verglichen diese mit einem nicht modifizierten Mörtel. Die eingesetzten Kunststoffe waren eine SB-Dispersion, 2 S-AY-Pulver und eine AY-Dispersion. Die Mörtelproben wurden bei vier verschiedenen Luftfeuchten gelagert (44 %, 55 %, 65 %, 71 %). Der Einfluss der Temperatur wurde als sehr gering betrachtet und vernachlässigt. Es wurden das Schwinden und die Druck- und Biegezugfestigkeiten bis 180 Tage bestimmt. Im Ergebnis wurde festgestellt, dass der AY- und ein S-AY-modifizierter Mörtel ein wesentlich höheres Schwindmaß aufwiesen, als der Vergleichsmörtel. Die anderen beiden PCC unterschieden sich kaum von der

Vergleichsmischung. Das Fazit war, dass sich das Schwindmaß nach 180 Tagen erhöht, wenn die Luftfeuchtigkeit sinkt. Das Endschwindmaß wurde bei niedrigerer Luftfeuchtigkeit früher erreicht. Die Biegezugfestigkeit wurde durch die Kunststoffe ausnahmslos gesteigert. Auch Dimmig bestätigte das erhöhte Schwinden bei trocken und gemischt gelagerten kunststoffmodifizierten Mörteln [6]. Sie stellte ebenfalls fest, dass gleiche Kunststoffe das Schwinden in Abhängigkeit vom verwendeten Zement unterschiedlich stark beeinflussen. In eigenen Untersuchungen konnte dies bestätigt werden [E2].

DOGAN und SENGUL [19] konnten bei ihren Untersuchungen das Gegenteil feststellen. Die untersuchten SBR- und AC-modifizierten Betone wiesen nach 90 Tagen ein deutlich geringeres Schwindmaß auf, als der nicht modifizierte Vergleichsbeton.

FREUND UND EYßLER [20] führten diese Wirkungen ganz allgemein auf die Verbesserung der Verarbeitbarkeit, die Einsparung von Anmachwasser und daraus resultierend einer Senkung des w/z-Wertes infolge einer Kunststoffmodifikation zurück.

In [21] stellte MAULTZSCH Eignungsprüfungen an kunststoffmodifiziertem Beton vor. Er schlussfolgerte, dass dem Schwinden im Frühstadium der Erhärtung mehr Beachtung geschenkt werden sollte und dass konventionelle Mörtel- und Betonprüfungen zur Beschreibung des Schwindverhaltens kunststoffmodifizierter Systeme nicht immer ausreichend sind. Weiterhin führte er aus, dass die Besonderheiten des Gefüges der PCC einen stark erhöhten Ausdehnungskoeffizienten zur Folge haben, was letztlich in erhöhten Spannungen im PCC resultiert.

Nach [10] nimmt ein relativ hoher Kunststoffgehalt von 15 % bezogen auf den Zementanteil selbst bei hohen Zementgehalten nur etwa 5 – 7 % des Mörtel- bzw. Betonvolumens ein. Daher wird die thermische Längenänderung auch bei PCC vorrangig von der Gesteinskörnung und dem Zementstein bestimmt. Werte von weniger als $14 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ sind die Regel. Zusammenfassend lässt sich ableiten, dass in Abhängigkeit von der verwendeten Kunststoffart, der Rezepturzusammensetzung sowie den Lagerungs- und Prüfbedingungen zwangsläufig diese widersprüchlichen Aussagen zustande kommen müssen. Abhängig von den gewählten Randbedingungen können so Einzelergebnisse sowohl positive als auch negative Auswirkungen der Kunststoffmodifikationen widerspiegeln. Die Vergleichbarkeit der verschiedenen Ergebnisse wird dadurch deutlich erschwert bzw. ist gar nicht möglich. Es ist daher zwingend erforderlich, die Versuchsbedingungen zu kennen, um die sinnvolle Vergleichbarkeit verschiedener Untersuchungen einschätzen zu können.

4.2 Bestimmung des Quellens und Schwindens an PCC nach DIN 52450

Die Bestimmung des Quellens und Schwindens wurde an PCC-Mörtelprismen mit Messzapfen Typ 1 nach DIN 52450 bis zum 90. Tag durchgeführt. Die Lagerung der Probekörper erfolgte wie in Abschnitt 2.2.2 beschrieben. Es wurden die Längenänderungen in Promille (gleichzusetzen mit mm/m) sowie die Masseänderungen in Prozent bestimmt. Die Ergebnisse sind in den Abb. 4-1 bis Abb. 4-4 dargestellt.

Die in [R7] festgelegten Grenzwerte für die Längenänderung von 0,9 mm/m Schwinden bzw. 0,3 mm/m Quellen nach 28 Tagen wurden lediglich von zwei Rezepturen überschritten (CEM

I, PCC 1, p/z=0,15, Lagerung B und CEM III, PCC 2, p/z=0,15, Lagerung A). Dahingegen wurden die Grenzwerte von 1,2 mm/m nach [R8] und [R10] nach 90 Tagen von mehreren Rezepturen teilweise deutlich überschritten. Insbesondere die Trockenlagerung (Lagerung B), die für den Zementstein die schlechtesten Hydratationsbedingungen darstellt, sorgte bei den PCC mit hohem, aber auch mit niedrigem p/z-Wert für ein enormes Schwinden. Bei den meisten Rezepturen war das Endschwindmaß nach 90 Tagen noch nicht erreicht. Dieses Ergebnis macht deutlich, dass die Ermittlung des Schwindens nur bis zum 28. Tag lediglich Anhaltswerte liefert. Generelle Aussagen zur Entwicklung des Schwindverhaltens und damit zu möglicherweise auftretenden Spannungen in den PCC sind damit jedoch nicht möglich. Für PCC ist es daher generell sinnvoll, das Schwinden mindestens bis zum 90 Tag zu ermitteln.

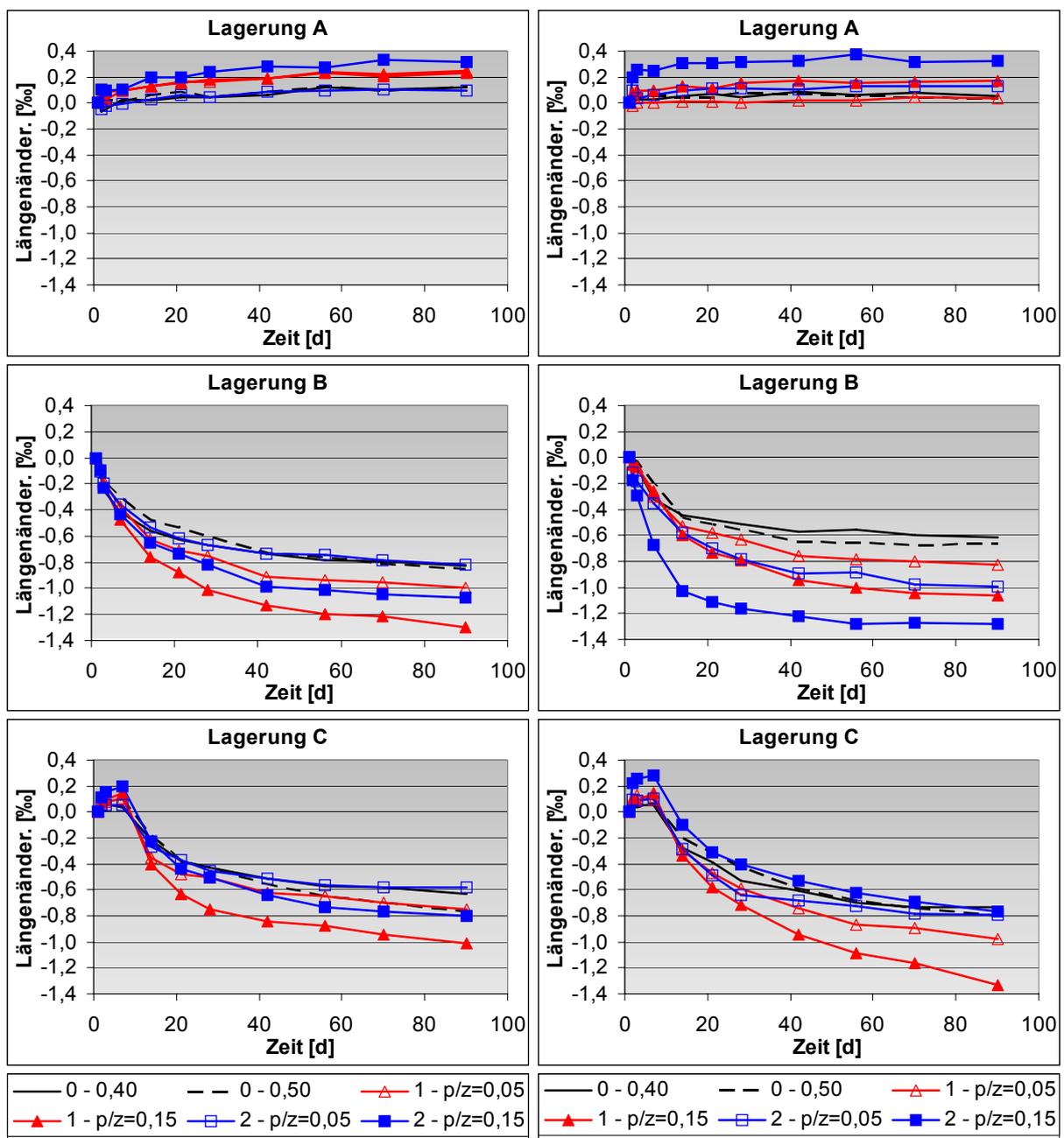


Abb. 4-1: Längenänderungen CEM I – Mörtel

Abb. 4-2: Längenänderungen CEM III/A - Mörtel

Beim Vergleich der einzelnen Rezepturen fällt auf, dass die beiden Vergleichsmischungen trotz des unterschiedlichen w/z-Wertes ein fast identisches Schwindverhalten aufweisen. Die sich nur im p/z-Verhältnis unterscheidenden PCC mit gleichem Kunststoff dagegen zeigen ein sehr unterschiedliches Schwindverhalten. Die PCC mit dem höheren p/z-Wert haben ein ausgeprägteres Längenänderungsverhalten als die gleichen PCC mit geringerem p/z-Wert.

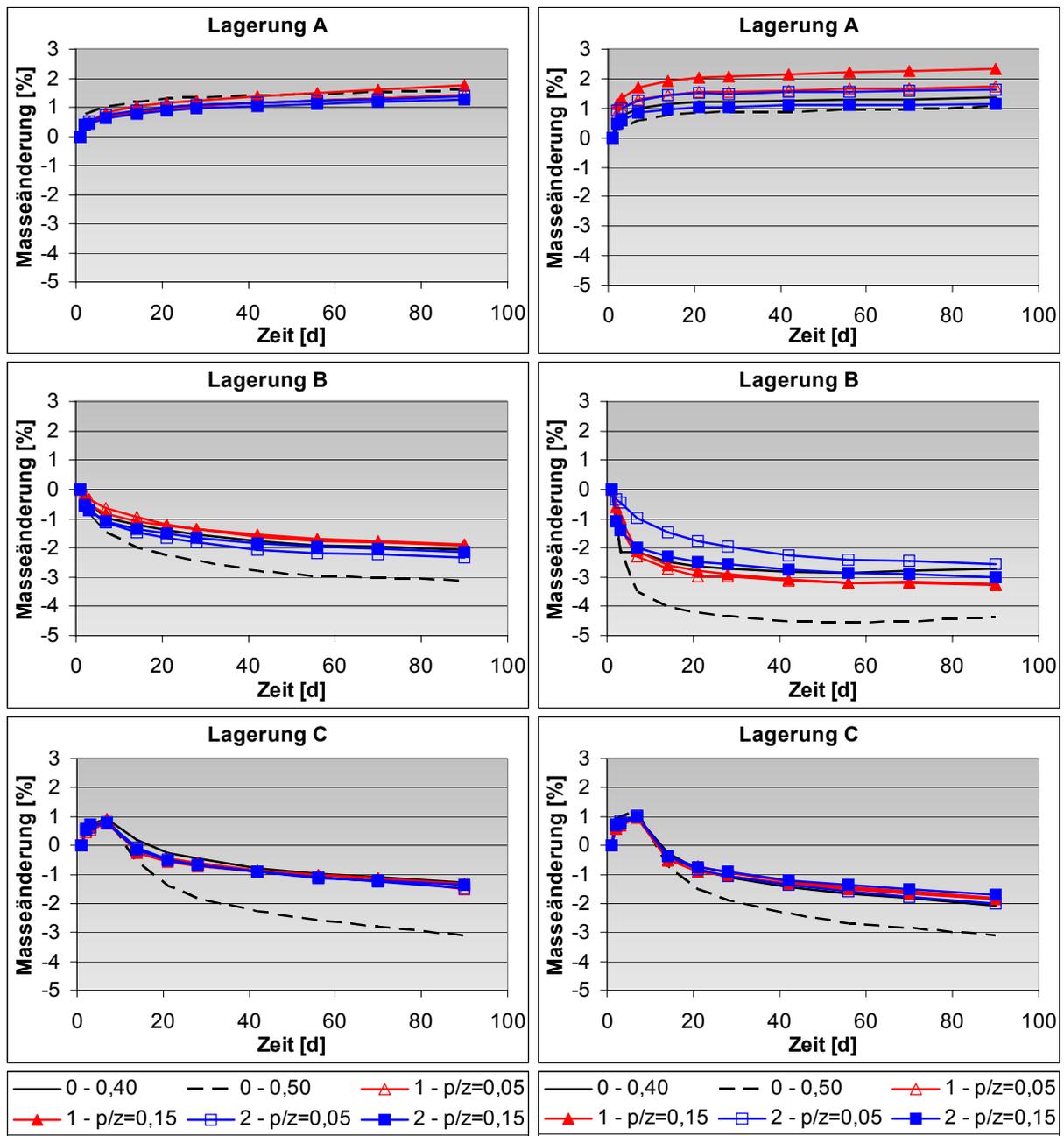


Abb. 4-3: Masseänderungen CEM I – Mörtel

Abb. 4-4: Masseänderungen CEM III/A - Mörtel

Der Vergleich der beiden verwendeten Zemente macht den unterschiedlichen Einfluss der Kunststoffe deutlich. Während für die Lagerung A (Wasserlagerung) noch ein eindeutiger Trend zu erkennen ist (Zunahme des Quellens mit steigendem Kunststoffanteil), sind verallgemeinernde Aussagen für die Lagerungen mit Trocknungsmöglichkeit nicht möglich. Der Verlauf der Graphen bei den modifizierten CEM I - Rezepturen ist für die Lagerungen B und C nahezu identisch. Bei der Lagerung C ist das Schwindmaß um ca. 0,25 ‰ geringer als bei Lagerung B. Dies entspricht in etwa dem Verhältnis bei der unmodifizierten Vergleichsmi-

schung bei den beiden Lagerungen und kann somit auf die besseren Hydratationsbedingungen in den ersten 7 Tagen Wasserlagerung zurückgeführt werden.

Die CEM III - Rezepturen zeigen ein völlig anderes Verhalten. Hier scheint die anfängliche Wasserlagerung eher nachteilig zu sein. Die Schwindmaße der Vergleichsmischungen und der PCC 1 sind bei der Lagerung C um ca. 0,20 ‰ höher als bei Lagerung B. Die PCC 2 dagegen verringern das Schwindmaß deutlich infolge der anfänglichen Wasserlagerung, und zwar umso stärker, je höher der Kunststoffgehalt ist. Es zeigt sich kein Unterschied im Schwindverhalten der PCC 2 und der Vergleichsmischung.

Die Auswertung der Ergebnisse der Masseänderungen (Abb. 4-3; Abb. 4-4) zeigt, dass die Kunststoffe keine (CEM I) oder nur sehr geringe (CEM III) Auswirkungen auf das Austrocknungsverhalten der Mörtel haben. Während bei den Lagerungen B und C der Einfluss des unterschiedlichen w/z-Wertes der Vergleichsmischungen deutlich wird, ist der Verlauf der Graphen aller Mörtel mit w/z = 0,40 nahezu identisch. Das bedeutet, dass eine Kunststoffmodifikation nicht bzw. kaum das Trocknungsschwinden eines Mörtels beeinflusst. Vielmehr kann der Einfluss auf das Längenänderungsverhalten im Wesentlichen nur aus der Beeinflussung des Hydratationsschwindens resultieren. Wie in der Literatur zu finden ist (z. B. [1][10][25][26]), wirken Kunststoffe verzögernd auf die Zementhydratation. In Folge dessen und im Zusammenwirken mit dem i. Allg. verbesserten Wasserrückhaltevermögen ergibt sich ein anderer, zeitlich verschobener Hydratationsverlauf. Dies hat dann auch ein zeitliches Verschieben der Auswirkungen des Hydratationsschwindens zur Folge.

Diese Ergebnisse bekräftigen nochmals die Aussage, dass die Bestimmung des Quellens und Schwindens von PCC nur bis zum 28. Tag nicht ausreichend ist. Die Messung des zeitlichen Verlaufs der Längenänderungen bis mindestens 90 Tage bei verschiedenen Lagerungsbedingungen ist daher unbedingt zu empfehlen.

4.3 Thermische Längenänderung von PCC

Um den tendenziellen Einfluss der thermischen Längenänderung von PCC zu überprüfen, wurden die Wärmeausdehnungskoeffizienten exemplarisch am PCC 1 und einer Vergleichsmischung ermittelt. Es wurde der KS 1 gewählt, weil dieser zu einer höheren Porosität im Mörtel führt. Das Wärmedehnvermögen ist nicht allein von den Wärmedehnkoeffizienten der Mörtelbestandteile abhängig, sondern wird auch durch die Porosität und den Feuchtegehalt bestimmt. [E4]. Es wurden der w/z-Wert sowie der p/z-Wert variiert. Dadurch konnte der Einfluss einer Änderung der Porosität, die sich durch die Änderung des w/z-Wertes zwangsläufig ergibt, berücksichtigt werden. Die Probekörper wurden der Lagerung B unterzogen, da sich bei der Trockenlagerung die Polymerphase gut ausbilden kann und infolge der schnellen Austrocknung die Porosität erhöht werden sollte. Als Vergleichswert für einen möglichen Beschichtungsuntergrund wurde der Wärmeausdehnungskoeffizient eines ca. ein Jahr alten C 45/55 bestimmt. Die Wärmeausdehnungskoeffizienten wurden nach dem in [R8] beschriebenen Verfahren ermittelt.

Die Auswertung der Versuche (Abb. 4-5) lässt keinen Einfluss einer Kunststoffmodifikation auf den Wärmeausdehnungskoeffizienten der PCC erkennen. Auch der in [R11] festgelegte Grenzwert wurde nicht überschritten. Den mit Abstand höchsten Wert zeigte der Vergleichs-

beton. Das bestätigt die in der Literatur zu findenden Angaben, dass eine Kunststoffmodifikation keinen bzw. nur einen untergeordneten Einfluss auf die thermische Längenänderung von PCC hat.

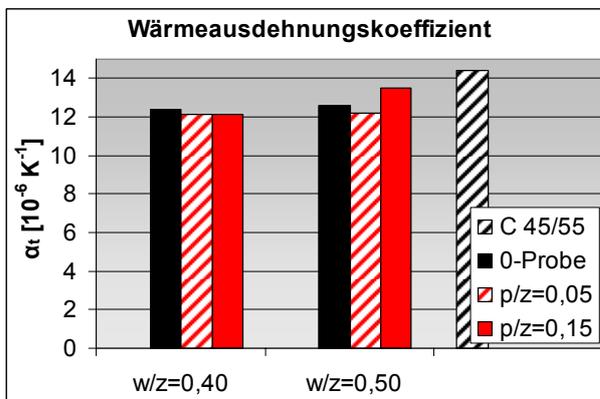


Abb. 4-5: Wärmeausdehnungskoeffizienten von PCC 1

4.4 Bestimmung des frühen Quellens und Schwindens von PCC in einer modifizierten Schwindrinne

Ausgangspunkt für diesen Untersuchungspunkt bildete die Theorie, dass das Frühschwinden für die PCC von besonderer Bedeutung sein könnte. Infolge der Hydratationsverzögerung und der damit verbundenen langsameren Festigkeitsentwicklung könnten extreme Schwindspannungen in der Frühphase des Erhärtungsprozesses zu Gefügestörungen und Mikrorissen führen, die später ein Dauerhaftigkeitsproblem darstellen würden. Mit der Methode nach DIN 52450 wird die Längenänderung in den ersten 24 Stunden nicht erfasst.

Zur Bestimmung des Frühschwindens wurde eine Schwindrinne verwendet, mit der die Längenänderungen kontinuierlich und ab dem frühest möglichen Zeitpunkt erfasst werden konnten. Zur realitätsnahen Abschätzung des Schwindverhaltens wurden die Proben verschiedene Temperaturzyklen, wie sie im Frühjahr bzw. im Sommer über einen Tag an einem Außenbauteil in Bodennähe vorkommen, ausgesetzt.

4.4.1 Versuchsaufbau mit und ohne seitliche Behinderung

Es wurde eine am F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde entwickelte und vielfach angewendete Schwindrinne verwendet. Die Schwindrinnen (Abb. 4-6) bestehen aus einem Stahlträger mit zwei abnehmbaren Seitenteilen und einem abnehmbaren Stirnseitenteil. Auf der anderen Stirnseite ist ein verschieblicher Kunststoffblock angebracht. Dieser kann mit einer Schraube gegen vorzeitiges Verschieben, etwa beim Befüllen der Schwindrinne, gesichert werden. In der Mitte dieses Kunststoffblocks setzt auf der Außenseite die Tastspitze eines potentiometrischen Wegaufnehmers auf. Der verwendete Wegaufnehmer hat einen Nutzweg von max. 10 mm, eine Auflösung von 0,001 mm und eine Messgenauigkeit von 0,2 %. Die Messrate liegt i. d. R bei $12 \cdot h^{-1}$. Die gemessenen Daten werden auf einem Datenlogger zwischengespeichert. Auf der Innenseite des Kunststoffblocks sowie auf dem anderen Stirnseitenteil sind ca. 30 mm lange Schrauben angebracht, die in den späteren Probekörper hineinragen. Dadurch wird eine bessere Kraftübertragung gewährleistet und der Probekörper fest mit den

Stirnseiten verbunden. Die Probekörperabmessungen betragen $40 \times 40 \times 250 \text{ mm}^3$. Vor dem Befüllen mit Mörtel werden alle Schalflächen geölt. Der Kunststoffblock wird eingefettet, um den Gleitwiderstand so gering wie möglich zu halten. Mit diesem Versuchsaufbau sind vergleichende Aussagen verschiedener Rezepturen möglich.

Zur Erfassung des Einflusses einer seitlichen Behinderung wurde ein Teil der Versuche mit Seitenteilen und dauernd abgedeckten Probekörpern durchgeführt (Abb. 4-7). Dadurch konnte insbesondere für die Unterseite von einer Behinderung der freien Verformbarkeit ausgegangen werden. Außerdem wurde die Austrocknung behindert, was zusätzlich zu einem veränderten Verformungsverhalten führen sollte.

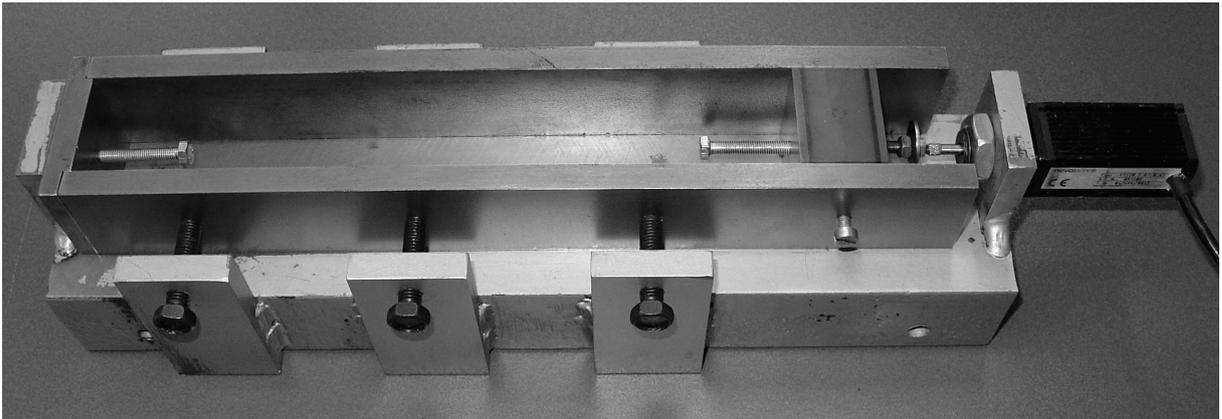


Abb. 4-6: *Verwendete Schwindrinne*



Abb. 4-7: *Schwindrinne mit seitlicher Behinderung und Abdeckung*



Abb. 4-8: *Schwindrinne, allseitig ohne Behinderung*

Der andere Teil der Versuche wurde mit zwangsarm gelagerten Proben durchgeführt (Abb. 4-8). Die Seitenteile und die Abdeckung wurden 24 Stunden nach der Herstellung entfernt und die Probekörper auf jeweils 2 Rollen gelagert. Der Abstand zur Bodenfläche betrug ca. 4 mm. Lediglich die Stirnseiten blieben fixiert, um die Längenänderung kontinuierlich messen zu können. Die freie Austrocknung wurde so kaum behindert. Dadurch sollten die so gelagerten Proben vergleichbar mit den Schwindmessungen nach DIN 52450 sein.

Die Temperaturzyklen wurden in einer Baustofftruhe (Firma Weiss, BT 700/40-60 DU) realisiert. Die befüllten Schwindrinnen wurden mit den angeschlossenen Wegaufnehmern in der Truhe platziert (Abb. 4-9). Erst dann wurden die Sicherungsschrauben gelöst und der Messvorgang gestartet.



Abb. 4-9: Lagerung der Schwindrinnen in der Baustofftruhe

4.4.2 Versuchsbedingungen

Die frühen Längenänderungen der PCC wurden bis 6 Tage nach dem Messungsbeginn (entspricht 144 Stunden) ermittelt. Den Beginn der jeweiligen Messung markierte der Erstarrungsbeginn der verschiedenen PCC-äquivalenten Zementleimrezepturen (Abb. 4-10), der vorher nach DIN EN 196-3 [R12] mit dem VICAT-Nadelgerät bestimmt wurde. Dazu wurden die Zementleime nach der gleichen Rezeptur wie die Mörtel hergestellt, jedoch ohne Gesteinskörnung. Die Zugabewassermenge wurde um den Wasseranspruch der Gesteinskörnung von ca. 3 % reduziert. Es ist ersichtlich, dass die Kunststoffe das Ansteifen als auch das Erstarren verlängern. Extrem ist dies beim KS 2, der bei der Modifikation des CEM I die Zeit bis zum Erstarrungsbeginn verdoppelt, bei der Modifikation des CEM III sogar nahezu vervierfacht. Die Gründe für die Erstarrungsverzögerung sind nach [27] im Wesentlichen auf die Verzögerung der Hydratation infolge der dichteren Belegung der Zementpartikel aufgrund der geringen Teilchengröße der Kunststoffe zurückzuführen.

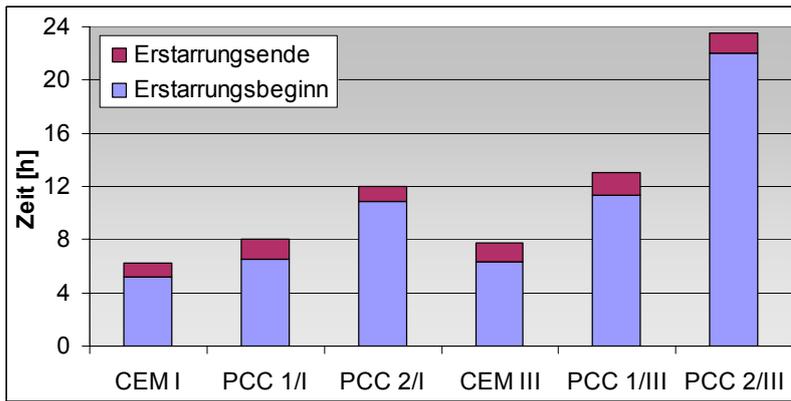


Abb. 4-10: Erstarrungszeiten

Zur Erfassung des Schwindverhaltens der PCC bei unterschiedlichen, realitätsnahen Temperatureinflüssen in der frühen Phase der Erhärtung wurden zwei Temperaturzyklen entworfen. Beide orientierten sich an real gemessenen Temperaturen über 24 Stunden in Bodennähe, einerseits im Sommer, andererseits im Herbst (Abb. 4-11; Abb. 4-12). Als Vergleich dienten die Messungen im Normalklima.

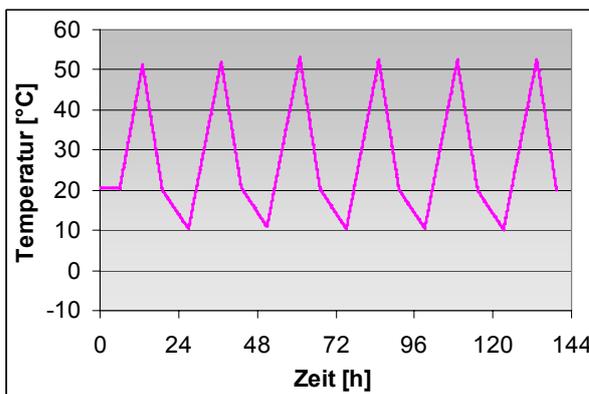


Abb. 4-11: Sommerzyklus

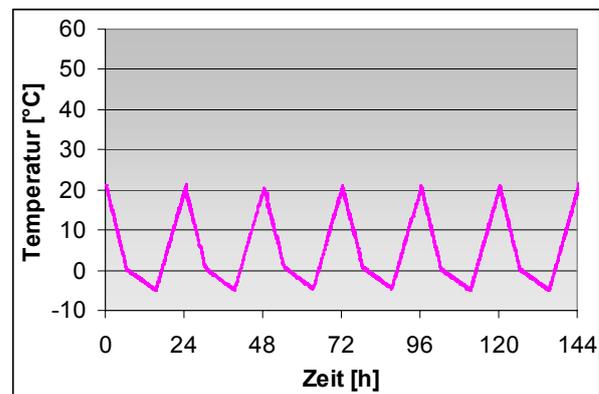


Abb. 4-12: Herbstzyklus

Da bei diesem Messaufbau zur Bestimmung der Längenänderung während der Temperaturzyklen zwangsläufig die thermische Längenänderung der Versuchseinrichtung mit gemessen wird, ist es sinnvoll, diesen Anteil von den gemessenen Längenänderungen abzuziehen, um so die tatsächlichen Längenänderungen der untersuchten Proben zu bestimmen. Dabei wird der Temperaturexpansionskoeffizient für die Stahlform ungünstig mit $15 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ [28] angenommen, der für die PCC durchschnittlich mit $12 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Es ergibt sich eine Differenz von $3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, welche die Dehnungsdifferenz der gemessenen Werte zur tatsächlichen Probekörperverformung darstellt. Die erhaltenen Graphen sind dennoch nicht vollständig geglättet. Dies ist zum einen auf die Annahmen der Wärmeausdehnungskoeffizienten zurückzuführen. Zum anderen wird sich der lineare Ausdehnungskoeffizient des Mörtels während der Hydratation ändern. Dies ist besonders im frühen Stadium der Erhärtung der Fall, da hier die Auswirkungen infolge Phasenneubildungen, Austrocknung und Gefügeveränderungen am drastischsten sind. Letztlich lässt sich jedoch tendenziell das Schwinden der verschiedenen Rezepturen sehr gut erkennen und vergleichen.

4.4.3 Ergebnisse

Die Versuche haben gezeigt, dass eine Kunststoffmodifikation von Mörteln keine bzw. kaum negative Einflüsse auf das Längenänderungsverhalten in der frühen Phase der Erhärtung hat. Der Verlauf des Schwindens von modifizierten Mischungen und der Vergleichsmischung unterscheiden sich bis zum 6. Tag nicht signifikant bei allen betrachteten Prüfbedingungen. Einschränkend ist hierbei zu sehen, dass es sich bei den Versuchen lediglich um Doppelbestimmungen handelte und damit die Ergebnisse statistisch nur minimal gesichert sind. Die ablesbaren Tendenzen sind jedoch eindeutig.

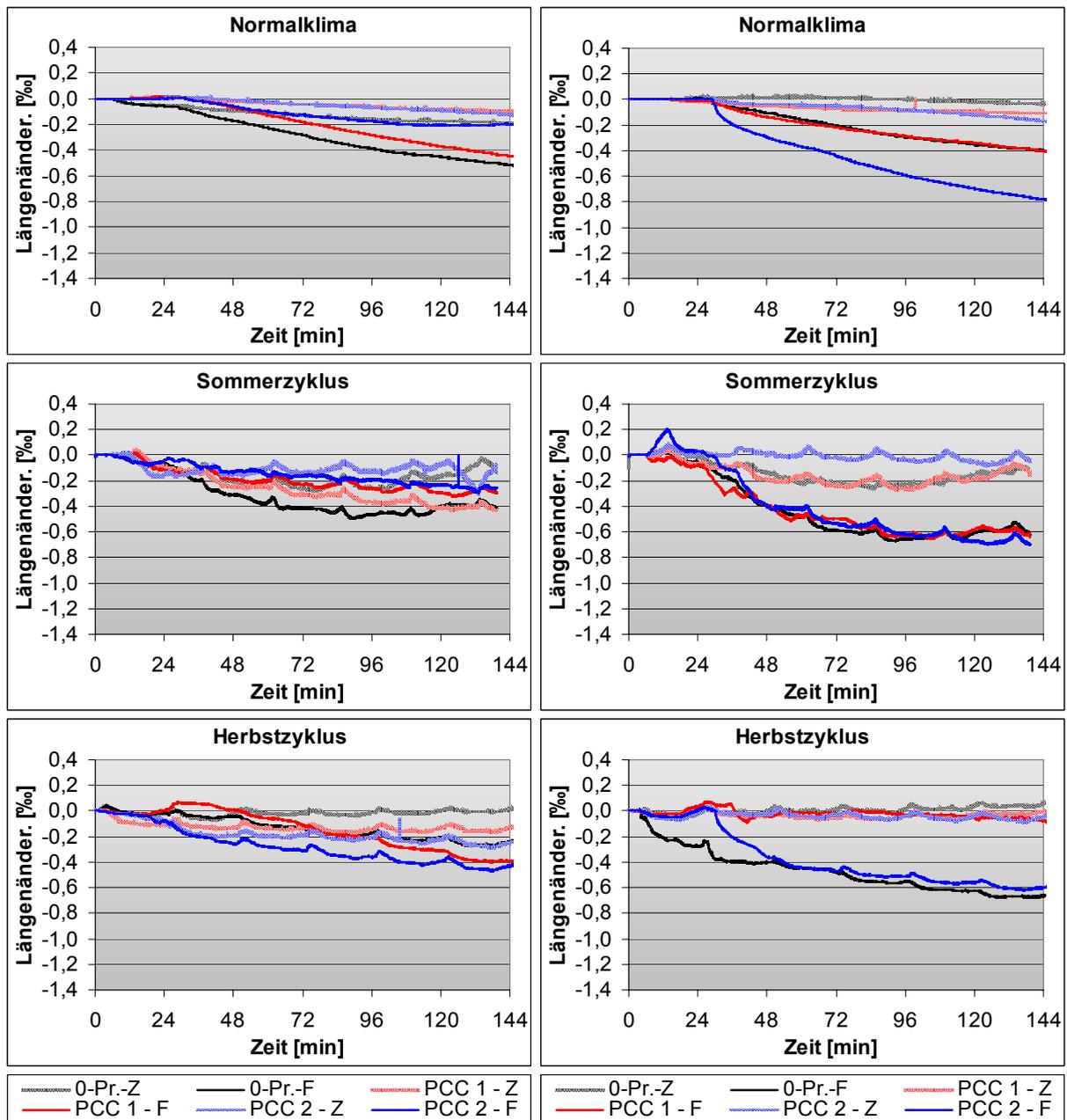


Abb. 4-13: Längenänderungen CEM I 42,5 R

Abb. 4-14: Längenänderungen CEM III/A 42,5

Grundsätzlich ist wie schon bei den Messungen nach DIN 52450 festzustellen, dass das Längenänderungsverhalten der CEM III – Mischungen ausgeprägter ist, als das der CEM I – Mischungen (Abb. 4-13, Abb. 4-14). Ebenso wird, wie zu erwarten, deutlich, dass die Verformungen der zwangsgelagerten Proben (... - Z) kleiner sind als die der zwangsarm gela-

gerten Proben (... - F). Dieser Unterschied wird bei den CEM III - Rezepturen wesentlich deutlicher als bei den CEM I – Rezepturen, was i. W. auf das größere Verformungspotential zurückzuführen ist. Bei dem Vergleich der 6-Tage Werte der Normalklimalagerung mit den 6-Tage Werten der Lagerung B der Messungen nach DIN 52450 (Abb. 4-1, Abb. 4-2) sind die gleichen Beträge und Tendenzen festzustellen. So zeigt beispielsweise der PCC 2 mit dem CEM III (PCC 2 - Z; PCC 2 - F) in beiden Fällen das mit Abstand größte Schwindmaß. Es kann also davon ausgegangen werden, dass die Messungen nach DIN 52450 mit den Messungen in den Schwindrinnen bei zwangsarmer Probenlagerung vergleichbar sind. Da bei dieser Methode die Messung jedoch ebenfalls erst nach 24 h beginnen kann, gibt es außer der kontinuierlichen und eingriffsfreien Messung keine weiteren Vorteile.

Die Anwendung des Sommerzyklus sowie des Herbstzyklus zeigen keine Auswirkungen auf den Schwindverlauf. Es sind zwar tendenzielle Einflüsse bei einzelnen Mischungen interpretierbar, insbesondere bei den CEM I – Rezepturen, jedoch sind diese Unterschiede aufgrund des geringen Probenumfangs statistisch nicht vollständig abgesichert.

Letztlich haben die Untersuchungen gezeigt, dass sich entgegen der anfänglichen Vermutung die Längenänderungen der PCC in der frühen Phase der Erhärtung kaum von denen der nicht modifizierten Vergleichsmischung unterscheiden. Es ist also davon auszugehen, dass die Bestimmung der Längenänderung nach DIN 52450 auch für PCC von ausreichender Aussagekraft ist.

4.5 Bestimmung des Schwindens von kunststoffmodifizierten Zementsteinen

Diese Untersuchungen wurden in Anlehnung an den in 4.4.1 beschriebenen Versuchsaufbau in Schwindrinnen durchgeführt. Nachdem die Untersuchungen an den PCC nicht zu den erwarteten Ergebnissen geführt hatten, war das Ziel, die gewonnenen Erkenntnisse durch Versuche an den kunststoffmodifizierten Zementsteinen zu verifizieren. Es wurden Zementsteinrezepturen verwendet, die auf den in 2.2 beschriebenen CEM I - Mörtelrezepturen basierten. Es kam ein w/z-Wert von 0,40 zur Anwendung, das Wasser der Dispersion (KS 2) wurde berücksichtigt, ebenso der Wasseranspruch der Gesteinskörnung.

Die mit Fett abgedichteten Schwindrinnen wurden lagenweise befüllt und durch fünfmaliges Anheben und Fallenlassen verdichtet. Nach 24 Stunden wurden die bis dahin abgedeckt im Normalklima gelagerten Proben bis auf die Stirnflächen entschalt. Sie wurden auf Rollen zwangsarm in den Schwindrinnen gelagert, so dass sie den Umweltbedingungen allseitig ausgesetzt waren. Aufgrund der stark verflüssigenden Wirkung der Kunststoffe war ein frühes Lösen der Feststellschraube des verschieblichen Kunststoffblocks nicht möglich. Deshalb wurde die Messung aller Proben einheitlich erst 24 h nach Mischungsherstellung, also nach dem Umlagern auf die Rollen gestartet. Aufgrund der Ergebnisse der Mörteluntersuchungen zum frühen Längenänderungsverhalten wurde davon ausgegangen, dass in den ersten 24 Stunden noch keine wesentlichen, das Gefüge beeinträchtigenden Verformungen eintraten. Die Längenänderungen der Probekörper wurden 14 Tage kontinuierlich gemessen. Die Lagerung erfolgte im Normalklima.

Zur Einordnung der Ergebnisse wurde die Porosität der Zementsteinproben untersucht. Dazu wurde mittels Quecksilberhochdruckporosimetrie die zugängliche Porosität G ermittelt. Damit konnte die Porengrößenverteilung der zugänglichen Poren übersichtlich dargestellt werden. Geschlossene Poren, ein Teil der Gelporen sowie Luftporen werden bei dieser Methode nicht erfasst. Dazu wurden die Roh(ρ)- und Reindichten(ρ_R) der Zementsteinproben mittels Pyknometerverfahren bestimmt. Mit diesen Werten kann die Gesamtporosität P nach der Formel:

$$P = \frac{\rho - \rho_R}{\rho} \cdot 100 \quad [\%] \quad [110]$$

berechnet werden. Durch Bildung der Differenz zwischen Gesamtporosität P und offener Porosität G wird die geschlossene Porosität $P-G$ errechnet.

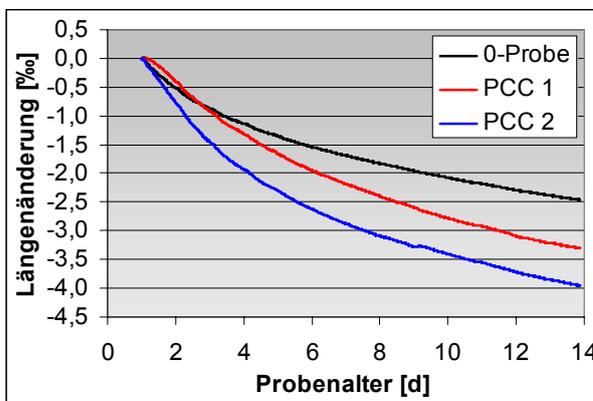


Abb. 4-15: Längenänderung der kunststoffmodifizierten Zementsteine

Wie zu erwarten war, kam es zu einem enormen Schwinden aller Zementsteinproben (Abb. 4-15). Dabei war das Schwindmaß der Vergleichsmischung nach 14 Tagen am geringsten und das der modifizierten Proben deutlich höher. Auffällig ist, dass die KS 2 - modifizierten Proben das größte Schwindmaß aufweisen. Die Mörteluntersuchungen nach DIN 52450 zeigten genau das Gegenteil. Der wesentliche Grund dafür ist in der fehlenden Gesteinskörnung zu sehen. Diese wirkt im Mörtel schwindreduzierend, indem sie die Zementsteinmatrix unterbricht, spannungsabbauend wirkt und so die Ausbreitung von Mikrorissen behindert. Außerdem wird der Volumenanteil des schwindenden Zementsteines in dem Probekörper drastisch reduziert und gleichmäßig im Probekörpervolumen verteilt. Bei reinen Zementsteinproben fehlt diese Wirkung völlig. Einzig die sich ausbildenden Poren können die schwindreduzierende Funktion der Gesteinskörnung zu mindest teilweise ersetzen. Da sich beim Einsatz des redispergierbaren Pulvers (KS 1) mehr und insbesondere größere Poren bilden als bei Verwendung der Dispersion (KS 2) (Abb. 4-16; Abb. 4-17), war zu erwarten, dass der mit KS 2 modifizierte Zementstein ein höheres Schwindmaß aufweisen würde, als der mit KS 1 modifizierte.

Weit interessanter ist jedoch die Erkenntnis, dass sich eine Beeinflussung des Schwindmaßes durch die Kunststoffmodifikation erst nach dem 2. bis 4. Tag tatsächlich erkennen lässt. Das bestätigt die Untersuchungen an den PCC. Die frühe Längenänderung der kunststoffmodifizierten Mörtel unterscheidet sich nicht wesentlich von der unmodifizierter Vergleichsrezepturen. Es ist also davon auszugehen, dass die entstehenden Schwindspannungen trotz

der verzögerten Hydratation und der damit verbundenen geringeren Druckfestigkeit in den ersten Tagen schadlos infolge der höheren Zugfestigkeit aufgenommen werden können. Das bedeutet aber auch, dass sich die erhöhten Schwindverformungen im späteren Stadium der Erhärtung umso deutlicher bemerkbar machen. Ist dann die Zugfestigkeit der modifizierten Mörtel nicht wesentlich höher als die der nicht modifizierten, kann es zu einem Überschreiten der Zugfestigkeit durch die hohen Schwindspannungen kommen. Die PCC würden dann kohäsiv versagen, was sich im Entstehen von Rissen äußert.

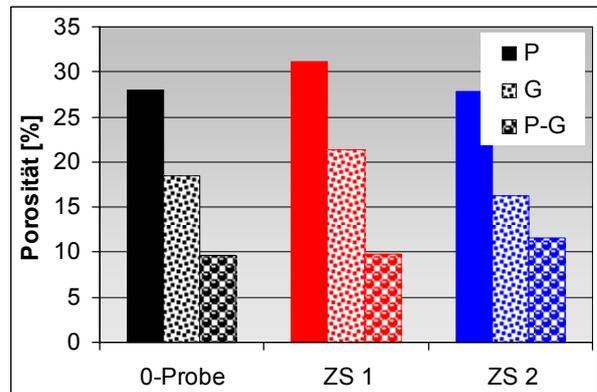
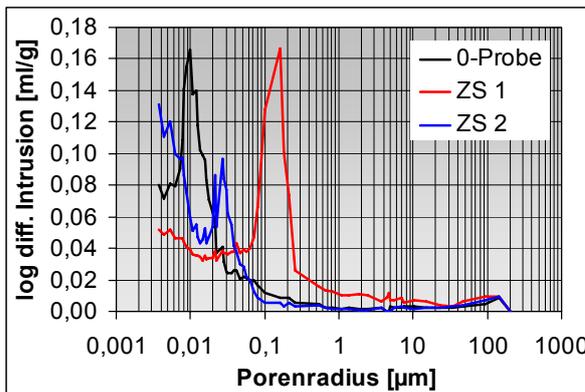


Abb. 4-16: Porenradienverteilung (Zementsteine)

Abb. 4-17: Verteilung der Gesamt-, offenen und geschlossenen Porosität (Zementsteine)

4.6 Versuche zum Einfluss des Längenänderungsverhaltens von kunststoffmodifizierten Zementsteinen auf den Haftverbund

In den bisher durchgeführten Versuchen zeigte sich, dass das Längenänderungsverhalten von Mörteln durch eine Kunststoffmodifikation negativ beeinflusst wird. Um Rückschlüsse ziehen zu können, wie sich dies auf die Kohäsion in den PCC auswirkt, wurden Modellversuche an Gesteinsproben durchgeführt, die beidseitig mit modifiziertem Zementleim beschichtet wurden. Die Zusammensetzung der Zementleimrezepturen war analog zu den in Abschnitt 4.5 beschriebenen. Im Vorfeld der Modellversuche wurde die Entwicklung des dynamischen E-Moduls und der Zugfestigkeit der Zementsteine untersucht. Mit diesen Ergebnissen sollten Zusammenhänge zwischen Längenänderung und Haftverbund genauer beschreibbar sein.

4.6.1 Entwicklung des dynamischen E-Moduls der Zementsteine

Diese Untersuchungen wurden an Normmörtelprismen (4 x 4 x 16 cm³) durchgeführt. Die Zementleime wurden in die Prismenformen eingefüllt und unter mehrmaligem Anheben und Fallenlassen verdichtet und verteilt. Diese Methode wurde angewendet, da aufgrund der flüssigen Konsistenz der Zementleime ein Verdichten auf dem Vibrationstisch nicht möglich war. Nach 24 Stunden wurden die Proben entschalt und im Normalklima gelagert. Zu verschiedenen Prüfzeitpunkten wurde mittels Resonanzfrequenzmessung der dynamische E-Modul berechnet (Abb. 4-18).

Bei der Erstmessung nach 2 Tagen waren die dynamischen E-Moduln der beiden kunststoffmodifizierten Zementsteine nahezu identisch und ca. 6500 N/mm² niedriger als der der Vergleichsmischung. Diese zeigte bereits nach dem 4. Tag keine nennenswerte Erhöhung

mehr. Bei den kunststoffmodifizierten Zementsteinen war zwar nach 4 Tagen ein deutliches Abknicken der Kurve zu erkennen, jedoch stiegen die Werte bis zum 14. Tag noch erkennbar an. Dieser Effekt kann auf die verzögerte Hydratation zurückgeführt werden. Der Verlauf der Kurven der kunststoffmodifizierten Zementsteine ist nahezu identisch. Die deutlich geringeren E-Moduln im Vergleich zum nicht modifizierten Zementstein sind auf den geringeren E-Modul der Kunststoffe zurückzuführen, die im Gefüge verteilt sind. Die geringeren E-Moduln der kunststoffmodifizierten Zementsteine wirken sich im Hinblick auf die zu erwartenden Spannungen in Folge des erhöhten Schwindens positiv aus. Darauf wird im Abschnitt 6.6.3 näher eingegangen.

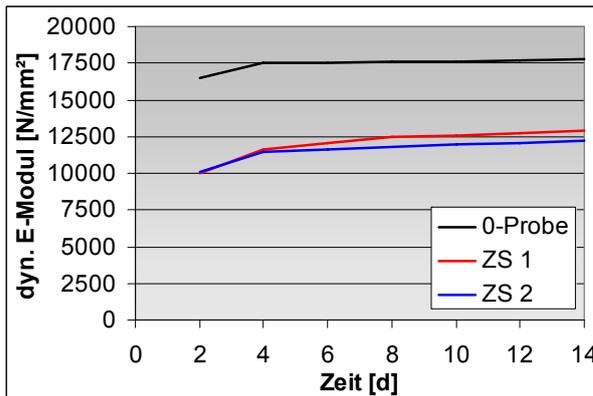


Abb. 4-18: Entwicklung der dynamischen E-Moduln der Zementsteine

4.6.2 Entwicklung der Zugfestigkeit der Zementsteine

Die Bestimmung der Zugfestigkeit der Zementsteine wurde an Probekörpern der Abmessungen $4 \times 4 \times 1 \text{ cm}^3$ durchgeführt. Diese Abmessungen wurden gewählt, da sie dem Beschichtungsvolumen der Modellversuche entsprechen. Die so erhaltenen Werte dienen lediglich dem Vergleich der einzelnen Rezepturen untereinander. Aufgrund der geringen Schlankheit sind sie nicht mit anderen, nach DIN ermittelten Werten vergleichbar.

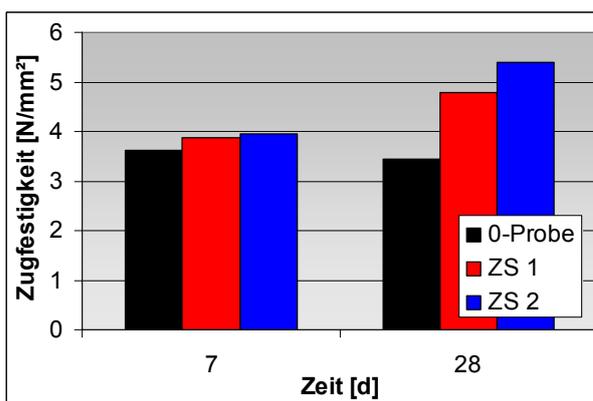


Abb. 4-19: Zugfestigkeitsentwicklung der Zementsteine

Auf beiden Seiten der Probekörper wurden Stahlstempel mit einer Fläche von $4 \times 4 \text{ cm}^2$ mittels eines PMMA-Klebers aufgebracht. Nach dessen Aushärtung erfolgte die Prüfung der Zugfestigkeit mit der Universalprüfmaschine TIRAtest 28100. Die Proben wurden so eingespannt, dass eine querkräftfreie Krafteinleitung gesichert war. Die Prüfungsgeschwindigkeit betrug 100 N/s .

Nach 7 Tagen waren kaum Unterschiede der Zugfestigkeit der modifizierten und nicht modifizierten Zementsteine zu erkennen. Nach 28 Tagen jedoch war ein deutlicher Zuwachs bei den kunststoffmodifizierten Proben zu verzeichnen, während sich bei der nicht modifizierten Vergleichsprobe keine positive Veränderung mehr ergab (Abb. 4-19). Daran ist wieder ein klarer Nacherhärtungseffekt infolge einer Kunststoffmodifikation zu erkennen. Erstaunlich ist auch hier wieder, dass der unter den vorgeherrschten Bedingungen nicht filmbildende KS 2 (MFT > 30°C) zu der höchsten Zugfestigkeit führte. Es wird also deutlich, dass nicht die Filmbildung allein für eine Erhöhung der Zugfestigkeit ausschlaggebend ist. Vielmehr können durch geringe Teilchengrößen, eine verflüssigende und porositätsmindernde Wirkung u. ä. Effekte der Kunststoffe Grenzflächen im Mörtelgefüge näher zusammengebracht werden. Damit erhöht sich der Anteil der spezifischen Adhäsion und es sind höhere Kräfte notwendig, um diese zu stören, was sich in der erhöhten Zugfestigkeit widerspiegelt [E5].

4.6.3 Modellversuche zum Haftverbund von kunststoffmodifizierten Zementsteinen

Die durch Längenänderungen in Mörteln hervorgerufenen Spannungen müssen von der Matrix aufgenommen und weitergeleitet werden. Dafür ist in erster Linie entscheidend, wie beständig der kohäsive Verbund innerhalb der Zementsteinmatrix ist. Darüber hinaus ist der Verbund von Zementsteinmatrix zur Gesteinskörnung ebenfalls entscheidend. Um diesen Verbund makroskopisch zu simulieren und unter definierten Bedingungen nachzustellen, wurden Gesteinsscheiben mit genauen Abmessungen (4 x 4,5 x 1 cm³) mit Zementleim in einer festgelegten Schichtdicke (1 cm) beschichtet. Als Gesteine wurden ein Seeberger Sandstein (SS) und ein Oberdorlaer Muschelkalk (MK) verwendet. Beide Gesteine haben eine relativ geringe, aber deutlich unterschiedliche Zugfestigkeit (SS 1,30 N/mm²; MK 2,31 N/mm²). Zudem weisen sie ein unterschiedliches Wasseraufnahmevermögen auf (SS 4,18 %; MK 2,0 %), was den Haftverbund beeinflussen könnte.

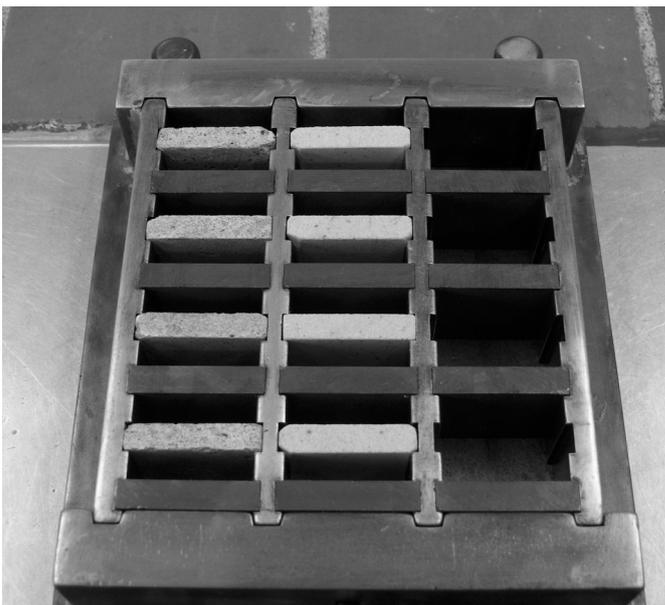


Abb. 4-20: Form für Modellprobekörper

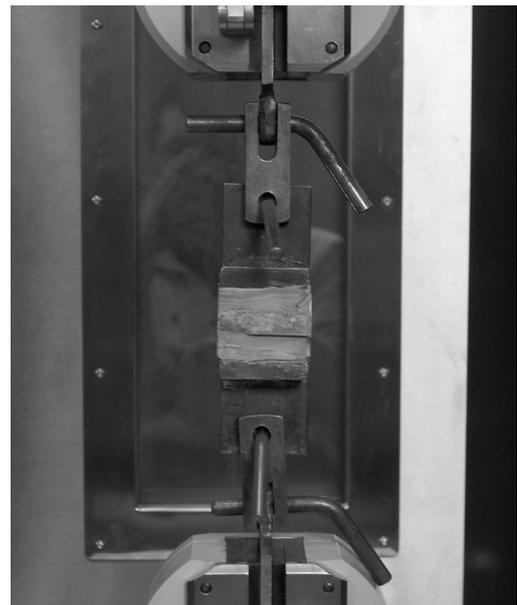


Abb. 4-21: Prüfmaschine TIRAtest 28100

Die Beschichtung wurde beidseitig aufgetragen, um im anschließenden Zugversuch auf beiden Probekörperseiten die gleichen Bedingungen prüfen zu können. Weiterhin konnte so die Einbettung von Gesteinskörnern in die Zementsteinmatrix simuliert werden.

Das Aufbringen wurde in einer dafür gefertigten Form (Abb. 4-20) durchgeführt, um konstante Schichtdicken zu erreichen. Die Gesteinsscheiben wurden vorgehäst, um einen möglichst guten Haftverbund zu erreichen. Als Zementleimrezepturen wurden die in Abschnitt 4.5 beschriebenen verwendet. Nach 24 Stunden wurden die Proben ausgeschalt und im Normalklima gelagert. Nach 28 Tagen wurden auf beiden Seiten der Proben Stahlprüfstempel mittels eines PMMA-Klebers angebracht und die Proben mit der Universalprüfmaschine TI-RAtest 28100 im Zugversuch geprüft (Abb. 4-21). Die Proben wurden querkraftfrei eingespannt. Die Prüfgeschwindigkeit betrug 100 N/s. Eine Prüfserie bestand aus 4 Einzelproben. Bei der Auswertung der Versuche wurden sowohl die Bruchkraft ermittelt als auch das Bruchbild beurteilt (Abb. 4-22; Abb. 4-23).

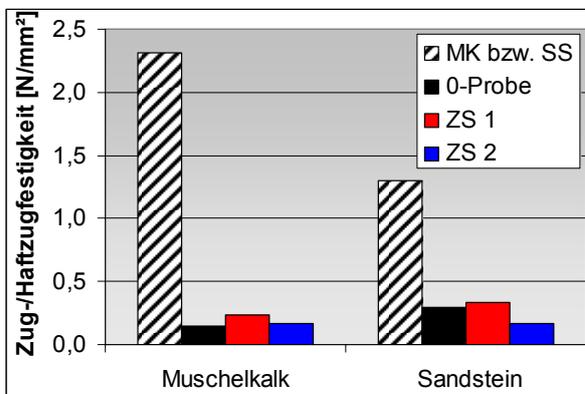


Abb. 4-22: Haftzugfestigkeiten

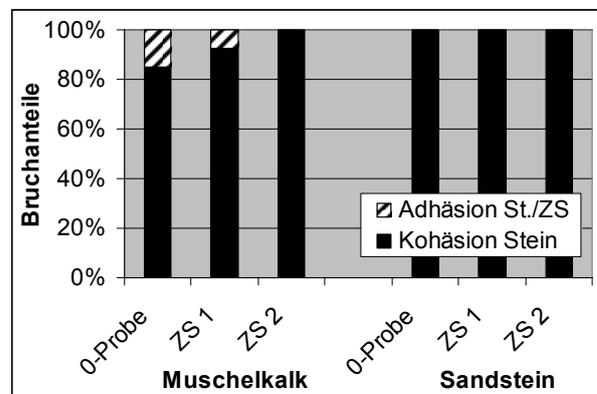


Abb. 4-23: Bruchanteile bei der Haftzugprüfung

Das Ergebnis zeigt, dass die ermittelten Haftzugwerte äußerst gering sind. Die Haftzugfestigkeiten aller Zementsteinproben liegen deutlich unter den Zugfestigkeiten der beiden Gesteine und der Zementsteine selbst. Bei Betrachtung des Bruchbildes konnte festgestellt werden, dass es im Wesentlichen zu einem Kohäsionsversagen der Gesteine gekommen war. Die Begutachtung der Probekörper vor Prüfbeginn zeigte bei allen Proben eine Vorschädigung (Abb. 4-24; Abb. 4-25), die bei den Steinscheiben nach dem Ausschalen noch nicht festzustellen gewesen war.

Aufgrund dieser Ergebnisse ist einzuschätzen, dass der Haftverbund aller Zementsteine zu den jeweiligen Gesteinen sehr gut ist. Die Bruchbilder sowie die Beobachtungen vor Versuchsbeginn legen nahe, dass es bereits während der 28-tägigen Lagerung zu einem Überschreiten der Zugfestigkeit der Gesteine gekommen sein muss. Daraus folgt, dass die Verbundfestigkeit der Zementsteine als auch nachgewiesenermaßen die Zugfestigkeit der Zementsteine (siehe Abschnitt 4.6.2) wesentlich höher sind als die durch das Schwinden hervorgerufenen Spannungen. Das bedeutet aber auch, dass allein durch das Schwinden der Zementsteine infolge der Behinderung der Verformung in der Verbundebene Schubspannungen $> 2,3 \text{ N/mm}^2$ (= Zugfestigkeit MK) entstanden. Diese führten an den freien Rändern zu Zugspannungen senkrecht zur Beschichtungsebene, welche die Zugfestigkeit der Gesteine überschritten haben. Dadurch kam es zum Kohäsionsversagen in den Gesteinen und zur

Entstehung von Rissen. Diese waren bei den Sandsteinen aufgrund der geringeren Zugfestigkeit ausgeprägter, als bei dem Muschelkalk.

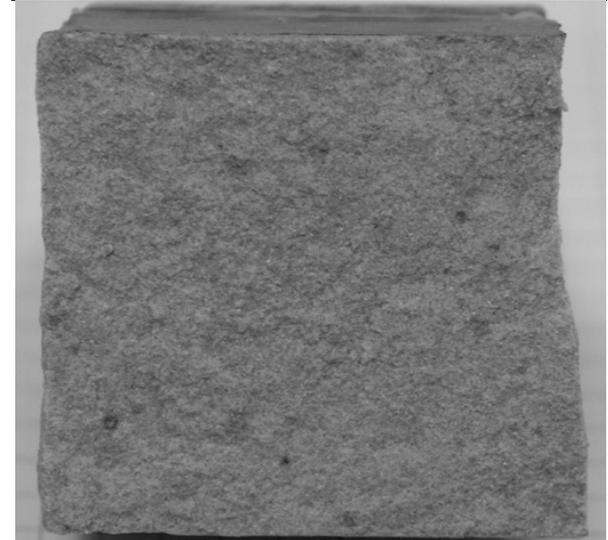
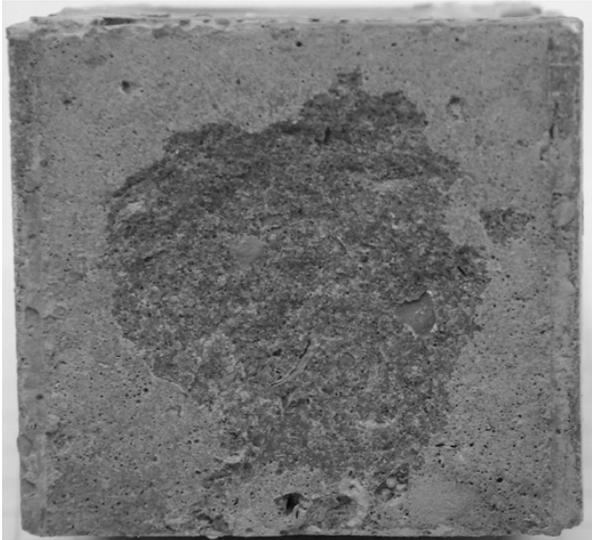
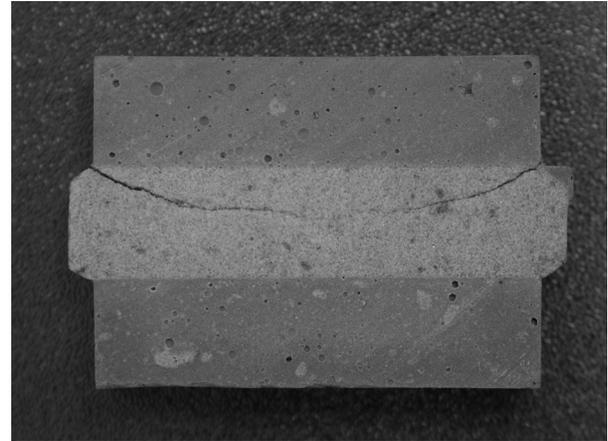
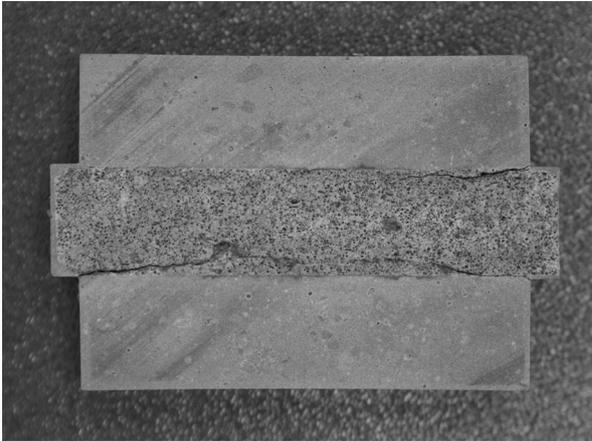


Abb. 4-24: Bruchbild Muschelkalk

Abb. 4-25: Bruchbild Sandstein

Um den Einfluss der Kunststoffmodifikationen auf die entstehenden Zugspannungen δ zu verdeutlichen, können diese bei bekanntem E-Modul E und bekannter Längenänderung ϵ näherungsweise berechnet werden. Dafür wurden die Ergebnisse aus den Abschnitten 4.6.1 und 4.5 in folgende Gleichung eingesetzt:

$$\delta = E \cdot \epsilon \quad [\text{N/mm}^2] \quad (\text{nach R. Hooke, 1678: „ut tensio sic vis“; [110]})$$

Bei den dabei erhaltenen Werten sind stark abstrahiert und können nur unter Vorbehalt miteinander verglichen werden. Außer Acht bleibt, dass ein Grossteil der Spannungen durch plastische Verformungen des Zementsteines abgebaut wird oder Spannungen durch Rissbildungen reduziert werden können. Weiterhin stand für die Berechnungen lediglich der dynamische E-Modul zur Verfügung, der sich vom statischen E-Modul, der i. d. R. für die Spannungsermittlung verwendet wird, unterscheidet. Aus diesen Gründen wurden die Ergebnisse für die kunststoffmodifizierten Zementsteine auf die des nicht modifizierten Zementsteins bezogen. Damit sind tendenzielle Aussagen zum Einfluss der Kunststoffmodifizierungen möglich.

Die Auswertung (Abb. 4-26) zeigt, dass sich der geringere E-Modul positiv auf die entstehenden Spannungen im Gefüge auswirkt. Trotz dem der ZS 1 ein höheres Schwindmaß als die Vergleichsprobe aufweist (ca. 34 % mehr nach 14 Tagen) sind die auftretenden Spannungen in etwa gleich. Werden die Schwindwerte jedoch größer, wie beim ZS 2 (ca. 60 % mehr nach 14 Tagen im Vergleich zur 0-Probe), übersteigen die Schwindspannungen die der Vergleichsmischung. Dies kann jedoch durch eine höhere Zugfestigkeit abgefangen werden. Positiv wirkt sich der geringere E-Modul besonders in der Anfangsphase der Erhärtung aus. Hier liegen in den ersten Tagen die entstehenden Spannungen teilweise deutlich unter denen der Vergleichsmischung, und das bei ähnlich hohen Zugfestigkeiten.

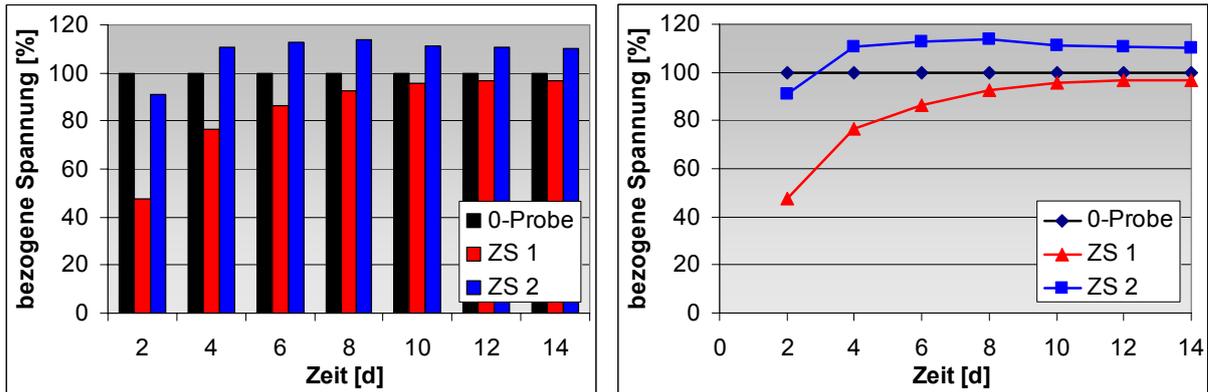


Abb. 4-26: berechnete bezogene Spannungen in den Zementsteinen

5 Kohäsion in PCC bei Belastung

5.1 Literaturübersicht

Mit *Kohäsion* wird der Zusammenhalt der Bestandteile innerhalb eines Stoffes beschrieben. Auf die Ebene kleinster Teilchen bezogen sind das die Zusammenhaltekräfte zwischen den Atomen bzw. Molekülen eines Stoffes. Makroskopisch sind darunter die Kräfte zu verstehen, die ein in sich geschlossenes Stoffsystem (z. B. einen Klebstoff) zusammenhalten. Der Beton wird i. A. auch als ein Stoffsystem (quasihomogen) betrachtet, welches durch Kohäsionskräfte zusammengehalten wird. Wird der Betrachtungsbereich jedoch in die nächst höhere Genauigkeit verschoben, handelt es sich aber um eine Mischung aus Kohäsions- und Adhäsionskräften, da Beton ein Konglomerat aus einzelnen Stoffsystemen (Gesteinskörnern, Zementstein) ist, die durch Phasengrenzflächen voneinander getrennt sind. Der Zustand der Grenzfläche zwischen zwei durch ihre Phasengrenze getrennte Stoffe wird als *Adhäsion* bezeichnet. Die Adhäsion beruht, in dieser Genauigkeitsebene betrachtet, auf zwei Faktoren:

- der mechanischen Adhäsion
- der spezifischen Adhäsion

Unter mechanischer Adhäsion ist die mechanische Verzahnung bzw. Verkrallung der beiden Grenzflächen ineinander zu verstehen. Auf den Beton bezogen wird klar, dass die Größe der Adhäsion von der Rauigkeit der einen und der Benetzungsfähigkeit der anderen Grenzfläche abhängig ist. Je höher dabei die Rauigkeit und je größer die Benetzungsfähigkeit der Grenzflächen sind, desto größer ist die aktiv wirksame Oberfläche. Diese beschreibt den Anteil der Oberfläche, von dem physikalisch-chemische Wechselwirkungen beider Grenzflächen ausgehen, also die Summe der Kontaktflächen. Der wesentliche Anteil dieser Wechselwirkungskräfte wird den physikalischen zugeschrieben und unter dem Begriff Van der Waals Kräfte zusammengefasst. Dabei handelt es sich um Dipol-Dipol Kräfte (Wasserstoffbrückenbindungen), die den höchsten Energiegewinn erzeugen, sowie um Induktions- und Dispersionskräfte. Die Wirkung dieser Anziehungskräfte ist wesentlich vom Abstand der Grenzflächen abhängig. Sie nimmt mit größer werdendem Abstand ab. Die Benetzungsfähigkeit ist dabei jedoch Bestandteil der spezifischen Adhäsion, da sie durch die Oberflächenspannung und den sich ausbildenden Randwinkel bestimmt wird. Diese Faktoren bilden den Ausgangspunkt der Grenzflächentheorie zur Beschreibung der Adhäsion. Daneben gibt es weitere Theorien (Diffusionstheorie, elektrostatische Theorie, Polarisierungstheorie) welche jedoch lediglich die Wechselwirkung zwischen kleinsten Teilchen (Atomen und Molekülen) beschreiben. Die Kräfte und Vorgänge, die die Adhäsion bewirken, sind noch nicht vollständig geklärt. [64][65][66][67][68][69][70]

PCC im erhärteten Zustand sind Verbundbaustoffe, die nach allgemeinen Vorstellungen aus dem Zementstein, der Gesteinskörnung und im Idealfall verfilmten Kunststoffen bestehen. Zur Ausbildung des PCC-Gefüges existieren verschiedene Modelle (KOLONKO [71]; OHAMA [72]; KONIETZKO [11]; SCHORN [1]; BEELDENS; VAN GEMERT, SCHORN, OHAMA [73]; DIMMIG-OSBURG [75]), die hier nicht näher erläutert werden sollen. Voraussetzung für gute Festigkeitseigenschaften der PCC ist letztlich die gemeinsame Tragwirkung aller Gefügebestandteile. KONIETZKO unterscheidet demzufolge streng zwischen filmbildenden und nicht filmbildenden Kunststoffen. Er schlussfolgert, dass nicht filmbildende Kunststoffpartikel in ihrer kugeligen Gestalt in der Gefügematrix als passiver Füllstoff ohne Verbund zu den anderen Gefügebestandteilen vorliegen. Demzufolge beteiligen sie sich auch nicht an der Kraftübertragung im Gefüge und haben eher negative Wirkung. Damit kann jedoch nicht begründet werden, warum die Zug- und Biegezugfestigkeiten auch bei Verwendung nicht filmbildender Kunststoffe erhöht werden können.

Entscheidend für die Kraftübertragung ist aber auch die Ausbildung des Phasengrenzbereiches zwischen Gesteinskörnung und Zementsteinmatrix. Nach Untersuchungen von KONIETZKO [11] sowie SU ET AL. [76] werden die Dicke und die Porosität in dieser Zone unabhängig von der verwendeten Kunststoffart verringert. Dieser Effekt nimmt mit steigendem Kunststoffgehalt zu. Sie stellten weiterhin fest, dass gleichzeitig der Kunststoffanteil in der Phasengrenzzone stieg und die Portlanditkonzentration sank. Dies bestätigen auch Untersuchungen von SHAKER ET AL. [77]. Die Übergangszone in Normalmörtel und -beton ist gekennzeichnet durch Anreicherungen an Ettringit und Portlandit. Letzteres wächst vorzugsorientiert parallel zur Gesteinskornoberfläche. Durch den recht großen, hexagonal-tafeligen Habitus wirken die Portlanditkristalle dann festigkeitsmindernd in der Übergangszone. Hinzu kommt, dass dieser Bereich i. d. R. eine höhere Porosität aufweist, hervorgerufen durch einen erhöhten w/z -Wert im Bereich der Gesteinskornoberfläche [78][80]. Die Verringerung der Porosität ergibt sich nach ZIMBELMANN [79] aus der besseren Benetzbarkeit der Gesteinsoberflächen infolge der oberflächenaktiven Stoffe, die durch die Kunststoffe mit in den PCC eingebracht werden. Daraus ergeben sich bessere Hydratationsbedingungen und die Dicke der Übergangszone wird reduziert. Die Verringerung der Portlanditbildung erklären KIM ET AL. [81] mit einer Verminderung der Keimbildung des Calciumhydroxides durch adsorbierende Polyvinylalkohole. Ähnlich argumentieren auch OHAMA und CHANDRA [82], die ein weiteres Kristallwachstum von Portlandit dadurch gehemmt sehen, dass sich Polymerpartikel während der Hydratation an deren Oberflächen anlagern, sobald die Kristallkeime eine bestimmte Größe erreicht haben. Ein weiteres Kristallwachstum wird dadurch verhindert und es bilden sich neue Kristallkeime.

Die Ausbildung der Mikrostruktur ist demnach maßgeblich für die Festigkeitseigenschaften der PCC. Deren Hydratation wird i. A. durch die zugefügten Kunststoffe beeinflusst. Meist tritt eine Verzögerung ein und die Ausbildung der Zementsteinphasen in den ersten Tagen wird beeinträchtigt [6][63]. Wesentlich ist dabei der Einfluss auf die Ausbildung der Phasenübergangszone zwischen Zementstein und Gesteinskörnung, da hier i. d. R. die schwächste Stelle im Gefüge vorliegt. Deshalb kommt es typischerweise beim Versagen der Matrix zu einem Adhäsionsversagen in diesem Bereich, dem Korngrenzversagen.

Festigkeitseigenschaften von PCC wurden in der Literatur häufig beschrieben (z. B. [1][10]). Über die globalen Auswirkungen einer Kunststoffmodifikation auf die verschiedenen mechanischen Belastungsarten von PCC ist sich die Fachwelt im Wesentlichen einig. So stellten u. a. KONIETZKO [11] und GIERLOFF [84] für thermoplastische Kunststoffe sowie LOHAUS [85] und SCHORN [86] für EP-Systeme fest, dass die Druckfestigkeit der PCC mit steigendem Kunststoffgehalt abnimmt. Untersuchungen von DIMMIG [6], JUSTNESS [25] sowie eigene [E9][E10] bestätigten dies. Die Wirkung auf die Zug- und Biegezugfestigkeit wird dagegen eher positiv gesehen. Hier wird i. A. von einem teilweise deutlichen Anstieg berichtet (u. a. [1][6][11][25][84][85][86][E6]). Zurückgeführt wird dieser Effekt auf die Ausbildung einer zugfesten Kunststoffmatrix, was die Erhärtung der PCC oberhalb der MFT des verwendeten Kunststoffes voraussetzt. Dann bilden sich statisch günstig wirkende geschlossene Gerüstkonstruktionen und der wenig zugfeste Beton wird durch die wesentlich zugfestere Kunststoffmatrix wirksam ausgesteift [11]. Der Effekt nimmt dann mit steigendem Kunststoffgehalt zu. Die Steigerung der Zug- und Biegezugfestigkeit bei Verwendung nicht filmbildender Kunststoffe wird jedoch nicht ausreichend geklärt.

Kunststoffmodifikationen wirken sich auch auf den E-Modul aus. Dies resultiert schon allein aus der Tatsache, dass die verwendeten Kunststoffe im verfilmten bzw. getrockneten Zustand einen deutlich geringeren E-Modul aufweisen, als die restlichen PCC-Bestandteile. LOHAUS [85] untersuchte den statischen E-Modul von PCC und kam zum gleichen Ergebnis wie MAULTZSCH und KWASNY [87], welche den dynamischen E-Modul untersuchten. Letztere fanden außerdem, dass der dynamische E-Modul genauso wie bei unmodifiziertem Beton zahlenmäßig größer ist, als der statische E-Modul. Beide stellten fest, dass sich der E-Modul in Folge der Kunststoffmodifikationen verringerte.

Neben dem E-Modul spielt für die Beurteilung der Festigkeitseigenschaften bei mechanischer Belastung das Kriechen eine große Rolle. Das Kriechen stellt das viskoelastische Formänderungsverhalten, also die Überlagerung von elastischen Verformungen und viskossem Verhalten während einer mechanischen Belastung, dar. Unter andauernder Belastung nehmen die Verformungen zu. Sind diese Belastungen unterhalb einer gewissen Dauerstandsfestigkeit, so nähern sich die Verformungen einem Maximum und kommen zum Stillstand. Belastung und Widerstand gegen die Belastung sind dann im Gleichgewicht. Liegen die Belastungen jedoch über der Dauerstandsfestigkeit, kommt es im Laufe der Verformungen zum Überschreiten der aufnehmbaren Verformungen und damit zum Versagen. Ein weiteres Problem stellt die Tatsache dar, dass die mechanischen Eigenschaften viskoser Stoffe stark von der Temperatur abhängen. Daraus ist zu schlussfolgern, dass insbesondere bei den PCC der viskose Verformungsanteil mit steigender Temperatur zunimmt [88]. Zu diesem Ergebnis kommen auch verschiedene eigene Untersuchungen (u. a. [E11][E12]). Darin wurden PCC-Mörtel untersucht, welche mit Vinylacetat-Ethylen- bzw. Styrolacrylat-Dispersion modifiziert waren. Die PCC zeigten bei Dauerbelastung mit einem Drittel der Kurzzeitdruckfestigkeit ein deutlich stärkeres Kriechen als die nicht modifizierte Vergleichsprobe. KONIETZKO [11] fand ähnliches bei seinen Untersuchungen an acrylatmodifizierten, styrolacrylatmodifizierten und styrolmodifizierten Betonzylindern bei Variation des p/z -Wertes. Er konnte zudem feststellen, dass das Verformungsvermögen mit steigendem Kunststoffgehalt

zunimmt. Zurückgeführt wurde dieses Verhalten auf Ausbildung nachgiebiger Gleitebenen in der polymeren Gerüststruktur der PCC.

Ein generelles Problem bei der Anwendung von Kunststoffen im Bauwesen stellen deren temperaturabhängige Eigenschaftsänderungen dar. So liegt der Gedanke nahe, dass auch mit Polymeren modifizierte Mörtel und Betone ihre Festigkeitseigenschaften bei Temperaturwechseln stärker ändern könnten, als unmodifizierte.

Untersuchungen an unmodifizierten Mörteln und Betonen ergaben, dass im gebrauchrelevanten Temperaturbereich zwischen -20 °C und 60 °C die Festigkeitsänderungen eher gering sind. KISHINTANI und KASSAMI z. B. stellten eine Verringerung der Druckfestigkeit von 10 % nach einer 90-tägigen Lagerung der Proben bei 50 °C gegenüber den Vergleichsproben, die bei 20 °C lagerten, fest. Im Wesentlichen gibt es zwei Theorien, die diesen Festigkeitsabfall zu erklären versuchen. Die eine stützt sich auf den Feuchtigkeitsverlust, der mit einer Temperierung einhergeht. Durch das Verdunsten des physikalisch gebundenen Wassers kommt es zu einer Vergrößerung der Porenstruktur, wodurch die Festigkeit abnimmt. Nach BUDELMANN [89] wirkt sich dieser Effekt bis ca. 100 °C aber lediglich auf einen schmalen Randbereich aus. Danach ist nicht dieser Effekt allein, sondern eher ein Zusammenwirken von hydrothermalen Zement-Zuschlagsreaktionen, der Vergrößerung der Porenstruktur, Änderungen der Oberflächenenergie und des Spaltdruckes im Zementstein sowie Mikrorissbildungen infolge thermischer und hygri-scher Inkompatibilitäten der Bestandteile verantwortlich. Die zweite Theorie stützt sich mehr auf die Bildung von Mikrorissen, die bereits bei geringfügig steigenden Temperaturen einsetzt. Da diese sich aber wesentlich als Folge der Austrocknung bilden, stützen sich die beiden Theorien im Kern auf denselben Sachverhalt. Die Mikrorisse breiten sich vornehmlich in der Kontaktzone Zementstein-Zuschlag aus. SULLIVAN und POUCHER vermuten, dass diese sich bei Abkühlung der Proben nicht wieder schließen und so langfristig zu einer Gefügauflockerung führen.

Untersuchungen zur Festigkeitsbeeinflussung bei Temperaturwechseln an PCC sind in der Literatur weit weniger zu finden. Einige umfangreichere Versuche wurden z. B. von GROßKURTH und KONIETZKO [90][91][92][93] veröffentlicht. Sie untersuchten die Druckfestigkeit 28 Tage alter Betone, die mit 15 % Styrolacrylat modifiziert waren, ober- und unterhalb des Glasübergangsbereiches (ca. 35 °C). Im Ergebnis schlussfolgerten sie, dass infolge der Reduzierung des E-Moduls der Polymerfilme bei höheren Temperaturen die modifizierten Betone geringere Spannungen bei gleichzeitig höheren Dehnungen aufnehmen können, als bei niedrigeren Temperaturen. SCHORN [83] kommt zu denselben Ergebnissen bei seinen Untersuchungen, bei denen die Druckfestigkeit bis 200 °C bestimmt wurde. Er verweist auch auf Langzeituntersuchungen von GIERLOFF [84], welcher beobachtete, dass durch die Kunststoffe die Rissbildungen reduziert werden.

5.2 Einfluss der Kunststoffe auf die PCC-Matrix

Nach DIMMIG-OSBURG [61] erfolgt durch die Modifikation mit Kunststoffen eine Auflockerung des Zementsteingefüges. Sie fand heraus, dass die Formierung der Kunststoffmatrix im Wesentlichen bereits nach 24 bis 72 erfolgt ist, wobei sich die hauptsächlichen Unterschiede zu nicht modifizierten Systemen bereits in den ersten Minuten herausbilden. Neben einer verzögerten Hydratation werden geringere Mengen an Ettringit gebildet, deren Kristallgröße dazu noch kleiner ist, als bei unmodifizierten Systemen.

In diesem Abschnitt werden die Auswirkungen einer Belastung auf die PCC-Matrix beschrieben. Dazu war es notwendig, den Ausgangszustand des Zement-Kunststoff-Gesteinsgefüges unmittelbar vor der Belastung zu charakterisieren. Es wurden an 28 Tage alten Proben der verschiedenen PCC und einer unmodifizierten Vergleichsprobe REM-, in Einzelfällen auch ESEM-Untersuchungen durchgeführt. Damit konnte das Gefüge hinsichtlich der Ausbildung von Poren, Reaktionsprodukten der Klinkerphasen sowie der Kunststoffmatrix und deren Verteilung, dem Vorhandensein von Mikrorissen infolge Schwindens und dem Verbund der Zementstein- bzw. Kunststoffmatrix zu Gesteinskörnern charakterisiert werden.

Die untersuchten Proben wurden i. d. R. aus dem Kernbereich der verschiedenen Probekörper gewonnen, da hier äußere Einflüsse wie Trocknung und dadurch bedingter verstärkter Mikrorissbildung durch erhöhtes Schwinden, Karbonatisierung u. ä. weitgehend minimiert werden konnten. Die Bruchstücke wurden dann zum größten Teil mit einer Feinsäge bearbeitet, so dass es sich bei der mikroskopierten Fläche um eine Sägefläche handelte. Dies hatte den Vorteil, dass eine bessere Tiefenschärfe der Bilder erzielt werden konnte, als dies an einer reinen Bruchfläche möglich gewesen wäre. Zur besseren Identifikation bzw. zur deutlichen Sichtbarmachung der Kunststoffphase wurden die zu mikroskopierenden PCC mit einem Säuregemisch angeätzt. Der Zementstein wurde dadurch aus der Oberfläche der Probe herausgelöst. Übrig und somit gut sichtbar blieb nur die organische Phase.

Die unmodifizierte Probe weist ein typisches, relativ dichtes Mörtelgefüge auf (Abb. 5-1). Die Gesteinskörner des Quarzsandes sind meist aus der Matrix herausgebrochen, seltener zerissen. Dieses Korngrenzversagen deutet auf eine im Vergleich zur Gesteinskörnung geringere Matrixfestigkeit des Zementsteines, was in diesen Festigkeitsklassen durchaus üblich ist. Die Gesteinskornoberfläche ohne Anhaftungen von Zementsteinresten belegt eine geringere Verbundfestigkeit des Zementsteines. In Folge der sehr glatten Gesteinsoberfläche gibt es kaum Möglichkeiten für Verkrallungen des Zementsteines. Ausgehend davon, dass es sich bei dem verwendeten Gestein nicht um langsam reagierendes Material handelt (etwa puzzolanisches Gestein o. ä.), beruht somit der Verbund auf reiner Adhäsion. Die Kohäsion dieses normalen Mörtels setzt sich demzufolge aus der Kohäsion der Gesteinskörner, der Kohäsion des Zementsteines und der Adhäsion zwischen Gesteinskörnern und Zementstein zusammen.

Die Poren sind größtenteils von Mikrorissen durchzogen, die wahrscheinlich von Schwindvorgängen infolge Austrocknung und Hydratation herrühren. Häufig sind in den Poren Reaktionsprodukte der Zementklinkerphasen, wie z. B. Portlandit, seltener Ettringit, zu finden. Die Größe der Poren ist variabel und deckt ein breites Spektrum ab. Vermehrt treten jedoch sehr kleine Poren auf. Vielfach handelt es sich um kugelförmige Poren. Der Gesamtanteil der Poren in der Matrix ist jedoch nicht sehr hoch.

Im Gegensatz dazu wirkt die Matrix des PCC 1 sehr porig (Abb. 5-2). Hier sind vor allem kleinere und mittelgroße Kugelporen bis 100 µm zu finden. Die Poren sind von Kunststofffilmen regelrecht ausgekleidet. Es scheint, als ob sich Kunststoffdomänen bevorzugt in diesen Hohlräumen gebildet haben. Der Strukturausbildungstheorie von Dimmig-Osburg folgend, stellen diese Porenauskleidungen im Wesentlichen den nicht adsorbierten Rest der Kunststoffteilchen dar, welcher nach dem Anmischen in der Flüssigphase verblieben ist. Schwindrisse an den Porenwandungen wie bei der Vergleichsprobe sind nicht zu erkennen. Sollten diese vorhanden sein, werden sie vollständig Kunststofffilmen überbrückt bzw. überdeckt. Reaktionsprodukte der Zementklinkerphasen waren in den Poren des PCC 1 nicht zu finden. Vereinzelt konnten Fragmente beobachtet werden, die jedoch von der Kunststoffphase derart überdeckt waren, dass sie nicht eindeutig zu identifizieren waren.

An Gesteinsoberflächen, die aus der Matrix gerissen wurden, sind flechtenartige Anhaftungen des KS 1 und damit durchsetzte Zementsteinmatrix zu erkennen. Eindeutiger wird die Zuordnung durch die Aufnahme im Rückstreuелеktronenbild (RE-Bild), in dem die organischen Bestandteile, also der Kunststoff, dunkler erscheinen. Es ist ein adhäsiver Verbund zwischen Zementsteinmatrix, gleichmäßig verteilten Kunststofffilmen und Gesteinskörnern sichtbar. Im Vergleich zum unmodifizierten Mörtel kann hier von einer deutlich erhöhten Adhäsion zwischen Zementsteinmatrix und Gesteinskörnern infolge der Kunststofffilme ausgegangen werden. Bei stärkeren Vergrößerungen sind einzelne Kunststoffpartikel auf Gesteinsoberflächen zu erkennen, die entweder gar nicht oder nur punktuell aneinander haften. Diese geringen Schichtdicken sind jedoch ausreichend, den adhäsiven Verbund des Zementsteines zur Gesteinskörnung und damit die Kohäsion im gesamten Mörtel deutlich zu erhöhen. Schwindrisse werden bereits frühzeitig von Kunststofffilmen überbrückt. Dies stützt den inneren Zusammenhalt im Mörtel zusätzlich.

Da der KS 2 eine MFT von > 30 °C hat, waren gut ausgebildete Kunststofffilme beim PCC 2 kaum zu erwarten. Wie jedoch DIMMIG [6] bereits feststellte und in weiteren Untersuchungen bestätigt werden konnte [62][63][E8], waren im Gefüge trotz der erhöhten MFT, die während der Herstellung, Lagerung und Präparation der Proben nicht erreicht bzw. überschritten wurde, gut verteilte Kunststoffdomänen zu finden (Abb. 5-3). Diese können aber als nicht zugfest angesehen werden. Wie schon beim PCC 1 waren auch hier flächige Anhaftungen von kunststoffdurchsetzten Zementsteinresten an Gesteinskörnern zu erkennen. Die Zementsteinmatrix war ebenfalls von Kunststoff durchzogen und wirkte sehr homogen. Sie erschien jedoch sehr viel dichter im Vergleich zum PCC 1. Unterschiede gab es bei den Poren. Zwar waren auch hier die Porenwandungen mit Kunststofffilmen überzogen. Während aber beim PCC 1 die wenigen Fragmente der Reaktionsprodukte nicht identifiziert werden konnten, waren beim PCC 2 in einigen Poren von Kunststoffen überzogene Fragmente des Portlandzements deutlich zu erkennen. Letztlich waren in der Verteilung der Kunststoffphase bei beiden PCC kaum Unterschiede zu erkennen.

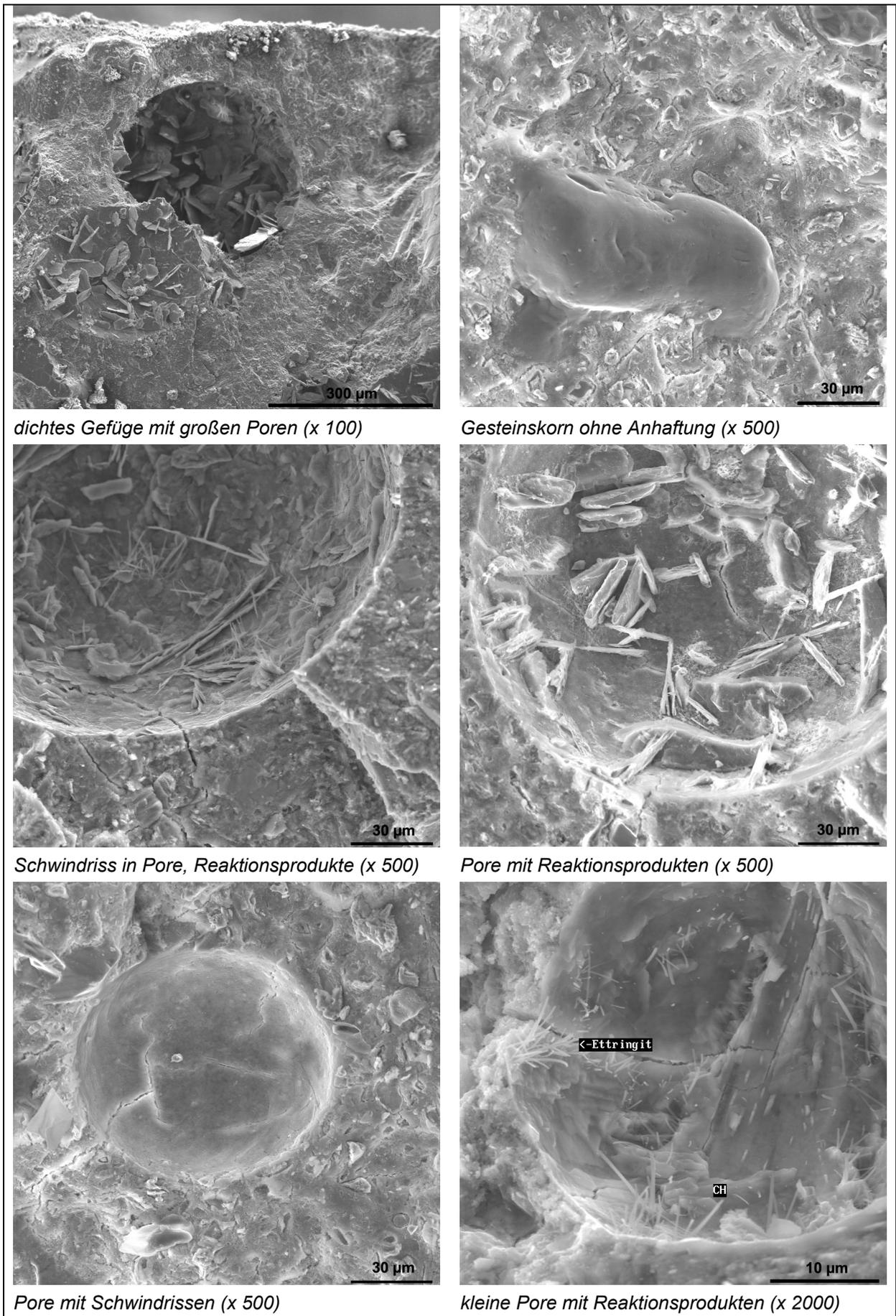


Abb. 5-1: unbelastete Mörtelmatrix der unmodifizierten Vergleichsprobe

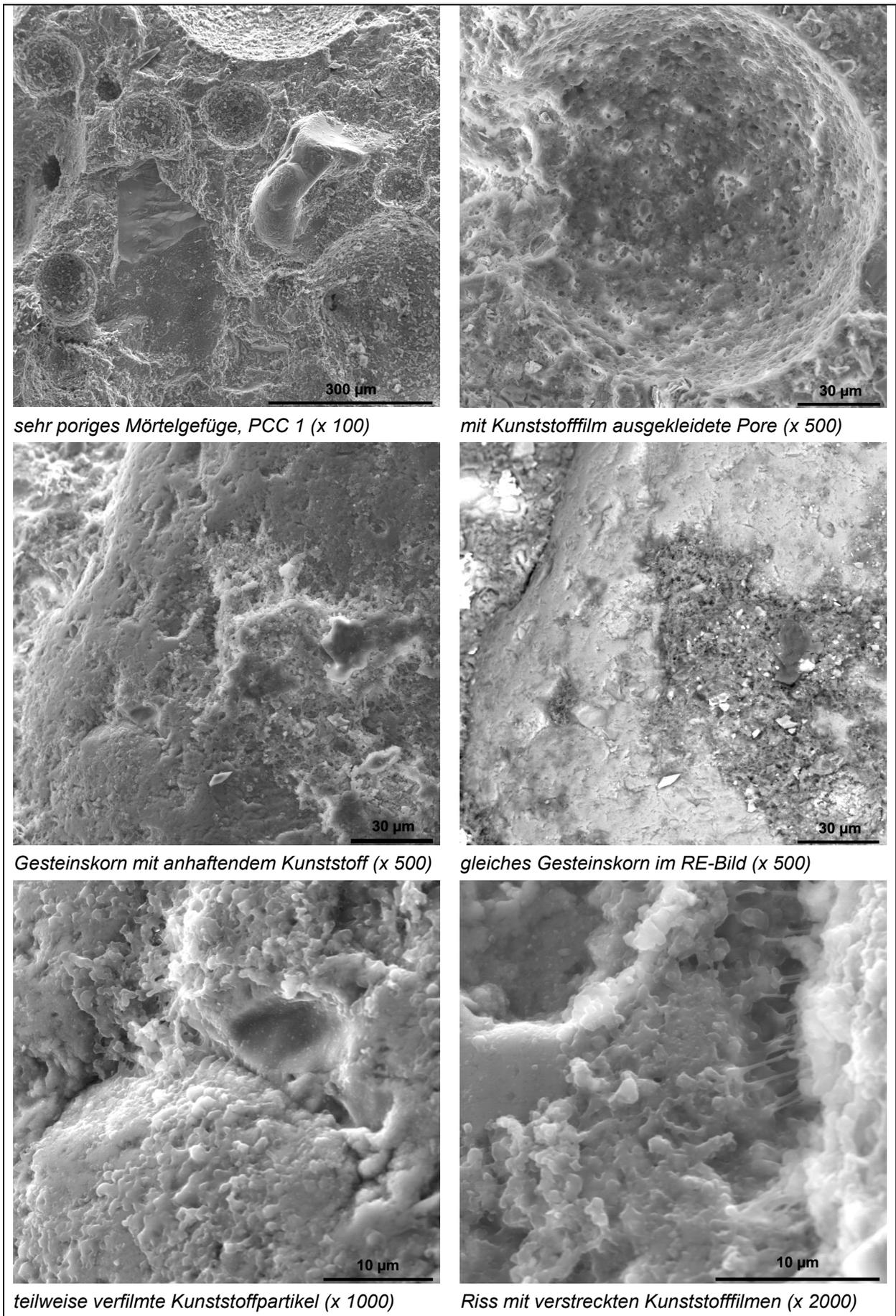
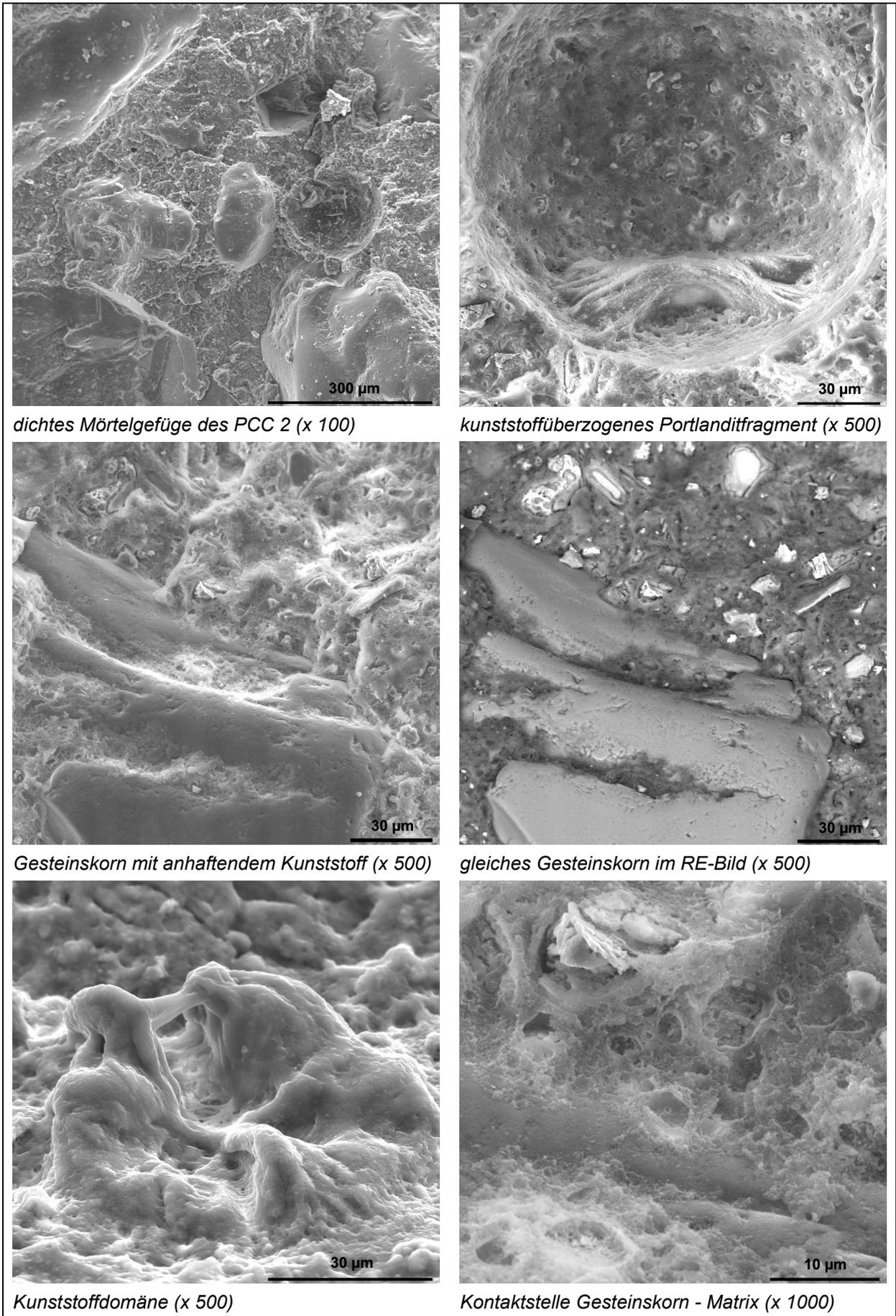


Abb. 5-2: unbelastete Mörtelmatrix des PCC 1



dichtes Mörtelgefüge des PCC 2 (x 100)

kunststoffüberzogenes Portlanditfragment (x 500)

Gesteinskorn mit anhaftendem Kunststoff (x 500)

gleiches Gesteinskorn im RE-Bild (x 500)

Kunststoffdomäne (x 500)

Kontaktstelle Gesteinskorn - Matrix (x 1000)

Abb. 5-3: unbelastete Mörtelmatrix des PCC 2

5.3 Verhalten von PCC unter Kurzzeitbelastung

Die im Folgenden dargestellten Versuche wurden an den in Abschnitt 2.2 erläuterten CEM I - Rezepturen durchgeführt. Dabei kamen für die Druck- und Zugversuche jeweils die Betonrezepturen, für die Biegezugversuche die Mörtelrezepturen zur Anwendung. Ziel war es einerseits, den direkten Vergleich von kunststoffmodifizierten und nicht modifizierten Rezepturen bei der jeweiligen Belastungsart hinsichtlich des Verformungsverhaltens zu erfassen. Andererseits sollte das Mikrogefüge vor nach der Belastung untersucht werden, um Rückschlüsse auf das Verbundverhalten unter der Belastung ziehen zu können. Von besonderem Interesse war dabei, ob z. B. der Kraftfluss nachträglich identifiziert werden kann und wie die beiden unterschiedlichen Kunststoffe auf den Verbund zur Gesteinskörnung wirken.

5.3.1 Druckbeanspruchung

Die Belastungsversuche zur Druckbeanspruchung wurden an 28 Tage alten Betonzylindern ($D/h = 10 \text{ cm}/30 \text{ cm}$) durchgeführt. Bei der gewählten Probenschlankheit von $1 : 3$ kann im mittleren Bereich von einem einaxialen Spannungszustand ausgegangen werden. An den Zylindern wurden mittig auf der Mantelflächenlängsachse und in den Drittelpunkten des Mantelumfanges Dehnmessstreifen (DMS) über Kreuz appliziert, um so die Querdehnungen sowie die Längsstauchungen messen zu können (Abb. 5-4).

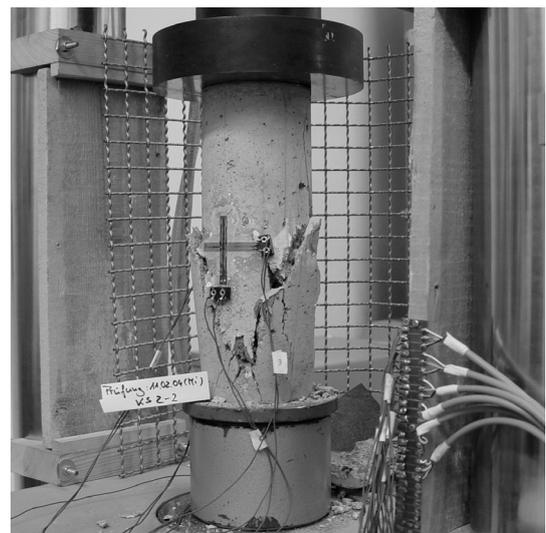
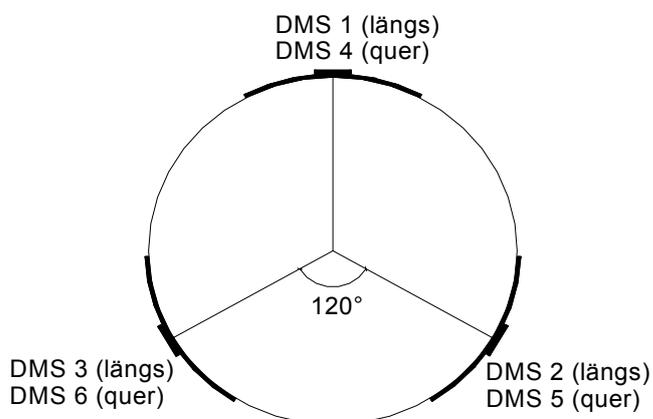


Abb. 5-4: Positionen der DMS auf der Mantelfläche

Abb. 5-5: versagte PCC 1- Probe bei 90 %

Vor den eigentlichen Druckversuchen wurde an adequate Probekörpern die jeweilige Bruchkraft bestimmt. Diese bildete den Ausgangspunkt zur Bestimmung der rezepturspezifischen Maximalkraft während der Lasthaltephase. Der Versuchsablauf wurde wie folgt konzipiert:

- Belastung der Probe bis 90 % ihrer Bruchlast, Belastungsgeschwindigkeit $0,6 \text{ kN/s}$
- Halten der Maximallast für 3 min (kraft geregelt)
- Entlasten auf 1 kN , Belastungsgeschwindigkeit $0,6 \text{ kN/s}$
- Halten bei 1 kN für 3 min (kraft geregelt), anschließend vollständig entlasten

Tatsächlich wurde die Kraft bis 90 % der Bruchlast bei der Vergleichsprobe, bei den PCC aber nur bis 80 % gesteigert. Bei den ersten Versuchen an den PCC mit einer Maximallast

von 90 % zeigte sich, dass die Proben während der Lasthaltephase infolge des starken Kriechens versagten (Abb. 5-5). Deshalb wurde die Maximallast reduziert.

Bei der Auswertung der Versuchsergebnisse wurde für die bessere Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Rezepturen die „bezogene Spannung“ berechnet. Dabei wird die bei der Bruchkraft der jeweiligen Rezeptur auftretende Spannung gleich 100 % gesetzt und die maximale Belastung während des Versuches darauf bezogen. Dadurch werden nicht die Verformungen bei einer absoluten Kraft, sondern die Verformungen bei einer auf die individuelle Bruchkraft bezogenen Spannung miteinander verglichen.

Aus den Verformungskurven (Abb. 5-6) sind deutlich größere Querdehnungen und Längsstauchungen für die PCC abzulesen, obwohl die Belastung der Vergleichsprobe um einiges höher war. Besonders während der Lasthaltephasen konnten wesentlich höhere Kriechverformungen festgestellt werden. Ein hauptsächlicher Grund dafür sind die geringeren E-Moduln der PCC (vgl. Tab. 2-7). Hinzu kommt, dass durch die Kunststoffe Gleitebenen im Gefüge entstehen, die es der Matrix erleichtern, sich einer aufgebracht, komprimierend wirkenden Last zu entziehen. Insbesondere bei einer konstant gehaltenen hohen Belastung ist dies durch die hohen Kriechverformungen gut zu beobachten. Das Gefüge hat ausreichend Zeit, Kräfte umzulagern und sich der Belastung anzupassen. Besonders beim PCC 2 ist zu beobachten, dass sich dieser Effekt auch über die Lasthaltephase hinaus fortsetzt. Trotz der beginnenden Entlastung stiegen die Dehnungen noch weiter an.

Als positiv ist die Tatsache zu bewerten, dass die PCC auch bei dieser für das eigentlich spröde Stoffsystem „Beton“ großen Verformung nicht versagt haben. Diese Extrembelastung wurde von allen PCC ohne sichtbare Risse und Schäden ertragen. Neben den geringeren E-Moduln wird dies durch die erhöhte Zugfestigkeit ermöglicht, welche dafür sorgt, dass es im Schubbereich trotz erhöhter Verformungen nicht zum kohäsiven Versagen kommt. Den bei diesen Rezepturen geringeren Druckfestigkeiten der PCC im Vergleich zur unmodifizierten Rezeptur kann unter Ausnutzung betontechnologischer Maßnahmen (z. B. Reduktion des w/z-Wertes unter Ausnutzung des verflüssigenden Effektes der Kunststoffe) entgegengewirkt werden. Die positiven Effekte des Verformungsvermögens sollten dadurch kaum beeinträchtigt werden.

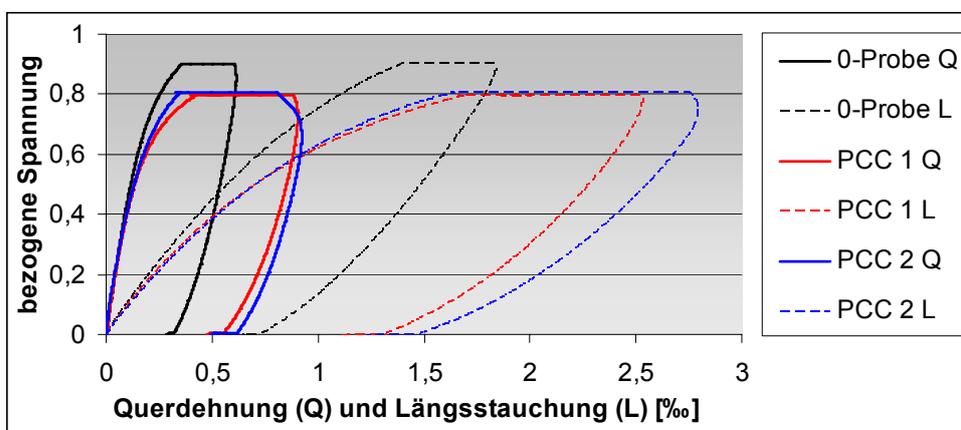


Abb. 5-6: Verformungen während der Druckbeanspruchung

5.3.2 Zugbeanspruchung

Die Zugbeanspruchung wurde nicht wie sonst üblich an reinen Betonproben ermittelt. Für die hier durchgeführten Versuche wurden Betonzylinder ($D/h = 10 \text{ cm}/100 \text{ cm}$) in Längsrichtung axial mit einem Bewehrungsstab ($D = 12 \text{ mm}$) bewehrt. Der Stabstahl ragte an den Enden aus den Probekörpern heraus, so dass die Probe am Stahl eingespannt werden konnte. Die querkräftfreie Krafteinleitung in den Beton verlief über den Stahl. Das Prüfregime, mit dem die 28 Tage alten Probekörper belastet wurden, war ähnlich dem für die Druckversuche:

- Beanspruchung der Probe bis 50 kN, Belastungsgeschwindigkeit 0,1 kN/s
- Halten der Maximallast für 3 min (kraftgeregelt)
- Entlasten auf 1 kN, Belastungsgeschwindigkeit 0,1 kN/s
- Halten bei 1 kN für 3 min (kraftgeregelt), anschließend vollständig entlasten

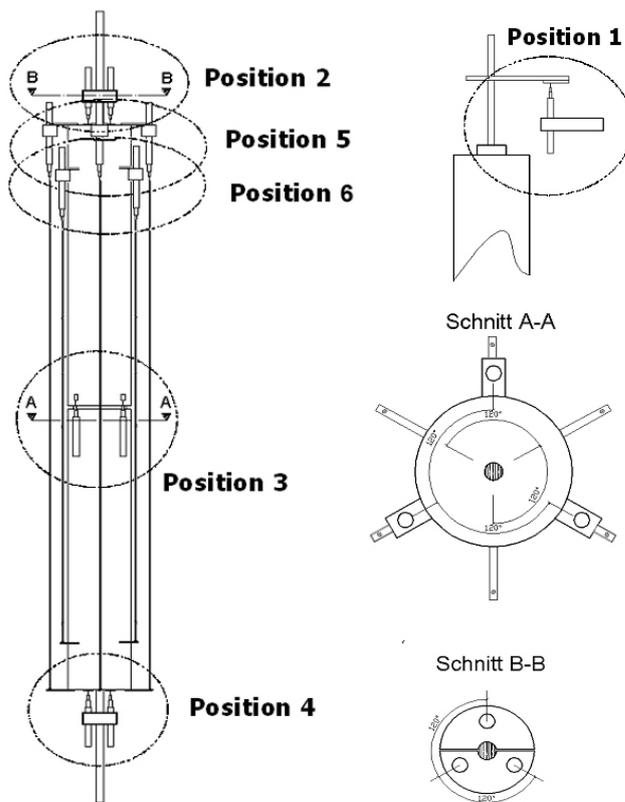


Abb. 5-7: Positionen der IWT an der Mantelfläche

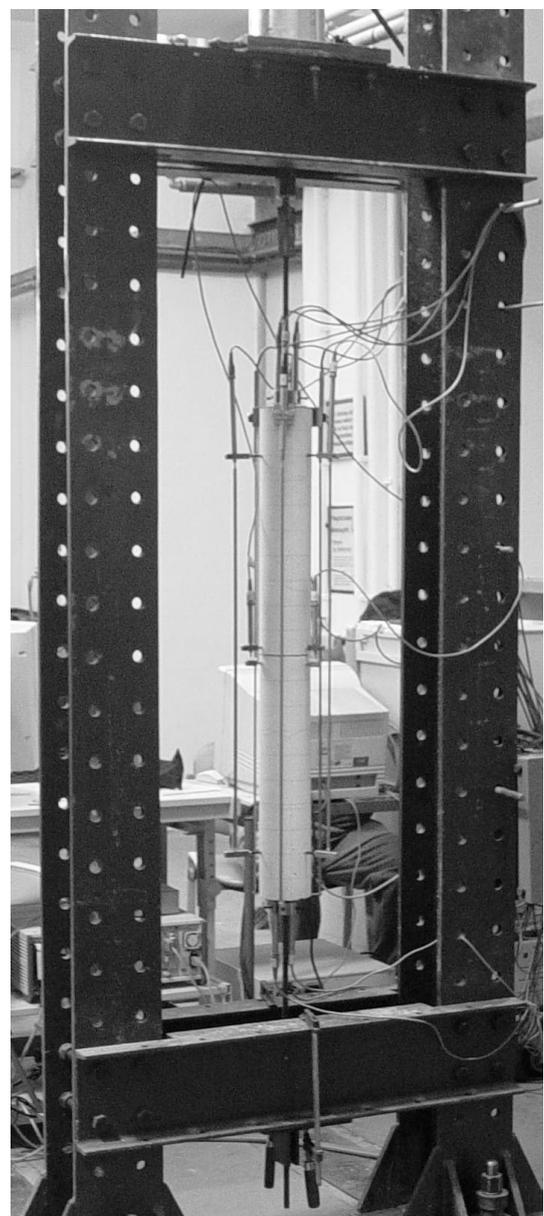


Abb. 5-8: Prüfraumen mit eingehängtem Dehnkörper

Die Maximallast von 50 kN war für alle Proben gleich. Sie markiert ungefähr den Beginn des Fließens des verwendeten Stahls.

Beim Betonieren wurde nach einem vorher festgelegten Raster an verschiedenen Stellen der Mantelflächen der Zylinder Gewindehülsen einbetoniert, an denen später zahlreiche induktive Wegaufnehmer (IWT) befestigt werden konnten (Abb. 5-7). Damit war es möglich, die Änderungen verschiedener, während des Versuches interessanter Wegstrecken zu erfassen. Im Einzelnen sollten mit den IWT-Positionen folgende Wegstrecken erfasst werden:

Pos. 1	Zylinderweg
Pos. 2 + 4	Ankerschlupf
Pos. 3	Betondehnung im Erstriss
Pos. 5	Betondehnung über den gesamten Probekörper (100 cm)
Pos. 6	Betondehnung außerhalb des Kräfteinleitungsbereiches (80 cm)

So konnten u. a. Aussagen zu Zeitpunkten der Rissentstehung, Rissanzahl, Rissweiten, Risskräften u. ä. getroffen werden.

Zur Sicherstellung des Erstrisses in Probenmitte wurde vor Versuchsbeginn eine 5 mm tiefe umlaufende Nut in die Mantelfläche gesägt, um den Querschnitt an dieser definierten Stelle zu schwächen. Die Aufnahme der Messdaten der IWT's erfolgte kontinuierlich.

Die Kurven der Gesamtdehnung (Abb. 5-9) zeigen, dass die PCC geringere Verformungen aufweisen, als die Vergleichsprobe. Gründe dafür sind das spätere Einsetzen des Erstrisses (Abb. 5-11) und die größere Belastbarkeit der PCC zwischen den Rissen, beides aufgrund der höheren Zugfestigkeit der PCC. Es ist zu erkennen, dass die Erstrisskraft bei den PCC höher ist. Das endgültige Rissbild stellt sich bei der unmodifizierten Probe am schnellsten ein. Nachdem sich der letzte Riss geöffnet hat, wird die weitere Dehnung im Wesentlichen vom Bewehrungsstahl bestimmt. Bei den PCC dagegen bilden sich die Risse bei höheren Lasten, insbesondere beim PCC 1. Hier sind die Unterschiede zur Vergleichsprobe am deutlichsten. Die waagerechten Plateaus in den Kurven kennzeichnen Momente, in denen ein Riss entstand und sich öffnete. Eindeutige Trends zu einer Veränderung der Rissanzahl konnten nicht beobachtet werden. Es traten zwischen 4 und 6 Risse an allen untersuchten Proben auf (Abb. 5-12).

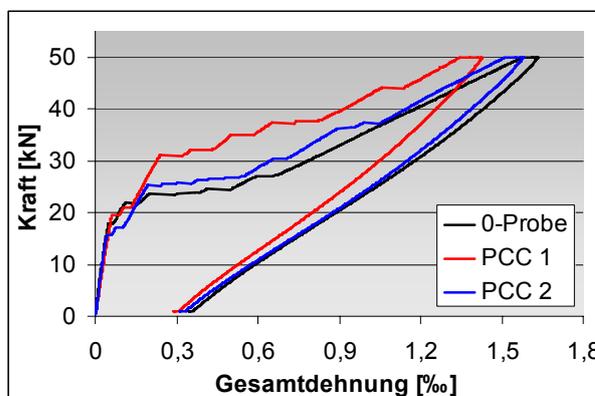


Abb. 5-9: Gesamtdehnung der Dehnkörper

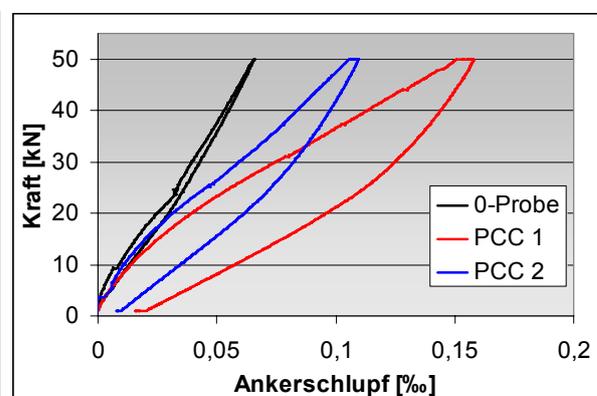


Abb. 5-10: mittlerer Ankerschlupf der Dehnkörper

Die Dehnungen während der Lasthaltephasen sind bei den PCC etwas größer als bei der Vergleichsprobe. Wie schon bei den Druckversuchen kann dies mit den geringeren E-Mo-

duln begründet werden. Dadurch können Kräfte umgelagert werden und das Gefüge kann sich der Belastung „anpassen“.

Die Unterschiede in den Dehnungen nach der Entlastung sind wesentlich geringer als bei Erreichen der Maximallast. Dies ist damit zu begründen, dass die Relaxationen während der Entlastung hauptsächlich vom elastischen Anteil der Stahlverformung abhängen. Durch Verkantungen in den sich schließenden Rissen kommt es zu geringen Unterschieden. Die elastischen Anteile der PCC werden vorrangig während der Lasthaltephase bei 1 kN abgebaut. Dort sind jedoch kaum Unterschiede zu interpretieren.

Zur Abschätzung des Verformungsverhaltens im Krafterleitungsbereich wurde der Ankerschlupf genauer untersucht (Abb. 5-10). Dabei zeigte sich, dass sich die Verformungsausmaße umkehren. Hier weist der PCC 2 die größten, der Vergleichsbeton die geringsten Verformungen auf. Da die Größe des Ankerschlupfes im Wesentlichen von der Druckfestigkeit (geringerer Ankerschlupf bei steigender Druckfestigkeit) und dem E-Modul (höherer Ankerschlupf bei geringerem E-Modul) abhängig ist, ist diese Tatsache jedoch nicht verwunderlich. Sehr ausgeprägt sind auch hier wieder die starken Kriechverformungen der PCC während der Lasthaltephase infolge von Kräfteumlagerungen. Der Vergleichsbeton dagegen weist keinerlei Verformungen in dieser Phase auf.



Abb. 5-11 IWT über gerissener Sägenut, Erstriss

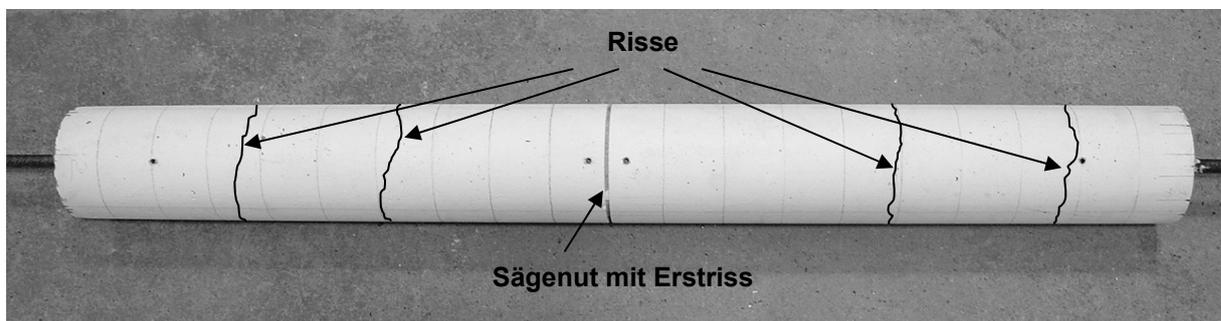


Abb. 5-12: Dehnkörper nach Versuchende

5.3.3 Biegezugbeanspruchung

Die Biegebeanspruchung stellt eine Kombination aus Druck- und Zugbelastung dar. Im Druckbereich kommt es zu einer Gefügekompensation verbunden mit den Nachteilen, die sich infolge der Kunststoffmodifikation für eine Druckbeanspruchung ergeben. Im Zugbereich

dagegen kommen die Vorteile einer Kunststoffmodifikation voll zum tragen. In Folge der erhöhten Zugfestigkeit ist eine erhöhte Rissfreiheit gegeben.

In diesem Untersuchungsschwerpunkt wurde an Mörtelprismen das Verformungsverhalten bei Biegebelastung untersucht. Zum Versuchszeitpunkt waren die Prismen ca. 200 Tage alt. Es konnte also davon ausgegangen werden, dass der wesentliche Teil der Festigkeitsbildung abgeschlossen war, selbst bei dem verzögerten Hydratationsverlauf der PCC. Die Prismen wurden im Dreipunkt-Biegeversuch belastet. Auf Grund der Erfahrungen aus den Druckversuchen an den PCC wurde in Vorversuchen die Maximalbelastung in der Lasthaltephase schrittweise von 65 % auf 90 % der Bruchkraft, welche vorher an gleich alten Prismen bestimmt wurde, erhöht. Es stellte sich heraus, dass die Mörtelprismen bei 90 % der Bruchkraft auch nach einer verlängerten Lasthaltephase von 5 min nicht durch erhöhte Kriechverformungen versagten. Deshalb wurde folgendes Belastungsregime festgelegt:

- Belastung der Probe bis 90 % ihrer Bruchlast, Belastungsgeschwindigkeit 50 N/s
- Halten der Maximallast für 5 min (kraftgeregelt)
- Entlasten auf 25 N, Belastungsgeschwindigkeit 50 N/s
- Halten bei 25 N für 5 min (kraftgeregelt), anschließend vollständig entlasten

Während des gesamten Versuchs wurde die Durchbiegung in Probenmitte gemessen (Abb. 5-14). Nach Beendigung des jeweiligen Belastungsversuchs wurden die Prismen mittels Ultraschall durchschallt, um evtl. auftretende Mikrorisse bzw. Gefügeschädigungen detektieren zu können. Die Ultraschallmessköpfe hatten eine sehr kleine Ankopplfläche, so dass eine punktuelle Ankopplung möglich war. Deshalb wurden drei Durchschallungsachsen in Probenlängsrichtung festgelegt (Abb. 5-11):

- | | |
|---------|---|
| Achse 1 | im Druckbereich, oberer Viertelpunkt (MP 1) |
| Achse 2 | in der Nulllinie, mittlerer Viertelpunkt (MP 2) |
| Achse 3 | im Zugbereich, unterer Viertelpunkt (MP 3) |

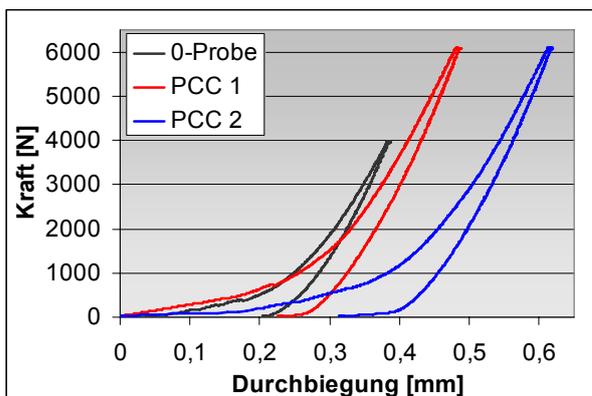


Abb. 5-13: Kraft-Durchbiegungskurven der Biegezugversuche **Abb. 5-14:** Versuchsaufbau Biegezugprüfung

Die erhaltenen Kraft-Durchbiegungskurven (Abb. 5-13) zeigen, dass einerseits die kunststoffmodifizierten Proben eine wesentlich höhere Biegezugfestigkeit haben als die Vergleichsprobe. Andererseits weisen sie eine deutlich größere Durchbiegung und ein verstärk-

tes Kriechen während der Lasthaltephasen auf. Insbesondere beim PCC 2 nehmen die Verformungen bereits bei geringen Kräften stark zu. Bei einer Belastung mit 1000 N liegen diese bereits ca. 50 % über den Verformungen des PCC 1 und der Vergleichsmischung, welche beide bei dieser Belastung vergleichbare Verformungen aufweisen. Über 1000 N ist der Anstieg der Verformungskurven der PCC flacher als der der Vergleichsproben. Diese Tatsachen belegen wiederum, dass über das polymermodifizierte Gefüge die auftretenden Spannungen durch Kriechverformungen verstärkt abgebaut werden. Die Verformungen setzen sich aus einem plastischen, einem viskoelastischen und einem elastischen Anteil zusammen. Der Anteil der viskoelastischen und elastischen Verformung ist bei den PCC deutlich höher als bei der Vergleichsmischung, was sich in einem verstärkten Rückkriechen am Belastungsende äußert. Jedoch ist auch der plastische Verformungsanteil erhöht. Da weder während noch nach der Belastung Risse im Zugbereich der Proben festgestellt werden konnten, ist davon auszugehen, dass die PCC trotz der höheren Verformungen höhere Belastungen rissfrei überstehen. Dies ist wiederum auf die erhöhte Zugfestigkeit zurückzuführen. Auch die Auswertung der Ultraschalluntersuchungen bestätigte dieses Ergebnis. Es konnten keine Anzeichen für eine Gefügauflockerung durch Mikrorissbildungen identifiziert werden. Der Vergleich der Laufzeiten des Ultraschallsignals (Abb. 5-15) vor und nach der Belastung zeigte keine Unterschiede im Einsatzzeitpunkt des Signals. Auf Grund dieses Ergebnisses wurden einige Proben ein zweites und drittes Mal dem Belastungsregime unterzogen. Auch hier war bei der nachfolgenden Ultraschalluntersuchung keine Schädigung feststellbar.

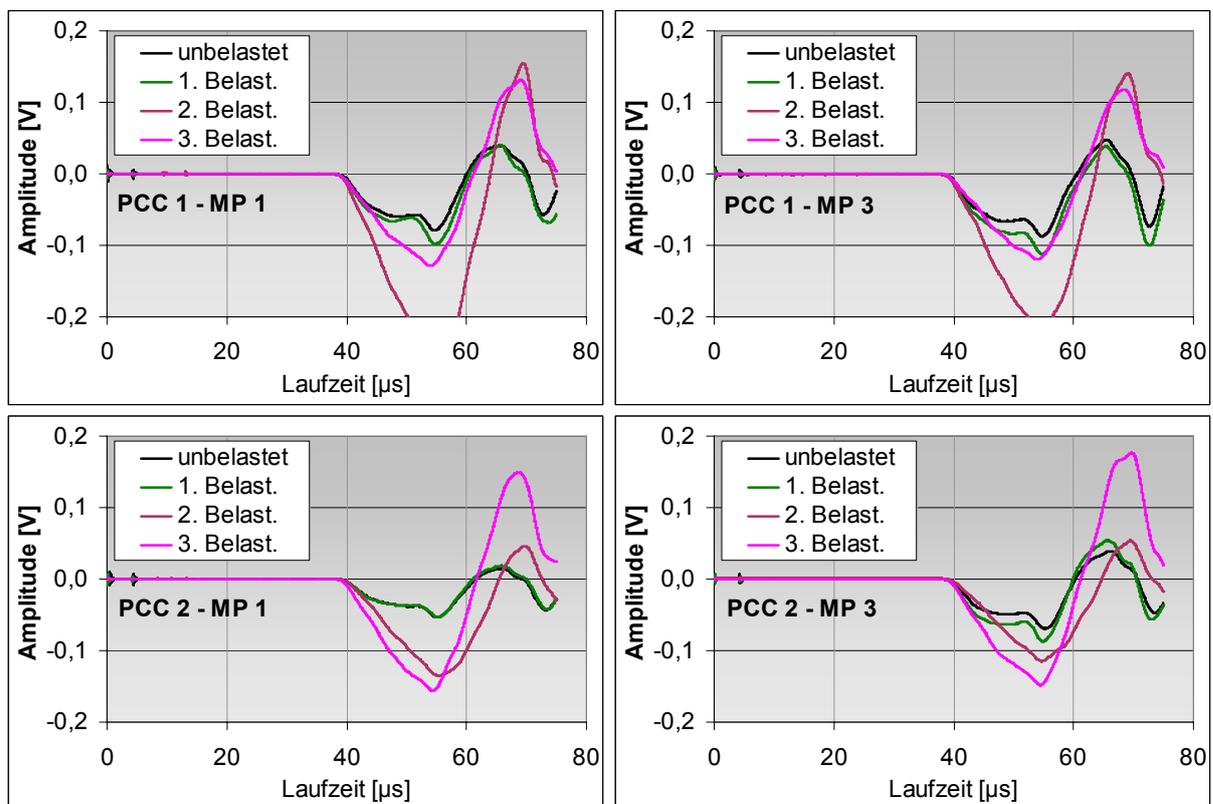


Abb. 5-15: Ultraschalllaufzeiten vor und nach Belastung

Daraus lässt sich schlussfolgern, dass es wahrscheinlich bei einer Kurzzeitbelastung bis zu 90 % der Bruchlast dieser PCC-Rezepturen noch zu keiner Schädigung im Mikrogefüge kommt. Andererseits könnte die Methode des Durchschallens mit Ultraschall nicht sensibel

genug sein, um geringe Schädigungen darzustellen. Möglicherweise schließen sich die Mikrorisse beim Entlasten wieder und können so nicht erfasst werden. Zur Erfassung wären dann Ultraschalluntersuchungen während der Belastung sinnvoll, wie sie bei den Untersuchungen im folgenden Abschnitt durchgeführt wurden. Dagegen spricht allerdings, dass sich bei wiederholter Belastung keine stärkeren Schäden ergaben und wiederum keine Änderungen im Einsatzzeitpunkt des Ultraschallsignals detektiert werden konnten.

5.4 Verhalten von PCC unter andauernder Druckbelastung

Die Kurzzeitversuche zeigten einen starken Einfluss der Kunststoffe auf das Verformungsverhalten der PCC. Besonders ausgeprägt war dies bei der Druckbelastung. Da Betone hauptsächlich auf Druck belastet werden, ist die Kenntnis über das Verformungsverhalten bei dieser Belastungsart sehr wichtig, zumal i. d. R. nicht nur von einer Kurzzeitbelastung ausgegangen werden kann. Deshalb wurde in diesem Untersuchungsschwerpunkt das Verhalten unter andauernder Druckbelastung exemplarisch am PCC 1 untersucht. Dieser PCC wurde aufgrund der filmbildenden Eigenschaften des verwendeten Kunststoffes und der erhöhten Porosität, welche sich i. A. negativ auf die Druckfestigkeit auswirkt, ausgewählt.

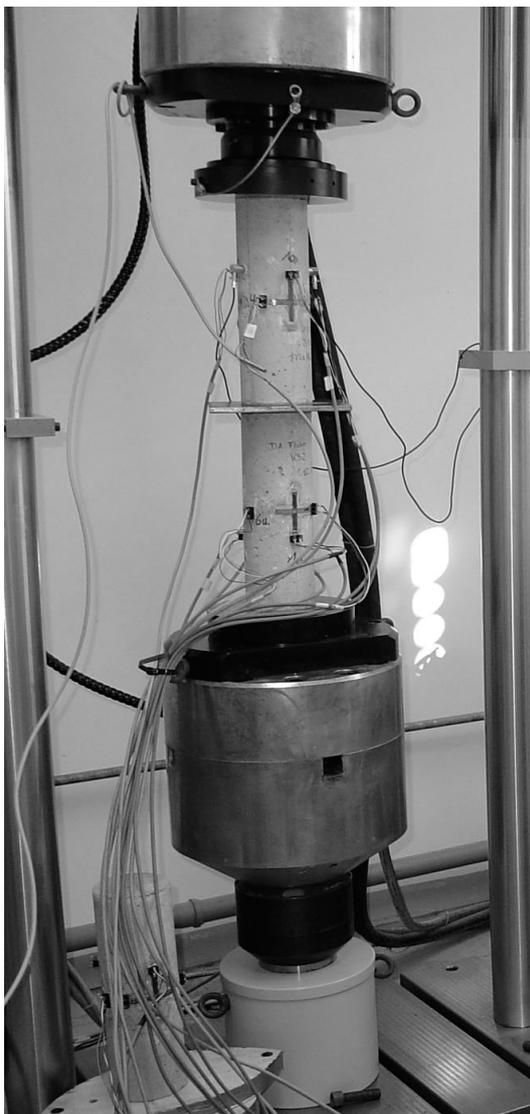


Abb. 5-16: Dauerstandsversuch

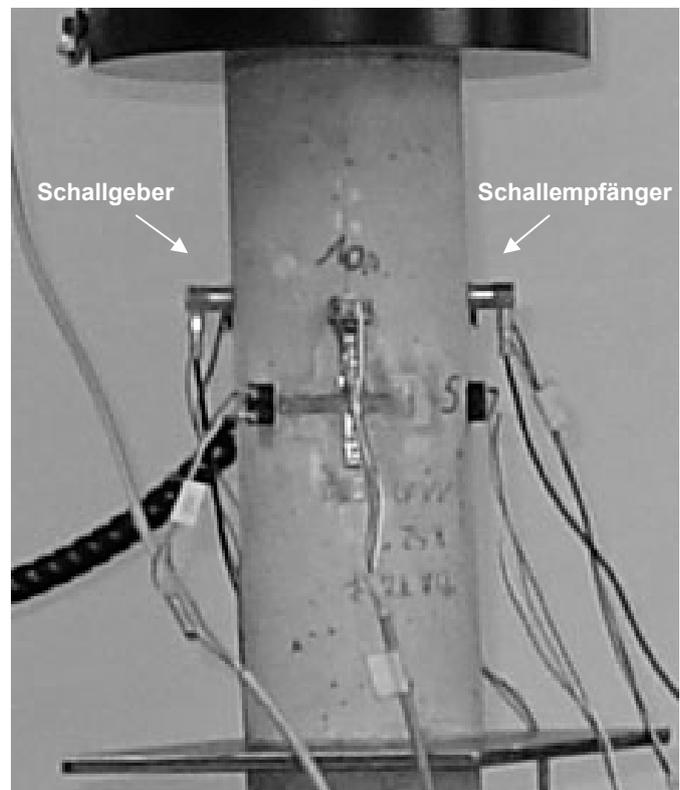


Abb. 5-17: Ankopplung der Ultraschallmessköpfe

Es wurden Probekörper der gleichen Abmessungen wie im Abschnitt 5.3.1 verwendet, die ebenso mit DMS versehen waren. Das Probenalter betrug abweichend von sonst üblichen Erhärtungszeiträumen 75 Tage. Da die Kunststoffe die Hydratation verzögern, sollten diese Proben die Möglichkeit haben, den Hydratationsverlust aufzuholen und eine höhere Druckfestigkeit gewinnen. Die Messungen wurden an zwei Proben durchgeführt, welche gleichzeitig übereinander in derselben Prüfmaschine belastet wurden (Abb. 5-16). Zusätzlich wurde am oberen Probekörper permanent (in Zeitintervallen von 4 h) während des Versuches die Ultraschalllaufzeit über den Zylinderdurchmesser gemessen (Abb. 5-17), um ein evtl. Versagen anhand der Verringerung der Schallgeschwindigkeit detektieren zu können. Damit sollten Aussagen über eintretende Mikrozerstörungen im Betongefüge getroffen werden.

Vor Versuchsbeginn wurde an entsprechend alten Proben die Bruchkraft bestimmt, welche bei 343 kN lag. Beim Druckdauerstandsversuch wurde dann mit einer Geschwindigkeit von 0,6 kN/s eine Kraft von 137 kN angefahren, was 40 % der Bruchkraft entspricht. Dieser Wert markiert den oberen Bereich der üblichen Gebrauchsbelastung. Diese Belastung wurde dann für 33 Tage kraftgeregelt aufrechterhalten. Anschließend wurde spontan entlastet. Die Messungen wurden jedoch für weiter 3 Tage fortgesetzt, um die Rückverformungen zu erfassen. Beim Vergleich der Dehnungen nach 33 Tagen (Abb. 5-18) ist festzustellen, dass sich der Verlauf der Kurven noch keinem konstanten Wert annähert. Das bedeutet, dass die Kriechverformungen noch nicht das Endkriechmaß erreicht haben und noch weitergehen. Die Maximalverformung, welche sich aus elastischen, plastischen und zeitabhängigen Anteilen zusammensetzt, erreichte nach 33 Tagen eine Längsstauchung von 3,0 ‰ und eine Querdehnung von über 0,5 ‰. Dabei betrug der Anteil der elastischen und reversiblen Kriechverformungen, welcher nach dem Entlasten bestimmt wurde, ca. 20 %.

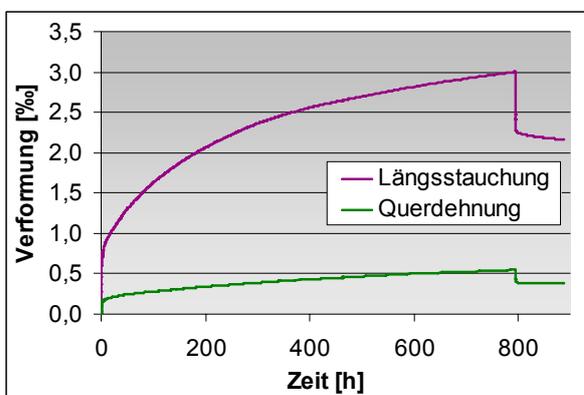


Abb. 5-18: Kriechverformungen beim Druckdauerstandsversuch

Die Querdehnzahl, welche zu verschiedenen Zeitpunkten des Versuches berechnet wurde, betrug ca. 0,2. Sie änderte sich über den Versuchszeitraum kaum, was bei einer Erhöhung ein Indiz z. B. für Mikrorissbildungen gewesen wäre. Die ebenfalls auf die Detektion von Mikrorissen infolge der Belastung ausgerichtete Bestimmung von Ultraschalllaufzeiten im Zylinderdurchmesser ergab auch kein zufrieden stellendes Ergebnis. Zwar konnte ein leichter Abfall von etwa 100 m/s während der Versuchsdauer bestimmt werden. Da diese Größenordnung jedoch im Schwankungsbereich der Messmethode liegt, kann hierbei lediglich von einem Trend ausgegangen werden, der nicht verifiziert werden konnte.

Letztlich lässt sich aus diesem Versuch ableiten, dass der Einfluss von Kunststoffmodifikationen auf die Druckfestigkeit von modifizierten Betonen erheblich größer ist, als es aus den Kurzzeitversuchen bereits zu schlussfolgern war. Damit wird auch klar, dass die alleinige Bestimmung der Druckfestigkeit von PCC nicht ausreichend ist, um Bauwerke mit diesem Material langfristig dauerhaft und druckstabil zu projektieren. Es ist die Bestimmung einer Dauerdruckfestigkeit zu empfehlen, wobei ein geeignetes, baustoffspezifisches Verfahren noch zu entwickeln wäre.

5.5 Haftverbund des modifizierten Zementsteines zur Gesteinskörnung nach Belastung

Nach der mechanischen Belastung wurden Bruchstücke der verschiedenen Probekörper im REM untersucht. Die Probenvorbereitung war dabei die gleiche, wie bei den REM-Untersuchungen vor der Belastung (vgl. Abschnitt 5.2).

Kunststoffe, welche oberhalb ihrer MFT verfilmen, bilden zugfeste Filme aus und können somit Zugkräfte aufnehmen. Die klassische Schlussfolgerung daraus ist, dass die Filmbildung der zur Modifikation von Mörtel und Beton eingesetzten Kunststoffe die wichtigste Voraussetzung ist, um einen positiven Einfluss auf die Zugfestigkeit zu erzielen. Es wird sich zeigen, dass diese Schlussfolgerung nur bedingt richtig ist.

Im Mörtel bzw. Beton gibt es abhängig von der jeweiligen Belastungsart unterschiedliche Bereiche, in denen Zugbelastungen auftreten. Bei einer reinen Zugbelastung, der Betone i. d. R. nicht ausgesetzt sind, wird die gesamte Matrix auf Zug belastet. Damit können hier die größten positiven Effekte erzielt werden. Bei Bauteilen, die auf Biegung belastet werden, gibt es einen Bereich, der in der Druckzone liegt und einen Bereich in der Zugzone. In letzterer können die positiven Effekte einer Kunststoffmodifikation wirken. Da die aufnehmbaren Zugspannungen im Beton deutlich unter den aufnehmbaren Druckspannungen liegen, wird die Bruchfestigkeit bei auf Biegung beanspruchten Bauteilen im Wesentlichen durch deren Zugfestigkeit bestimmt. Damit sind in etwa die gleichen positiven Effekte einer Kunststoffmodifikation zu erwarten, wie bei reiner Zugbelastung. Bei auf Druck belasteten Betonen gibt es in der Matrix jedoch nur kleine Bereiche, die auf Zug beansprucht werden. Diese liegen im Querschnittsbereich des komprimierten Bauteils, also dort, wo infolge von Mikrorissen Gefügeverschiebungen möglich sind und sich Rissufer senkrecht voneinander weg bewegen. Dieser geringe Anteil von Bereichen mit positiver Wirkung einer Kunststoffmodifikation wird vom deutlich überwiegenden Anteil mit negativer Wirkung überlagert. Die auf Druck beanspruchten Kunststoffpartikel entziehen sich der Belastung aufgrund ihres geringen E-Moduls und verformen sich stark. Dadurch wirken diese Partikel wie Mikrogleitebenen im Gefüge und vergrößern so die Dehnungen enorm. Die Folge ist ein beschleunigtes Versagen der Gefügematrix. Deshalb sind die zu erwartenden Effekte einer Kunststoffmodifikation bei Druckbelastung eher gering bzw. können auch negative Auswirkungen haben.

Bei Mörteln und Betonen bildet sich im Bereich der Zugbelastungen i. A. ein fein verzweigtes System von Rissen, die sich im Wesentlichen an Gesteinsoberflächen entlang ausbilden (Abb. 5-19). Ist der adhäsive Verbund zwischen Zementsteinmatrix und Gesteinskörnern jedoch infolge einer Kunststoffmodifikation erhöht, müssen höhere Kräfte aufgebracht werden, um diesen Verbund zu zerstören. Dieser Effekt ist bei normalfesten Mörteln und Beto-

nen am größten, da hier das Bruchbild i. d. R. vorwiegend durch Korngrenzversagen determiniert ist. Das bedeutet, dass die Kohäsion der umgebenden Matrix höher ist, als die Adhäsion zwischen Matrix und Gesteinskörnung. Durch eine Kunststoffmodifikation kann die Adhäsion jedoch deutlich erhöht werden und ist dann vergleichbar mit der Kohäsion in der Zementsteinmatrix. In Folge dessen kommt es zu einer Mischung aus adhäsivem Korngrenzversagen und einem gesteinskornnahen Kohäsionsversagen der Zementsteinmatrix. Teilweise sind sogar vermehrt Risse in Gesteinskörnern zu finden.

Dieser Effekt konnte bei beiden untersuchten Kunststoffen festgestellt werden (Abb. 5-20; Abb. 5-21), obwohl nur der KS 1 zugfeste Filme gebildet haben kann. Die Schlussfolgerung daraus ist, dass nicht allein die Filmbildung für die Erhöhung der Zugfestigkeit verantwortlich sein kann. Die Zug- und Biegezugfestigkeiten der mit den Kunststoffen modifizierten Rezepturen sind stets deutlich höher als die der Vergleichsmischungen und auch vergleichbar miteinander. Daraus ist zu schlussfolgern, dass die Erhöhung des adhäsiven Verbundes zwischen Zementsteinmatrix und Gesteinskörnung die wesentliche Ursache für die erhöhten Festigkeiten ist.

Zurückzuführen ist dies letztlich auf die Erhöhung der spezifischen Adhäsion zwischen Zementsteinmatrix und Gesteinskörnung. Einerseits füllen die kleinen, nicht adorierten Kunststoffpartikel, welche sich nach dem Mischen noch in der Flüssigphase befinden, Zwischenräume zwischen hydratisierenden Zementteilchen und Gesteinskörnern. Damit wird die Kompaktheit in dem für die Festigkeit entscheidenden Übergangsbereich zwischen Zementstein und Gesteinskörnung erhöht. Weiterhin wird durch den verlangsamten und veränderten Hydratationsablauf die Bildung von festigkeitsmindernden, weil vorzugsorientierten Portlanditkristallen in der Phasengrenzfläche vermindert. Andererseits wird die Gesteinsoberfläche von den in der Flüssigphase verbliebenen Kunststoffteilchen in Abhängigkeit von deren Teilchengröße besser benetzt. Dadurch wird die Adhäsion in der Phasengrenzfläche deutlich erhöht, da die Abstände zwischen den beteiligten Oberflächen verringert werden. Dies alles führt zu einer Verminderung des reinen Korngrenzversagens und zu einer Verlagerung der Rissbildung in die festere Zementsteinmatrix. Durch eine Filmbildung der Kunststoffe wird dieser Effekt unterstützt, z. B. in dem die Bildung von Mikroschwindrissen vor der Belastung bereits verringert bzw. diese überbrückt werden und so weniger als Rissinitialisierung fungieren.

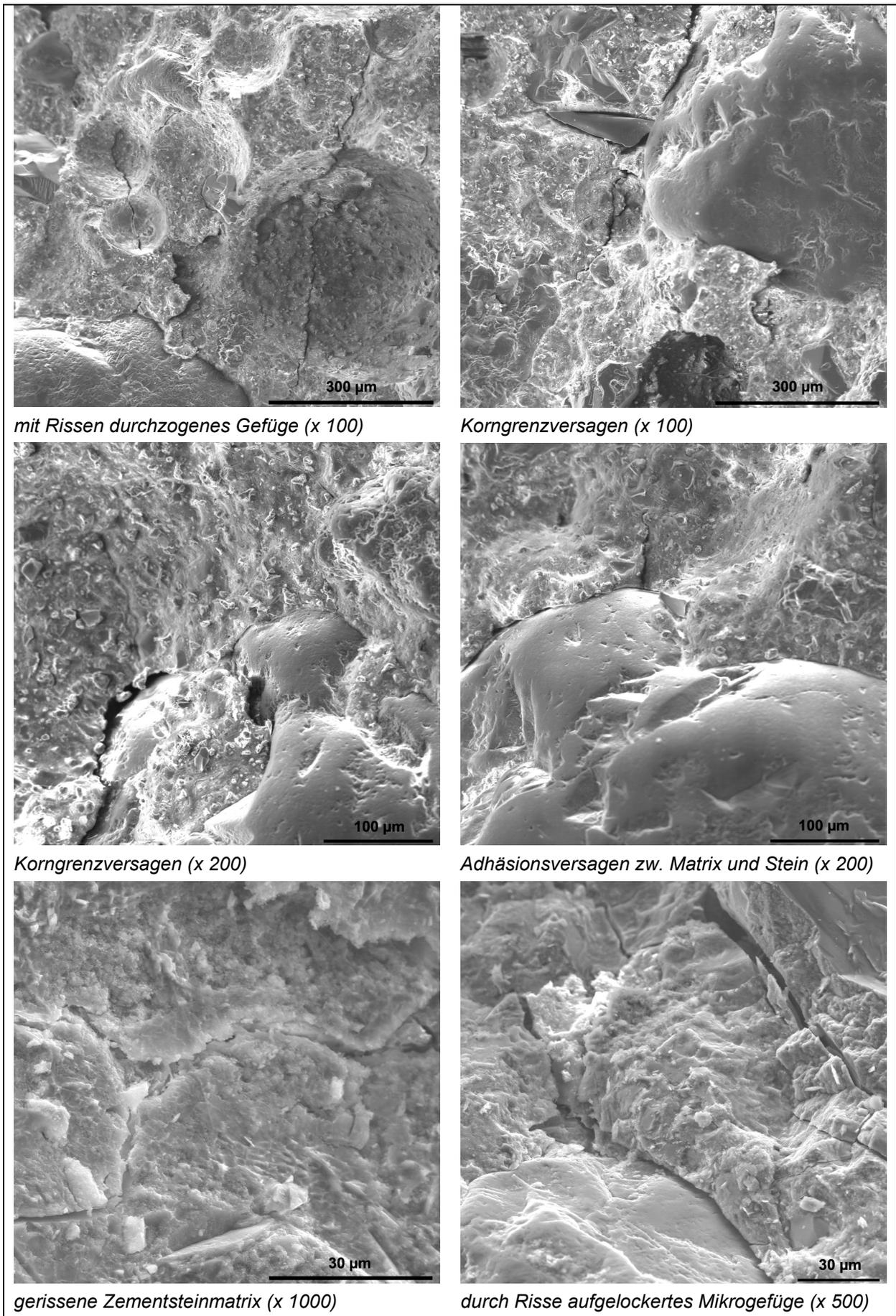


Abb. 5-19: mechanisch belastete Mörtelmatrix der unmodifizierten Vergleichsprobe

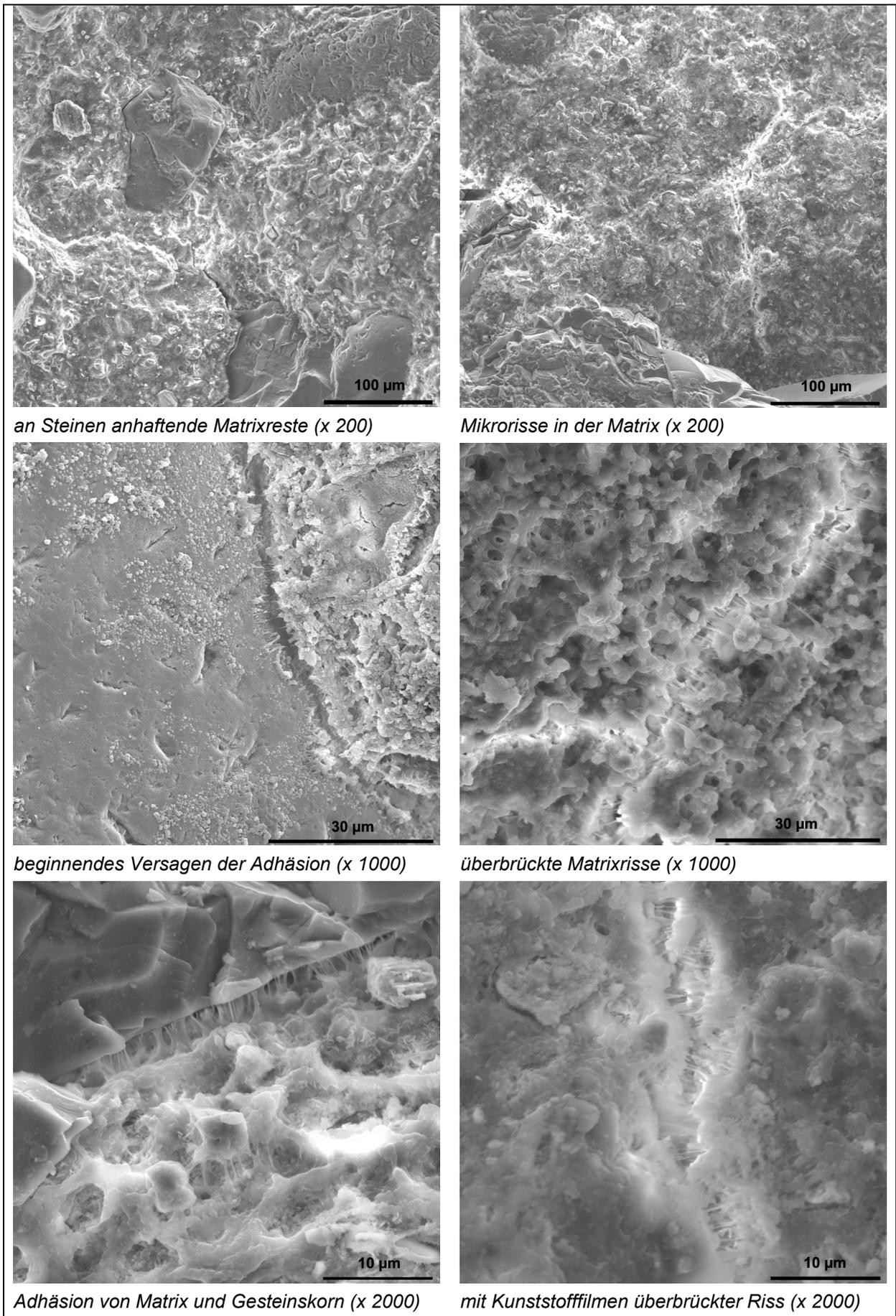


Abb. 5-20: mechanisch belastete Mörtelmatrix des PCC 1

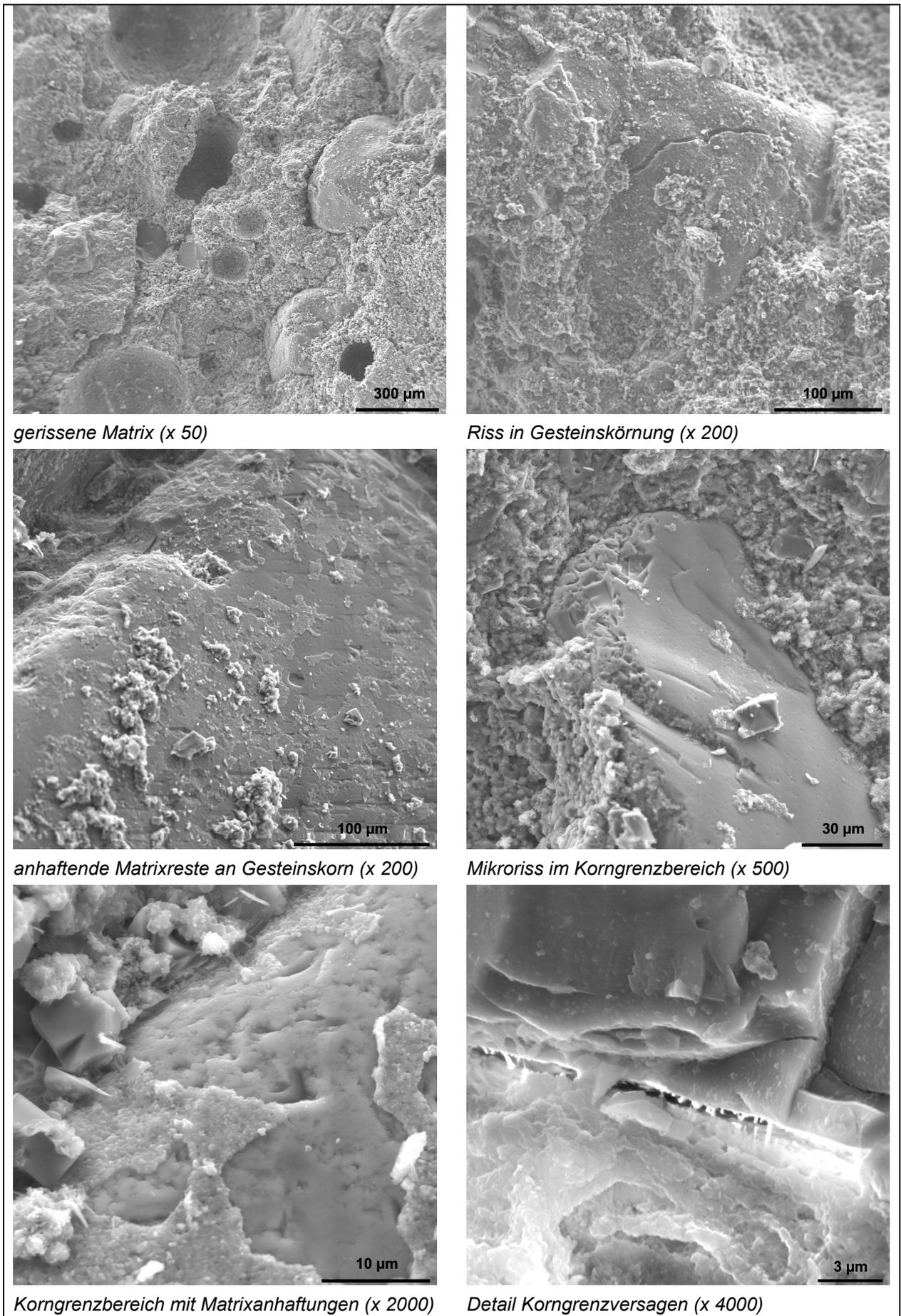


Abb. 5-21: mechanisch belastete Mörtelmatrix des PCC 2

5.6 Bedeutung der Kunststoffmodifikation für die Biegezugfestigkeit bei unterschiedlichen Temperaturen

Zur Modifikation von Mörteln und Beton eingesetzte Kunststoffe wirken hinsichtlich der Kraftübertragung nur im Zugbereich. Demzufolge ist die statische Wirksamkeit bei Bauteilen im Zug- bzw. Biegezugbereich entscheidend. Sie bieten hier z. B. eine erhöhte Rissicherheit und erhöhen damit die Dauerhaftigkeit. Bei Kunststoffen im Allgemeinen ist die Zugfestigkeit abhängig von der Temperatur. Dies gilt auch für die zur Modifikation von Mörteln und Beton eingesetzten Kunststoffe. Deshalb wurde in einem Versuchsprogramm der Einfluss der Temperatur auf die Biegezugfestigkeit von kunststoffmodifizierten Zementsteinen und Mörteln untersucht.

Es wurden die Mörtelrezepturen nach Abschnitt 2.2.1 mit hohem p/z-Wert und einem w/z-Wert von 0,40 verwendet (vgl. Tab. 2-3). Auf die Gesteinskörnung wurde bei den Zementsteinversuchen verzichtet, deren Wasseranspruch von 3 % jedoch bei der Wasserzugabe berücksichtigt und abgezogen. Die Mörtelversuche wurden an Normprismen, die Zementsteinversuche an Kleinstprismen ($1 \times 1 \times 6 \text{ cm}^3$) durchgeführt. Nach der Herstellung wurden die Proben für einen Tag in der Form und anschließend bei den Varianten A, B und C (vgl. Abschnitt 2.2.2) gelagert.

Im Alter von 42 Tagen wurden die Biegezugfestigkeiten der Proben geprüft. Je Rezeptur, Lagerung und Prüftemperatur wurden 3 Mörtelprismen und 5 Zementsteinprismen geprüft. Als Prüftemperaturen wurden im Bauwesen relevante Temperaturen festgelegt: 0, 20, 40 und 60 °C. Vor der Biegezugprüfung wurden die Prismen auf die jeweilige Prüftemperatur temperiert. In zahlreichen Vorversuchen mit Prismen beider Größen, welche mit Temperatursensoren versehen waren, wurde die minimale Verweilzeit bis zum Erreichen der jeweiligen Prüftemperatur ermittelt.

Zur besseren Interpretation der Ergebnisse wurden aus den Kunststoffen freie Filme hergestellt, aus denen Zugproben gestanzt wurden. Diese wurden bei den gleichen Temperaturen geprüft, wie die Mörtel- und Zementsteinproben. Die Herstellung der freien Filme erfolgte aus der 50%-igen Dispersion (KS2) direkt sowie beim KS 1 aus der zuvor hergestellten 50%-igen Redispersion. Diese Dispersionen wurden auf Glasscheiben in einer Schichtdicke von 0,7 mm mit Hilfe einer Abziehlehre ausgebreitet. Nach dem Trocknen der Filme wurden die Zugproben herausgestanzt.

Der KS 2 wurde aufgrund der höheren Filmbildungstemperatur im Trockenschrank bei 40 °C gelagert, da nur so zugfeste Filme gewonnen werden konnten. Trockneten die Filme im Laborklima bei 20 °C und 65 % rel. Luftfeuchte ergab dies Filme, die von Netzfalten durchzogen waren und spätestens bei dem Versuch, sie von der Unterlage zu lösen, aufscherten und zerfielen. Dadurch sind jedoch die Ergebnisse nicht ohne weiteres auf die Ergebnisse der Mörtel- und Zementsteinuntersuchungen übertragbar. Es können lediglich Tendenzen aufgezeigt werden. Prinzipiell gilt dies auch für die Filme des KS 1, da freie Filme nicht direkt mit denen im alkalischen Milieu des Zementsteines gebildeten vergleichbar sind. Zur generellen Beurteilung der verwendeten Kunststoffe sind die Ergebnisse trotzdem förderlich.

Die Ergebnisse aller Prüfungen sind als prozentuale Biegezugfestigkeiten in den Abb. 5-22 bis Abb. 5-24 dargestellt, relativ zu der Biegezugfestigkeit der jeweiligen 0-Probe bei 20 °C als Referenzwert.

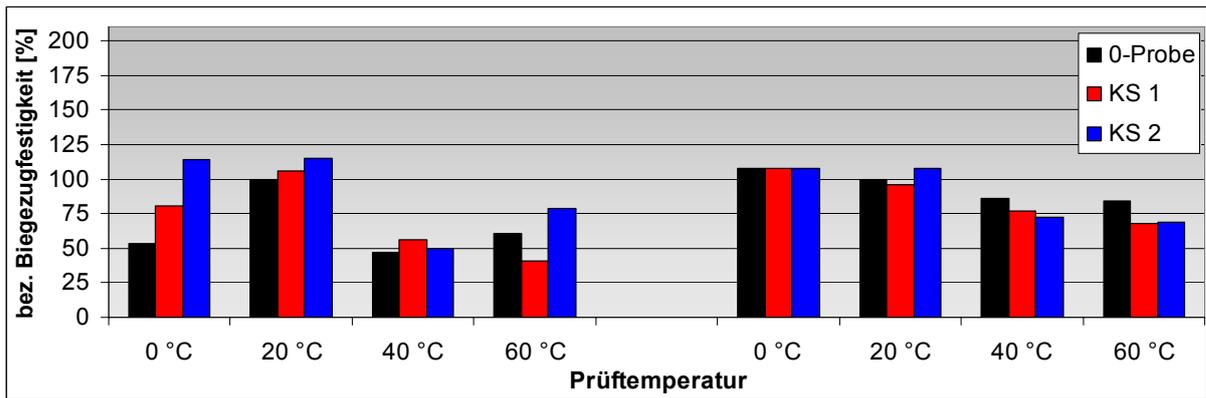


Abb. 5-22: Biegezugfestigkeiten von Mörtelprismen (li.) und Zementsteinprismen (re.), Lagerung A

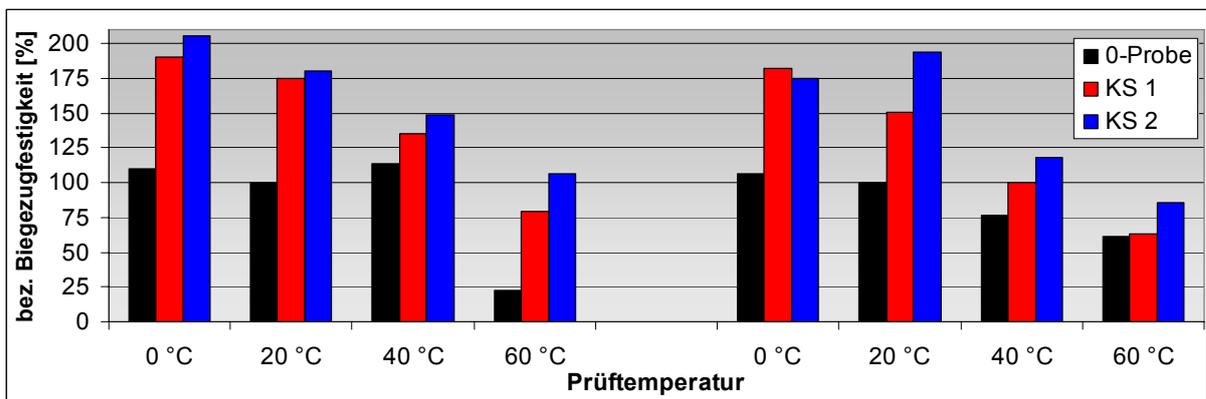


Abb. 5-23: Biegezugfestigkeiten von Mörtelprismen (li.) und Zementsteinprismen (re.), Lagerung B

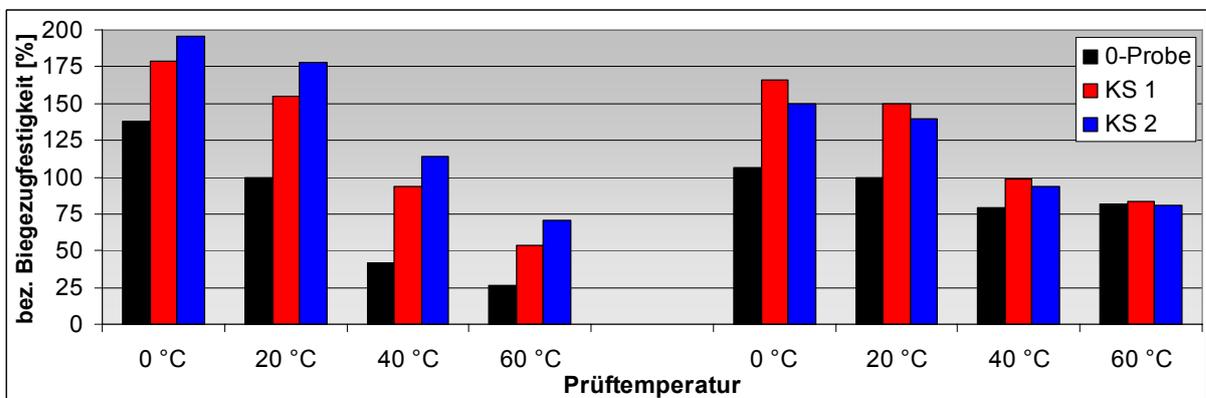


Abb. 5-24: Biegezugfestigkeiten von Mörtelprismen (li.) und Zementsteinprismen (re.), Lagerung C

Generell die höchsten Biegezugfestigkeiten erreichen die Proben der Lagerungen B und C, bei denen die Proben die Möglichkeit hatten, zu trocknen. Dadurch können sich Kunststofffilme besser ausbilden und enthalten weniger Wasser, welches festigkeitsschwächend wirkt. Bei der Nasslagerung (A) sind kaum Unterschiede zwischen modifizierten und unmodifizierten Mörteln festzustellen. Insbesondere bei den Zementsteinproben sind im Gegensatz zu den Lagerungen B und C keine Unterschiede zu interpretieren. Das lässt darauf schließen, dass bei dauerndem Kontakt der Kunststofffilme zu Wasser die Festigkeit des Gesamtsystems im Wesentlichen allein durch den Zementstein bestimmt wird.

Die Abnahme der Biegezugfestigkeit bei steigenden Temperaturen ist bei den modifizierten Proben deutlich größer als bei den unmodifizierten. Zurückzuführen ist dies auf die Erweichung der Polymere. Zwar steigt deren Zugfestigkeit bei höheren Temperaturen, die Deh-

nung vergrößert sich aber ebenfalls drastisch (Abb. 5-25). Dadurch ist beim Übersteigen der Biegezugfestigkeit des Zementsteines die aufnehmbare Spannung in den Polymerfilmen noch sehr gering, so dass sie der Rissöffnung kaum Widerstand entgegensetzten. Die Polymerfilme können nicht richtig wirken. Ist deren aufnehmbare Spannung hoch genug, ist die Dehnung bereits so groß, dass das Gefüge längst versagt hat.

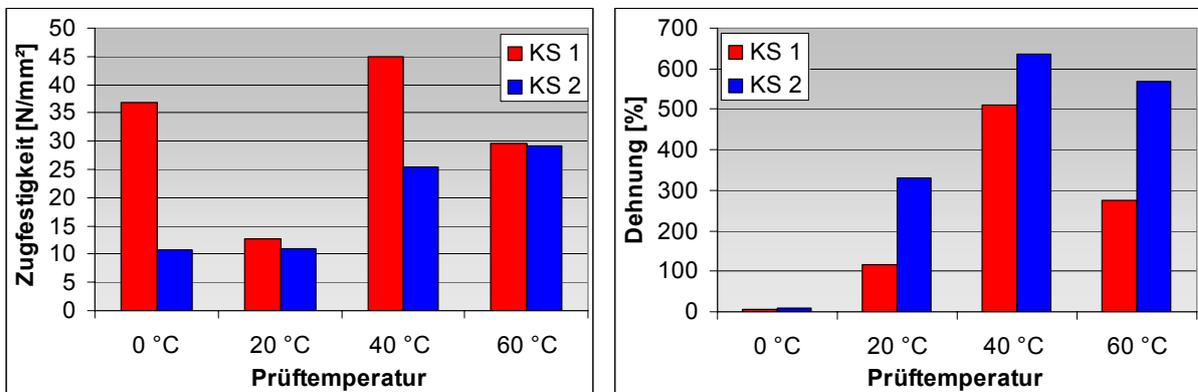


Abb. 5-25: Zugfestigkeiten und Dehnungen der Kunststofffilme bei unterschiedlichen Temperaturen

Die Tendenzen der Ergebnisse der Zementsteinproben stimmen mit denen der Mörtelproben sehr gut überein. Die Unterschiede der Biegezugfestigkeiten zwischen 0 °C und 60 °C sind bei den Zementsteinproben jedoch deutlich größer als bei den Mörtelproben. Das stützt zum einen die These, dass der Festigkeitsabfall durch Mikrorissbildung infolge Austrocknung und somit der erhöhten Längenänderung infolge Schwindens entsteht. Zum andern zeigt dieses Ergebnis jedoch, dass nicht der Verbundbereich Zementstein-Zuschlag die Schwachstelle ist, sondern eher der Zementstein selbst zur Rissbildung bei geringfügigen Temperaturerhöhungen neigt. Die Zuschlagskörner wirken dann als Rissstopper bzw. -verteiler.

Unterschiede bei den verwendeten Kunststoffen sind kaum zu erkennen. Lediglich bei der reinen Trockenlagerung (B) scheint der KS 2 leichte Vorteile zu haben, obwohl gerade hier die Filmbildungsbedingungen für den KS 1 (MFT > 5 °C) am besten waren. Dies zeigt wiederum, dass nicht die Filmbildung allein ausschlaggebend für eine Erhöhung der Festigkeit ist, sondern auch die Erzeugung eines dichten Gefüges, besonders im Verbundbereich um die Zuschlagskörner. Der somit erhöhte adhäsive Verbund innerhalb der Matrix trägt wesentlich zu den Festigkeitseigenschaften bei.

6 Frost-Taumittel-Widerstand der PCC

6.1 Literaturübersicht

Der Frost-Taumittel-Widerstand von PCC ist von wesentlicher baupraktischer Bedeutung, da PCC häufig zum Schutz und zur Instandsetzung bestehender Bausubstanz eingesetzt werden. Bei dieser Bausubstanz handelt es sich oft um Ingenieurbauwerke im Außenbereich, die erhöhten Anforderungen hinsichtlich einer Taumittelbelastung ausgesetzt sind.

In der Literatur wird den PCC i. A. ein erhöhter Frost- und Frost-Taumittel-Widerstand zugesprochen (u. a. [35][36][37][E6]). Jedoch sind auch hier widersprüchliche Aussagen zu finden, welche im Wesentlichen die Gründe der erhöhten Dauerhaftigkeit bei Frost- und Frost-Taumittel-Beanspruchung betreffen.

Die meisten Autoren beziehen sich auf die Beeinflussung der Porosität durch die Kunststoffmodifizierungen (z. B. [38][39][41]). Zum einen wird die Reduktion der Gesamtporosität aufgrund der Verringerung des w/z-Wertes, zum anderen der Effekt des Füllens der Poren mit Kunststoff als Gründe für die Verbesserung angesehen. Hinzu kommt das Einbringen künstlicher Lustporen in die Bindemittelmatrix, welche ähnliche Größenverhältnisse wie Mikroluftporen bei LP-Zugabe aufweisen.

ZAJAC und KORLA [34] führen die erhöhte Frost- und Frost-Tausalz-Beständigkeit auf die Reduzierung der Kapillarporosität infolge der Kunststoffmodifikation zurück. Das erhöhte Vorhandensein von Luftporen spielt demnach nur eine untergeordnete Rolle.

Nach Untersuchungen von HERRMANN [39][44] gibt es grundsätzlich eine Abhängigkeit des Frost-Tausalz-Widerstandes vom Grobporenanteil $> 0,1 \mu\text{m}$. Bei seinen untersuchten Styrol-Butadien- und Vinylacetatethylen-Betonen konnte er ein erhöhtes Porenvolumen im Bereich von $0,1$ bis $10 \mu\text{m}$ nachweisen, was bei diesen Betonen zu einem hohen Frost-Tausalz-Widerstand führte. Die acrylat- und styrolacrylatmodifizierten Betone dagegen wiesen ein sehr geringes Porenvolumen im genannten Bereich auf. Diese Betone zeigten nach der Frost-Tausalz-Beanspruchung ein stark aufgelockertes Gefüge, welches lediglich durch die intakte polymere Co-Matrix sowie deren adhäsive und kohäsive Eigenschaften zusammengehalten wurde.

SU [47] sieht als wesentlichen Grund für einen erhöhten Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand von PCC ein durch die Polymere bewirktes geringeres Wasseraufnahmevermögen. Damit ist die Menge gefrierfähigen Wassers im PCC-Gefüge geringer, ebenso wie die Gefahr des Erreichens eines kritischen Sättigungsgrades.

Der kritische Sättigungsgrad stellt bei Beton einen Schwellenwert dar, bei dem ab höheren Feuchtegehalten wenige Frost-Tau-Wechsel ausreichen, um den Beton zu schädigen. Nach FAGERLUND [52] erfolgt die Bestimmung des kritischen Sättigungsgrades an unterschiedlich gesättigten Probekörpern, welche einigen Frost-Tau-Zyklen ausgesetzt werden, durch Bestimmung des relativen dynamischen E-Moduls. Der Punkt des charakteristischen Abknickens der Kurve markiert den Wert des kritischen Sättigungsgrades. Dieser liegt für Normalbeton bei $0,75$ bis $0,90$.

Davon ausgehend kann geschlussfolgert werden, dass Mörtel und Betone, welche eine geringe kapillare Wasseraufnahmefähigkeit besitzen, eine geringere Wahrscheinlichkeit haben,

den kritischen Sättigungsgrad zu erreichen. Demzufolge sind bei solchen Mörteln und Betonen geringere Schäden durch Frost- und Frost-Taumittleinwirkungen zu erwarten.

Bei kunststoffmodifizierten Mörteln und Betonen sind Poren häufig mit Kunststoffen ausgekleidet oder durch Kunststofffilme verschlossen. Diese Effekte nehmen mit steigendem Kunststoffanteil zu [38]. Bei einigen Kunststoffen kommt hinzu, dass sie eine hydrophobierende Wirkung besitzen [47][E6]. Des Weiteren können Kunststofffilme Wasser absorbieren und dadurch Quellen. LAMPE und SAARNAK [53] untersuchten die Wasseraufnahme von Filmen aus Polymerdispersionen. Sie stellten fest, dass die Wasserabsorption vom Grad der Filmbildung abhängig ist. Je vollständiger die Filmbildung ablief, desto weniger Wasser wurde absorbiert. Es ließe sich also schlussfolgern, dass sich mit Kunststofffilmen ausgekleidete Poren bei Flüssigkeitskontakt infolge des Quellens der Filme verengen oder sogar verstopfen können und so einen weiteren Flüssigkeitstransport behindern bzw. unterbinden. Nach KNOBLAUCH und SCHNEIDER [54] kann dieser Quellvorgang jedoch auch auf die enthaltenen Emulgatoren und Schutzkolloide zurückgeführt werden. Durch den Kontakt mit organischen Flüssigkeiten können Kunststoffpartikel auf das bis zu 3-fache aufquellen und so die Dichtwirkung unterstützen [55]. Infolge dieser Eigenschaften werden die Wasseraufnahme, der Wassertransport und die Wasserdurchlässigkeit verringert. Das Ansteigen der Eindringtiefen von Flüssigkeiten kann stark behindert bzw. zum Stillstand gebracht werden.

Dem entgegen stehen Untersuchungen von JUSTNESS ET AL. [57], wonach bei der Unterschreitung der Mindestfilmtemperatur der Kunststoffe während der Erhärtung nur geringe Verbesserungen der Frost-Tausalz-Beständigkeit der PCC erreicht werden können.

Nach ATZENI ET AL. [56] führen bereits geringe Kunststoffgehalte zu einer drastischen Reduktion der Wasseraufnahmefähigkeit von PCC. Sie gründeten die Schlussfolgerung auf Ergebnisse, wonach die untersuchten Probekörper auch nach 200 FTW keine Risse oder Abwitterungen aufwiesen.

Der Grad der Verbesserung des Frost- und Frost-Taumittel-Widerstandes richtet sich nach der Kunststoffart und dessen Gehalt [40]. OHAMA fand, dass Kunststoffgehalte von 5 % bereits zu deutlichen Verbesserungen des Frost-Taumittel-Widerstandes führen, während höhere Kunststoffgehalte kaum nennenswerte Verbesserungen bringen [37]. Ähnliches berichtet auch NÄGELE [41]. BALAGURU ET AL. [42] schrieben dagegen, dass mit steigendem Kunststoffgehalt auch der Frost-Tau-Widerstand zunimmt. BEELDENS ET AL. [49][50] fanden ein Optimum bei einem Kunststoffgehalt von 10 %. Hier stellten sie neben einer signifikanten Steigerung der Frost- und Frost-Tausalz-Beständigkeit, welche auf die Ausbildung dickerer zusammenhängender Polymerfilme bei diesem Kunststoffgehalt zurückgeführt wurde, auch die höchsten Haftzugfestigkeiten nach Frost-Tausalz-Belastung fest.

Der Einfluss der Zusammensetzung der Kunststoffe auf den Frost-Taumittel-Widerstand wurde in [45][46] untersucht. So wurden Abhängigkeiten vom Anteil der Copolymere und der Hilfsstoffe (Sprühhilfen, Antbackmittel und Entschäumer) ermittelt. Generell wurde ein erhöhter Frost-Taumittel-Widerstand mit steigendem Kunststoffgehalt hinsichtlich der Abwitterungsmenge und dem Grad der inneren Schädigung bestätigt.

Bei der Untersuchung des Einflusses von Redispersionspulvern auf den Frost-Tau-Widerstand modifizierter Mörtel im Vergleich mit Dispersionsmodifizierten stellten OHAMA ET AL. fest [48], dass beide Systeme den Frost-Tau-Widerstand erhöhen. Die Dauerhaftigkeit

der pulvermodifizierten Mörtel war teilweise sogar höher als die der dispersionsmodifizierten Mörtel. Es wurden Abhängigkeiten vom Polymer und dem p/z-Verhältnis festgestellt. Jedoch erhöhte nicht notwendigerweise ein größerer p/z-Wert auch die Dauerhaftigkeit.

Dass nicht jede Kunststoff-Zement-Kombination zwangsläufig zu einer Verbesserung der Frost-Taumittel-Beständigkeit führen muss, zeigen Untersuchungen von STARK und DIMMIG [43]. Die hier verwendete Styrol-Butadien-Dispersion führte in keinem Fall (in Kombination mit CEM I, CEM I-HS, CEM III/A, CEM III/B, SHZ) zu einer Erhöhung der Frostbeständigkeit. Bei geringen Kunststoffgehalten ($p/z=0,05$) erhöhte sich sogar die Abwitterungsmenge teilweise drastisch gegenüber der Referenz.

Der beeinflussbare äußere Faktor für den Frost-Taumittel-Widerstand der PCC bildet die Art und Konzentration des Taumittels. Taumittel verschärfen i. A. den Frostangriff, wobei sich insbesondere niedrig konzentrierte Tausalzlösungen als besonders aggressiv erwiesen haben. Fast alle in [58] beschriebenen makroskopischen und mikroskopischen Schadensursachen werden verstärkt. Durch die hygroskopische Wirkung der Salze erhöht sich die Feuchtigkeit im Oberflächenbereich des Betons und somit der Sättigungsgrad in dieser Zone [59].

Weiterhin wird die Oberflächenspannung der Taumittel gegenüber reinem Wasser geändert, was zu einer veränderten Viskosität führt. Niedrigviskose Lösungen können besser in engere Poren eindringen und so eine intensivere Durchfeuchtung herbeiführen. Taulösungen auf Basis von Alkali- und Erdalkaliacetaten besitzen aufgrund ihrer niedrigen kinematischen Viskosität gute Durchdringungseigenschaften [60]. Eine eindeutige Abhängigkeit zwischen Viskosität und der Eindringtiefe in Beton konnte jedoch nicht nachgewiesen werden [35].

Der Einfluss verschiedener Auftaumittel auf PCC wurde bisher kaum untersucht. Fest steht, dass insbesondere thermoplastische Kunststoffe gegenüber organischen Lösungsmitteln wenig beständig sind [38]. Organische Lösungen (z. B. Aceton) können dazu führen, dass die thermoplastischen Kunststoffe in den modifizierten Mörteln erweichen oder quellen [47]. Die Beständigkeit der PCC ist dabei wiederum abhängig von der Art und der Menge der enthaltenen Kunststoffe.

6.2 Frost-Tausalz-Widerstand und innere Schädigung mittels CDF-/CIF-Verfahren

6.2.1 Versuchsbedingungen

Die Prüfung des Frost-Taumittel-Widerstandes der PCC erfolgte in Anlehnung an das in DIN CEN/TS 12390-9 [R13] beschriebene Alternativprüfverfahren. Abweichend von dem dort beschriebenen Verfahren wurden drei Probekörper mit den Abmessungen $8 \times 8 \times 25 \text{ cm}^3$ verwendet. Die Gesamtprüffläche betrug 600 cm^2 . Die Anzahl der Frost-Tau-Wechsel (FTW) wurde auf 56 erhöht.

Es wurden die in Abschnitt 2.2 dargestellten Mörtelrezepturen verwendet. Je Rezeptur wurden 3 Probekörper in einer Form hergestellt (Abb. 6-1). Diese wurden nach einem Tag ausgeschalt und die Probekörper den Lagerungen B (20 °C , 65 % rel. LF) und C (bis zum 7. Tag unter Wasser, dann 20 °C , 65 % rel. LF) unterzogen. Im Alter von 26 Tagen wurden die Proben jeweils an der Mantelfläche mit Butylklebeband abgedichtet (Abb. 6-2).

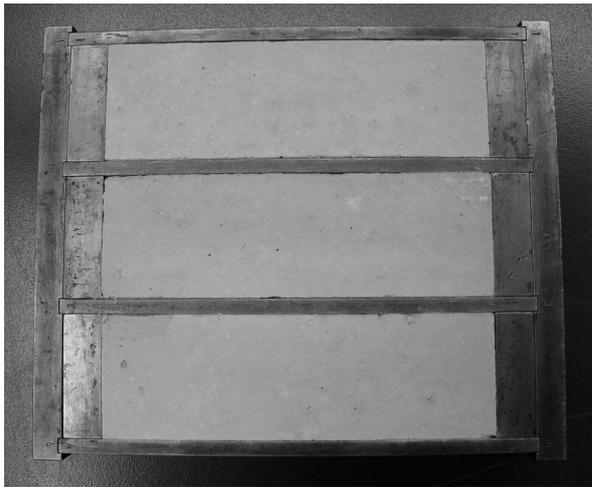


Abb. 6-1: CDF-Proben in der Form

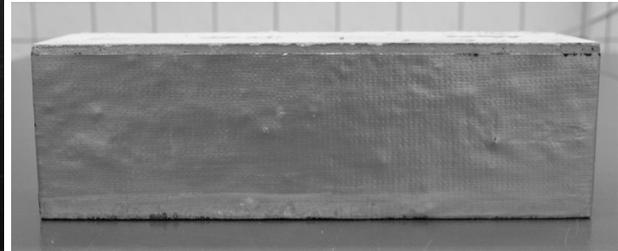


Abb. 6-2: abgeklebter Probekörper

Das CDF-Prüfverfahren begann 28 Tage nach Probenherstellung. Die seitlich abgedichteten Probekörper wurden für 7 Tage mit der Prüffläche ca. 5 mm tief in 3%-ige NaCl-Lösung getaucht. Dadurch wurde eine kapillare Lösungsaufnahme und innere Befeuchtung der Probe ermöglicht. Anschließend begannen die Frost-Tau-Wechsel. Ein Zyklus dauerte 12 Stunden. Der Temperaturverlauf ist in Tab. 6-1 und Abb. 6-3 dargestellt.

Tab. 6-1: CDF-Temperaturzyklus [R13]

t [h]	T [°C]		
	Obergrenze	Nennwert	Untergrenze
0	21	20	19
4	-19,5	-20	-20,5
7	-19,5	-20	-20,5
11	21	20	19
12	21	20	19

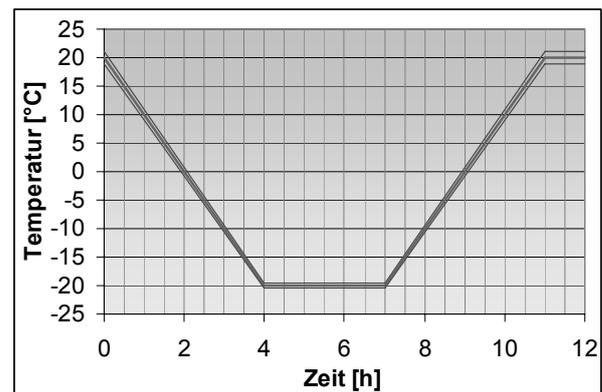


Abb. 6-3: CDF Temperaturzyklus [R13]

Während des CDF-Prüfverfahrens wurden die kapillare Lösungsaufnahme und die Abwitterung der einzelnen Probekörper zu folgenden Zeitpunkten bestimmt: 1, 2, 5, 6, 7 (bis hier nur kapillare Lösungsaufnahme), 9, 12, 14, 16, 19, 21, 23, 26, 28, 30, 33, 35 Tagen.

In [29] wird die Möglichkeit beschrieben, den CDF-Test mit dem CIF-Test zu kombinieren. Einschränkend ist dabei jedoch zu sehen, dass die Oberflächenschädigung infolge der NaCl-Einwirkung deutlich gegenüber einer inneren Schädigung überwiegen wird. Es wird aber ein zusätzlicher Parameter gewonnen. Deshalb wurden die Probekörper vor (vks) und nach dem kapillaren Saugen (0), nach 14, 28, 42 und 56 FTW sowie in ausgleichsfeuchtem Zustand (AF; etwa 3 Wochen nach Befrostungsende und Lagerung im Normalklima) in der Probenlängsachse mittels Ultraschalls durchschallt. Die Durchschallungsachse lag im Mittelpunkt der 8 x 8 cm² großen Seitenfläche.

Im Ergebnis dieser Untersuchungen wurden die zeitlichen Verläufe der kapillaren Lösungsaufnahme, der Abwitterung und der Entwicklung des relativen dynamischen E-Moduls beurteilt.

6.2.2. Porenradienverteilung

Zur besseren Interpretation der Ergebnisse der CDF-/CIF-Tests erschien es notwendig, Erkenntnisse zur Porenstruktur der untersuchten Mörtel heranzuziehen. Deshalb wurde exemplarisch an 28 Tage alten Bruchstücken der CEM I - Mörtel aus Lagerung B die offene Porosität **G** mittels Quecksilberhochdruckporosimetrie bestimmt (Abb. 6-4). Die Gesamtporosität **P** wurde durch die Ermittlung von Roh- und Reindichte berechnet (Abb. 6-5).

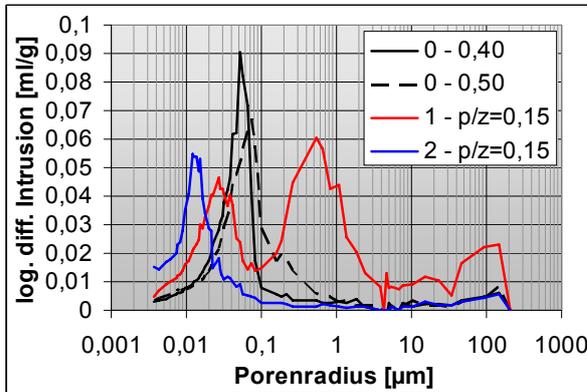


Abb. 6-4: Porenradienverteilung der Mörtel

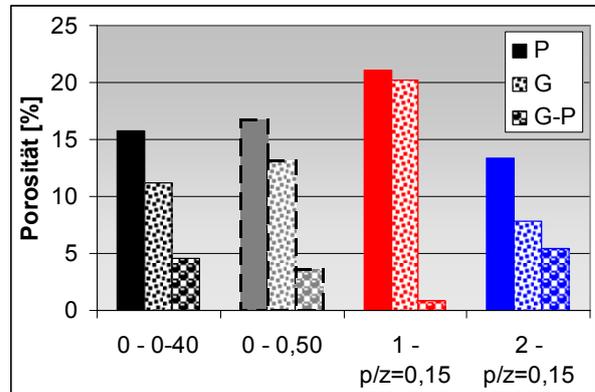


Abb. 6-5: Verteilung der Gesamt- (P), offenen (G) und geschlossenen (G-P) Porosität der Mörtel

Es ist zu erkennen, dass sich die Porosität der nicht modifizierten Vergleichsmischungen infolge der Reduzierung des w/z-Wertes um 0,10 nur geringfügig änderte. Die Kapillarporosität verschob sich etwas in den Bereich der feineren Poren.

Die Modifikation mit KS 1 bewirkte dagegen einen Anstieg der Gesamtporosität um ca. 5 % bei gleichzeitig deutlicher Erhöhung der offenen Porosität. Das Maximum der Kapillarporosität wurde bei Poren erreicht, die einen um den Faktor 10 größeren Porenradius aufwiesen. Die bereits bei der Charakterisierung der Frischmörtel festgestellte schäumende Wirkung dieses Kunststoffes wird durch diese Ergebnisse untermauert. Auch die Zugabe eines Entschäumers konnte diese Wirkung nicht vollständig aufheben.

Die Modifikation mit KS 2 führte dagegen zu einer Reduzierung der Gesamtporosität. Am deutlichsten wurde die Kapillarporosität gesenkt. Der Anteil der geschlossenen Poren war bei diesem Mörtel am höchsten.

Auf Grund dieser Ergebnisse war anzunehmen, dass der PCC 1 die höchste kapillare Lösungsaufnahme zeigen müsste. Demzufolge wären hier auch die größten Schäden infolge einer expansiven Eisbildung in den Poren zu erwarten. Der PCC 2 dagegen müsste den CDF-Test ohne größere Schäden überstehen.

Bei dieser Beurteilung sind allerdings die Schwächen des Verfahrens bei der Bestimmung der offenen Porosität zu berücksichtigen. In Folge des hohen Druckes bei kleinen Porenradien kann es zur Zerstörung von Porenwänden kommen. Ein weiteres Problem stellen so genannte „ink-bottle“-Poren dar. Diese flaschenhalsförmigen Poren können nur bei sehr hohem Druck gefüllt werden, wobei deren gesamtes Volumen Poren mit dem Radius des „Flaschenhalses“ zugeordnet wird. In beiden Fällen erhöht sich der Anteil kleiner Poren drastisch, was zu einer Fehlinterpretation des Porengefüges führen kann.

6.2.3. Kapillare Lösungsaufnahme

Die kapillare Lösungsaufnahme der Proben wurde durch Differenzwägungen ermittelt. Der Bezugswert war dabei jeweils die abgedichtete Probe nach der 28-tägigen Lagerung. Eventuelle Abwitterungen wurden bei der Berechnung berücksichtigt. Die Ergebnisse sind in Abb. 6-6 als prozentuale kapillare Lösungsaufnahme dargestellt und können somit unabhängig von der Prüffläche beurteilt werden. Der Zeitpunkt des Befrostungsbeginns nach 7 Tagen ist hervorgehoben.

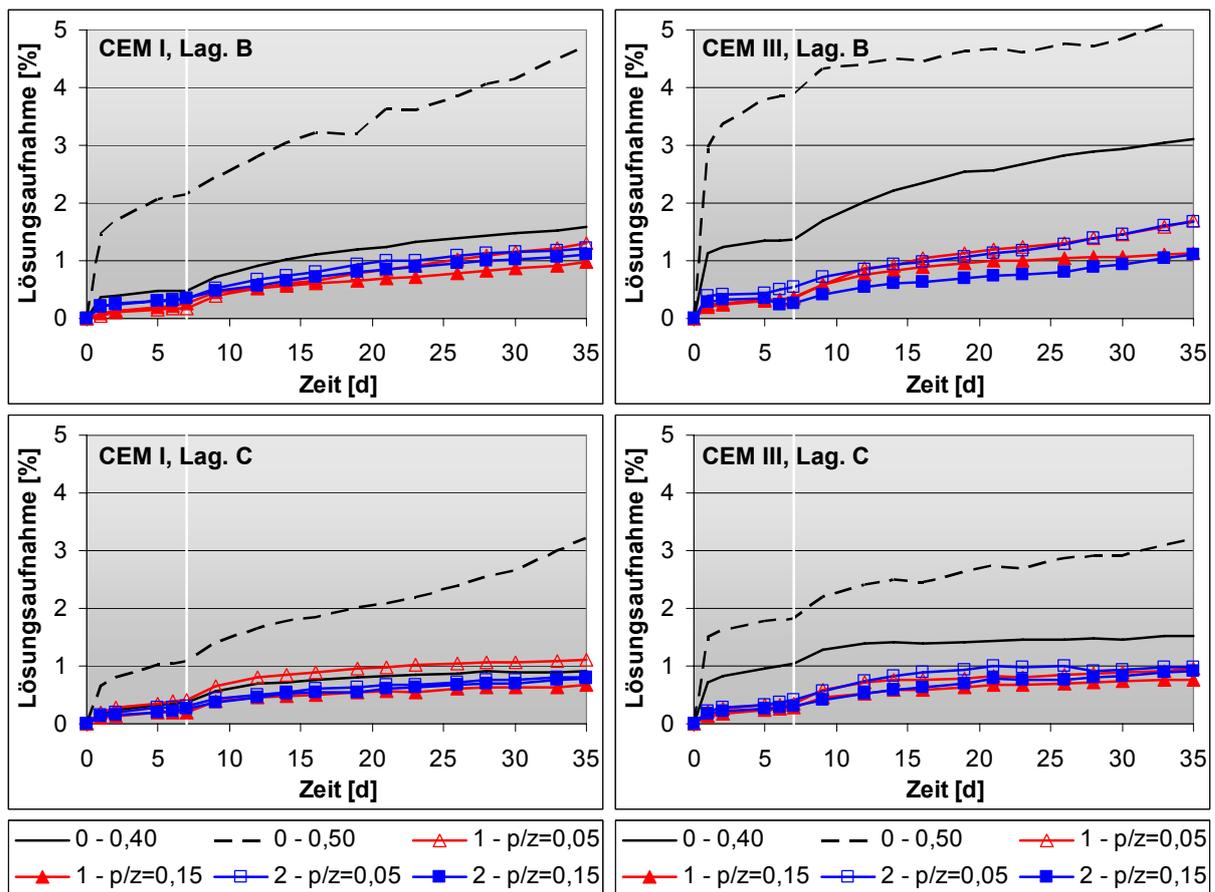


Abb. 6-6: Kapillare Lösungsaufnahmen der Mörtel während des CDF-Testes

Der Vergleichsmörtel mit $w/z = 0,50$ hatte in allen Fällen die höchste kapillare Lösungsaufnahme. Diese war bei der Lagerung B deutlich höher als bei der Lagerung C, was auf die besseren Hydratationsbedingungen und demzufolge dichteren Gefüge bei Lagerung C zurückzuführen ist. Die anderen untersuchten CEM I - Mörtel wiesen keine signifikanten Unterschiede bei der Lösungsaufnahme auf. Lediglich der Vergleichsmörtel mit $w/z = 0,40$ zeigte bei der Lagerung B tendenziell eine leicht erhöhte Lösungsaufnahme gegenüber den kunststoffmodifizierten Proben. Dies könnte bereits als ein Hinweis auf die positive Wirkung der Kunststoffe gedeutet werden, da sie zu einer Reduktion der Lösungsaufnahme führten. Verstärkt wird diese Vermutung durch die Ergebnisse der CEM III - Mörtel. Hier ist ein signifikanter Unterschied der kapillaren Lösungsaufnahme des Vergleichsmörtels mit geringem w/z -Wert und der kunststoffmodifizierten Mörtel deutlich zu erkennen. Offensichtlich führt eine Kunststoffmodifikation zu einer Verbesserung der Gefügedichtigkeit gegenüber dem Eindringen von Flüssigkeiten. Dies kann nicht pauschal auf eine Erhöhung des Wasserrück-

haltevermögens (vgl. Abb. 2-4) zurückgeführt werden. Es ist davon auszugehen, dass dabei nachhaltigere Wirkungen der Kunststoffe (hydrophobierende Wirkung, Gefügeabdichtung u. ä.) eine wesentliche Rolle spielen.

Bei dem Vergleich der verschiedenen PCC sind keinerlei Unterschiede festzustellen. Es lässt sich also schlussfolgern, dass eine Kunststoffmodifikation generell die kapillare Lösungsaufnahme von Mörteln reduziert.

6.2.4. Abwitterung

Für die Bestimmung der Abwitterung wurden die Proben in ihrem Befrostungsbehälter zum jeweiligen Termin im Ultraschallbad von noch anhaftenden Abwitterungsprodukten befreit. Die Tausalzlösung mit der Abwitterung wurde filtriert. Nach dem Trocknen des Filters wurde die Masse des Filtrerrückstandes, was der Masse der Abwitterung von der Befrostungsfläche entspricht, bestimmt und die Abwitterung bezogen auf 1 m² Probenfläche berechnet. Die Ergebnisse sind in Abb. 6-7 dargestellt. Das Abwitterungskriterium von 1500 g/m² nach 28 FTW ist zur Orientierung hervorgehoben.

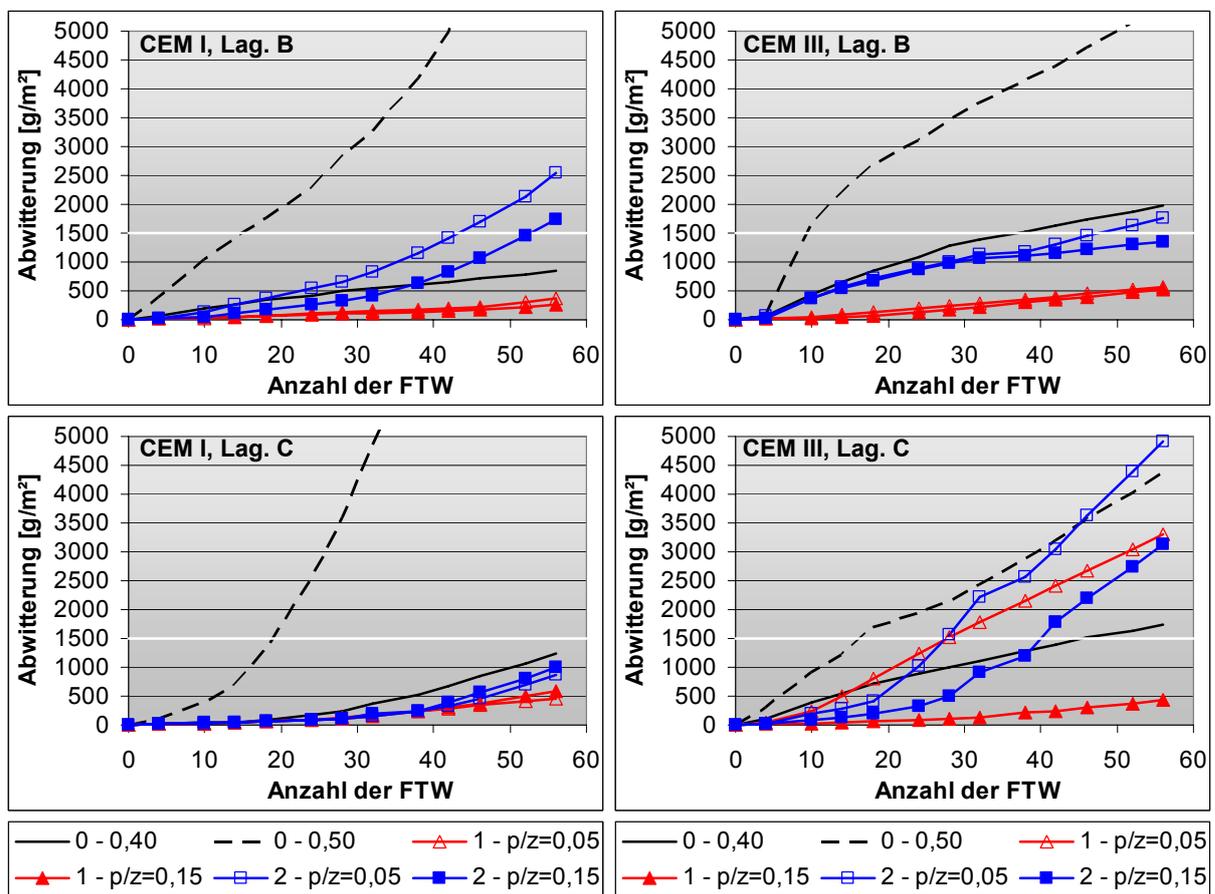


Abb. 6-7: Abwitterung der Proben beim CDF-Test

Die Vergleichsmischung mit hohem w/z-Wert erreichte in allen Fällen das Abwitterungskriterium von 1500 g/m² nach 28 FTW nicht, jedoch die mit niedrigem w/z-Wert. Ebenso wurde durch die Kunststoffmodifikationen das Abwitterungskriterium erreicht, wenn auch nur knapp beim CEM III und Lagerung C. Auf Grund dieses Ergebnisses ist es also nicht klar, ob die Verbesserung des Frost-Taumittel-Widerstandes auf die Kunststoffmodifizierung oder lediglich auf Effekte durch die w/z-Wert-Senkung zurückzuführen ist.

Bei Betrachtung des Abwitterungsverlaufes bis zum 56. FTW zeigt sich ein diffuseres Bild. Abhängig von der verwendeten Zementart, der Art der Vorlagerung oder des Kunststoffgehaltes ergeben sich durch die Kunststoffmodifizierungen Vor-, aber auch Nachteile. Eindeutig ist, dass der filmbildende KS 1 bei beiden Zementen, wenn für diese die Hydratationsbedingungen schlecht sind (Lag. B), zu einer deutlichen Reduktion der Abwitterung führt, unabhängig vom Kunststoffgehalt. Für die Lagerung C trifft diese Aussage pauschal nur für den PCC mit hohem Kunststoffgehalt zu. Die Dauerhaftigkeit dieser PCC ist also erhöht. Die wahrscheinlichsten Ursachen hierfür sind u. a. die Ausbildung eines dreidimensionalen Netzwerkes von Polymerfilmen, welches die Zementsteinmatrix durchdringt und außerdem einen adhäsiven Verbund zu den Gesteinskörnern eingeht. Dadurch werden abwitternde Matrixbestandteile länger festgehalten und so bei der Abwitterung nicht erfasst. Dies kann dann nur über die Auswertung von Ultraschalllaufzeiten zur Bestimmung der inneren Schädigung geschehen (vgl. Abschn. 6.3). Hauptsächlich jedoch steht durch die schäumende Wirkung des KS 1 genügend Porenraum zur Verfügung, um dem gefrierenden Wasser Möglichkeiten der Ausdehnung zu bieten. Hinzu kommt, dass durch die Auskleidung der Poren mit dem Kunststoff, welcher hydrophob wirkt, die kapillare Saugkraft drastisch reduziert wird und so die Lösung nicht tief in das Gefüge eindringen kann.

Der KS 2 dagegen hatte nicht die Möglichkeit, zugfeste Filme auszubilden. Hier wird der Verbund zur Matrix lediglich über die Erhöhung der adhäsiven Kräfte gewährleistet, was sich in einem dichteren Gefüge äußert. Dadurch hat gefrierendes Wasser eher die Möglichkeit, durch die Expansion Matrixbestandteile abzulösen und so die Abwitterung zu erhöhen. Mit steigendem Kunststoffgehalt kann dieser Effekt tendenziell reduziert werden. Trotzdem ist die Wirkung vergleichbar mit der der reinen w/z-Wert-Senkung.

Bei der Lagerung C der CEM I - Mörtel sind Unterschiede kaum interpretierbar. Tendenziell war zwar die Abwitterung der PCC 1 am geringsten, gefolgt vom PCC 2, jedoch liegen die Ergebnisse alle im Schwankungsbereich der Messmethode. Die Dauerhaftigkeit wird hier klar vom Zement bestimmt, der aufgrund des niedrigen w/z-Wertes und der anfänglichen Wasserlagerung ein dichtes und dauerhaftes Gefüge ausbilden konnte.

Die Ergebnisse der Lagerung C der CEM III - Mörtel zeigen als einzige eine Abhängigkeit vom Kunststoffgehalt. Ein niedriger Kunststoffgehalt wirkte sich hier negativ auf den Abwitterungsverlauf aus. Bereits nach 28 FTW war die Abwitterung beider PCC mit geringem Kunststoffgehalt deutlich höher als die des Vergleichsmörtels mit geringem w/z-Wert. Dieser Abstand vergrößerte sich noch bis zum 56. FTW, wobei die Abwitterung des PCC 2 dann sogar die Abwitterung des Vergleichsmörtels mit w/z = 0,50 überstieg. Beide PCC mit hohem p/z-Wert hatten eine geringere Abwitterung als die mit niedrigem p/z-Wert. Dabei unterschritt aber lediglich der PCC 1 das Abwitterungskriterium von 1500 g/m² auch nach 56 FTW deutlich. Alle anderen Mörtel wiesen eine wesentlich größere Abwitterungsmenge auf.

Eine Korrelation der Ergebnisse der kapillaren Lösungsaufnahme mit den Ergebnissen der Abwitterung ist nicht zu erkennen. Während bei der kapillaren Lösungsaufnahme der PCC keine signifikanten Unterschiede zu erkennen waren, sind bei der Auswertung der Abwitterungen durchaus Unterschiede zu interpretieren.

Diese Ergebnisse zeigen, dass bei einer erhöhten Anzahl von Frost-Tau-Wechseln durch Kunststoffmodifikationen nicht zwangsläufig eine Erhöhung des Frost-Tausalz-Widerstandes

erreicht werden kann. Um sicher zu gehen, dass der FTSW unabhängig von der Zementart erhöht wird, ist es ratsam, einen filmbildenden Kunststoff in höherer Dosierung zu verwenden, der außerdem noch zusätzlichen Porenraum im PCC-Gefüge schafft. In allen anderen Fällen ist eine Einzelfallprüfung der favorisierten Rezepturen unerlässlich.

6.2.5. Relativer dynamischer E-Modul

Die Bestimmung der Ultraschalllaufzeit durch die Probekörper erfolgte zu den jeweiligen Terminen nach der Entfernung der Abwitterung im Ultraschallbad. Dazu wurden die Proben in einem Behälter ausgerichtet, bei dem an den Stirnseiten ein Ultraschallgeber bzw. -empfänger angebracht war. In dem Behälter befand sich Wasser als Ankopplungsmedium. Aus der bekannten Entfernung von Ultraschallgeber und -empfänger und der Probenlängsabmessung konnte der Weg des Ultraschallsignals im Ankoppelmedium berechnet und bei der späteren Berechnung des relativen dynamischen E-Moduls [29] berücksichtigt werden. In Abb. 6-8 sind die relativen dynamischen E-Moduln der verschiedenen Serien dargestellt. Der Zeitpunkt 0 (nach dem kapillaren Saugen und vor der Befrostung) entspricht 100 %.

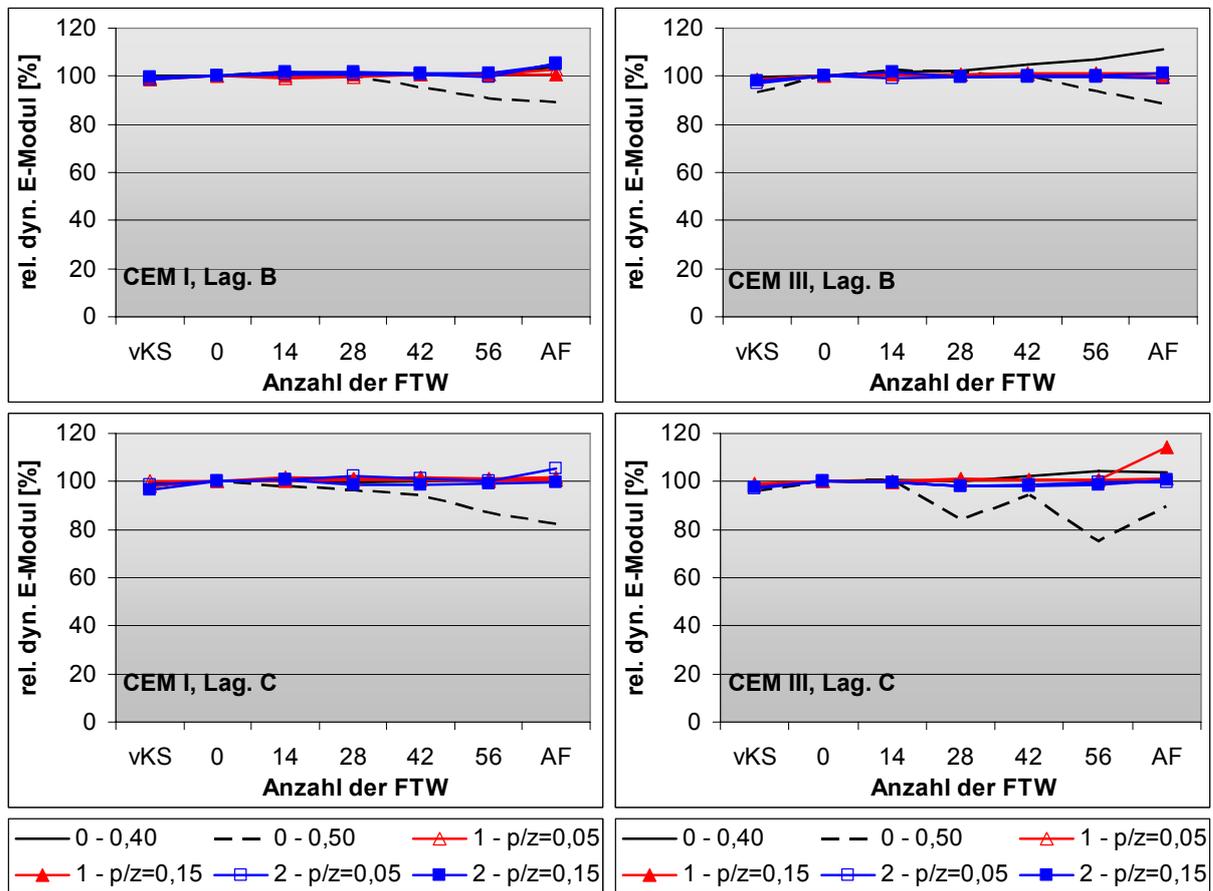


Abb. 6-8: Relativer dynamischer E-Modul

Das in [32] vorgeschlagene Prüfkriterium von einem E-Modul-Abfall kleiner 40 % nach 56 FTW wurde von keinem untersuchten Mörtel überschritten. Die relativen dynamischen E-Moduln der PCC während der Befrostung unterschieden sich nicht signifikant voneinander. Lediglich bei der Messung im ausgleichsfeuchten Zustand (AF) sind geringe Unterschiede zu erkennen, die aber im Wesentlichen auf das unterschiedliche Austrocknungsverhalten zurückzuführen sind. Nach [29] sind alle PCC aufgrund dieser Ergebnisse als gering geschä-

dig (relativer dynamischer E-Modul > 90 %) einzustufen. Auch die Vergleichsmörtel mit geringem w/z-Wert können uneingeschränkt so eingestuft werden, da sie sich ebenfalls nicht signifikant von den PCC unterscheiden. Die Vergleichsmörtel der Lagerung B mit hohem w/z-Wert erfüllen nach 56 FTW ebenfalls noch dieses Kriterium. In ausgleichsfeuchtem Zustand dagegen müssen sie wie auch die der Lagerung C als mäßig geschädigt eingestuft werden.

Insgesamt bestätigen die Ergebnisse den Hinweis von Setzer, dass bei der Verwendung von Tausalzlösungen die äußere Schädigung überwiegt. Der Anteil einer inneren Schädigung der PCC ist mit diesem Versuchsaufbau nicht nachweisbar.

6.3. Schädigungsprofil mittels Ultraschallrastermessungen

Das CIF-Verfahren liefert nur sehr unbefriedigende Aussagen über die innere Schädigung der Probekörper, da nur an einer Stelle, und zwar in der Mitte dieser Probe gemessen wird. Die Ultraschalllaufzeit ist von mehreren Faktoren abhängig. Eine wichtige Rolle spielt die Dichte des Mörtelgefüges, über dessen Schädigung durch Mikro- und Makrorisse infolge der Frosteinwirkung sich letztlich eine Verlängerung der Ultraschalllaufzeit ergibt. Dies wird dann als Indiz für die Schädigung der Mörtelprobe herangezogen.

Ein weiterer wesentlicher Faktor für die Ultraschalllaufzeit ist die Feuchtigkeit des Probekörpers. Während des CDF-Testes wird sich in einem Probekörper ein Feuchtegradient ausbilden, der wiederum von der Dichtigkeit der Mörtelmatrix und der Häufigkeit der Frost-Tau-Wechsel abhängig ist. Die Probe wird im Bereich der in die Prüflösung eingetauchten Fläche sehr schnell einen hohen Grad der Wassersättigung erreichen. Die Flüssigkeitsfront wird sich dann u. a. durch das kapillare Saugen, durch Diffusion und die von SETZER in [33] beschriebene Mikroslinsenpumpe von der Befrostungsfläche in den Probekörper hinein bewegen. Die Geschwindigkeit dieses Vorgangs ist im Wesentlichen von der Art und Struktur des Porensystems abhängig. In diesem durchfeuchteten Bereich wird die Ultraschallgeschwindigkeit größer sein, als im „trockenen“ Bereich. Dieser Effekt wird sich umso stärker bemerkbar machen je höher die Porosität des Probekörpers ist.

Um diesen Effekt zu visualisieren und um Aussagen über den tatsächlichen Schädigungsverlauf zu erhalten, wurde eine Probe der Lagerung B je Serie senkrecht zur Befrostungsfläche in einem engen Raster durchschallt. Begonnen wurde in einem Abstand von 5 mm von der Befrostungsfläche. Der Abstand von benachbarten Durchschallungsachsen betrug ebenfalls 5 mm. Jeder Probekörper wurde in 2 Achsen, die sich jeweils in den Drittelpunkten der Probenlängsachse befanden, durchschallt. Die Messtermine waren die gleichen wie für die Bestimmung der relativen dynamischen E-Moduln, jeweils im Anschluss an deren Bestimmung. Zur genauen Positionierung der Proben und Sicherstellung identischer Probenachsen zu den jeweiligen Prüfterminen wurde ein Probenschlitten verwendet (Abb. 6-9). Damit war es möglich, die 5 mm Rasterschritte exakt einzustellen. Es wurden punktförmige Ultraschallmessköpfe verwendet. Das Butylband, mit dem die Proben abgedichtet waren, diente als Ankoppelmedium. Über einen Blasebalg mit angeschlossenem Manometer wurde ein gleichmäßiger Ankoppeldruck gewährleistet (Abb. 6-10).

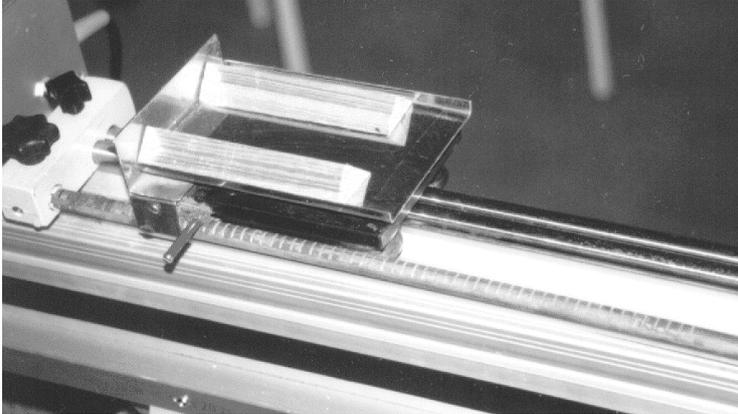


Abb. 6-9: Probenschlitten mit Justiereinrichtung (5 mm)

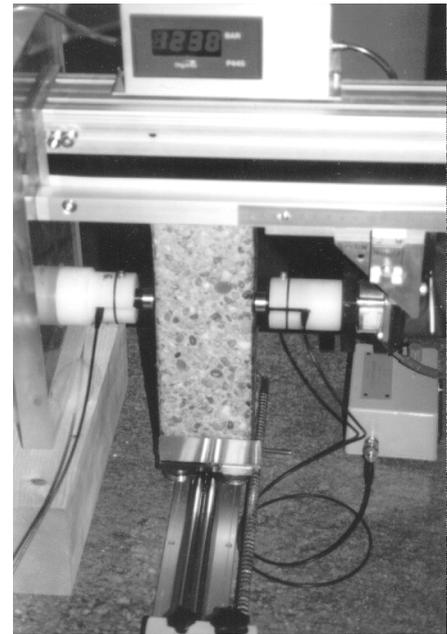


Abb. 6-10: Durchschallung einer CDF-Probe

Mittels der Messergebnisse wurden die relativen dynamischen E-Moduln für jede Messachse und zu den verschiedenen Messzeitpunkten berechnet. Diese sind als Profil über den Abstand von der Befrostungsfläche für jeden Probekörper dargestellt (Abb. 6-11, Abb. 6-12). Als Bezugswert diente wie beim CIF-Test die Messung nach dem kapillaren Saugen und vor der Befrostung (0 FTW) eines jeden Probekörpers. Die relativen dynamischen E-Moduln bei 35 mm sind vergleichbar mit denen des CIF-Testes, da es sich etwa um den gleichen Abstand von der Befrostungsfläche handelt.

Die deutlichsten Profile sind bei der Vergleichsmischung mit hohem w/z-Wert bei beiden verwendeten Zementen zu sehen. Während im trockenen Zustand (leichtes Absinken im Randbereich auf Grund der sich einstellenden Trocknungsgradienten) und nach 14 FTW nur leichte Verringerungen der relativen dynamischen E-Moduln zu den Probenrändern zu erkennen sind, war zu späteren Zeitpunkten eine Messung am Probenrand aufgrund der hohen Abwitterung nicht mehr möglich. Gut zu erkennen ist der geringe Abfall auf ca. 90 % in Probenmitte, was sich ebenfalls beim CIF-Test zeigte. Hier ist jedoch auch zu erkennen, dass die innere Schädigung bis 20 mm von der Befrostungsfläche erheblich ist.

Die restlichen Profile sind weit weniger ausgeprägt. Die relativen dynamischen E-Moduln beider Zemente bewegen sich im Wesentlichen zwischen 90 % und 110 %. Deutliche Abfälle während der Befrostung auf bis zu 80 % sind nur bis zu etwa 10 mm von der Befrostungsfläche zu erkennen. Eine Ausnahme bildet hier der PCC 1. In Verbindung mit dem CEM I und $p/z = 0,15$ sowie mit CEM III und $p/z = 0,05$ fällt der relative dynamische E-Modul während der Befrostung kontinuierlich und über die gesamte Probenhöhe gleichmäßig ab. In ausgleichsfeuchtem Zustand erreichen die Werte aber wieder 100 %. Ursächlich ist hierfür wahrscheinlich die erhöhte Porosität, die in Verbindung mit dem kontinuierlichen Feuchteintrag bei dieser Messmethode zu größeren Schwankungen führt.

Der Vergleich der Kurven der PCC mit denen der unmodifizierten Mischung mit geringem w/z-Wert spiegelt auch die erhöhte Lösungsaufnahme der 0-Mischung wider. Bei beiden

Zementen liegt die Kurve der Messung vor dem kapillaren Saugen deutlich unter den restlichen Kurven. Infolge der kapillaren Lösungsaufnahme erhöht sich der relative dynamische E-Modul. Dieser Effekt ist bei den PCC auf Grund der geringeren kapillaren Lösungsaufnahme nicht zu beobachten.

Das gelegentliche Abknicken der Kurven auf der der Befrostungsseite gegenüberliegenden Seite ist auf eine rückwärtige Durchfeuchtung zurückzuführen. Da das Abtropfen von Kondenswasser vom Behälterdeckel durch dessen Anordnung weitestgehend ausgeschlossen wurde, kommt als Ursache hierfür nur das Kondensieren von Wasser direkt auf dieser Probe in Betracht. Kritisch wird dies, wenn abgewittertes Material der unterseitigen Abwitterung zugeordnet wird und so das Ergebnis verfälscht.

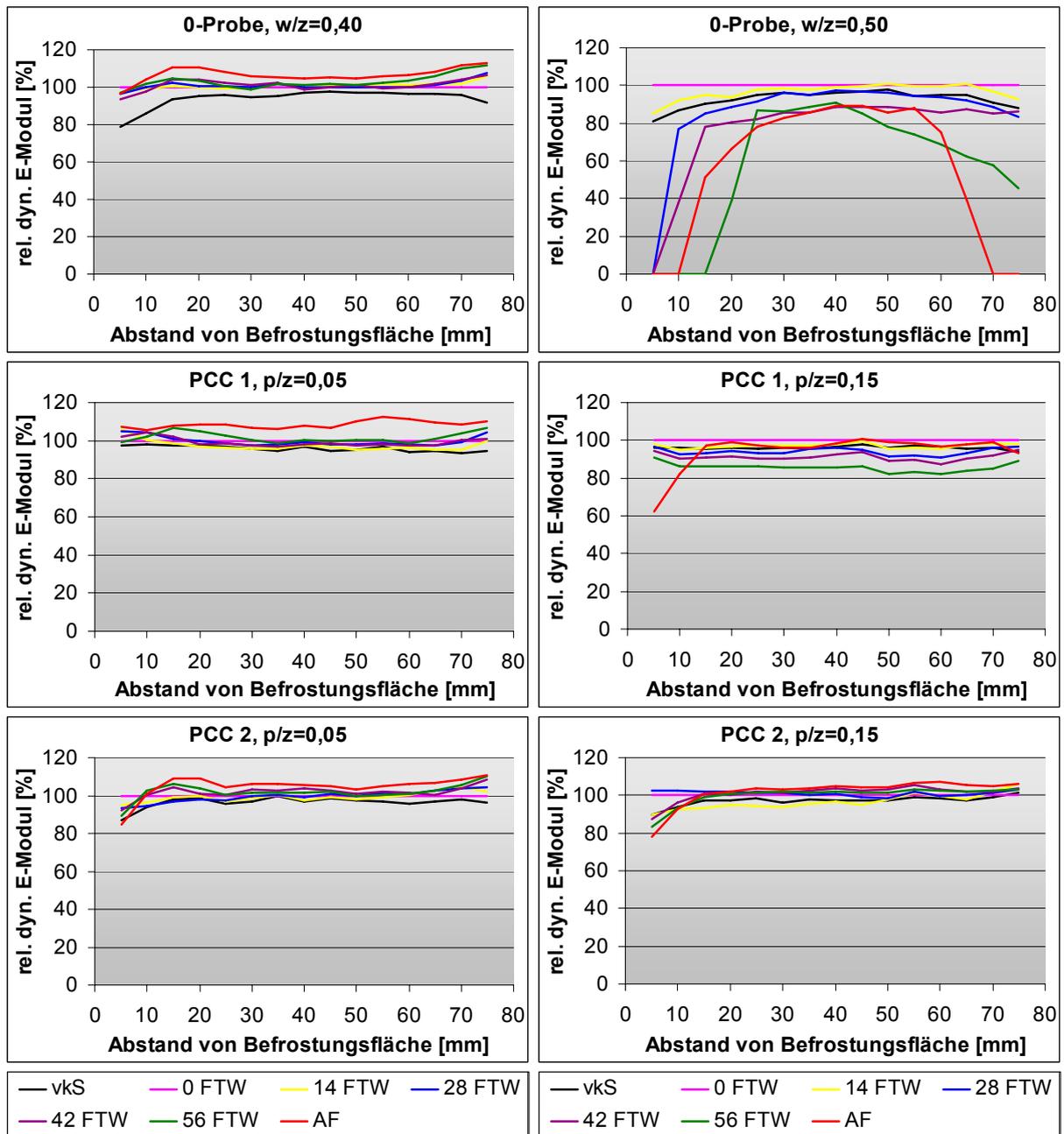


Abb. 6-11: Profile der relativen dynamischen E-Moduln aus den Rastermessungen der CEM I-Mörtel

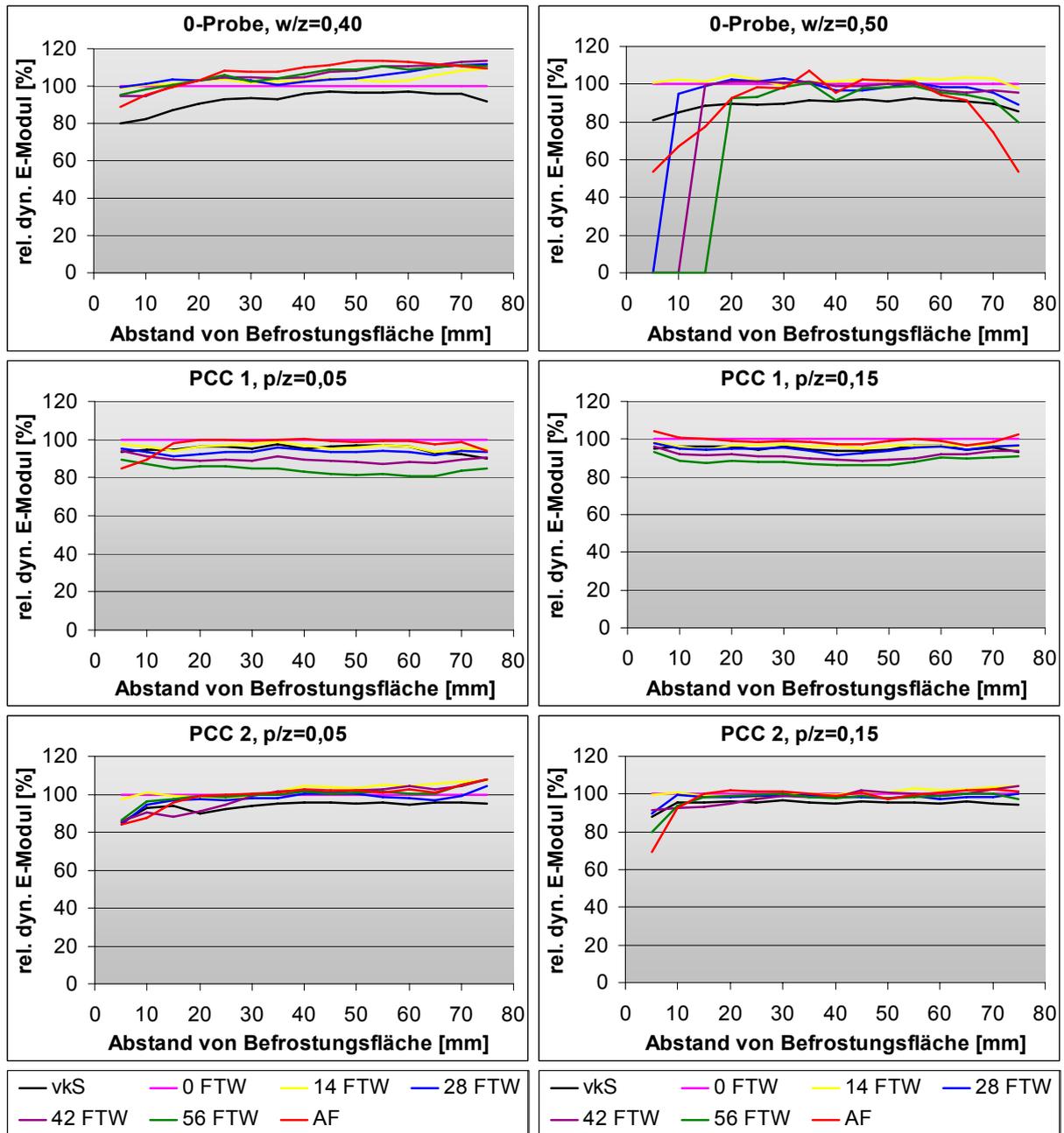


Abb. 6-12: Profile der relativen dynamischen E-Moduln aus den Rastermessungen der CEM III-Mörtel

Mit dieser Methode ist es möglich, Schädigungsgradienten über die Probenhöhe infolge Frost- und Frost-Tausalz-Einwirkung zu ermitteln und darzustellen. Wichtig ist dies z. B. für die zeitliche Einschätzung des Erreichens einer Bewehrungslage durch eine Schädigungsfront. Kritisch zu beurteilen sind jedoch die Abhängigkeit von der Porosität bzw. dem Feuchtetransportvermögen. Hierbei kann es leicht zu Fehleinschätzungen kommen. Des Weiteren ist der erhebliche (zeitliche) Messaufwand nur für spezielle Fragestellungen gerechtfertigt.

6.4. Einfluss organischer Taumittel

Natriumchlorid ist heute nicht das einzige zur Anwendung gebrachte Taumittel. Unter anderem kommen organische Taumittel wie Glykole oder Acetate zum Einsatz. Da sich organische Substanzen teilweise gut in organischen Lösungsmitteln lösen, war die Frage zu klären, wie sich diese organischen Taumittel in Bezug zu den PCC verhalten. Es sollte geklärt werden, ob eine höhere Schädigung zu erwarten ist bzw. wie sich die Kunststofffilme in diesen Taumitteln verhalten [E7].

6.4.1. CDF-Test mit unterschiedlichen Taumitteln

Diese Untersuchungen wurden an CEM I – Mörteln ($w/z = 0,40$) durchgeführt, die mit einem p/z -Wert von 0,15 modifiziert wurden. In Anlehnung an die Vorschriften des CDF-Testes wurden Balkenproben ($8 \times 8 \times 25 \text{ cm}^3$) hergestellt, gelagert und geprüft.

Als Prüflösungen wurden NaCl-Lösung (3%-ig), Kaliumacetatlösung (5%-ig) und Ethylenglykollösung (3%-ig) verwendet. Zum Vergleich wurde deionisiertes Wasser verwendet. Es wurden die kapillaren Lösungsaufnahmen und die Abwitterungen bis 28 FTW bestimmt. Die Ergebnisse sind in den Abb. 6-13 und Abb. 6-14 dargestellt.

Es sind keine signifikanten Unterschiede in den kapillaren Lösungsaufnahmen bzw. bei den Abwitterungen zu erkennen. Die Abwitterungen sind insgesamt so gering, dass die Mörtel das Abwitterungskriterium klar unterschreiten. Signifikante Unterschiede der Abwitterungen bei Einwirkung der verschiedenen Taumittel sind ebenfalls nicht feststellbar. Es bleibt letztlich kein Spielraum für Interpretationen.

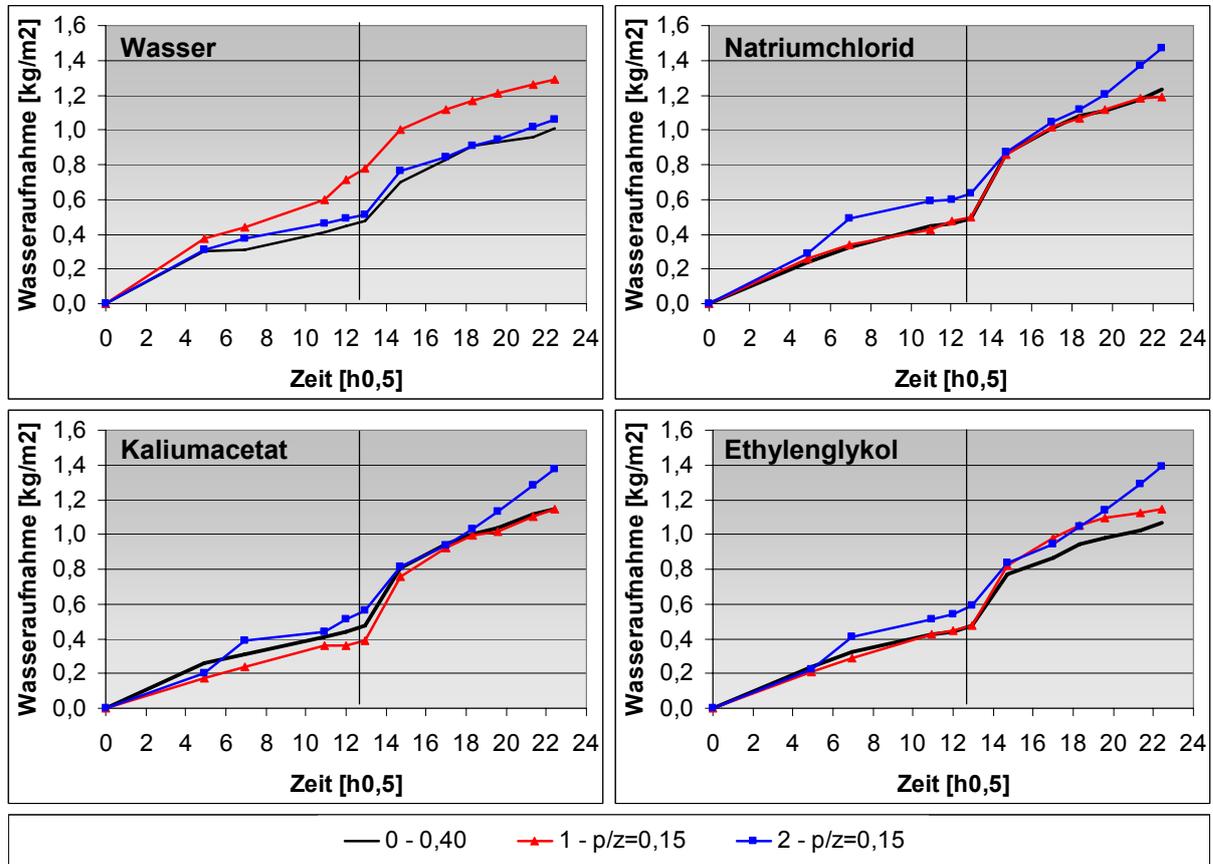


Abb. 6-13: kapillare Lösungsaufnahmen der verschiedenen Taumittel

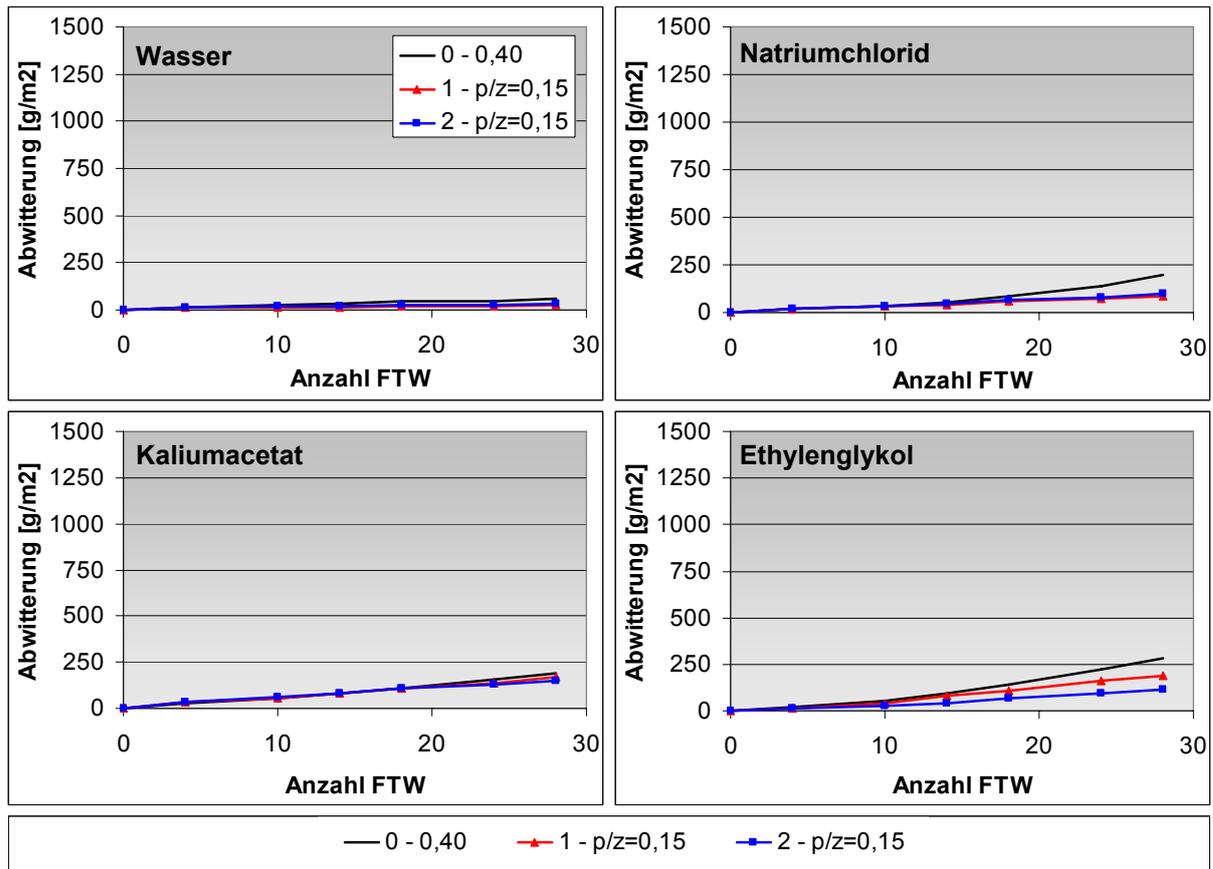


Abb. 6-14: Abwitterungen während des CDF-Testes bei Belastung mit verschiedenen Taumitteln

Das zeigt, dass die organischen Taumittel scheinbar keine negative Wirkung auf die PCC haben. Es sind also keinerlei Probleme, welche auf die Anwendung organischer Taumittel zurückzuführen wären, bei der Instandsetzung von Betonbereichen, welche mit diesen Taumitteln beaufschlagt werden (etwa am Flughafen) zu erwarten. Die Ergebnisse des CDF-Testes sind also auch auf organische Taumittel übertragbar.

6.4.2. Wirkung unterschiedlicher Taumittel auf die Polymerfilme

Um diesen Aspekt noch etwas näher zu betrachten, wurden freie Kunststofffilme der beiden verwendeten Kunststoffe hergestellt. Das Pulver des KS 1 wurde in Wasser redispergiert, auf eine PE-Folie aufgetragen und im Labor getrocknet. Die entstandenen Filme wurden in die Taumittel eingelagert und verblieben darin bis zum 56. Tag. Eine wechselnde Trocken-Nass-Lagerung war hier nicht möglich. Grund dafür war das rasche Quellen und anschließende Zerfallen der Filme, unabhängig vom Prüfmedium. Das Filtrieren am Ende des Prüfzeitraumes brachte keine weiteren Erkenntnisse.

Der KS 2 wurde wegen seiner Mindestfilmbildetemperatur von 30 °C im Wärmeschrank bei 40 °C temperiert. Um die für Kunststofffilme i. d. R. problematischen hygri-schen Wechsel zu simulieren, wurden die entstandenen Filme jeweils 6 Tage in der Prüf-flüssigkeit eingelagert und anschließend einen Tag lang bei 40°C im Trockenschrank gelagert. Diese Prozedur wurde bis zum 27. Tag wiederholt. Danach fand die Trocknung jeweils einen Tag lang bei 20°C / 65% rel. Luftfeuchte statt, um eine bei 40°C immer wieder auftretende Verfilmung auszuschließen. Der Untersuchungszeitraum umfasste ebenfalls 56 Tage.

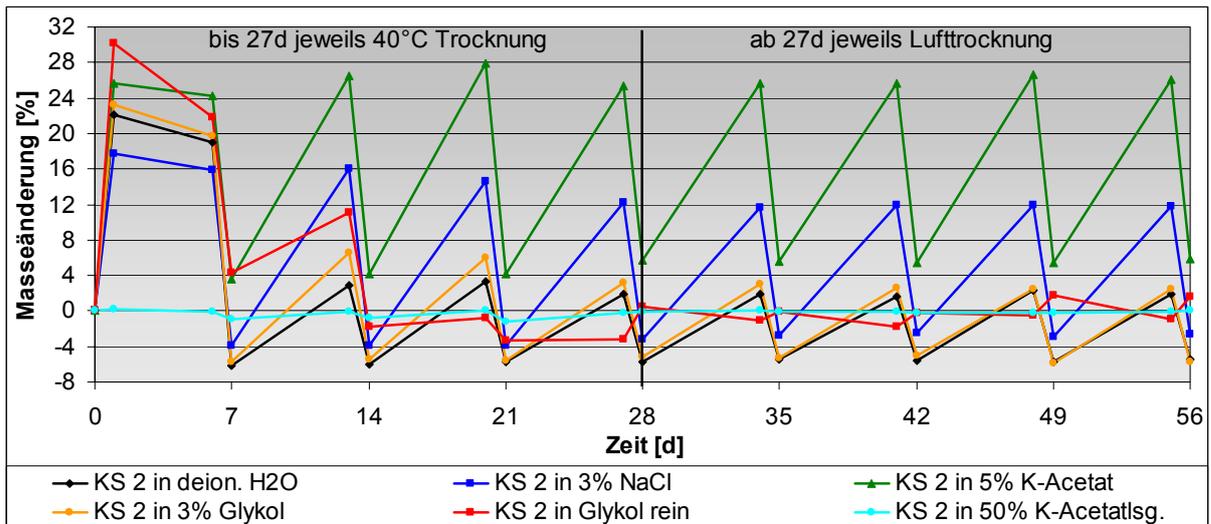


Abb. 6-15: Masseänderungen der Polymerfilme

Bei der Bestimmung der Masseänderung der Polymerfilme von KS 2 (Abb. 6-15) ist festzustellen, dass es zu einem Quellvorgang kommt, welcher abhängig von der verwendeten Lösung unterschiedlich stark abläuft. Der Quelleffekt nimmt in folgender Reihenfolge zu:

50 % Kaliumacetatlösung → 3 % Natriumchloridlösung → deionisiertes Wasser → 3 % Ethylenglykollösung → 5 % Kaliumacetatlösung → reines Ethylenglykol.

Bei Betrachtung der niedrigprozentigen Lösungen bzw. Wasser fällt auf, dass der Quelleffekt bei jedem Zyklus etwas abnimmt und sich dann einem konstanten Wert annähert. Ab dem 27. Tag ist ein konstantes Alternieren der Kurven festzustellen. Dabei verursacht die 5%ige Kaliumacetatlösung die größten Schwankungen ($\Delta m \approx 20\%$). Die 3%ige Natriumchlorid-Lösung verursacht geringere Masseänderungen ($\Delta m \approx 15\%$). Die 3%ige Glykollösung und Wasser schwanken in kleineren Intervallen ($\Delta m \approx 8\%$) und verlaufen annähernd identisch. In reinem Glykol bzw. in der 50%igen Kaliumacetatlösung ist ein sehr geringes, teilweise diffuses Quellen und Schwinden feststellbar.

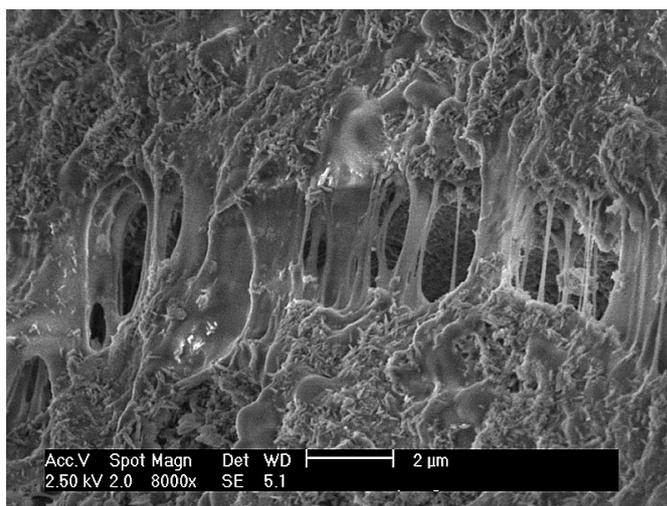


Abb. 6-16: KS 1 im Gefüge (ESEM)

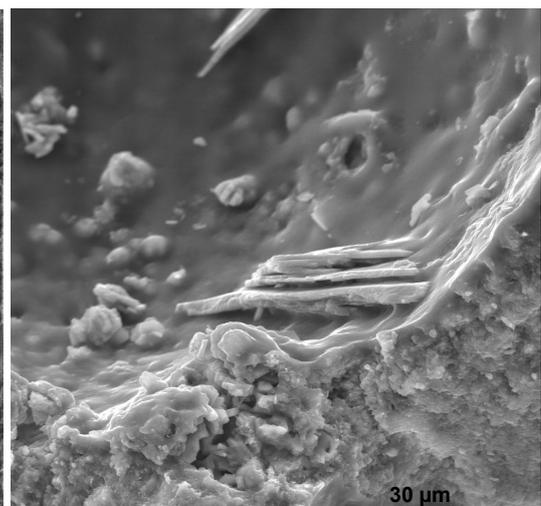


Abb. 6-17: KS 2 in einer Pore (REM)

Die Ergebnisse an den "freien" Kunststofffilmen konnten an den Mörteln so nicht bestätigt werden. Weder das Aufquellen und Zerfallen der Filme des KS 1 noch das Quellen des KS 2 waren im REM bzw. ESEM sichtbar (Abb. 6-16; Abb. 6-17). Dabei ist zu berücksichtigen,

dass die Bedingungen im Mörtel (alkalisches Milieu, dichte Struktur, Filmbildungsbedingungen, dünnere Filmstrukturen, Wechselwirkungen an den Grenzflächen zum Zementstein / Gesteinskörnung u. ä.) wesentlich von denen an den freien Polymerfilmen abweichen. Dadurch sind die Ergebnisse nicht direkt übertragbar und haben lediglich hinweisenden Charakter.

6.5. Untersuchungen zur Sättigungsfähigkeit von PCC

Die Frost-Tausalz- und insbesondere die Frost-Beständigkeit von Mörteln und Betonen wird wesentlich durch deren Dichtigkeit gegenüber verschiedener Lösungen bestimmt. Dies gilt auch für PCC. Wie bereits dargelegt, ist die Lösungsaufnahme vor und während des CDF-Testes bei den PCC gleich, meist sogar deutlich geringer im Vergleich zur Referenz.

Um zu ermitteln, wie hoch die kritische Sättigung der PCC tatsächlich ist, wurde das Verfahren nach FAGERLUND [52] angewendet. Es sollte geprüft werden, ob die kritischen Sättigungswerte der PCC im gleichen Bereich liegen, wie die normaler Betone. Alle Versuche schlugen fehl. Es konnte bei keiner Rezeptur eine Schädigung erzielt werden, d. h., es konnte kein deutlicher E-Modul-Abfall an den untersuchten Proben festgestellt werden. Bei der Ursachenforschung wurde die Frage aufgeworfen, wie viel Wasser von den PCC überhaupt aufgenommen werden kann.

Der mit Lösung füllbare Porenraum ist vergleichbar mit der zugänglichen Porosität. Diese kann mittels Quecksilberhochdruckporosimetrie bestimmt werden. Dieser ermittelte Porenraum stellt dann das maximal mit Lösung füllbare Volumen dar.

In einem Versuchsprogramm wurden die kapillaren Lösungsaufnahmen der PCC sowie der Vergleichsrezepturen in Anlehnung an die DIN 13057 [R14] als auch die Lösungsaufnahme unter Vakuum Anlehnung an das Verfahren nach FAGERLUND bestimmt.

Für die kapillare Lösungsaufnahme wurden aus Balken ($8 \times 8 \times 24 \text{ cm}^3$) der verschiedenen CEM I - Mörtel (vgl. Tab. 2-3) Platten ($8 \times 8 \times 2 \text{ cm}^3$) gesägt und bis zur Massekonstanz bei $60 \text{ }^\circ\text{C}$ getrocknet. Vor Prüfbeginn wurden die Proben gewogen. Die Prüfung erfolgte im Laborklima 20/65. In eine Kunststoffwanne mit Dreikantleisten als Lagerstützen wurde deionisiertes Wasser eingefüllt. Die Proben wurden auf den Dreiecksleisten so gelagert, dass die Eintauchtiefe ca. 2 mm betrug. Nach 12 und 30 Minuten sowie 1, 2, 3, und 24 Stunden erfolgte jeweils eine Wägung der Proben. Dazu wurden sie aus dem Wasserbad genommen, auf einem Filter von oberflächlich anhaftendem Wasser befreit und gewogen. Anschließend wurden die Proben sofort wieder in das Wasserbad verbracht. Dieser Wägevorgang dauerte ca. 1 min.

Die Bestimmung der Lösungsaufnahme unter Vakuum erfolgt an massekonstant getrockneten Platten aus den gleichen Balken wie für die kapillare Lösungsaufnahme. Die Proben wurden in einem Edelstahlbehälter auf Gitterrosten gelagert, an dem eine Vakuumpumpe angeschlossen war. Nach dem druckdichten Verschließen wurde der Behälter evakuiert. Dabei wurde ein Vakuum kleiner 1 mbar erreicht und gehalten. Nach 30 Minuten wurde über ein 3-Wege-Ventil das Evakuieren unterbrochen und über die andere Zuleitung Wasser infolge des Vakuums in den Behälter gesaugt, bis die Proben vollständig überschichtet waren. Dies konnte am Füllstandsanzeiger des Behälters kontrolliert werden. Anschließend wurde über das 3-Wege-Ventil die Vakuumpumpe wieder zugeschaltet und die Luft erneut für ca. 30

Minuten evakuiert. Dabei stellte sich ein Vakuum von ca. 24 mbar ein, was für 24 Stunden gehalten wurde. Ein höheres Vakuum war nicht zu erreichen, da der Sättigungsdampfdruck von Wasser bei 20 °C 23,4 mbar beträgt. Nach 24 Stunden wurde ein Druckausgleich durchgeführt, die Proben herausgenommen, oberflächlich auf einem Filtertuch getrocknet und gewogen. Anschließend wurden sie wieder im Behälter im Wasser gelagert. Am Schluss wurde der Behälter wieder verschlossen und die Luft erneut evakuiert, bis sich ein Vakuum von ca. 24 mbar einstellte. Diese Prozedur wurde so lange wiederholt, bis sich eine Massekonstanz einstellte, die Abweichung zwischen 2 Wägezeitpunkten also geringer als 0,1 % war. Dann konnte von einer vollständigen Sättigung der Proben ausgegangen werden.

Die Auswertung erfolgte einerseits durch die Bestimmung der prozentualen Wasseraufnahme bei beiden Verfahren bezogen auf die jeweiligen massekonstant getrockneten Proben. Andererseits wurde die prozentuale kapillare Sättigung aller Proben bezogen auf deren offene Porosität berechnet. Die offene Porosität der jeweiligen Rezepturen wurde vorher mittels Quecksilberhochdruckporosimetrie bestimmt (vgl. Abb. 6-5). Die Ergebnisse sind in Abb. 6-18 dargestellt.

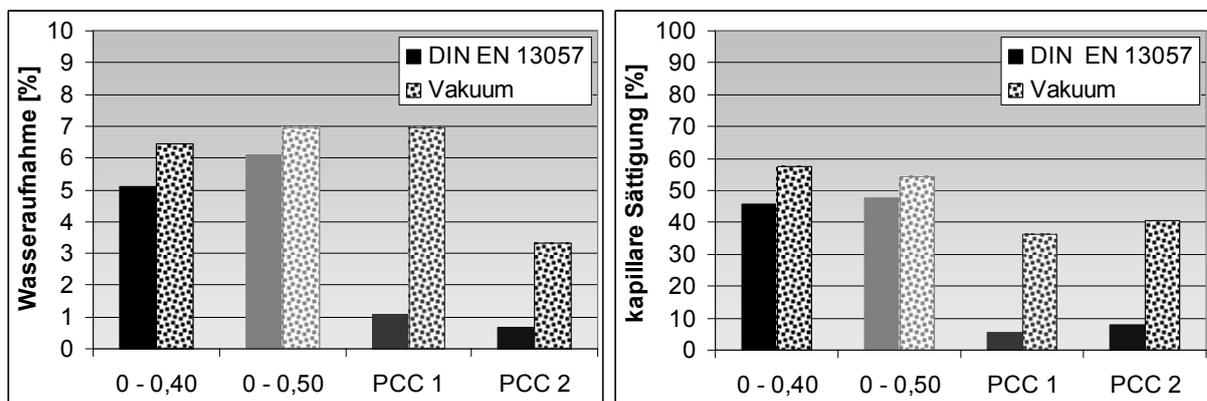


Abb. 6-18: prozentuale kapillare Wasseraufnahme und kapillare Sättigung der PCC

Die Lösungsaufnahme unter Vakuum der nicht modifizierten Rezepturen ist lediglich um ein Prozent höher als deren kapillare Lösungsaufnahme. Bei den PCC ist dieser Unterschied sehr viel größer. Während bei beiden PCC die kapillare Lösungsaufnahme lediglich bei ca. 1 % liegt, ist die Lösungsaufnahme unter Vakuum beim PCC 1 mit 7 % vergleichbar mit der der nicht modifizierten Rezepturen. Die Lösungsaufnahme unter Vakuum des PCC 2 dagegen ist nicht einmal halb so hoch. Dies ist ein Resultat der wesentlich geringeren Kapillarporosität des PCC 2 (vgl. Abschnitt 6.2.2).

Bei dem Vergleich der kapillaren Sättigung relativiert sich das Bild wieder. Hier zeigt sich, dass die PCC durch reines kapillares Saugen kaum Lösungen aufnehmen. Dies ist eine wesentliche Folge der Auskleidung der Porenwänden mit den Kunststoffen. Zum einen können die Kunststoffe hydrophob wirken und so die kapillare Steighöhe deutlich verringern. Bedeutender ist jedoch der Quelleffekt einzuschätzen, in Folge dessen die Poren verengt oder sogar verschlossen werden. Durch den relativ langen Kontakt zur Lösung und der geringen Steiggeschwindigkeit bei diesem Verfahren bleibt den Kunststoffen genügend Zeit aufzuquellen.

Anders verhält es sich dagegen bei dem Vakuumverfahren. Dadurch, dass die Proben anfänglich nur in Luft evakuiert und dann schlagartig mit Lösung beaufschlagt wurden, war die

Penetrationsgeschwindigkeit der Lösung am Anfang in Folge des Bestrebens des Druckausgleiches sehr hoch. Die Kunststofffilme konnten nicht so schnell aufquellen und ihre abdichtende Wirkung entfalten. Dadurch konnte mehr Lösung von den Proben aufgenommen werden. Hinzu kommt bei diesem Verfahren die zusätzlich zur Kapillarkraft wirkende Saugkraft des Vakuums. Trotzdem konnte bei beiden PCC keine kapillare Sättigung von mehr als 40 % erreicht werden, während die nicht modifizierten Proben weit über 50 % erreichten.

Letztlich ist daraus zu schlussfolgern, dass bei diesen PCC eine kritische Sättigung nicht erreicht werden kann. Einerseits gründet sich dies auf den niedrigen w/z-Wert von 0,40, aufgrund dessen das Gefüge grundsätzlich sehr dicht ist. Dies zeigt sich auch bei dem Vergleich mit den nicht modifizierten Rezepturen. Selbst bei der Rezeptur mit einem w/z-Wert von 0,50, welcher für Beton der Beanspruchungsklasse XF 4 den maximalen w/z-Wert darstellt, konnte keine kapillare Sättigung über 60 % erreicht werden. Andererseits zeigt dieser Vergleich aber auch die Vorteile der abdichtenden Eigenschaften infolge des Aufquellens der Kunststofffilme.

Einschränkend muss jedoch davon ausgegangen werden, dass die kapillare Sättigung im oberflächennahen Bereich auch bei den PCC sehr hoch ist. Es wird sich ein deutlicher Feuchtegradient ausbilden. Demzufolge ist hier bei Frostbelastung auch mit einem erhöhten Schädigungspotenzial zu rechnen. Dies zeigen auch die Schädigungsprofile der Ultraschallrastermessungen, bei denen teilweise im oberflächennahen Bereich bis 10 mm ein Abfall des relativen dynamischen E-Moduls bis zu 20 % festzustellen war. Die Folgen sind dann erhöhte Abwitterungen, jedoch über einen deutlich längeren Zeitraum als bei nicht modifizierten Mörteln.

7 Adhäsiver Haftverbund von PCC zu Beton

In diesem Abschnitt wird im Wesentlichen auf Aspekte des Haftverbundes von PCC zu Beton eingegangen, die sich im Zusammenhang mit dem Laborprüfverfahren der Haftzugfestigkeit nach Frost-Tau-Belastung nach RILI - SIB ergaben. Im Vordergrund stehen dabei Überlegungen zum Prüfverfahren selbst und zum Einfluss des Beschichtungsvorganges. Aber auch der Umgang mit Salzbelastungen des Untergrundes und der Beschichtung wurden untersucht.

7.1 Literaturübersicht

In den letzten Jahren wurden zahlreiche Untersuchungen zum Haftverbund von PCC auf Betonen veröffentlicht. Das Untersuchungsspektrum reicht dabei vom Einfluss des Untergrundes, des Beschichtungsmörtels und dessen Nachbehandlung bis zu verschiedenen Beschreibungen der Wirkmechanismen des Haftverbundes und von Schäden.

Eine der wichtigsten Voraussetzungen zur Erzielung eines guten Haftverbundes ist ein tragfähiger und benetzungswilliger Untergrund [95]. Schadhafter und evtl. schlecht nachbehandelter Beton müssen entfernt werden. Die Beschichtungsoberfläche muss frei von losen Bestandteilen, Staub, öligen Verunreinigungen, Algenbewuchs usw. sein. Vor dem Beschichten sind die Oberflächenzugfestigkeit ($> 1,5 \text{ N/mm}^2$ nach RILI - SIB [R7] und ZTV - ING [R9]), die Rauigkeit und je nach Beschichtungssystem die Oberflächenfeuchte und -temperatur zu prüfen [96][97][98][99].

Einen wirksamen Beitrag zur Haftfestigkeit leistet die mechanische Adhäsion, auch als mechanische Verzahnung bezeichnet [68]. Sie beschreibt die Verankerung des Beschichtungsstoffes in den mikroskopisch kleinen Vertiefungen und Poren des Untergrundes [104]. Abhängig ist diese Verzahnung allerdings auch von der Benetzungsfähigkeit des Untergrundes. Der Grad der Benetzung hängt dabei vom Verhältnis der Oberflächenspannungen des Grenzflächensystems ab [100]. Bei der Benetzung verschwindet Oberfläche und es entsteht Grenzfläche. Die mechanische Adhäsion steigt außerdem mit zunehmender Rautiefe des Untergrundes [68][105].

Auswirkungen auf den Haftverbund hat insbesondere das Schwindverhalten des Beschichtungsmörtels, welches ebenso die Reißneigung und somit letztlich die Dauerhaftigkeit beeinflusst [4][100]. Die Spannungen, die dadurch im Beschichtungsmaterial und in der Verbundfuge entstehen, sind wesentlich vom E-Modul des Beschichtungssystems abhängig, schreibt SCHORN [1]. Zusätzlich wird der Verbund durch Temperatur- und Feuchtegradienten sowie lastabhängige Verformungen, wie dem Kriechen, beansprucht [100][101]. Solange ein guter Haftverbund vorhanden ist, werden die Spannungen in den Betonuntergrund übertragen. In der Beschichtungsebene entstehen Schubspannungen und senkrecht dazu Normalspannungen (Zug- bzw. Druckspannungen), die größer als die Schubspannungen sein können. Sind die Schubspannungen höher als die Zugfestigkeit des Beschichtungsmaterials, entstehen Risse im Beschichtungsmaterial. Diese Risse haben wiederum freie Ränder in der Beschichtung zur Folge, an denen neue Schub- und Normalspannungen übertragen werden müssen. Sind die Normalspannungen jedoch höher als die Verbundfestigkeit, kommt es zu Ablösungen der Beschichtung vom Untergrund [100][101][104].

Besonders bei Temperatur- und Feuchtewechseln sind PCC-Beschichtungen problematisch und es kommt zum Beschichtungsversagen [E1][E9]. Rissbildungen werden verstärkt [106]. In diesen Fällen ist nach MAULTZSCH eine Verringerung des E-Moduls mit zunehmender Temperatur vorteilhaft [87].

Die Nachbehandlung hat zwar einen Einfluss auf die Dauerhaftigkeit des Beschichtungsmaterials, nicht jedoch auf den Haftverbund direkt. Nach MAULTZSCH gibt es keinen direkten Zusammenhang zwischen Abreißfestigkeit und Nachbehandlungsdauer bei PCC-Beschichtungen [9]. Er stellte außerdem bei Schwindrinnenversuchen an PCC und SPCC fest, dass Rissanzahl und -breite durch eine mangelhafte Nachbehandlung nicht negativ beeinflusst wurden. Dagegen fand WEBER, dass bei großen Schichtdicken eine fehlende Nachbehandlung zu mehr Rissen führte [102]. DEMPWOLF [103] untersuchte ECC-Beschichtungen. Er zeigte, dass bei mangelnder Nachbehandlung die Hydratation des Zementes verschlechtert wurde und dadurch die Rissbildung in der Beschichtung zunahm. Außerdem waren die Haftzugfestigkeiten der besser nachbehandelten Systeme höher als die der nicht nachbehandelten.

Hinsichtlich der Dauerhaftigkeit gelten PCC i. A. als unproblematisch (u. a. [6][7][107]). In [101] und [104] wurde jedoch eine Reduzierung der Haftzugfestigkeiten nach Frost-Tausalzbeanspruchung festgestellt. Ursache für solche Schäden werden häufig in der Entstehung von Rissen gesehen, in Folge derer es dann zu Undichtigkeiten in den Beschichtungen kommt. Nach YOON [108] kann sich eindringende Feuchtigkeit durch kapillares Saugen weit ausbreiten und in Folge dessen zur Schädigung des Verbundes führen.

Trotz dieser zahlreichen Untersuchungen sind noch nicht alle Aspekte des Haftverbundes der PCC zu Beton geklärt. Der chemischen Adhäsion z. B., also der Reaktion von Bestandteilen des Beschichtungsmörtels mit dem Betonuntergrund, wird kaum Beachtung geschenkt. Ebenso vernachlässigt wird die Betrachtung der Einflüsse von Belastungen im Beschichtungsuntergrund durch wasserlösliche Stoffe. Diese können beim Kontakt mit dem Anmachwasser des Beschichtungsmörtels, welches in die Betonoberfläche eindringt, in Lösung gehen und in die Beschichtungsebene gelangen, wo sie evtl. haftungsmindernd wirken können. Meßmethoden dazu im Bezug auf PCC wurden in [109] verglichen. Dieser Aspekt wird in diesem Abschnitt genauer untersucht.

7.2 Untersuchungen zur Verkürzung des Frost-Tau-Prüfregimes nach RILI-SIB

In der RILI - SIB [R7] als auch in der ZTV - ING [R9] bzw. der TL BE-PCC [R10] wird für PCC eine Prüfung der Haftzugfestigkeit nach Frost-Tau-Beanspruchung vorgeschrieben. Das Prüfregime ist folgendermaßen gegliedert:

0 h	Wasserlagerung bei 20 °C
1,75 h	Abpumpen des Wassers
2 h	Beginn des linearen Abkühlvorganges auf -15 °C
5 h	Lagerung an Luft bei -15 °C
9 h	Fluten mit Wasser (20 °C)
9,25 h	Wasserlagerung bei 20 °C
10,25 h	Abpumpen des Wassers

10,5 h	Beginn des linearen Aufheizens auf 60 °C
12 h	Lagerung an Luft bei 60 °C
22 h	Fluten mit Wasser (20 °C)
22,25 h	Wasserlagerung bei 20 °C
24 h	Zyklusende

Beschichtete Probekörper müssen 20 Zyklen dieses Regimes, das entspricht 20 Tagen, ausgesetzt werden, bevor die Haftzugfestigkeit bestimmt wird. Die Oberfläche wird mehrmals während dieser Zeit begutachtet und auf Risse und Ablösungen untersucht.

In diesem Punkt sollte untersucht werden, ob das Prüfregime für vergleichende Laboruntersuchungen gekürzt werden kann, ohne dabei die Zyklenanzahl bzw. die Belastungen für das Beschichtungssystem zu reduzieren. Dafür war es notwendig, die jeweiligen Beanspruchungen zu charakterisieren. Es wurden verschiedene Platten (30 x 30 x 5 cm³) 2 cm dick beschichtet und mit Temperatursensoren versehen, um das Erreichen der jeweiligen Außentemperatur zu erfassen. Eine Messstelle lag im Schwerpunkt der Probengeometrie, eine zweite in der Beschichtungsebene (Abb. 7-1).

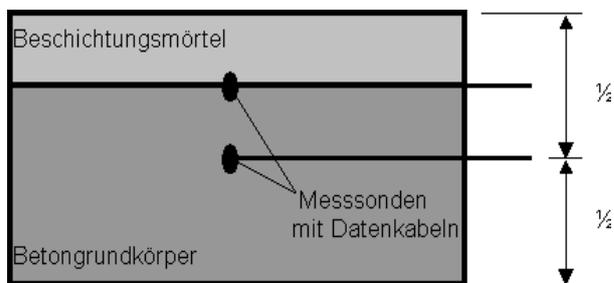


Abb. 7-1: Lage der Temperatursensoren im Beschichtungskörper

Die Grundkörper wurden zusammen mit einigen Betonprobekörpern, welche zur Sicherstellung des Volumenverhältnisses von Prüfraum / Probekörpern von ca. 7 / 1 dienen, in der Prüfruhe platziert (Abb. 7-2). Anschließend wurde das beschriebene Prüfregime mehrfach wiederholt durchgeführt. Die Temperaturen wurden im Intervall von 5 min aufgezeichnet.

Eine Möglichkeit zur Reduzierung der Prüfdauer war nur während der Haltephasen möglich, da Aufheiz- und Abkühlraten nicht geändert werden sollten. Demzufolge waren die entscheidenden Punkte der Temperaturmessungen die, an denen Außentemperatur und Temperatur an den Messpunkten sich angleichen. Dies geschah in der unteren Haltephase bei -15 °C erst 4 Stunden nach Beginn der Haltephase, also dem Punkt, an dem nach dem ursprünglichen Prüfzyklus bereits wieder mit 20 °C warmem Wasser geflutet werden soll. Hier ergab sich demzufolge nicht die Möglichkeit, Zeit einzusparen.

Bei der oberen Haltephase bei 60 °C wurde der Schnittpunkt zwischen Außentemperatur und Temperatur der Messfühler bereits nach knapp 5 Stunden erreicht, also der Hälfte der Haltezeit. Dieses Ergebnis konnte an allen untersuchten Proben in mehreren Prüfzyklen verifiziert werden. Daraus ergab sich für den Aspekt des Durchkühlens bzw. Durchwärmens der Proben ein Einsparpotenzial von 5 Stunden.

Da sich die Temperatur wesentlich auf das Längenänderungsverhalten auswirkt (z. B. thermische Längenänderung), wurde überprüft, wie sich die Länge der PCC innerhalb der 10 Stunden Lagerung bei 60 °C ändert. Dazu wurden Normmörtelprismen der PCC hergestellt, die an den Stirnseiten mit Messzapfen versehen waren. In Anlehnung an das Messverfahren

nach DIN 52450 [R5] wurde die Längenänderung der 28 Tage alten Prismen bei Lagerung über Wasser bei 60 °C gemessen. Die Lagerung über Wasser resultierte aus der Tatsache, dass die Luftfeuchtigkeit in der Prüfruhe während der 60 °C - Lagerung in Folge des vorangegangenen Flutens sehr hoch ist. Es zeigte sich, dass alle Prismen ca. 2,5 Stunden nach Erreichen der 60 °C keine nennenswerten Längenänderungen mehr erfahren haben. Insbesondere zwischen den Messzeitpunkten nach 5 und 10 Stunden kam es nicht mehr zu einer Längenänderung. Die Verkürzung des Messregimes hätte also keine Auswirkungen auf das Längenänderungsverhalten der Beschichtungsmörtel.

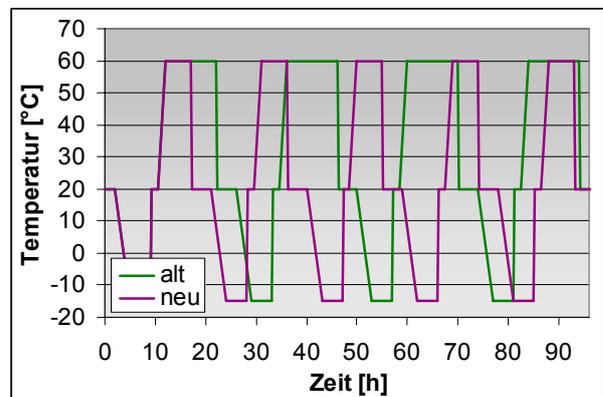
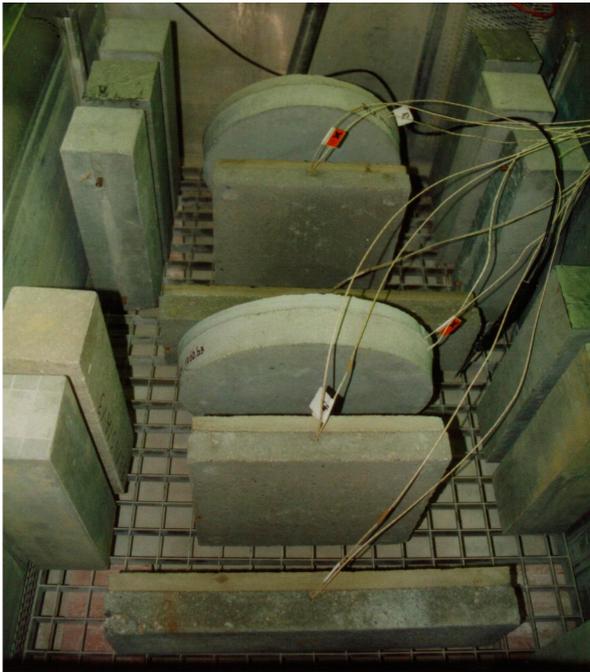


Abb. 7-2: Anordnung der Proben in der Prüfruhe **Abb. 7-3:** Gegenüberstellung der Prüfregime

Aufgrund dieser Ergebnisse konnte das Prüfregime um 5 Stunden je Zyklus und damit um 100 Stunden (ca. 4 Tage) bei den vorgeschriebenen 20 Zyklen reduziert werden. Dies bedeutet eine deutliche Zeitersparnis bei vergleichenden Laborprüfungen in der verwendeten Prüfruhe. In wie weit dieses Ergebnis auf andere Prüfruhe und andere Volumenverhältnisse von Prüfraum zu Probenvolumen angewendet werden kann, wurde nicht geprüft.

7.3 Untersuchungen zum Einfluss der Probengeometrie

Nach der RILI - SIB 2001 [R7] als auch nach der ZTV - ING [R9][R10] sind für die Prüfung der Frost-Tau-Beständigkeit von PCC-Beschichtungen quadratische Platten mit einer Grundfläche von 300 x 300 mm² der Betonfestigkeitsklasse C 45/55 vorgeschrieben. Häufig treten bei Verwendung solcher Platten im Laborprüfverfahren Ablösungen im Eck- und Randbereich auf, so dass die eigentliche Prüfung der Haftzugfestigkeit nicht mehr möglich ist. Hervorgerufen werden diese Ablösungen i. A. durch die hohen Zugfestigkeiten und dem erhöhten Schwinden der PCC, verbunden mit dem deutlich geringeren E-Modul im Vergleich mit dem beschichteten Beton. In Folge dessen treten in der Verbundzone große Spannungen auf, die dann die Haftfestigkeit übersteigen und zur Beschichtungsentfestigung führen. Es kommt zu dem bekannten Effekt des „Aufschüsselns“. Sind die Spannungen geringer als die Haftfestigkeit, jedoch höher als die Zugfestigkeit des Beschichtungsmaterials, kommt es zum

Spannungsabbau durch Rissbildung. Während die Ablösungen von den freien Rändern in die Probenmitte verlaufen, treten die Risse zuerst im Zentrum der Beschichtung auf. [94]
 Da der Effekt des Aufschüsselns bei den Laborprobekörpern i. W. auf die Geometrie zurückzuführen und mit der Abbildung der realen Bedingungen nur bedingt in Verbindung zu bringen ist, wurde der Einfluss der Probengeometrie für dieses Prüfverfahren näher untersucht. Es wurden quadratische (300 x 300 mm²), rechteckige (550 x 150 mm²) und runde Probekörper (D = 350 mm) verwendet. Die Abmessungen der rechteckigen und der runden Platten resultieren aus der Überlegung, dass der Abstand zwischen den verwendeten Haftzugprüfstempeln (D = 50 mm) bzw. derer zum Plattenrand von mindestens einem Stempeldurchmesser eingehalten werden sollte. Die Platten wurden hinsichtlich ihrer wesentlichen Eigenschaften charakterisiert (Tab. 7-1). Demnach bestanden alle Platten aus einem Beton der nach RILI - SIB und ZTV - ING erforderlichen Druckfestigkeitsklasse C 45/55 sowie einer Mindestoberflächenzugfestigkeit von 3,0 N/mm². Die vorgeschriebene maximale Rautiefe der vor dem Beschichten mittels Sandstrahlens aufgerauten Betonoberflächen von höchstens 1,0 mm wurde ebenfalls nicht überschritten.

Tab. 7-1: Kennwerte des Beschichtungsuntergrundes

	Druckfestigkeit $f_{C, cube}$	Oberflächenzugfestigkeit	Rautiefe
	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[mm]
rund	62	3,0	0,36
quadratisch	61	3,8	0,41
rechteckig	60	3,4	0,44

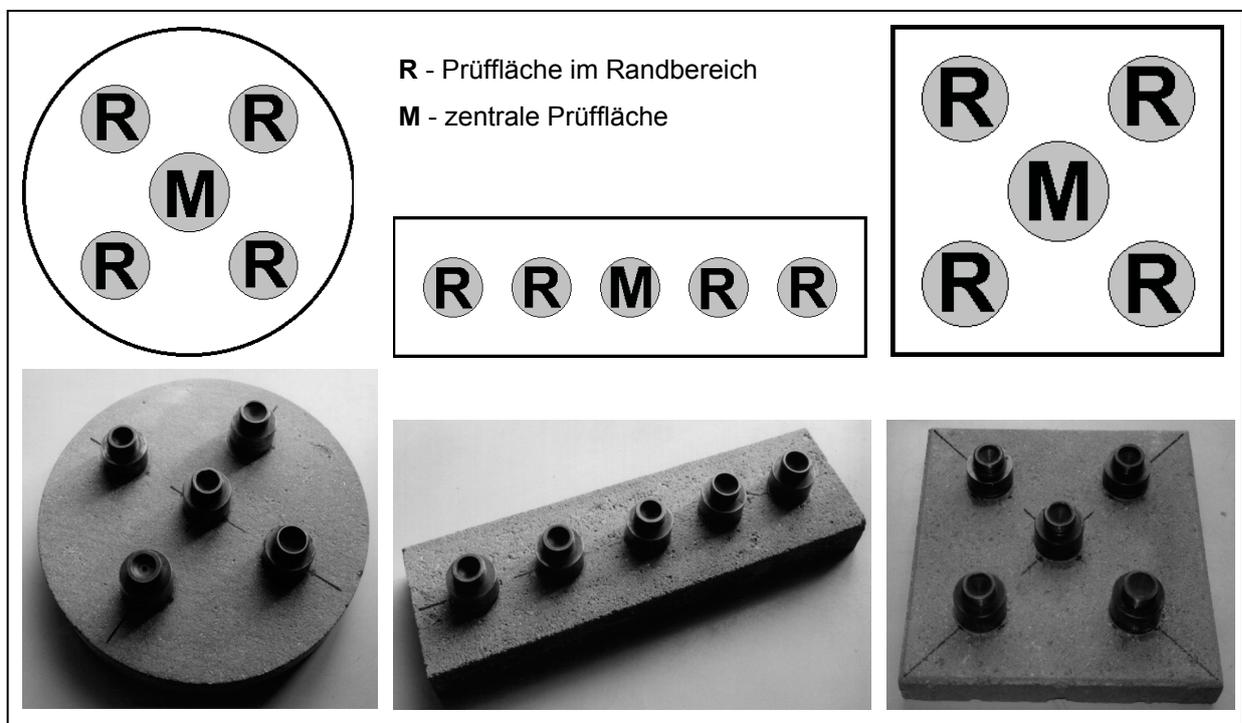


Abb. 7-4: Anordnung der Prüfflächen bei der Oberflächen- und Haftzugfestigkeitsprüfung

Zur Bestimmung der Oberflächenzug- sowie der Haftzugfestigkeiten wurde das in Abb. 7-4 dargestellte Prüfstellenraster verwendet. Es wurde eine Unterscheidung der Rand- bzw.

Eckmessstellen und der zentralen Prüfstelle vorgenommen. Dadurch sollte ein möglicher Randeinfluss ermittelt werden. Es stellte sich jedoch heraus, dass nach statistischer Betrachtung kein Unterschied zwischen den Haftzugwerten im Rand- und im Zentralbereich festzustellen war. Einen tendenziellen Hinweis auf Ablösungen im Randbereich kann jedoch aus der Tatsache geschlussfolgert werden, dass es beim Vorbohren der Ringnut an drei Haftzugprüfstellen zum Ablösen der Beschichtung an der Betonoberfläche kam. Da dies üblicherweise nur bei Haftzugfestigkeiten unter $0,1 \text{ N/mm}^2$ vorkommt, ist davon auszugehen, dass hier der Haftverbund durch das Aufschüsseln gestört war, da Verunreinigungen der Beschichtungsoberfläche und sonstige verbundstörende Einflüsse auszuschließen waren.

Für diesen Untersuchungspunkt wurden die beiden kunststoffmodifizierten CEM I - Mörtel mit hohem p/z-Wert (vgl. Abschnitt 2.2) verwendet. Je Rezeptur wurden 6 Platten der gleichen Geometrie beschichtet. Die mit ölfreier Druckluft von Strahlstaub befreiten, mindestens 56 Tage alten Betonplatten wurden mit nassen Tüchern eine halbe Stunde vorgeässt. Anschließend wurde der Mörtel auf die mattfeuchte Oberfläche in zwei Lagen aufgebracht. Die erste Lage wurde in die Oberfläche eingearbeitet, die zweite Lage frisch in frisch aufgebracht und durch stampfen verdichtet (vgl. Abschnitt 7.4). Auf einem Schalungsrahmen, durch den eine konstante Schichtdicke von 20 mm gewährleistet wurde, wurde die Oberfläche abgezogen. Anschließend wurden die Platten für 24 Stunden mit feuchten Tüchern und Folien abgedeckt. Zur Überprüfung des Nachbehandlungseffektes auf den Haftverbund wurden dann jeweils drei Platten einer Serie für weitere 6 Tage mit feuchten Tüchern, die täglich aufgefrischt wurden, und Folien abgedeckt. Anschließend wurden sie mit den restlichen Platten (diese bereits nach einem Tag) im Normklima 20/65 bis zum Beginn der Frost-Tau-Belastung nach RILI - SIB gelagert. Die Frost-Tau-Belastung wurde nach dem verkürzten Regime (vgl. Abschnitt 7.2) durchgeführt.

Nach Beendigung der 20 Frost-Tau-Wechsel wurden die Proben visuell begutachtet. Während des Abtrocknens zeigten sich zahlreiche Risse, deren Rissbreiten jedoch deutlich unter 0,1 mm lagen. Alle Platten wurden abgeklopft, um evtl. Hohllagen im Vorfeld detektieren zu können. Dies ist durch die Änderung des Klangbildes sehr gut möglich und eine bewährte Methode. Aussagen zur Haftfestigkeit sind damit jedoch nicht möglich. Es wurden nur geringe Klangänderungen zu den Rändern hin festgestellt, woraus auf einen noch intakten Haftverbund bei allen Platten geschlussfolgert werden konnte. Anschließend wurden die Ringnuten auf allen Platten nach dem vorgegebenen Prüfstellenraster (Abb. 7-4) vorgebohrt, die Prüfstempel aufgeklebt und die jeweiligen Haftzugfestigkeiten ermittelt.

Ausgewertet wurden die Haftzugfestigkeit und das Bruchbild der jeweiligen Prüffläche (Tab. 7-2). Dabei wurde abweichend von der RILI - SIB lediglich in Kohäsionsversagen (im Beton und im Beschichtungsmörtel) und in Adhäsionsversagen zwischen Beschichtung und Betonuntergrund unterschieden. Adhäsionsbrüche zwischen Kleber des Prüfstempels und der Beschichtungsoberfläche waren selten und wurden bei der Auswertung nicht berücksichtigt. Daraus ergibt sich die Differenz zwischen berechneter Prüffläche und abgeschätzter Gesamtprüffläche. Die nach RILI - SIB geschätzten und auf 10 % gerundeten Bruchflächenanteile wurden in cm^2 umgerechnet. Die Basis dafür bildete die Prüfstempelfläche von rund 20 cm^2 . Die Ergebnisse einer Serie wurden jeweils addiert und somit als gesamte Prüffläche einer Serie ausgewertet.

Tab. 7-2: Bewertung des Adhäsionsversagens, jeweils in Abhängigkeit vom Beschichtungsmaterial, der Grundkörpergeometrie und der Nachbehandlungsdauer

Betrachtung in Abhängig- keit von	Anzahl Einzel- prüfungen	berechnete Prüffläche	abgeschätzte Prüffläche			Differenz berechnete - abgeschätzte Gesamtprüf- fläche	Anteil Adhä- sionsversa- gen am Ge- samt- bruchbild	Haftzug- festigkeit
			Kohäsions- versagen Beton + Be- schichtung	Adhäsions- versagen Beton - Be- schichtung	Gesamt- fläche			
Beschichtungsmaterial								
PCC 1	90	1800	1534	204	1748	3,4	11,7	2,81
PCC 2	90	1800	1626	154	1780	1,1	8,7	3,09
Grundkörpergeometrie								
rund	60	1200	1174	20	1194	0,5	1,7	2,40
quadratisch	59	1180	1064	90	1154	2,2	7,8	3,45
rechteckig	60	1200	922	248	1170	2,5	21,2	3,01
Nachbehandlungsdauer								
1 d	89	1780	1578	162	1740	2,2	9,3	2,79
7 d	90	1800	1582	196	1778	1,2	11,0	3,11

Die Auswertung des Bruchbildes zeigt den höchsten Anteil Adhäsionsversagen bei den rechteckigen Platten und den geringsten bei den runden Platten. Daraus wird geschlussfolgert, dass sich die runde Plattengeometrie weniger auf das Aufschüsseln auswirkt, als die eckige. Wird jedoch die Haftzugfestigkeit in die Auswertung einbezogen, relativiert sich das Ergebnis wieder. Der Anteil der Kohäsionsbrüche im Beton war tendenziell bei den runden Platten etwas höher, als bei den eckigen. Allerdings war auch die Oberflächenzugfestigkeit bei den runden Platten am geringsten. Zurückzuführen ist dies möglicherweise auf die schlechtere Verdichtung bei der Laborherstellung dieser Platten. Letztlich bestätigt dieses Ergebnis jedoch die Vermutung, dass der Rand- und insbesondere der Eckenfluss der Grundkörper Auswirkung auf die Prüfung des Haftverbundes von Beschichtungsmörteln hat. Je kleiner der freie Rand ist (hier: rechteckig 140 cm; quadratisch 120 cm; rund 110 cm), desto geringer sind die zu erwartenden Randspannungen, die letztlich zur Störung des Haftverbundes führen.

Der Vergleich der Haftzugfestigkeiten der beiden PCC auf allen untersuchten Platten zeigt, dass es keinen signifikanten Unterschied gibt. Werden jedoch die Anteile des Adhäsionsversagens verglichen, bestätigt sich die Tendenz aus der visuellen Beurteilung der Beschichtungsflächen nach der Frost-Tau-Belastung (Abb. 7-5, Abb. 7-6). Dort weisen die mit PCC 1 beschichteten Platten ein grobes Rissbild mit großen Rissabständen auf. Die mit PCC 2 beschichteten Platten zeigen dagegen ein sehr feinmaschiges Netzrisswerk, welches auf einen guten Haftverbund hindeutet, da sich die Spannungen im Beschichtungsmaterial durch vermehrte Rissbildung abgebaut haben. Durch den um ca. ein Drittel höheren Anteil an Adhäsionsversagen beim PCC 1 kann dies untermauert werden.



Abb. 7-5: PCC 1 nach Frost-Tau-Belastung



Abb. 7-6: PCC 2 nach Frost-Tau-Belastung

Die Auswertung des Einflusses der Nachbehandlung auf den Haftverbund bestätigt die Untersuchungen von MAULTZSCH [9]. Es sind hinsichtlich der Haftzugfestigkeit als auch bei der Beurteilung des Anteils an Adhäsionsbrüchen keine Unterschiede bei der ein- und siebentägigen Nachbehandlungsdauer zu interpretieren. Dies bedeutet allerdings nicht, dass grundsätzlich auf eine Nachbehandlung verzichtet werden kann. Diese ist für das Erreichen einer guten bzw. hohen Dauerhaftigkeit auch bei den PCC essentiell [6][E3][E9].

7.4 Untersuchungen zum Einfluss des Aufbringens des Beschichtungsmörtels

Der Haftverbund von Beschichtungsmörteln auf einem Beton wird einerseits durch die spezifische Adhäsion des Beschichtungsmörtels bestimmt, die sich wesentlich in der Benetzungsfähigkeit des Untergrundes darstellt. Andererseits ist die mechanische Adhäsion ebenso bedeutsam. Die gute Verkrallung des Beschichtungsmörtels ist dabei von der Rauigkeit des Untergrundes abhängig. Bei vorgegebenen Rezepturen bzw. vorbereiteten Untergründen kann scheinbar an den adhäsionsfördernden Mechanismen nichts mehr geändert werden und es sollte sich stets derselbe Haftverbund einstellen. Dass dem aber nicht so ist, wurde in einigen eigenen Untersuchungen deutlich. Vermutet wurde, dass das Aufbringen des Mörtels auf den Untergrund eine wesentlich größere Rolle spielt, als dies bisher Beachtung fand.

Da die mit dem KS 1 modifizierten Mörtel die größten Unterschiede im Haftverbund bei verschiedenen Untersuchungen aufwiesen, wurden diese Untersuchungen exemplarisch mit dem PCC 1 (hoher p/z-Wert) durchgeführt. Die Viskosität dieses PCC ist sehr groß, die Benetzungseigenschaften sind also augenscheinlich nicht sehr gut im Vergleich beispielsweise mit dem PCC 2. Dies äußert sich z. B. im deutlich geringeren Ausbreitmaß und dem schnelleren Ansteifen.

Es wurden zwei mattfeuchte Betonplatten 2 cm dick mit PCC 1 beschichtet. Beide Betonplatten wurden eine halbe Stunde vorgeätzt. Auf die erste Platte wurde der Mörtel ohne besondere mechanische Verdichtung einlagig aufgebracht und mit Hilfe eines Schalungsrahmens abgezogen. Auf die zweite Platte wurde eine erste, ca. 0,5 cm dicke Lage des PCC mit der Kelle in den Untergrund eingearbeitet. Dadurch wurde eine bestmögliche Verzahnung mit dem Untergrund erreicht und Luftblasen aus der Beschichtungsebene herausgedrückt. Darauf wurde die zweite Lage „frisch in frisch“ aufgebracht und durch stampfen verdichtet. Am Schluss wurde die Beschichtung wiederum mit Hilfe eines Schalungsrahmens abgezogen. Beide Platten wurden anschließend für 24 Stunden mit feuchten Tüchern und Folie abgedeckt. Danach lagerten sie für weitere 27 Tage im Normalklima (20/65). Nach 28 Tagen wurden sie dem verkürzten Frost-Tau-Prüfregime unterzogen. Nach dem Ende des Prüfregimes wurden die Proben visuell begutachtet. Dabei zeigte die Platte 1 deutlich weniger Risse als die Platte 2. Die Rissbreiten waren allerdings sehr gering, so dass die Risse nur im feuchten Zustand zu erkennen waren. Aus den Platten wurden anschließend Streifen herausgesägt, von denen wiederum Dünnschliffe (6 x 10 cm²) angefertigt wurden. Diese wurden unter dem Mikroskop begutachtet.

Gut zu erkennen ist im Dünnschliff der Platte 1 (Abb. 7-7) der durchgehende Riss zwischen Beschichtungsmörtel und Beton. Dieser ist in den Mikroskopieaufnahmen (Abb. 7-8; Abb. 7-9) noch einmal deutlicher zu erkennen. Es war praktisch kein Haftverbund mehr vorhanden. Im Dünnschliff sind weiterhin große Hohllagen und Poren zu erkennen, bei denen davon auszugehen ist, dass es bei der Beschichtung zu keinerlei Benetzung der Betonoberfläche an diesen Stellen gekommen war. Demzufolge wurden an diesen Stellen keine Kräfte, welche aus Schwind-, Temperatur- und Feuchteverformungen resultieren, übertragen. Die Kraftübertragung konzentrierte sich somit auf eine deutlich geringere Fläche. Die Haftzugfestigkeit wurde dadurch schneller überschritten und es kam zur Delamination.

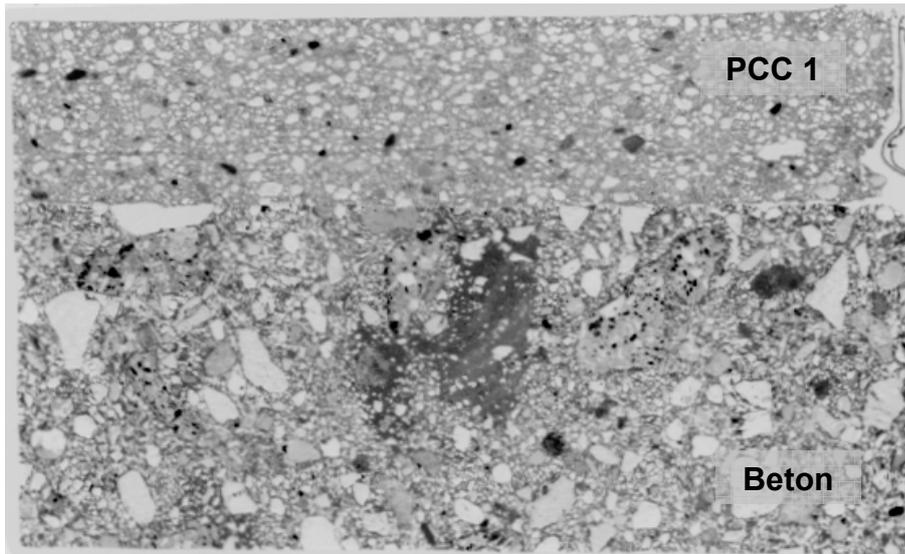


Abb. 7-7: Dünnschliffprobe Platte 1 (Beschichtung einlagig aufgebracht)

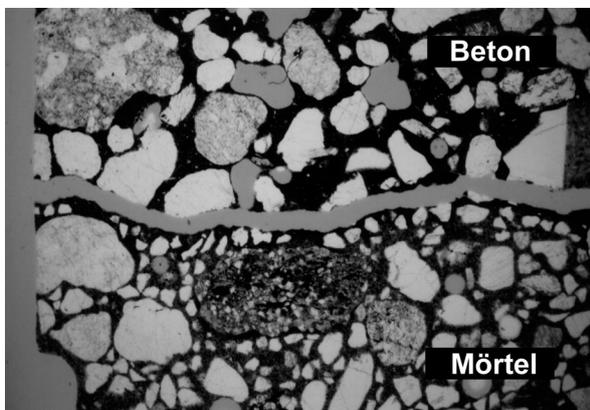


Abb. 7-8: Randbereich Platte 1 (x 2,5)

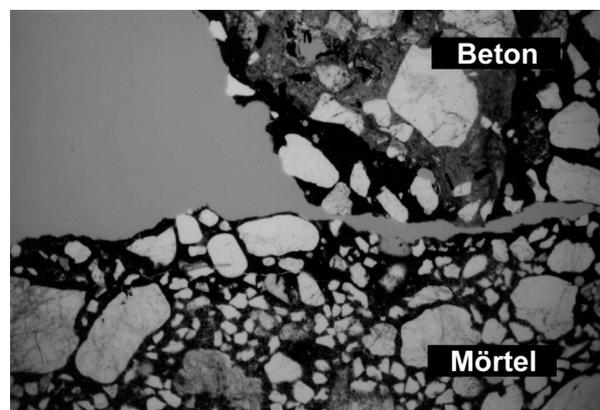


Abb. 7-9: mittlerer Bereich Platte 1 (x 10)

Im Dünnschliff der Platte 2 ist dagegen ein durchweg guter Haftverbund zu erkennen (Abb. 7-10). Der Beschichtungsmörtel liegt dicht auf dem Beton auf. Hohllagen und größere Poren in der Beschichtungsebene sind nicht zu identifizieren. Der PCC „verkrallt“ sich gut im Untergrund (Abb. 7-11; Abb. 7-12). Die Packungsdichte in der Grenzzebene ist hoch, die Porosität dagegen gering. Auch im Randbereich sind keine Risse zu erkennen.

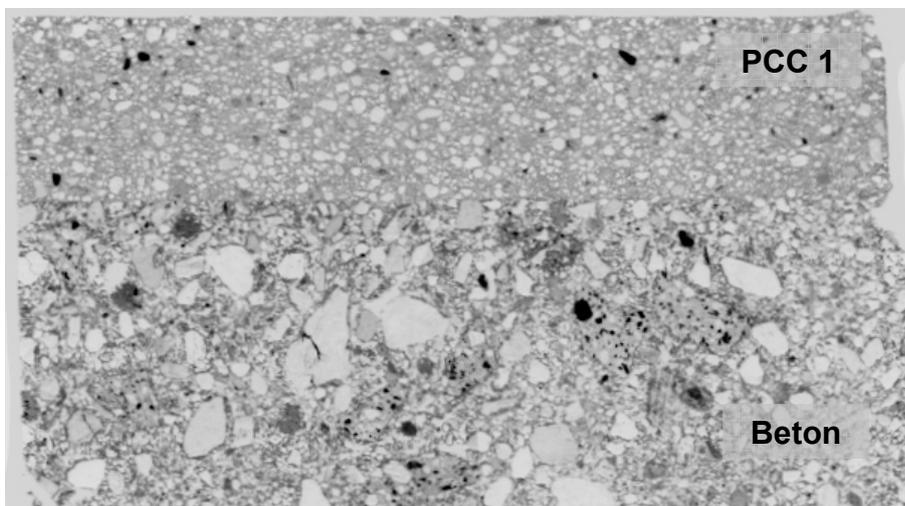


Abb. 7-10: Dünnschliffprobe Platte 2 (Beschichtung zweilagig aufgebracht)

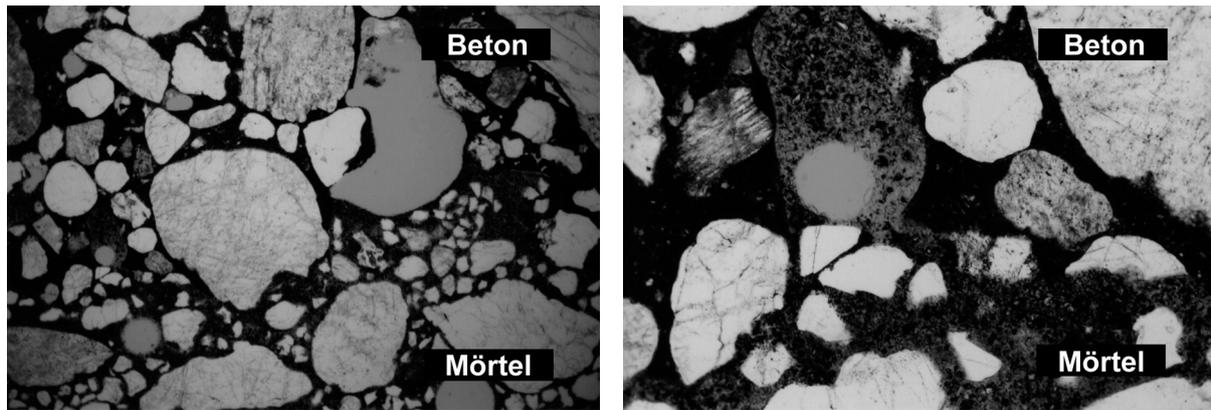


Abb. 7-11: mittlerer Bereich Platte 2 (x 2,5) **Abb. 7-12:** Detail aus Abb. 7-11 (x 10)

Zur Beurteilung des Verdichtungserfolges bei der Platte 2 wurden an den Dünnschliffen die Porenkennwerte mittels Bildanalyse ausgewertet. Danach betrug der Gesamtporengehalt L_S des Beschichtungsmörtels auf der Platte 1 5,0 %, der auf der Platte 2 dagegen nur 3,6 %. Durch das Einarbeiten bzw. das Verdichten durch das Stampfen wurde die Kompaktheit des PCC erhöht. Dies hat letztlich positive Auswirkungen auf die Zugfestigkeit als auch auf das Schwinden.

Es wird also festgestellt, dass die Art des Aufbringens des Beschichtungsmörtels einen wesentlichen Einfluss auf den Haftverbund hat. Alle Faktoren, die die Benetzung der zu beschichtenden Oberfläche erhöhen, fördern dadurch den Haftverbund. Dies gilt besonders für die unabhängig von der Rezeptur zu beeinflussenden Faktoren (z. B. das Aufbringen). Durch das Einarbeiten des Beschichtungsmörtels in die Betonoberfläche wird die wirksame Oberfläche deutlich vergrößert, wodurch die spezifische und insbesondere die mechanische Adhäsion vergrößert werden.

7.5 Untersuchungen zum Einfluss einer Salzbelastung

Kunststoffmodifizierte Beschichtungsmörtel werden meist in der Rekonstruktion oder der Instandsetzung bestehender, älterer Bausubstanz eingesetzt. Dadurch kommt es häufig vor, dass diese PCC dann auf z. B. salzbelastete Untergründe aufgebracht werden. Oft sollen auch die unter der Beschichtung liegenden Baustoffe vor einer erneuten Salzeinwirkung geschützt werden. Es existieren also zwei grundlegend verschiedene Belastungsszenarien, die u. a. auf den Haftverbund der PCC-Beschichtung Einfluss haben können.

In diesem Untersuchungspunkt wurden modellhafte Versuche durchgeführt, die den Einfluss dieser beiden Belastungsszenarien auf den Haftverbund simulieren.

7.5.1 Belasteter Untergrund

Es wurden Betonplatten (33 x 30 x 8 cm³) der Festigkeitsklasse C 45/55 sechs Wochen unter Vakuum in 10%-iger Natriumchloridlösung getränkt zur Simulation des salzbelasteten Untergrundes. Anschließend wurden die Platten 2 cm dick beschichtet. Es wurde eine Doppelbestimmung durchgeführt, wobei eine Platte jeweils zur Hälfte mit einem anderen Beschichtungsmörtel beschichtet wurde (Abb. 7-13). Es kamen die CEM I - PCC 1 und 2 mit hohem p/z-Wert sowie der CEM I - Vergleichsmörtel mit w/z = 0,40 (vgl. Abschnitt 2.2) zur Anwendung. Nach dem Beschichten lagerten die Platten weitere sechs Wochen zu zwei drittel eingetaucht in der 10%-ige Natriumchloridlösung. Dadurch wurde sichergestellt, dass der Diffu-

sionsstrom der Salzlösung vom Grundkörper zur Beschichtung hin verläuft. Die Lösung wurde wöchentlich gewechselt. Am Ende des Prüfungszeitraumes wurden Chlorideindringtiefen mittels Bohrmehlproben bestimmt sowie die Haftzugfestigkeit der Beschichtungen geprüft.



Abb. 7-13: Plattenkörper mit 2 Beschichtungen

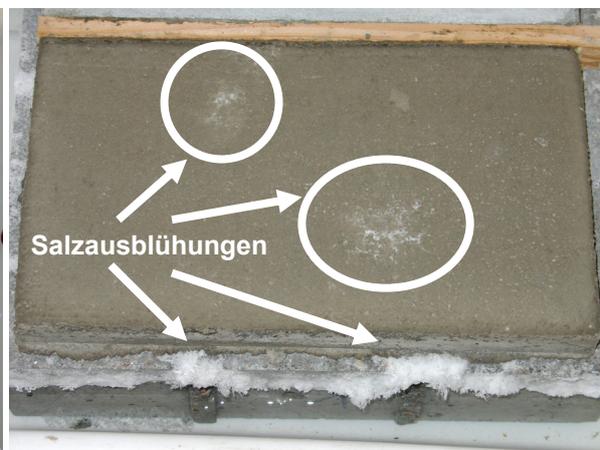


Abb. 7-14: Salzausblühungen in der Verdunstungsebene

Während der Lagerung bildeten sich in der Beschichtungsebene Salzkristalle infolge der Verdunstung des Wassers, obwohl die Lösung nur bis ca. 2 cm unter dieser Fläche anstand. Die Betonoberfläche des Beschichtungsgrundkörpers stellte also augenscheinlich eine Grenzfläche für die Salze dar. Auf den Beschichtungsoberflächen waren nur vereinzelt kleine Stellen mit Salzausblühungen zu finden (Abb. 7-14). Daraus kann geschlossen werden, dass der Transport der Salzlösung durch die Beschichtungsmörtel behindert wurde.

Dies belegen auch die Analysen der Bohrmehlproben. Von jeder Oberfläche wurden über die Beschichtung hinaus bis in eine Tiefe von 1 cm in den Untergrund hinein im Abstand von 0,5 cm Bohrmehlproben entnommen und das wasserlösliche Chlorid in diesen Proben bestimmt. Für den PCC 1 wurden die Analysen über den gesamten Probekörperquerschnitt von 10 cm ausgeweitet, um exemplarisch die Salzkonzentration im Grundkörper darstellen zu können.

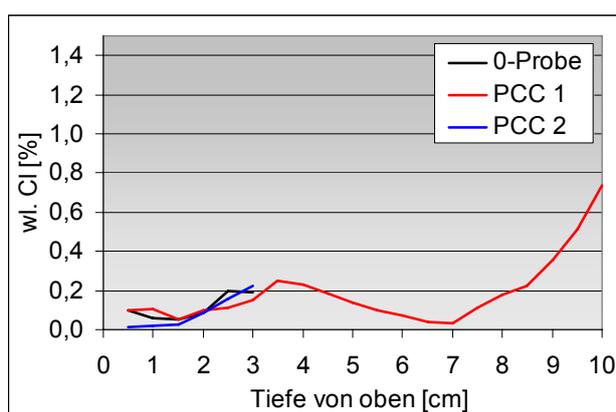


Abb. 7-15: Chloridkonzentration über die Probendicke

Die Auswertung zeigte allerdings, dass die Chloridkonzentration in den Beschichtungsmörteln nahezu identisch war (Abb. 7-15). An der Oberfläche wurde eine Konzentration von max. 0,1 % nachgewiesen. Bis in 3 cm Tiefe verdoppelte sich diese Konzentration auf ca. 0,2 %. Der Grundkörper des PCC 1 zeigte ein Maximum im Bereich zwischen 3 und 4 cm, bevor die Konzentration bis 7 cm fast auf 0 abnahm. Im weiteren Verlauf stieg die Konzentration wie-

der an und erreicht in 10 cm Tiefe über 0,7 %. Dies zeigt, dass es unterhalb des Verbundbereiches zu einer höheren Salzkonzentration kam. Die sehr hohe Salzkonzentration an der Plattenunterseite ist auf die Betonqualität der industriell gefertigten Grundkörper zurückzuführen, die in diesem Bereich eine durch die Herstellung bedingte aufgelockerte Struktur aufweisen. Dadurch konnte die Salzlösung besser eindringen.

Die Auswertung der Haftzugprüfungen (Tab. 7-3) zeigt die höchsten Haftzugfestigkeiten bei der Vergleichsmischung, während die Haftzugwerte der beiden PCC geringer sind und sich nicht voneinander unterscheiden. Dagegen weisen der Vergleichsmörtel und der PCC 1 einen größeren Anteil an Adhäsionsversagen auf, als der PCC 2. Auf Grund dieser Ergebnisse ist hinsichtlich des Vergleiches der drei Beschichtungsmörtel keine weitere Interpretation möglich.

Tab. 7-3: Auswertung der Haftzugprüfungen, salzbelasteter Untergrund

	Haftzugfestigkeit	Kohäsionsversagen	Adhäsionsversagen
	[N/mm ²]	[%]	[%]
0-Probe	2,22	80	20
PCC 1	1,69	75	25
PCC 2	1,64	90	10

7.5.2 Belastete Beschichtung

Es wurden Betonplatten (330 x 300 x 80 mm³) der Festigkeitsklasse C 45/55 jeweils mit den CEM I - PCC 1 und 2 mit hohem p/z-Wert sowie der CEM I - Vergleichsmörtel mit w/z = 0,40 (vgl. Abschnitt 2.2) 1 cm dick beschichtet. Nach einem Tag wurden die Platten seitlich mit Butylband abgeklebt, so dass ein Rand von ca. 2 cm überstand. Auf die Beschichtungsoberfläche wurde eine 10%-ige Natriumchloridlösung ca. 1 cm hoch eingefüllt, welche wöchentlich gewechselt wurde (Abb. 7-16). Nach sechswöchiger Lagerung wurden Chlorideindringtiefen mittels Bohrmehlproben bestimmt sowie die Haftzugfestigkeit der Beschichtungen geprüft.

Die Auswertung der Bohrmehlproben erfolgte bis in eine Tiefe von 2 cm im Abstand von 0,5 cm (Abb. 7-17). Sie zeigt, dass die Chloridkonzentration in der Oberfläche (bis 0,5 cm Tiefe) des Vergleichsmörtels deutlich höher ist, als bei den PCC. Während die PCC eine Konzentration von ca. 1,0 % erreichen, steigt die Konzentration bei der Vergleichsmischung auf fast 1,5 %. Dieser Unterschied zeigt sich auch noch in der Beschichtungsebene in einer Tiefe von 1 cm. Hier ist die Chloridkonzentration der PCC unter 0,3 %, während der Vergleichsmörtel noch mehr als 0,4 % aufweist. Anschließend folgt eine rasche Abnahme und in einer Tiefe von 2 cm (also im Grundkörper) ist die Chloridkonzentration bei allen Proben kleiner als 0,1 %. Der weitere Verlauf wurde bis in eine Tiefe von 6 cm exemplarisch am Vergleichsmörtel bestimmt. Es wurde kein weiterer Anstieg der Konzentration ermittelt. Das zeigt, dass auch bei einer sehr intensiven Salzbelastung der Beschichtungsoberfläche nur geringe Eindringtiefen erreicht werden. Aus diesen Ergebnissen ergibt sich eine Mindestdicke einer Beschichtung von mindestens 2 cm, wenn bei starker aufstehender Salzbelastung eine steigende Salzkonzentration über die Beschichtungsebene hinaus ausgeschlossen werden soll. Allerdings ist dabei zu bedenken, dass es sich hier um eine kontinuierliche Belastung mit

einer erhöhten Salzkonzentration handelte. In weiteren Untersuchungen muss der Einfluss von mehreren Feuchte- und Trocknungszyklen untersucht werden, da dabei evtl. mit einem Pumpeneffekt und damit dem verstärkten Eindringen der Salzlösung zu rechnen ist.



Abb. 7-16: Platte mit aufstehender Natriumchloridlösung

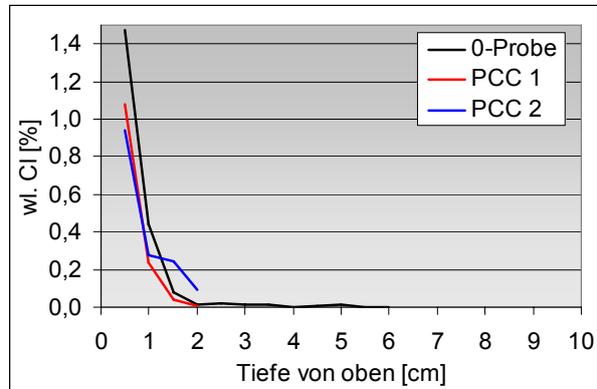


Abb. 7-17: Chloridkonzentration an der Beschichtungsoberfläche

Die Auswertung der Haftzugfestigkeiten (Tab. 7-4) korreliert mit den Bohrmehlanalysen. Es ist kein Unterschied der Haftzugwerte der verschiedenen Mörtel festzustellen. Bei allen Prüfungen kam es zu einem reinen Kohäsionsversagen im Beton. Daraus ist zu schließen, dass die über die Beschichtungsebene eingedrungenen Salze noch nicht zu Verbundbeeinflussungen geführt haben. Möglicherweise ist die Salzbelastung in der Verbundebene noch nicht hoch genug, um Verbundstörungen hervorzurufen. Anderenfalls wären vermehrt Adhäsionsbrüche bei der Bestimmung der Haftzugfestigkeit zu erwarten gewesen. Ein salzbelasteter Untergrund ist demnach weitaus kritischer zu betrachten, als eine Salzeinwirkung auf der Beschichtungsoberfläche.

Tab. 7-4: Auswertung der Haftzugprüfung, salzbelastete Beschichtung

	Haftzugfestigkeit	Kohäsionsversagen	Adhäsionsversagen
	[N/mm ²]	im Beton [%]	[%]
0-Probe	2,55	100	0
PCC 1	2,31	100	0
PCC 2	2,33	100	0

8 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieser Arbeit war es, materialspezifische Erkenntnisse zu den adhäsiven und kohäsiven Eigenschaften von PCC zu gewinnen. Dadurch wird eine für den jeweiligen Anwendungszweck angepasste Auswahl der Ausgangsstoffe möglich und der Umgang mit diesen Materialien sicherer.

Die zahlreichen Untersuchungen wurden mit zwei Kunststoffen gleicher chemischer Basis (Syren und Acrylsäureester), aber unterschiedlicher Lieferform sowie verschiedener Mindestfilmbildungstemperaturen (redispersierbares Pulver (PCC 1) - MFT = 5 °C, Dispersion (PCC 2) - MFT = 30°C) durchgeführt.

Es wurde das Längenänderungsverhalten bei unterschiedlichen Erhärtungsbedingungen untersucht, da diese Eigenschaft wesentlichen Einfluss auf den Haftverbund von PCC zu anderen Materialien hat.

Weiterhin wurden die Änderungen der Festigkeitseigenschaften (Zug-, Druck- und Biegezugfestigkeit) im Vergleich zu unmodifizierten Rezepturen untersucht, wobei nicht nur die Bruchlasten verglichen, sondern auch Belastungsversuche durchgeführt wurden. Die dabei auftretenden Beeinflussungen der Mikrostruktur der PCC wurden erfasst und hinsichtlich der Auswirkungen einer Kunststoffmodifikation auf die kohäsiven Eigenschaften interpretiert.

Um die adhäsiven und kohäsiven Eigenschaften der PCC auch mittels Dauerhaftigkeitsuntersuchungen beurteilen zu können, wurden Frost-Taumittel-Tests (CDF / CIF) durchgeführt. Durch die dabei erfolgte eingehende Untersuchung des Abfalls des relativen dynamischen E-Moduls wurden Rückschlüsse auf die kohäsiven Eigenschaften der PCC gezogen.

Schließlich wurden zur Einordnung von Ergebnissen der Ermittlung des Haftverbundes in Laborversuchen Betrachtungen zur Prüfung der Verbundfestigkeit der PCC zu einem Beton angestellt. Die Art des Aufbringens des Beschichtungsmörtels, die Probengeometrie sowie eine Salzbelastung des Beschichtungsuntergrundes bzw. der Beschichtung waren wesentliche Aspekte dieses Untersuchungsschwerpunktes.

Die Erkenntnisse aus den Untersuchungen werden folgendermaßen zusammengefasst:

1. PCC haben ein deutlicher ausgeprägtes, von den Lagerungsbedingungen abhängiges Längenänderungsverhalten als unmodifizierte Vergleichsmischungen. Die Beträge der Längenänderungen sind bei steigendem Kunststoffgehalt höher.
2. Die verstärkten Längenänderungen resultieren nicht aus einem erhöhten Trocknungsschwinden. Vielmehr kommt es in Folge der verzögernden Beeinflussung der Hydratation des Zementes durch die Kunststoffe und des erhöhten Wasserrückhaltevermögens dieser Mörtel zu einer zeitlichen Verschiebung der Hydratation. Schwindspannungen werden dann nicht mehr zu einem Großteil im noch plastischen, sondern im schon erhärteten Mörtel abgebaut und können so die Kohäsion im PCC negativ beeinflussen.
3. Die Beeinflussung des Schwindens durch die Kunststoffe zeigt sich erst einige Tage nach dem Anmischen. Sowohl am Mörtel als auch am Zementstein konnte dies in modifizierten Schwindrinnen nachgewiesen werden.
4. In den ersten Tagen können erhöhte Spannungen im Mörtel infolge des Schwindens durch die erhöhte Zugfestigkeit der PCC aufgenommen werden. Im Verlauf der Hydratation kann es bei nicht so deutlicher Steigerung der Zugfestigkeit eines Mörtels durch die

Kunststoffmodifizierung und bei behinderter Verformungsmöglichkeit zum Überschreiten der Zugfestigkeit der Mörtelmatrix und somit zum kohäsiven Versagen kommen. Risse sind die Folge.

5. Die in der RILI-SIB Teil 4 (Ausgabe Oktober 2001) festgelegte Prüfdauer für das Schwinden von 28 Tagen wird kritisch beurteilt. Die in der vorhergehenden RILI-SIB Teil 4 (Ausgabe November 1992) und in der ZTV-ING (Ausgabe Januar 2003) festgelegte Prüfdauer von 90 Tagen ist angesichts des verzögerten Hydratationsverlaufs und des dadurch bedingten zeitlich verzögerten und verstärkten Schwindens anzuraten.
6. Der Einsatz von bis zu 15 % Kunststoff bezogen auf den Zementgehalt führt nicht zu einer signifikanten Änderung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten eines PCC.
7. Eine Modifikation von Mörteln mit den hier verwendeten Kunststoffen führt zu einer Erhöhung der Biegezugfestigkeit. Die Druckfestigkeit wird dagegen verringert, wenn der w/z-Wert konstant gehalten wird. Durch Ausnutzung der Möglichkeiten zur Verringerung des w/z-Wertes infolge der verflüssigenden Wirkung der Kunststoffe kann dieser Effekt jedoch reduziert werden.
8. Im Kurzzeitdruckversuch zeigen die PCC ein prägnanteres Lastverformungsverhalten als der Vergleichsbeton. Neben den größeren Verformungen während der Laststeigerungsphase sind besonders die Kriechverformungen in der Lasthaltephase stark erhöht. Insgesamt kommt es jedoch bedingt durch den geringeren E-Modul und die erhöhte Zugfestigkeit trotz der fast doppelt so großen Verformungen nicht zum kohäsiven Versagen der PCC.
9. Im Zugversuch ist die Gesamtdehnung der bewehrten PCC-Proben geringer als die des Vergleichsbetons. Infolge der höheren Zugfestigkeit und des geringeren E-Moduls können die PCC einen höheren Lasteintrag ertragen, bevor Risse entstehen.
10. Im Druckdauerstandsversuch zeigte der PCC 1 sehr starke Kriechverformungen. Das Endkriechmaß konnte auch nach mehr als 30 Tagen nicht erreicht werden. Aus diesen ersten Versuchen ist zu schlussfolgern, dass die Dauerstandsfestigkeit des PCC ohne betontechnologische Anpassungen niedriger ist, als bei dem Vergleichsbeton.
11. Eine mechanisch nicht belastete PCC-Matrix weist bei ausreichend hohem Kunststoffgehalt ($p/z > 0,05$) gut verteilte Polymerdomänen auf. Es sind Auskleidungen von Poren zu erkennen, unabhängig davon, ob die Mindestfilmbildungstemperatur des jeweiligen Kunststoffes erreicht wurde oder nicht.
12. Aus der PCC-Matrix gerissene Gesteinskörner zeigen oberflächlich deutliche und großflächige Anhaftungen von kunststoffdurchsetzter Zementsteinmatrix, was auf einen starken adhäsiven Verbund hindeutet. Dies führt dazu, dass die Kohäsion des PCC als solche erhöht ist. Dass dies einzig durch die eingesetzten Kunststoffe bedingt wird, ergibt sich aus der Tatsache, dass herausgerissene Körner der Vergleichsmischung glatte, von Zementsteinanhaftungen freie Oberflächen aufweisen.
13. Filmbildende Kunststoffe zeigen nach einer mechanischen Belastung der PCC-Matrix bis zum Bruch in den Rissen verstreckte Kunststofffilme. Anhand des Winkels dieser Verstreckungen zum Rissverlauf lässt sich die Belastungsrichtung gut abschätzen, da die Filme nur auf Zug belastbar sind.

14. Nicht filmbildende Kunststoffe zeigen keine Verstreckungen, da die Kunststoffdomänen nicht zugfest sind, sondern lediglich aus aneinander gelagerten Kunststoffpartikeln mit geringen Bindungskräften untereinander bestehen. Die trotzdem nachgewiesene deutliche Steigerung der Zug- und Biegezugfestigkeit dieser PCC ist auf die Erhöhung des adhäsiven Verbundes zwischen Gesteinskörnern und Zementsteinmatrix zurückzuführen.
15. Die Erhöhung des adhäsiven Verbundes zwischen Gesteinskörnern und Zementsteinmatrix ist vorrangig der Steigerung der spezifischen Adhäsion zuzuschreiben. Nach dem Anmischen nicht adsorbierte Kunststoffpartikel füllen aufgrund ihrer geringen Teilchengröße Zwischenräume zwischen hydratisierenden Zementpartikeln und Gesteinskörnern aus. Die mechanische Adhäsion zur Gesteinskörner wird verbessert. Durch die Verzögerung der Hydratation wird die Bildung vorzugsorientierter und demnach festigkeitsmindernder Portlanditkristalle vermindert. Die Packungsdichte in der gesteinskornnahen Grenzschicht wird dichter.
16. Die weit verbreitete Annahme, dass die Filmbildung eines Kunststoffes Voraussetzung für dessen Wirksamkeit hinsichtlich einer Steigerung der Zug- und Biegezugfestigkeit von PCC ist, kann nicht aufrechterhalten werden. Vielmehr ist die Steigerung der Zug- und Biegezugfestigkeit bei den PCC auf die Erhöhung des adhäsiven Verbundes zwischen Gesteinskörnung und Zementsteinmatrix zu sehen, was durch eine eventuelle Filmbildung ergänzt wird.
17. Bei sehr gutem Haftverbund des (modifizierten) Zementsteines zu einem Beschichtungsuntergrund (auch Gesteinskorn in der Matrix) kann es bei sehr großen Schwindverformungen zum Kohäsionsversagen des Beschichtungsgrundes kommen. Die über die Verbundebene übertragbaren Spannungen sind dann größer als die Zugfestigkeit des Beschichtungsuntergrundes.
18. Durch die Senkung des E-Moduls infolge einer Kunststoffmodifikation können die entstehenden Schwindspannungen trotz eines höheren Schwindmaßes geringer sein als bei einer unmodifizierten Vergleichsmischung. Dies wirkt sich insbesondere in der Anfangsphase der Erhärtung positiv auf die Rissbildung in Folge Kohäsionsversagen des PCC bzw. das Verbundversagen zwischen PCC und Untergrund aus.
19. Sind die entstehenden Schwindspannungen der PCC trotz des geringeren E-Moduls höher als bei der unmodifizierten Vergleichsprobe, kann ein Kohäsionsversagen dennoch durch die i. Allg. vorhandene höhere Zugfestigkeit bis zu einem gewissen Grad unterbunden werden.
20. Eine Kunststoffmodifikation von Mörteln führt nicht zwangsläufig zu einer Erhöhung des Frost-Tausalz-Widerstandes. Insbesondere bei einer erhöhten Anzahl von Frost-Tau-Wechseln kann es zum schichtenweisen kohäsiven Versagen der PCC kommen. Die Verwendung eines filmbildenden Kunststoffes ist für diese Dauerhaftigkeitsanforderung zu empfehlen.
21. Die Ergebnisse der höher auflösenden Bestimmung des relativen dynamischen E-Moduls mittels Rastermessungen rechtfertigen den Mehraufwand nur in Ausnahmefällen. Für orientierende Aussagen ist das übliche CIF-Verfahren auch bei PCC ausreichend.

22. Die Verwendung organischer Taumittel ist ohne weitere Einschränkungen möglich. Es konnten keine beeinträchtigenden Auswirkungen der verwendeten Taumittel in relevanter Konzentration auf die Kunststoffe festgestellt werden.
23. Die kapillare Sättigungsfähigkeit mit Wasser ist bei PCC deutlich geringer als bei nicht modifizierten Mörteln. Es ist davon auszugehen, dass lediglich lokal eine kritische Sättigung in Bezug auf die Frostbeständigkeit erreicht werden kann.
24. Das Prüfrezime zur Frost-Tau-Beständigkeit von PCC-Beschichtungen nach RILI-SIB (2001) könnte je Prüfzyklus um 5 Stunden verkürzt werden, ohne nennenswerte Auswirkungen auf das Prüfergebnis. Damit wird die Gesamtversuchszeit von 20 Tagen um 4 Tage verkürzt.
25. Die Plattengeometrie hat bei Laborversuchen zum Haftverbund von Beschichtungsmörteln keinen nachweisbaren Einfluss.
26. Die Nachbehandlung hat keinen Einfluss auf den Haftverbund der PCC. Damit konnten Ergebnisse aus der Literatur bestätigt werden.
27. Das Einarbeiten eines Beschichtungsmörtels verbessert deutlich den Haftverbund. Dies resultiert aus der besseren Benetzung der Grundkörperoberfläche, was verbunden mit der ohnehin besseren Benetzungsfähigkeit der PCC zu einer Steigerung der spezifischen als auch der mechanischen Adhäsion führt.
28. Ein salzbelasteter Untergrund kann zu einer Verringerung des Haftverbundes insbesondere von PCC-Beschichtungen führen. Durch die erhöhte Dichtigkeit der PCC kommt es zu einer verstärkten Anreicherung von Salzen direkt unter der Beschichtungsebene, was vermutlich verbunden mit einem Kristallisationsdruck zu einer Schwächung in dieser Schicht führt.
29. Die Salzbelastung eines PCC (aufstehende Salzlösung) hat dagegen keinen Einfluss auf den Haftverbund, da in Folge der abdichtenden Wirkung der Kunststoffe die Salzlösung nicht bis in die Beschichtungsgrenzfläche vordringen kann.

Mittels der Ergebnisse dieser Arbeit konnten einige Wissens- und Interpretationslücken zu den adhäsiven und kohäsiven Eigenschaften der PCC gefüllt werden. Durch einige Untersuchungsschwerpunkte wurden jedoch auch neue Fragen aufgeworfen. Den interessantesten Ansatz für weitere Forschungen zu den PCC bietet zweifellos die Untersuchung der Dauerstandsfestigkeit. Die hier durchgeführten Modellversuche zu dieser Thematik belegen ein abweichendes Verhalten hinsichtlich der elastischen und visko-elastischen Verformungsanteile im Vergleich zu Normalbeton. Zur Verwendung der PCC als reiner Konstruktionswerkstoff ist es jedoch unabdingbar, die Verformungskennwerte zu charakterisieren und die Verwendung bestehender Berechnungsalgorithmen zur Bewertung der statischen Eignung für bestimmte Bauteile zu prüfen. Gelingt es, diese Berechnungsalgorithmen anzupassen und für die Verwendung definierter Kunststoffe zu verallgemeinern, stellen diese PCC nicht zuletzt durch ihre hervorragenden Dauerhaftigkeitseigenschaften einen optimalen Konstruktionsbaustoff für viele Bauvorhaben dar.

Literatur

- [1] Schorn, H.: Betone mit Kunststoffen und andere Instandsetzungsbaustoffe. Ernst & Sohn-Verlag, Berlin, 1991
- [2] Scholz, W.; Hiese, H.: Baustoffkenntnis. Werner-Verlag GmbH & Co. KG, Düsseldorf, 1999
- [3] van Gemert, D.; Czarnecki, L.; Maultzsch, M.; Schorn, H.; Beeldens, A.; Lukowski, P.; Knapen, E.: Cement Concrete and Concrete-Polymer Composites: Two Merging Worlds. A Report from 11th ICPIIC Congress in Berlin, 2004. Cement and Concrete Composites ; V. 27, No. 9-10; Oktober/November 2005; S. 926-933
- [4] Letsch, R.: Spannungen zwischen PCC-Beschichtungen und Beton. Industriefußböden `95; 10. - 12. Januar; Esslingen; 1995; S. 391 - 397
- [5] Kawakami, M.; Sakakibara, H.; Suzuki, S.; Tokushige, H.: Shrinkage of premixed polymer cement mortars at early age. IX. ICPIIC; 2. - 4. Juni; Berlin; 2004; S. 29 - 36
- [6] Dimmig, A.: Einflüsse von Polymeren auf die Mikrostruktur und die Dauerhaftigkeit kunststoffmodifizierter Mörtel (PCC). Dissertation; Bauhaus-Universität Weimar; 2002
- [7] Beeldens, A.; van Gemert, D.: Strength and Durability of Porous Polymer Cement Concrete. Proceedings of the 9th International Congress on Polymers in Concrete; Casma, Bologna; Sept. 1998; S. 189-197
- [8] Yamamoto, T.; Osaki, K.; Wakasugi, M.; Sugiura, A.; Sakakibara, H.: Adhesive Strength of Modified Cement Mortar with Redispersible Polymer Powders. IX. ICPIIC; 14. – 18. September; Bologna (Italien); 1998; S. 255-261
- [9] Maultzsch, M.: Einfluss der Nachbehandlung auf die Eigenschaften polymermodifizierter Betone und Estriche. Industrieböden `99; 12. – 14. Januar; Esslingen; 1999; S. 351-356
- [10] Ettl, W.-P.: Kunstharze und Kunststoffdispersionen für Mörtel und Betone. Beton-Verlag, Düsseldorf, 1998
- [11] Konietzko, A.: Polymerspezifische Auswirkungen auf das Tragverhalten modifizierter zementgebundener Betone (PCC). Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1988
- [12] Beeldens, A.; Van Gemert, D.; Schorn, H.; Ohama, Y.: Integrated model for microstructure building in polymer cement concrete. IX. ICPIIC 2. - 4. Juni, Berlin, 2004, S. 1 - 10
- [13] Maultzsch, M.: Einfluss der Nachbehandlung auf die Eigenschaften polymermodifizierter Betone und Estriche. In: Industrieböden `99, 12. - 14. Januar, Esslingen 1999, S. 351 – 356
- [14] Metha, P. K.; Monteiro, P. J. M.: Concrete - Microstructure, Properties, and Materials - Second Edition. The McGraw-Hill Companies, Inc.; Collage Custom Series; New York, St. Louis, San Francisco a. o.; 1993
- [15] Wendehorst, R.: Baustoffkunde. Curt R. Vincentz; Hannover; 1994
- [16] Kawakami, M.; Sakakibara, H.; Suzuki, S.; Tokushige, H.: Shrinkage of premixed polymer cement mortars at early age. IX. ICPIIC, 2. - 4. Juni, Berlin, 2004, S. 29 – 36

- [17] Mangat, P. S.; Limbachiya, M. C.: Repair material properties for effective structural application. *Cement and Concrete Research* 27, Pergamon Press, Oxford, 1997, S. 601 – 617
- [18] Sasse, H. R.; Brameshuber, W.; Rößler, G.: Einfluss unterschiedlicher Prüfklimata auf das Schwinden und die Festigkeit von PCC. Forschungsbericht F 561 / F 562, Fraunhofer-IRB-Verlag, Stuttgart, 2000
- [19] Dogan, U. A.; Sengul, O.: Mechanical properties and durability of polymer modified concretes. IX. ICPIC, 2. - 4. Juni, Berlin, 2004, S. 22 – 29
- [20] Freund, V.; Eyßler, I.: Polymermodifizierte Industrieestriche. *Industrieböden`99*, 12. – 16. Januar, Esslingen, 1999, S. 275-28
- [21] Maultzsch, M.: Eignungsprüfungen an polymermodifizierten Betonen. *Industrieböden`95*, 10. – 12. Januar, Esslingen, 1995, S. 275-281
- [22] Jensen, O. M.; Lura, P.; Kovler, P.: Volume Changes of Hardening Concrete: Testing and Mitigation. *Proceedings of the International RILEM Conference*, 20. - 23. August, Lyngby, Denmark, 2006
- [23] Ulm, F.-J.; Bažant, Z. P.; Wittmann, F. H.: Creep, Shrinkage and Durability Mechanics of Concrete and other quasi-brittle Materials. *Proceedings of the Sixth International Conference Concreep-6@MIT*, 20. - 22. August, Cambridge (MA), USA, 2001
- [24] Barron, T. H. K.; White, G. K.: Heat Capacity and thermal Expansion at low Temperatures. Kluwer Academic / Plenum Publishers, New York, USA, 1999
- [25] Justnes, H.; Reynaers, R.; Van Zundert, W.: The influence of Latices and Redispersible Powders on Hydratation and Strength Development of Polymer Cement Mortars. IX. ICPIC, 14. – 18. September, Bologna (Italien), 1998, S. 225-238
- [26] Dimmig, A.: Direkte und indirekte Einflussnahme von Kunststoffmodifizierungen auf die Eigenschaften, insbesondere die Dauerhaftigkeit von Mörtel. 15. Internationale Baustofftagung - ibausil, 24. - 27. September, Weimar, 2003, S. 2-0331 - 2-0346
- [27] Dimmig-Osburg, A.: Aspekte der Modellierung - Neues Modell der Ausbildung der Mikrostruktur kunststoffmodifizierter Mörtel. *Betonwerk + Fertigteil-Technik* 71 (2005) Heft 10, S. 26 - 36
- [28] Dax, W.; Grundelfinger, K.; Häffner, W.; Itschner, H.; Kotsch, G.; Staniczek, M: Tabellenbuch für Metalltechnik. 5. Auflage; Verlag Handwerk und Technik; Hamburg;1991
- [29] Setzer, M. J.: CIF-Test - Capillary suction, Internal damage and Freeze thaw Test - Reference method and alternative methods A and B. *RILEM TC 176-IDC Internal Damage of Concrete due to Frost Action, Materials and Structures*, Vol. 34, November 2001, S. 515-525
- [30] Tang, L.; Petersson, P.-E.: Slab Test - Freeze/Thaw Resistance of Concrete - Internal deterioration. *RILEM TC 176-IDC Internal Damage of Concrete due to Frost Action, Materials and Structures*, Vol. 34, November 2001, S. 526-531
- [31] Setzer, M. J.; Fagerlund, G.; Janssen, D. J.: CDF-Test - Test method for the freeze-thaw resistance of concrete - tests with sodium chloride solution (CDF). *RILEM TC 117-FDC Freeze-thaw and deicing resistance of concrete, Materials and Structures*, Vol. 29, November 1996, S. 523-528

- [32] Auberg, R.: Zuverlässige Prüfung des Frost- und Frost-Tausalz-Widerstandes von Beton mit dem CDF- und CIF-Test. Dissertation, Universität Gesamthochschule Essen, 1998
- [33] Setzer, M. J.: Die Mikroelinsenspumpe - Eine neue Sicht bei Frostangriff und Frostprüfung. 14. Internationale Baustofftagung - ibausil, 20. - 23. September, Weimar, 2000, S. 1-0691 - 1-0705
- [34] Zajac, A.; Korla, J.: Freeze-Thaw-Resistance with and without deicing salts of polymer cement concrete. VIII. ICPIC; 3. - 5. Juli; Oostende (Belgien); 1995; S. 245-250
- [35] Schießl, P.; Alfes, C.; Sybert, F.; Vannahme, S.: Verwendung von Kunststoffdispersionen als Zusatzstoff für Beton nach DIN 1045 bei Einwirkung umweltgefährdender Flüssigkeiten. Bauingenieur 68; 1993, S. 1926
- [36] Nägele, E.: Reaktiv verfüllte Dispersionen - Eigenschaften und Anwendungen im Bautenschutz. Bautenschutz - Bausanierung 9, 1986, S. 73-79
- [37] Ohama, Y.: Study on Properties and Mix Proportioning of Polymer Modified Mortars. Report No. 65; Building Research Institut; Tokyo (Japan), 1985
- [38] Chandra, S.; Ohama, Y.: Polymers in Concrete. CRC Press, Inc., 1994
- [39] Herrmann, K.: Gefügeuntersuchungen an Frost-Tausalz beanspruchten polymermodifizierten Betonen (PCC). Beiträge zum 40. Forschungskolloquium des DAfStB; 11./12. Oktober; Braunschweig; 2001
- [40] Alfridi, M. U. K.; Ohama, Y.; Dumura, K.; Iqbal, M. Z.: Freeze-Thaw Durability of powdered and aqueous polymer modified mortars and effects of freezing-thawing cycles on their pore structures. IV. ICPIC; 24. - 27. September; Shanghai (China); 1990; S. 253-260
- [41] Nägele, E.: Dispersionsbaustoffe. R. Müller-Verlag; Köln; 1989
- [42] Balaguru, P.; Ukadike, M.; Nawy, E.: Freeze-Thaw Resistance of Polymer Concrete. Concrete Durability ACI SP-100; 1987
- [43] Stark, J.; Dimmig, A.: Ein Beitrag zur Untersuchung der Dauerhaftigkeit kunststoffmodifizierter Mörtel (PCC). Thesis, Beiträge zur Baustoffforschung 1998; F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde Weimar; Universitätsverlag; 1998; S. 148-158
- [44] Herrmann, K.: Untersuchungen zur Gefügestabilität und zur Struktur frost-tausalzbeanspruchter polymermodifizierter zementgebundener Betone (PCC). Dissertation; Fachbereich für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig; 1998
- [45] Petri, C.: Frostbeständigkeit von kunststoffmodifizierten Mörteln in Abhängigkeit von der Zusammensetzung der Kunststoffkomponente. Diplomarbeit; F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde; Bauhaus-Universität Weimar; 2001
- [46] Sachße, S.: Frostbeständigkeit von kunststoffmodifizierten Mörteln. Diplomarbeit; F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde; Bauhaus-Universität Weimar; 2000
- [47] Su, Z.: Microstructure of Polymer Cement Concrete. Delft University Press; III. Thesis Delft University of Technology; 1995
- [48] Ohama, Y.; Demura, K.; Kim, W. K. : Freeze-thaw durability of polymer modified mortars using redispersible powders. VIII. ICPIC; 3. - 5. Juli; Oostende (Belgien); 1995; S. 251-256

- [49] Beeldens, A; van Gemert, D; Poupeleer, A.-S.; Cornelis, B.: Behaviour of porous PCC under freeze-thaw cycling. X. ICPIIC; Tagungsband (CD); 21. - 25. Mai; Honolulu (Hawaii); 2001
- [50] Beeldens, A; van Gemert, D; Poupeleer, A.-S.; Cornelis, B.: Behaviour of porous PCC under freeze-thaw cycling. Proceedings of the Tenth International Congress on Polymers in Concrete (CD-ROM); Department of Civil Engineering; The University of Texas; Austin (USA), 2003
- [51] Grosskurth, K. P.; Herrmann, K.: Untersuchungen zur Struktur Frost-Tausalz beanspruchter polymermodifizierter zementgebundener Betone (PCC). Schriftenreihe des iMBM der TU Braunschweig; H. 144; 1999; S. 181-184
- [52] Fagerlund, G.: The critical degree of saturation method of assessing the freeze-thaw resistance of concrete. Materials and Structures; Vol. 19; No. 58; 1977
- [53] Lampe, K.; Saarnak, A.: Die Wasseraufnahme von Filmen aus Polymerdispersionen. Bautenschutz und Bausanierung 13; 1990; S. 102-106
- [54] Knoblauch, H.; Schneider, U.: Bauchemie. 5. Auflage; Werner-Verlag GmbH & Co. KG; Düsseldorf; 2001
- [55] Vogel, A.: Kunststoffmodifizierter Beton - eine Lösung zur Erhaltung der Umweltschutzanforderungen bei Auffangbauwerken. Umwelt Technologie aktuell; Band 7; Heft 5; 1996; S. 398-402
- [56] Atzeni, C. et al: Dimensional variations, capillary adsorption and freeze-thaw resistance of repair mortars admixtures with polymers. Cement and Concrete Research; Vol. 23; 1993; S 301-308
- [57] Justness, H.; Reynaers, T.; Van Zundert, W.: Moisture transport in polymer cement mortars based on lattices and redispersible polymer powders. IX. ICPIIC; 14. – 18. September, Bologna (Italien), 1998, S. 633-645
- [58] Stark, J.; Wicht, B.: Dauerhaftigkeit von Beton - Der Baustoff als Werkstoff. Birkhäuser-Verlag, Basel (Schweiz); 2001
- [59] Würth, E.: Beanspruchung des Betons bei Tausalzanwendung. Betonwerk und Fertigteil-Technik 43; 1977; S. 542-548
- [60] Palecki, S.; Wowra, O.; Setzer, M. J.: Untersuchung der inneren und äußeren Schädigung von Beton unter dem Einfluss verschiedener Taumittel. 14. Internationale Baustofftagung - ibausil; 20. - 23. September; Weimar; 2000; S. 1-0745- 1-0754
- [61] Dimmig-Osburg, A.: Aspekte der Ausbildung der Mikrostruktur im frühen Stadium der Erhärtung von PCC. 16. Internationale Baustofftagung - ibausil; 20. - 23. September; Weimar; 2006; S. 2-0263 - 2-0280
- [62] Dimmig, A.: Einflüsse von Polymeren auf die Dauerhaftigkeit kunststoffmodifizierter Mörtel. 5. Internationales Kolloquium Industrieböden `03; 21. - 23. Januar 2003; Technische Akademie Esslingen; 2003; Band II; S. 645-658
- [63] Dimmig, A.: Die Beeinflussung der Mikrostruktur kunststoffmodifizierter Mörtel durch chemische und physikalische Belastungen. Schriften der Bauhaus-Universität Weimar „Revitalisierung von Bauwerken“; Band 117; Weimar; 2004/2005; S. 81-94
- [64] Engelfried, R.: Schäden an polymeren Beschichtungen. Schadenfreies Bauen; Band 26; Günter Zimmermann (Hrsg.); Fraunhofer IRB Verlag; Stuttgart; 2001

- [65] Bischof, C.; Possart, W.: Adhäsion: theoretische und experimentelle Grundlagen. Akademie-Verlag; Berlin; 1983
- [66] Lunk, P.: Oberflächenfestigkeit: Untergrund (Beton). In: Haften zwischen zementgebundenen Schichten; WTA-Conference Notes; Heft 2; Aedificatio Verlag; Freiburg; 2000; S. 19-28
- [67] Packham, D. E.: Handboock of adhesion, second edition. John Wiley and Sons Ltd.; West Sussex (UK); 2005
- [68] Sasse, H. R.: Adhäsion zwischen Estrich und Beton. 1. Internationales Kolloquium Industrieböden `87; 13. - 15. Januar; Institut für Bauforschung; RWTH Aachen; 1987; CD-ROM
- [69] Michel, M.: Adhäsion und Klebetechnik - Die theoretischen Grundlagen der Klebstoffe auf Basis von Kunststoffen. Carl Hanser Verlag; München; 1969
- [70] Henning, O.: Baustoffchemie: Eine Einführung für Bauingenieure und Architekten. 5. Auflage; Verlag für Bauwesen; Berlin; 1997
- [71] Kolonko, K.: Über die Wirkung von Kunstharzdispersionen in zementgebundenen Mörteln. Kunststoff-Anwendung auf Spezialgebieten im Bauwesen; Technische Akademie Esslingen; Lehrgang Nr. 3264/71.29; 12.-13.09.; Ostfildern; 1977
- [72] Ohama, Y: Concrete Admixtures. Handbook; V. S. Ramachandran Noyes Publication; 1984
- [73] Beeldens, A.; Van Gemert, D.; Schorn, H.; Ohama, Y.: Integated model for microstructure building in polymer cement concrete. IX. ICPIC; 2. - 4. Juni; Berlin; 2004; S. 1-10
- [74] Beeldens, A.; van Gemert, D.; Ohama, Y.: Integrated Model of Structure Formation in Polymer Modified Concrete. Proceedings of the 11th International Congress on the Chemistry of Cement; Cement's Contribution to Development in the 21th Century; Vol. 1; The Cement and Concrete Institute of South Africa; Durban; May 2003; S. 206-216
- [75] Dimmig-Osburg, A.: Neues Modell der Ausbildung der Mikrostruktur kunststoffmodifizierter Mörtel. Betonwerk + Fertigteil-Technik 10; Jahrgang 71;2005; S. 26-36
- [76] Su, Z. Larbi, J. A.; Bijen, J. M. J. M.: The interface between polymer-modified cement paste and aggregates. Cement and Concrete Research 21; Nr. 6; 1991; S. 983-990
- [77] Shaker, F. A.; El-Dieb, A. S.; Reda, M. M.: Durability of styrene-butadiene latex modified concrete. Cement and Concrete Research 27; 1997; S. 711-720
- [78] Stark, J.; Wicht, B.: Anorganische Bindemittel - Zement - Kalk - spezielle Bindemittel. Schriften der Bauhaus-Universität; Weimar; 1998
- [79] Zimbelmann, R.: A Method for strengthening the bond between Cement Stone and Aggregates. Cement and Concrete Research 17; 1987; S. 651-660
- [80] Metha, P. K.; Monteiro, P. J. M.: Concrete - Microstructure, Properties and Materials. Second Edition; Prentice Hall Inc.; New York u. a. (USA); 1993
- [81] Kim, J.-H.; Robertson, R. E.; Naaman, A. E.: Structure and properties of polyvinyl alcohol-modified mortar and concrete. Cement and Concrete Research 29; 1999; S. 407-415
- [82] Ohama, Y; Chandra, S.: Polymers in Concrete. Boca Raton; CRC Press; 1994

- [83] Schorn, H.: Instandsetzungsbaustoff: Harz-Zement-Beton. Bauingenieur 63; Springer-Verlag; Berlin; 1988
- [84] Gierloff, M.: Beeinflussung von Betoneigenschaften durch Zusatz von Kunststoffdispersionen. Forschungsbericht 104; Band 4; BAM; Berlin; 1984
- [85] Lohaus, L.: Festigkeits- und Verformungsverhalten epoxidharzmodifizierter Betone. Dissertation; Ruhr-Universität Bochum; 1984
- [86] Schorn, H.: Kunststoffmodifizierter Beton / PCC. Schriften zur Materialtechnologie des Bauingenieurs; Vulkan-Verlag; Essen; 1984
- [87] Maultzsch, M.; Kwasny, R.: PCC als Baustoff für Brückeninstandsetzung. Strassen und Tiefbau 43; Nr. 1; 1988; S. 225-238
- [88] Stark, J.; Krug, H.: Baustoffkenngrößen. Schriftenreihe der Bauhaus-Universität; 2. ergänzte Auflage; Universitätsverlag; Weimar; 1997
- [89] Budelmann, H.: Zum Einfluss erhöhter Temperatur auf die Festigkeit und Verformung von Beton mit unterschiedlichen Feuchtegehalten. Dissertation; TU Braunschweig; 1987
- [90] Großkurth, K. P.; Konietzko, A.: Polymermodifizierter zementgebundener Beton als Konstruktionswerkstoff. Bauingenieur 64; Springer-Verlag; Berlin; 1989; S. 173-179
- [91] Großkurth, K. P.; Konietzko, A.: Polymerbewirktes Zug- und Druckverhalten in Zementgebundenen Betonen (PCC). Beton- und Straßenbetonbau 84; Verlag Ernst und Sohn; Berlin; 1989
- [92] Grosskurth, K. P.; Konietzko, A.: Polymerbewirktes Zug- und Druck-Tragverhalten in zementgebundenen Betonen. Beton- und Stahlbetonbau 84 (1989) 9; S. 217-222.
- [93] Grosskurth, K. P., Konietzko, A.: Langzeitverformungsverhalten polymermodifizierter zementgebundener Betone (PCC). 22. Forschungskolloquium des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton; Braunschweig; 12./13.10.1989; Berichtsband; S. 15-20.
- [94] Hilsdorf, H. K.; Günter, M.; Haard, P.: Fracture Mechanics Application of Concrete Repair Systems and Protection Systems. Adherence of young and old Concrete; Aedificatio Verlag; Freiburg; 1994
- [95] Kramer, P.: Schaden erkannt - Schaden gebannt, Betoninstandsetzung. Baugewerbe Nr. 8; Jahrgang 81; S- 26-29
- [96] Stehno, G.: Untergrundvorbehandlung. Internationale Kolloquium Industriefußböden `87; 13. - 15. Januar; Esslingen; 1987
- [97] Freund, V.: Polymermodifizierte Industrieestriche. Internationale Kolloquium Industriefußböden `99; 12. - 16. Januar; Esslingen; 1999
- [98] Schröder, M.: Instandsetzung von tausalz- und korrosionsgeschädigtem Stahlbeton mit PCC nach ZTV - SIB. Straßen- und Tiefbau Nr. 7/8; Jahrgang 44; 1990; S. 21-26
- [99] Eichler, K.: Erfahrungen aus der Praxis mit PCC und Besonderheiten bei der Verarbeitung. Betonwerk- und Fertigteil-Technik; 1992
- [100] Haardt, P.: Zementgebundenen und kunststoffvergütete Beschichtungen auf Beton. Dissertation; Institut für Massivbau und Baustofftechnologie; Universität Karlsruhe; 1990

- [101] Rieche, G.: Erforderliche Oberflächenzug- und Haftzugfestigkeit von Beton für Estriche und Mörtelbeschichtungen. Internationales Kolloquium Industriefußböden '95; 10. - 12. Januar; Esslingen; 1995
- [102] Weber, J.: Einsatz von PCC und SPCC bei der Instandsetzung der Isarbrücke Unterföhring. Werterhaltung von Ingenieurbauwerken; Darmstädter Massivbau-Seminar; 1994
- [103] Dempwolf, F.: Untersuchungen von Einflussgrößen auf den Haftverbund zwischen epoxidharzmodifizierten Mörteln und Untergrund. Diplomarbeit; F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde; Bauhaus-Universität; Weimar; 1994
- [104] Schwamborn, B.: Zum Leistungsvermögen von Oberflächenschutzsystemen für Betonbauteile. Dissertation; Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz; Technische Hochschule Aachen; 1994
- [105] Cleland, D. J.; Nadierl, M.; Long, A. E.: Bond Strength of Patch Repair Mortars for Concrete. Adhesion between Polymers and Concrete. Editor H. R. Sasse; Chapman and Hall; 1986
- [106] Maultzsch, M.: Untersuchungen zur Eignung von Zementmörteln mit Kunststoffzusatz für den Ersatz von Konstruktionsbeton im Brückenbau. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik 534; Selbstverlag; Bonn; 1987
- [107] Berken, C.; Großkurth, K. P.: Polymermodifizierte Mörtel unter Einwirkung sulfathaltiger Lösungen. 16. Internationale Baustofftagung - ibausil; 20. - 23. September; Weimar; 2006; S. 2-0297 - 2-0304
- [108] Yoon, W.-H.: Untersuchung der temperatur- und feuchtebedingten Spannungsverhältnisse im Bereich von Instandsetzungen bei massiven Betonbauten. Dissertation; Technische Hochschule; Aachen; 1989
- [109] Van Gemert, D.: Comparison of two methods for measurement of chloride ion diffusion in Polymer Cement Concrete. Polymers in Concrete; OProceedings of the 7th International Congress on Polymers in Concrete; BETECOM; Moscow; Sept. 1992; S. 165-177
- [110] Stark, J.; Krug, H.: Baustoffkenngrößen. Schriften der Bauhaus-Universität Weimar 102; Fakultät Bauingenieurwesen; F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde; 15.04.1996

Regelwerke

- [R1] DIN EN 197-1: Zement - Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement. Ausgabe August 2004
- [R2] DIN EN 197-4: Zement - Teil 4: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Hochofenzement mit niedriger Anfangsfestigkeit. Ausgabe August 2004
- [R3] DIN EN 196-1: Prüfverfahren für Zement - Teil 1: Bestimmung der Festigkeit. Ausgabe Mai 2005
- [R4] DIN 1048-1: Prüfverfahren für Beton - Frischbeton. Ausgabe Juni 1991
- [R5] DIN 52450: Bestimmung des Schwindens und Quellens an kleinen Probekörpern. Ausgabe August 1985
- [R6] DIN EN 12617-4: Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerke - Prüfverfahren: Bestimmung des Schwindens und Quellens. Ausgabe August 2002
- [R7] DAfStb-Richtlinie Schutz und Instandsetzen von Betonbauteilen (RILI-SIB) - Teil 4: Prüfverfahren. Ausgabe Oktober 2001
- [R8] DAfStb-Richtlinie Schutz und Instandsetzen von Betonbauteilen (RILI-SIB) - Teil 4: Prüfverfahren. Ausgabe November 1992
- [R9] Bundesanstalt für Straßenwesen: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten - ZTV-ING. Ausgabe Januar 2003
- [R10] Der Bundesminister für Verkehr, Abteilung Straßenbau: Technische Prüfvorschriften für Betonersatzsysteme aus Zementmörtel / Beton mit Kunststoffzusatz (PCC) - TP BE-PCC. Ausgabe 1990
- [R11] Der Bundesminister für Verkehr, Abteilung Straßenbau: Technische Lieferbedingungen für Betonersatzsysteme aus Zementmörtel / Beton mit Kunststoffzusatz (PCC) - TL BE-PCC. Ausgabe 1990
- [R12] DIN EN 196-3: Prüfverfahren für Zement - Teil 3: Bestimmung der Erstarrungszeiten und der Raumbeständigkeit. Ausgabe Mai 2005
- [R13] DIN CEN/TS 12390-9 (Vornorm): Prüfung von Festbeton - Teil 9: Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand - Abwitterung. Ausgabe August 2006
- [R14] DI 13057: Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken - Prüfverfahren: Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme. Ausgabe September 2002

Eigene Veröffentlichungen

- [E1] Dimmig-Osburg, A.; Bode, K. A.: Polymer Cement Concrete (PCC) - Baustoffe mit Zukunft?! Beton; Nr. 5; 2006; S. 194-197
- [E2] Bode, K. A.; Dimmig, A.: Einflüsse auf das Längenänderungsverhalten von PCC. 15. Internationale Baustofftagung - ibausil; 24. - 27. September; Weimar; 2003; S. 2-0567 - 2-0574
- [E3] Bode, K. A.; Dimmig, A.: Durability of Polymer-modified Mortars and Concrete. Concrete Solutions; 1. International Conference on Concrete Repair; 15. - 17. July; St. Malo, Frankreich; 2003; CD-ROM
- [E4] Bode, K. A.; Dimmig, A.; Rudolph, R.; Grodde, E.: The determination of thermal parameters of PCC. IX. ICPIIC; 2. - 4. Juni; Berlin; 2004; S. 37-44
- [E5] Bode, K. A.; Dimmig-Osburg, A.: Verhalten der Polymermatrix in PCC unter mechanischer Belastung. 16. Internationale Baustofftagung - ibausil; 20. - 23. September; Weimar; 2006; S. 2-0281 - 2-0288
- [E6] Bode, K. A.; Dimmig, A.: Die Beeinflussung des Frost-Tausalz-Widerstandes von Mörteln durch die Modifikation mit Polymerpulvern. Thesis, Beiträge zur Baustoffforschung 2001; F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde Weimar; Universitätsverlag; 2001; S. 24-32
- [E7] Bode, K. A.; Dimmig, A.: Freeze-deicing salt resistance and bond strength of PCC after freeze-thaw attack. IX. ICPIIC; 2. - 4. Juni; Berlin; 2004; S. 75-82
- [E8] Bode, K. A.; Dimmig, A.: Frost-Tausalz-Beständigkeit und Haftverbund nach Frost-Tau-Einwirkung von PCC. Schriften der Bauhaus-Universität Weimar „Revitalisierung von Bauwerken“; Band 117; Weimar; 2004/2005; S. 89-95
- [E9] Dimmig, A.; Bode, K.: Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit polymermodifizierter Mörtel. 4.Tagung Bauchemie; 30.09. - 01.10.; GDCh-Monographie; Band 25; Weimar; 2002; S. 200-202
- [E10] Raue, E.; Dimmig-Osburg, A.; Heidolf, T.; Bode, K. A.: Untersuchungen an Betondruckzylindern zum Einfluss einer Polymermodifikation auf das Trag- und Verformungsverhalten. Schriften der Bauhaus-Universität Weimar; Band 119; Veröffentlichungen des SFB 524; Weimar; 2006; S. 29 - 34
- [E11] Raue, E.; Dimmig-Osburg, A.; Heidolf, T.; Bode, K. A.: Untersuchungen an Betondruckzylindern zum Einfluss einer Polymermodifikation auf das Trag- und Verformungsverhalten. 16. IBAUSIL, 20. - 23.09.; Weimar; 2006; Tagungsband 2; S. 0319 - 0326
- [E12] Dimmig-Osburg, A.; Raue, E.; Bode, K. A.; Heidolf, T.: Untersuchungen zum Trag- und Verformungsverhalten polymermodifizierter Betondruckzylinder. Thüringer Werkstofftag in Jena; Verlag Dr. Köster; Berlin; 2006; S. 64 - 67
- [E13] Dimmig, A.; Erfurt, W.; Bode, K.: Methoden zur Bestimmung der Schädigungsgradienten kunststoffmodifizierter Mörtel nach einer Frost-Tausalz-Belastung. 14. Ibausil; 20. - 23.09. Weimar; Band 2; S. 2-1015 - 2-1022.

- [E14] Dimmig, A.; Bode, K.; Erfurt, W.: Methods of Determining the Gradient of Damage in Polymer-Modified Mortar after Freeze-Deicing Salt Attack. X. International Congress on Polymers in Concrete; ICPIC; 21. - 25.05.; Honolulu (USA); 2001; CD-ROM
- [E15] Bode, K. A.; Dimmig, A.; Einflüsse auf das Längenänderungsverhalten von PCC. Schriften der Bauhaus-Universität Weimar; Bd.115; Veröffentlichung des SFB 524; Weimar; 2003; S. 73-78
- [E16] Dimmig, A.; Bode, K. A.: Kunststoff und Zement - eine sinnvolle Verbindung? Festschrift zum 60. Geburtstag von Prof. Dr.-Ing. habil. Jochen Stark; Bauhaus-Universität Weimar; 24.10.; Weimar; 2003; S. 172-177.
- [E17] Dimmig, A.; Bode, K. A.: Haftverbund von PCC zu Altbeton - Arbeiten an Verifikationsobjekt Eiermann-Bau Apolda. Broschüre der Querschnittsarbeitsgruppe "Verifikation"; Zusammenarbeit der Teilprojekte im SFB 524; Weimar; 2005
- [E18] Most, T.; Erfurt, W.; Tatarin, R.; Dimmig, A.; Bode, K. A.: Arbeitsbericht zur Untersuchung stochastischer Rissentwicklung in Beton-Biegebalken unter Analyse der Verteilung der Materialeigenschaften mit Ultraschall. Broschüre der Querschnittsarbeitsgruppe "Naturwissenschaftliche Grundlagen" des SFB 524; Weimar; 2005
- [E19] Raue, E.; Dimmig, A.; Heidolf, T.; Bode, K. A.: Untersuchungen zum Trag- und Verformungsverhalten von polymermodifizierten Betondruckzylindern. Broschüre der Querschnittsarbeitsgruppe "Naturwissenschaftliche Grundlagen" des SFB 524; Weimar; 2005
- [E20] Erfurt, W.; Tatarin, R.; Dimmig, A.; Bode, K. A.: Anpassung der Reflexionseigenschaften von Baustoffoberflächen an die Laservibrometrie. Broschüre der Querschnittsarbeitsgruppe "Naturwissenschaftliche Grundlagen" der SFB 524; Weimar; 2005
- [E21] Bode, K. A.; Dimmig, A.; Rudolph, R.; Grodde, E.: The determination of thermal parameters of PCC. Broschüre der Querschnittsarbeitsgruppe "Naturwissenschaftliche Grundlagen" des SFB 524; Weimar; 2005
- [E22] Dimmig-Osburg, A., Bode, K. A., Flohr, A.: The influences of different polymers on deformation behaviour and stiffness processing of concrete. Junior Euromat; 04.-06. September; Lausanne (Schweiz); 2006
- [E23] Dimmig-Osburg, A.; Bode, K. A.; Flohr, A.: Investigations into the PCC-Microstructure after Mechanical Load. Euromat; 10.-13. September; Nürnberg; 2007
- [E24] Dimmig-Osburg, A.; Bode, K. A.; Flohr, A.: Dauerhaftigkeit kunststoffmodifizierter Mörtel und Betone. Beton 58 (2008), Heft 1+2, Seite 48 - 50
- [E25] Bode, K. A.; Dimmig-Osburg, A.: Untersuchungen zur Lastabtragung im Gefüge von PCC. Tagung Verkehrsbauten - Schwerpunkt Parkhäuser/Brücken; 29./30. Januar; Technische Akademie Esslingen; Ostfildern; 2008; S. 299 - 307
- [E26] Bode, K. A.; Dimmig-Osburg, A.: Polymers in Cementious Mixtures - More than an Adhesive between Aggregates and Cement Stone. Third Symposium on Durability of Building Sealants and Adhesives; 25.-26. June; Denver, Co (USA); 2008

Betreute studentische Arbeiten zu dieser Thematik

Martin, S.: Untersuchungen von Einflüssen auf den Haftverbund kunststoffmodifizierter Mörtel. Diplomarbeit; Betreuer: A. Dimmig, K. A. Bode; Weimar; 2002

Helbig, I.: Frost-Taumittel-Widerstand von PCC. Diplomarbeit; Betreuer: K.A. Bode; Weimar; 2002

Baldy, F.: Einfluss eines hydrophobierenden Kunststoffes auf die Dauerhaftigkeit von PCC. Diplomarbeit; Betreuer: K.A. Bode; Weimar; 2002

Koch, K.-U.: Haftzugfestigkeit nach Frost-Tau-Beanspruchung - Einfluss von Probengeometrie und Prüfregime. Diplomarbeit; Betreuer: Dimmig, A.; Bode, K. A.; Weimar; 2004

Häselbarth, M.: Einfluss von Polymerart und Exposition auf das Haftvermögen kunststoffmodifizierter Zementsteine. Diplomarbeit; Betreuer: Dimmig-Osburg, A.; Bode, K. A.; Weimar; 2005

Ehrhardt, D.: Einflussgrößen auf den Haftverbund kunststoffmodifizierter Mörtel und Beton sowie dessen Beurteilung unter Einbeziehung zerstörungsfreier Prüfverfahren. Diplomarbeit; Betreuer: Bode, K. A.; Weimar; 2005

Gorkenant, C.: Untersuchungen zur Temperaturabhängigkeit mechanischer Kennwerte von PCC. Diplomarbeit; Betreuer: Bode, K. A.; Weimar; 2005

Flohr, A.: Stoffliche Aspekte einer Polymermodifikation auf die statischen und dynamischen Eigenschaften von Konstruktionsbeton. Diplomarbeit; Betreuer: Bode, K. A.; Weimar; 2005

Studienarbeiten der Studenten Recke, S.; Harnisch, S.; Gorka, B.; Meyer, T.; Lorenz, G.; Klesel, D.; von Waldenfels, G.; Gibson, C.; Koch, K.-U. (Mitbetreuerin A. Dimmig); Knorr, M.; Flohr, A.; Ehrhardt, D.; Gorkenant, C.; Müller, F.; Wolff, E.; Dunkel, S. (Mitbetreuer A. Flohr)

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2-1	Ausbreitmaßänderung der CEM I 42,5 R – Mörtel	9
Abb. 2-2	Ausbreitmaßänderung der CEM III/A 42,5 – Mörtel	10
Abb. 2-3	Frischmörtelluftgehalte der Mörtel	10
Abb. 2-4	Wasserrückhaltevermögen der Mörtel	11
Abb. 2-5	Rohdichten CEM I – Mörtel	13
Abb. 2-6	Rohdichten CEM III/A – Mörtel	13
Abb. 2-7	Biegezugfestigkeiten CEM I – Mörtel	14
Abb. 2-8	Biegezugfestigkeiten CEM III/A – Mörtel	14
Abb. 2-9	Druckfestigkeiten CEM I – Mörtel	16
Abb. 2-10	Druckfestigkeiten CEM III/A – Mörtel	16
Abb. 4-1	Längenänderungen der CEM I – Mörtel	25
Abb. 4-2	Längenänderungen der CEM III/A – Mörtel	25
Abb. 4-3	Masseänderungen der CEM I – Mörtel	26
Abb. 4-4	Masseänderungen der CEM III/A – Mörtel	26
Abb. 4-5	Wärmeausdehnungskoeffizienten von PCC 1	28
Abb. 4-6	verwendete Schwindrinne	29
Abb. 4-7	Schwindrinne mit seitlicher Behinderung und Abdeckung	29
Abb. 4-8	Schwindrinne ohne seitliche Behinderung	29
Abb. 4-9	Lagerung der Schwindrinnen in der Baustoffruhe	30
Abb. 4-10	Erstarrungszeiten	31
Abb. 4-11	Sommerzyklus	31
Abb. 4-12	Herbstzyklus	31
Abb. 4-13	Längenänderungen CEM I 42,5R	32
Abb. 4-14	Längenänderungen CEM III/A 42,5	32
Abb. 4-15	Längenänderungen der kunststoffmodifizierten Zementsteine	34
Abb. 4-16	Porenradienverteilung (Zementsteine)	35
Abb. 4-17	Verteilung der Gesamt-, offenen und geschlossenen Porosität (ZS)	35
Abb. 4-18	Entwicklung der dynamischen E-Moduln der Zementsteine	36
Abb. 4-19	Zugfestigkeitsentwicklung der Zementsteine	36
Abb. 4-20	Form für Modellprobekörper	37
Abb. 4-21	Prüfmaschine TIRAtest 28100	37
Abb. 4-22	Haftzugfestigkeiten	38
Abb. 4-23	Bruchanteile bei der Haftzugprüfung	38
Abb. 4-24	Bruchbild Muschelkalk	39
Abb. 4-25	Bruchbild Sandstein	39
Abb. 4-26	berechnete bezogene Zugspannungen in den Zementsteinen	40
Abb. 5-1	unbelastete Mörtelmatrix der unmodifizierten Vergleichsprobe	47
Abb. 5-2	unbelastete Mörtelmatrix des PCC 1	48
Abb. 5-3	unbelastete Mörtelmatrix des PCC 2	49

Abb. 5-4	Position der DMS auf der Mantelfläche	50
Abb. 5-5	versagte PCC 1- Probe bei 90 %	50
Abb. 5-6	Verformungen während der Druckbeanspruchung	51
Abb. 5-7	Positionen der IWT an der Mantelfläche	52
Abb. 5-8	Prüfrahmen mit eingehängtem Dehnkörper	52
Abb. 5-9	Gesamtdehnung der Dehnkörper	53
Abb. 5-10	mittlerer Ankerschlupf der Dehnkörper	53
Abb. 5-11	IWT über gerissener Sägenut, Erstriss	54
Abb. 5-12	Dehnkörper nach Versuchsende	54
Abb. 5-13	Kraft-Durchbiegungskurven der Biegezugversuche	55
Abb. 5-14	Versuchsaufbau Biegezugprüfung	55
Abb. 5-15	Ultraschalllaufzeiten vor und nach Belastung	56
Abb. 5-16	Dauerstandsversuch	57
Abb. 5-17	Ankopplung der Ultraschallmessköpfe	57
Abb. 5-18	Kriechverformungen beim Druckdauerstandsversuch	58
Abb. 5-19	mechanisch belastete Mörtelmatrix der unmodifizierten Vergleichsprobe	61
Abb. 5-20	mechanisch belastete Mörtelmatrix des PCC 1	62
Abb. 5-21	mechanisch belastete Mörtelmatrix des PCC 2	63
Abb. 5-22	Biegezugfestigkeiten von Mörtelprismen und Zementsteinprismen, Lagerung A	65
Abb. 5-23	Biegezugfestigkeiten von Mörtelprismen und Zementsteinprismen, Lagerung B	65
Abb. 5-24	Biegezugfestigkeiten von Mörtelprismen und Zementsteinprismen, Lagerung C	65
Abb. 5-25	Zugfestigkeiten und Dehnungen der Kunststofffilme bei unterschiedli- chen Temperaturen	66
Abb. 6-1	CDF-Proben in der Form	70
Abb. 6-2	abgeklebter Probekörper	70
Abb. 6-3	CDF Temperaturzyklus [R13]	70
Abb. 6-4	Porenradienverteilung der Mörtel	71
Abb. 6-5	Verteilung der Gesamt-, offenen und geschlossenen Porosität der Mörtel	71
Abb. 6-6	kapillare Lösungsaufnahme der Mörtel während des CDF-Testes	72
Abb. 6-7	Abwitterung der Proben während des CDF-Testes	73
Abb. 6-8	relativer dynamischer E-Modul	75
Abb. 6-9	Probenschlitten mit Justiereinrichtung (5 mm)	77
Abb. 6-10	Durchschallung einer CDF-Probe	77
Abb. 6-11	Profile der relativen dynamischen E-Moduln aus den Rastermessungen der CEM I-Mörtel	78
Abb. 6-12	Profile der relativen dynamischen E-Moduln aus den Rastermessungen der CEM III-Mörtel	79
Abb. 6-13	kapillare Lösungsaufnahmen der verschiedenen Taumittel	80

Abb. 6-14	Abwitterungen während des CDF-Testes bei Belastung mit verschiedenen Taumitteln	81
Abb. 6-15	Masseänderungen der Polymerfilme	82
Abb. 6-16	KS 1 im Gefüge (ESEM)	82
Abb. 6-17	KS 2 in einer Pore (REM)	82
Abb. 6-18	prozentuale kapillare Wasseraufnahme und kapillare Sättigung der PCC	84
Abb. 7-1	Lage der Temperatursensoren im Beschichtungskörper	88
Abb. 7-2	Anordnung der Proben in der Prüfruhe	89
Abb. 7-3	Gegenüberstellung der Prüfregime	89
Abb. 7-4	Anordnung der Prüfflächen bei der Oberflächen- und Haftzugfestigkeitsprüfung	90
Abb. 7-5	PCC 1 nach Frost-Tau-Belastung	93
Abb. 7-6	PCC 2 nach Frost-Tau-Belastung	93
Abb. 7-7	Dünnschliffprobe Platte 1 (Beschichtung einlagig aufgebracht)	95
Abb. 7-8	Randbereich Platte 1 (x 2,5)	95
Abb. 7-9	mittlerer Bereich Platte 1 (x 10)	95
Abb. 7-10	Dünnschliffprobe Platte 2 (Beschichtung zweilagig aufgebracht)	95
Abb. 7-11	mittlerer Bereich Platte 2 (x 2,5)	96
Abb. 7-12	Detail aus Abb. 7-11 (x 10)	96
Abb. 7-13	Plattenkörper mit 2 Beschichtungen	97
Abb. 7-14	Salzausblühungen in der Verdunstungsebene	97
Abb. 7-15	Chloridkonzentration in der Beschichtung	97
Abb. 7-16	Platte mit aufstehender Natriumchloridlösung	99
Abb. 7-17	Chloridkonzentration an der Beschichtungsoberfläche	99

Tabellenverzeichnis

Tab. 2-1	charakteristische Zementkennwerte	4
Tab. 2-2	charakteristische Kennwerte der verwendeten Kunststoffe	5
Tab. 2-3	Mörtelrezepturen mit CEM I 42,5 R	7
Tab. 2-4	Mörtelrezepturen mit CEM III/A 42,5	7
Tab. 2-5	Betonrezepturen mit CEM I 32,5 R	7
Tab. 2-6	Frischbetonkennwerte	12
Tab. 2-7	Festbetonkennwerte	17
Tab. 6-1	CDF Temperaturzyklus [R13]	70
Tab. 7-1	Kennwerte des Beschichtungsuntergrundes	90
Tab. 7-2	Bewertung des Adhäsionsversagens, jeweils in Abhängigkeit vom Beschichtungsmaterial, der Grundkörpergeometrie und der Nachbehandlung	92
Tab. 7-3	Auswertung der Haftzugprüfungen, salzbelasteter Untergrund	98
Tab. 7-4	Auswertung der Haftzugprüfungen, salzbelastete Beschichtung	99

Lebenslauf

Name: Kay Andre Bode
Anschrift: Fischersand 28
99084 Erfurt
Geburtsdatum: 18.11.1973
Geburtsort: Eisenach
Familienstand: ledig
Kinder: 2

Schulbildung:

1980 - 1990 Polytechnische Oberschule in Förtha
1990 - 1993 Technisches Gymnasium in Seebach - Abitur

Grundwehrdienst:

1993 - 1994 Panzeraufklärungsbataillon Gotha

Studium:

WS 1994/95 Studium des Bauingenieurwesens an der Bauhaus-Universität Weimar
bis SS 2000 Thema der Diplomarbeit: „Untersuchungen zur Ermittlung von Schädigungsgradienten frost- bzw. frosttausalzbelasteter Betone und Mörtel“
Studienabschluß: Diplom-Ingenieur im Studiengang Bauingenieurwesen, Studienrichtung Baustoffe und Sanierung
Abschluss als Bauingenieur, Vertiefungsrichtung Baustoffe und Sanierung

Baupraktische Tätigkeiten während des Studiums:

- Steinmetztätigkeiten bei der Firma „Natursteine Funk GmbH“ in Wünschensuhl
- Mitarbeit im „Dennert-Baustoffbüro Linke“ in Eisenach
- Hilfsassistent am FIB an der Bauhaus-UNI Weimar

Berufstätigkeit:

seit 06.2000 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Finger-Institut für Baustoffkunde (FIB) an der Bauhaus-Universität Weimar