

Lehrstuhl für Baustoffkunde und Werkstoffprüfung  
der Technischen Universität München

**Experimentelle Untersuchungen zum Transport von Wasser und Chlorid in  
rezykliertem Beton und zu der daraus ableitbaren Gefahr der chloridinduzierten  
Stahlkorrosion**

Ludwig Friedl

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen  
der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor – Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. D. Heinz

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. P. Schießl
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Raupach, Rheinisch-  
Westfälische Technische Hochschule Aachen

Die Dissertation wurde am 10.09.2003 bei der Technischen Universität München eingereicht  
und durch die Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen am 15.01.2004 angenom-  
men.

## **Zusammenfassung**

Korrosionsauslösende Chloride werden in den Poren des Betons transportiert. Bei rezykliertem Beton werden gegenüber herkömmlichem Beton aufbereitete mineralische Abfälle als Zuschlag eingesetzt. Diese weisen im Vergleich zu natürlichen Zuschlägen eine höhere Porosität auf und können ggf. selbst chloridkontaminiert sein. Bei der Verwendung von groben rezyklierten Zuschlägen ( $> 4$  mm) und einem Chloridangriff von außen ist die Gefahr der Stahlkorrosion im Vergleich zu herkömmlichem Beton als gleich einzuschätzen, bei der Verwendung von rezykliertem Sand ( $< 4$  mm) ist die Gefahr der Stahlkorrosion jedoch wesentlich größer. Bei einem Chloridangriff von innen, infolge der Umverteilung von Chloriden aus kontaminierten rezyklierten Zuschlägen heraus, muß mit Korrosion gerechnet werden.

## **Abstract**

Chlorides that induce corrosion are transported in the pores of concrete. Contrary to ordinary concrete with natural aggregates industrially processed mineral waste is used as aggregates (so called recycled aggregates) in recycled aggregate concrete. In comparison to natural aggregates these aggregates are more porous and additionally can be chloride-contaminated themselves. Using coarse recycled aggregates (grain size  $> 4$  mm) in concrete where chlorides are penetrating from outside into the concrete is leading to a corrosion risk that is comparable to ordinary concrete with natural aggregates. But using recycled sand (grain size  $< 4$  mm) leads to a serious higher risk of corrosion in comparison to ordinary concrete. For the redistribution of chlorides from chloride contaminated recycled aggregates into the concrete matrix pitting corrosion has to be anticipated.

## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Assistent am Lehrstuhl für Baustoffkunde und Werkstoffprüfung der Technischen Universität München. Meinem „Doktorvater“, Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. P. Schießl, möchte ich an dieser Stelle danken, dass er mir während der Ausarbeitung der vorliegenden Arbeit den nötigen Freiraum gewährte. Seine vielen wertvollen Hinweise und Verbesserungsvorschläge haben viel zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Meinen Dank möchte ich auch Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Raupach für die Übernahme des zweiten Referates dieser Arbeit aussprechen. Ebenso danke ich Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. D. Heinz für den Vorsitz in der Prüfungskommission.

Mein besonderer Dank gilt auch Herrn Dr.-Ing. A. Volkwein, der mich in vielen Stunden durch konstruktive Diskussionen und hilfreiche Ratschläge tatkräftig unterstützt hat.

Desweiteren sei auch allen nicht namentlich Erwähnten gedankt, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Hierzu zählen auch meine ehemaligen Kollegen und Kolleginnen am Lehrstuhl, bei denen ich mich darüber hinaus auch für die angenehme Arbeitsatmosphäre und die stete Bereitschaft zur fachlichen Diskussion bedanken möchte.

Last but not least möchte ich mich bei meiner Frau für die Korrektur und die stete „moralische“ Unterstützung bedanken.

München, im Februar 2004

Ludwig Friedl

## Inhaltverzeichnis

<b>1</b>	<b><i>Einleitung, Zielsetzung</i></b> .....	<b>1</b>
1.1	<b>Problemstellung</b> .....	<b>1</b>
1.2	<b>Ziel dieser Arbeit</b> .....	<b>2</b>
1.3	<b>Vorgehensweise</b> .....	<b>3</b>
<b>2</b>	<b><i>Stand des Wissens</i></b> .....	<b>6</b>
2.1	<b>Grundsätzliches zur Technologie von rezykliertem Beton</b> .....	<b>6</b>
2.1.1	Historie.....	6
2.1.2	Rezyklierte Zuschläge.....	7
2.1.3	Betonherstellung / Frischbetoneigenschaften .....	9
2.1.4	Mechanische und physikalische Festbetoneigenschaften .....	10
2.1.5	Bisherige Erkenntnisse zur Dauerhaftigkeit .....	12
2.2	<b>Transportvorgänge von Wasser und Chlorionen in Beton</b> .....	<b>14</b>
2.2.1	Allgemeines.....	14
2.2.2	Transportarten.....	15
2.2.3	Betontechnologische Einflüsse auf den Transport von Wasser und Chlorid .....	17
2.2.4	Die Bedeutung der Mikrostruktur des Zementsteins in der Kontaktzone.....	19
<b>3</b>	<b><i>Untersuchungen zur Charakterisierung der Mikrostruktur in der Kontaktzone von rezykliertem Beton</i></b> .....	<b>24</b>
3.1	<b>Zur Auswahl der Versuchsparameter und Wahl des Messverfahrens</b> .....	<b>24</b>
3.2	<b>Probenherstellung, Probenvorbereitung</b> .....	<b>25</b>
3.2.1	Beton.....	25
3.2.2	Proben für das REM.....	26
3.3	<b>Durchführung der Versuche mit dem REM</b> .....	<b>28</b>
3.4	<b>Auswertung der Rückstreuelektronenbilder</b> .....	<b>29</b>
3.5	<b>Ergebnisse</b> .....	<b>31</b>
3.5.1	Allgemeines, Vergleich mit Ergebnissen von Betonen mit Naturzuschlag .....	31
3.5.2	Einflüsse aus unterschiedlicher Vorbefeuchtung von rezyklierten Zuschlägen auf die Mikrostruktur der Übergangszone .....	33
3.5.3	Einflüsse aus der Zuschlagart auf die Mikrostruktur der Übergangszone .....	35
3.5.4	Zusammenfassung, Folgerungen .....	36

<b>4</b>	<b><i>Untersuchungen zum Chlorid- und Wassertransport bei „äußerer“ Chloridquelle ....</i></b>	<b>37</b>
<b>4.1</b>	<b>Allgemeines .....</b>	<b>37</b>
<b>4.2</b>	<b>Versuchsbeschreibung.....</b>	<b>37</b>
4.2.1	RCM-Versuch.....	37
4.2.2	Kapillare Saugversuche mit und ohne Multiringelektrode .....	39
4.2.3	Untersuchte Einflussgrößen.....	40
4.2.4	Betonausgangsstoffe, Betonzusammensetzung.....	41
4.2.5	Betonherstellung und -lagerung.....	41
<b>4.3</b>	<b>Einflüsse aus der Bindemittelart und dem w/z-Wert .....</b>	<b>42</b>
<b>4.4</b>	<b>Einfluss von rezykliertem Sand.....</b>	<b>45</b>
<b>4.5</b>	<b>Einflüsse aus der Ersatzrate und der Herkunft von rezyklierten Grob-Zuschlägen.....</b>	<b>49</b>
<b>4.6</b>	<b>Einfluss aus carbonatisiertem Betonsplitt.....</b>	<b>53</b>
<b>4.7</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>54</b>
<b>5</b>	<b><i>Untersuchungen zum Chlorid- und Wassertransport bei „innerer“ Chloridquelle.....</i></b>	<b>56</b>
<b>5.1</b>	<b>Allgemeines, Übersicht .....</b>	<b>56</b>
<b>5.2</b>	<b>Umverteilung von Chloriden.....</b>	<b>57</b>
5.2.1	Entwicklung eines geeigneten Versuchsaufbaus, Untersuchungen.....	57
5.2.2	Ausgangsstoffe .....	60
5.2.3	Variation der Vorbehandlung von SRZ.....	61
5.2.4	Ergebnisse .....	63
<b>5.3</b>	<b>Umverteilung von Wasser .....</b>	<b>78</b>
5.3.1	Ergebnisse aus der Wägung abgespaltener Scheibchen .....	78
5.3.2	Feuchtegehaltsbestimmung durch Mikrowellendurchstrahlung.....	80
<b>5.4</b>	<b>Zusammenfassung/Diskussion der Untersuchungen zum Wasser- und Chloridtransport .</b>	
.....	.....	<b>90</b>
<b>5.5</b>	<b>Modell-Korrosionsversuche .....</b>	<b>93</b>
5.5.1	Allgemeines.....	93
5.5.2	Methodik, Versuchsparameter .....	93
5.5.3	Ergebnisse .....	96
5.5.4	Zusammenfassung .....	104
<b>6</b>	<b><i>Zusammenfassung.....</i></b>	<b>105</b>
<b>6.1</b>	<b>Die Bedeutung der chloridinduzierten Stahlkorrosion in rezyklierten Beton .....</b>	<b>105</b>
<b>6.2</b>	<b>Die Eigenschaften der Mikrostruktur von rezyklierten Beton.....</b>	<b>106</b>
<b>6.3</b>	<b>Korrosionsgefahr bei „äußerer“ Chloridquelle.....</b>	<b>106</b>
<b>6.4</b>	<b>Korrosionsgefahr bei „innerer“ Chloridquelle.....</b>	<b>108</b>
<b>6.5</b>	<b>Ausblick .....</b>	<b>109</b>
<b>7</b>	<b><i>Literatur.....</i></b>	<b>111</b>

## **Allgemeine Abkürzungen**

BS:	Betonsplitt
C <sub>3</sub> A:	Tri-Calcium-Aluminat-Phase des Zementklinkers
CSH:	Calcium-Silikat-Hydrat-Phasen
DAfStb:	Deutscher Ausschuß für Stahlbeton
MRE:	Multiringelektrode
N:	Naturzuschlag
RCM-Test:	Rapid-Chloride-Migration-Test
REM:	Raster-Elektronen-Mikroskopie
SB:	Simuliertes Betonsplittkorn
SRZ:	Simuliertes Rezykliertes Zuschlagkorn
w/z:	Wasser-Zement-Verhältnis
ZS:	Ziegelsplitt

## **Formelzeichen und Einheiten**

### a) Lateinische Zeichen

A [kg/m <sup>2</sup> √s]:	Wasseraufnahmekoeffizient
c [kg/m <sup>3</sup> ]:	Konzentration einer Lösung
c <sub>0</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]:	Ausgangskonzentration einer Lösung
c <sub>f</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]:	Salzkonzentration einer Lösung
c <sub>s</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]:	Oberflächenkonzentration einer Lösung
c <sub>x</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]:	Konzentration in einer Tiefe x
Cl <sub>frei</sub> [M.-%]:	frei löslicher Chloridgehalt
Cl <sub>ges</sub> [M.-%]:	gesamter (gebunden und frei löslich) Chloridgehalt
d:	Zeit in Tagen
D [cm <sup>2</sup> /s]:	Diffusionskoeffizient
f (...):	Funktion von ...
J [g/cm <sup>3</sup> s]:	je Zeit und Flächeneinheit transportierte Stoffmenge
M.-% [%]:	Masse-Prozent

$m_{\text{Zement}}$ [kg]:	Masse von Zement
$m_{\text{Wasser}}$ [kg]:	Masse von Wasser
$m_{\text{Beton}}$ [kg]:	Masse von Beton
$m_{\text{Zuschlag}}$ [kg]:	Masse von Zuschlag
$m_{\text{Zementleim}}$ [kg]:	Masse von Zementleim
$m_{\text{w}}$ [kg/m <sup>2</sup> ]:	auf eine Fläche bezogene aufgenommene Wassermenge
$m_{\text{Cl}}$ [kg/m <sup>2</sup> ]:	auf eine Fläche bezogene aufgenommene Chloridmenge
r.F. [%]:	Relative Luftfeuchte
t [s]:	Zeit
Vol.-% [%]:	Volumen-Prozent

#### b) Griechische Zeichen

$\partial$ :	Kennzeichnung von partiellen Differentialen
$\Delta$ :	Kennzeichnung von Differenzen
$\chi$ :	Quotient von Konzentrationen
$\rho_{\text{w}}$ [kg/m <sup>3</sup> ]:	Dichte des Wassers
$\rho_{\text{FrBS}}$ [kg/m <sup>3</sup> ]:	Soll-Rohdichte des Frischbetons
$\rho_{\text{FrBI}}$ [kg/m <sup>3</sup> ]:	Ist-Rohdichte des Frischbetons
$\rho_{\text{FB}}$ [kg/m <sup>3</sup> ]:	Rohdichte des Festbetons
$\beta_{\text{w200}}$ [N/mm <sup>2</sup> ]:	Beton-Würfeldruckfestigkeit nach 28 Tagen

# 1 Einleitung, Zielsetzung

## 1.1 Problemstellung

Die Idee, mineralische Bauabfälle einer Aufbereitung zuzuführen und sie anschließend als Zuschlag für neuen Beton einzusetzen (= rezyklierter Beton) ist nicht neu. Schon nach dem 2. Weltkrieg wurden aufbereitete Trümmersmassen als Zuschlag für neuen Beton verwendet. Aber erst in den letzten Jahren ist, in Verbindung mit einem zunehmendem Umweltbewusstsein, verstärkt die Anstrengung unternommen worden, die Idee des rezyklierten Betons in die Praxis umzusetzen.

Dabei wurden die Grundlagen der Anwendung des rezyklierten Betons in zahlreichen Forschungsarbeiten erarbeitet. Dem Aspekt der Dauerhaftigkeit und hier im besonderen dem Aspekt der Korrosion von Stahl in rezykliertem Beton wurde allerdings kaum Aufmerksamkeit geschenkt. Zu diesem Thema existieren national und international nur wenige Forschungsarbeiten oder Erfahrungsberichte. Dies ist umso erstaunlicher, wenn man bedenkt, dass in der Vergangenheit Korrosionsschäden an Stahlbetonbauteilen einen erheblichen volkswirtschaftlichen Schaden hervorgerufen haben.

Denn bis Mitte der 70er Jahre wurde in Deutschland die Bedeutung des Eindringens von Chlorionen in herkömmlichen Beton (mit ausschließlich Naturzuschlag) unterschätzt. Das lag zum einen daran, dass die maßgebenden Vorgänge für die chloridinduzierte Korrosion nur in Ansätzen erforscht waren. Zum anderen aber kam es erst in den 60er Jahren durch die vermehrte Verwendung von Tausalzen im Straßenverkehr zu einer erhöhten Salzbelastung und damit zu entsprechenden Korrosionsschäden von Stahl- und Spannbetonbauwerken. Nachdem die Forschung auf diesem Gebiet intensiviert wurde, liegen heute zahlreiche Erkenntnisse zum Thema der chloridinduzierten Korrosion von Stahl in Beton sowie der maßgebenden Transportvorgänge vor. Mit diesen Erkenntnissen kann man das Korrosionsrisiko von Stahl in Beton unter Chloridbelastung eindeutig quantifizieren. Damit können nun bei einem Neubau bzw. einer Instandsetzung die Randbedingungen auf der Materialseite so gestaltet werden, dass das Korrosionsrisiko in der Zukunft auf ein Minimum reduziert wird.

Diese Erkenntnisse können jedoch nicht ohne Überprüfung auf rezyklierten Beton übertragen werden, da bei rezykliertem Beton einerseits die Porosität wesentlich größer ist als bei Beton mit natürlichen Zuschlägen und andererseits die Gefahr besteht, dass rezyklierte Zuschläge selbst chloridkontaminiert sind. Von daher müssen die Zusammenhänge bei der chloridinduzierten Stahlkorrosion in rezykliertem Beton noch entsprechend erarbeitet werden. Zudem

würden die Marktchancen für den noch jungen Baustoff „rezyklierter Beton“ steigen, wenn das Werkstoffverhalten in einem so kritischen Gesichtspunkt entsprechend durchleuchtet ist und die Aspekte der Dauerhaftigkeit für die Zukunft zweifelsfrei dargestellt werden können.

## 1.2 Ziel dieser Arbeit

Ziel für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen ist es, die in der Baupraxis in rezyklierten Betonen auftretenden Transportvorgänge von Wasser und Chlorionen darzustellen und so zu beurteilen, dass daraus ableitbare Risiken hinsichtlich chloridinduzierter Korrosion abgeschätzt werden können.

Dabei sollen in erster Linie die Grundlagen und alle wichtigen Materialparameter für den Transport von Chlorionen und Wasser in rezykliertem Beton erforscht werden. Die Entwicklung eines Transportmodells für Wasser und Chlorid in rezykliertem Beton steht nicht im Vordergrund dieser Arbeit, da im Rahmen zahlreicher Arbeiten für herkömmlichen Beton bereits entsprechende Modelle entwickelt wurden und angenommen wird, dass eine Übertragbarkeit von diesen auf rezyklierten Beton möglich ist. Jedoch fehlen für die Anwendung dieser Modelle notwendige Materialeigenschaften von rezyklierten Betonen, also die Eingangsparameter für die Modelle.

Die Transport-Modelle gelten aber ohne Einschränkung nur für den Fall, dass die Chloridquelle außerhalb des Betons liegt, die Belastung also von „außen“ erfolgt. Dabei werden Modelle unterschieden, die von einer konstanten Chloridbelastung ausgehen, also z.B. Stahlbetonbauwerke in Meerwasserumgebung und solche die von wechselnder Chloridbelastung ausgehen, also z.B. Bauwerke im Kontakt mit Streusalzbelastung.

Beim Einsatz von rezykliertem Beton sind diese Belastungsarten auch möglich. Es gibt aber noch eine zusätzliche Gefahr der chloridinduzierten Korrosion bei rezykliertem Beton: die Belastung durch Chloride von „innen“. Es ist nämlich durchaus möglich, dass chloridkontaminierter Altbeton, z.B. aus Abbrüchen von Tiefgaragen oder Straßenbauwerken, vor der Aufbereitung nicht aussortiert wird und als Zuschlag in neuen Beton gelangt. Durch Umverteilungsprozesse können Chloride aus den rezyklierten Zuschlägen heraus in die umgebende Betonmatrix hinein abgegeben werden und Korrosion an der Stahlbewehrung auslösen. Dieser im Vergleich zu anderen Betonarten nur bei rezykliertem Beton auftretenden Gefahr der Chloridbelastung ist bislang national und international nur eine geringe Aufmerksamkeit geschenkt worden. Von daher ist es eines der vordringlichsten Ziele dieser Arbeit, die Grundla-

gen für diese Art der Chloridbelastung zu erarbeiten und daraus resultierende Korrosionsrisiken abzuschätzen.

Da der Chloridtransport in zementgebundenen Baustoffen in großen Anteilen an den Transport von Wasser gebunden ist, wurde in weiten Teilen der Arbeit gerade dem Aspekt des Wassertransports in rezykliertem Beton große Aufmerksamkeit geschenkt. Dabei wurden keine neuen Methoden zur Beobachtung des Wassertransports erarbeitet, sondern vielmehr bestehende Methoden, die sich in Versuchen an herkömmlichen Betonen bewährt haben, angepasst und optimiert, so dass auch bei rezyklierten Betonen aussagekräftige Ergebnisse erhalten werden konnten.

Gegenstand dieser Arbeit ist auch die Analyse der Mikrostruktur in der Phasengrenzfläche von rezykliertem Beton, da diese nach dem heutigen Stand der Erkenntnis einen ganz wesentlichen Einfluss auf die Transportvorgänge ausübt.

### 1.3 Vorgehensweise

Eine Übersicht für die zur Lösung der o.g. Problemstellung notwendigen Schritte ist **Bild 1** zu entnehmen. Zunächst wurde die Mikrostruktur von rezykliertem Beton an der Grenzfläche zwischen rezykliertem Zuschlag und umgebender Zementsteinmatrix mit Hilfe speziell entwickelter Probekörper analysiert. Dabei wurde vor allem der Vorgang des Wassersaugens von rezyklierten Zuschlägen untersucht, da durch diesen die Mikrostruktur bei rezyklierten Betonen am stärksten beeinflusst bzw. verändert werden kann.

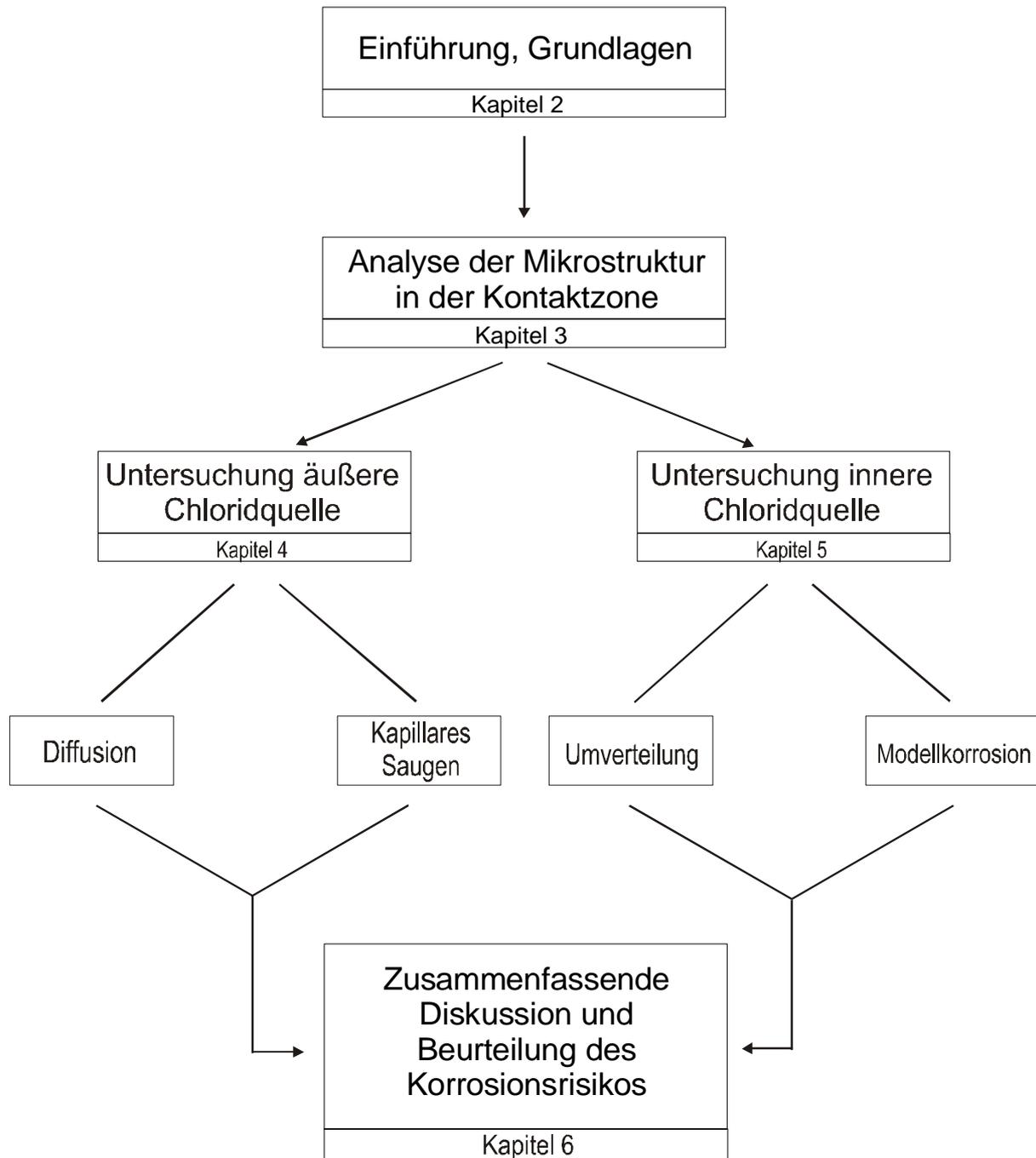
Anschließend wurden die maßgebenden Zusammenhänge und Transportprozesse bei einer „äußeren“ Chloridquelle ermittelt. Dabei wurden vor allem betontechnologische Parameter (w/z-Wert, Zementart, Zusätze) sowie Menge und Art des rezyklierten Zuschlags in den rezyklierten Betonen variiert, um zu überprüfen, ob die für herkömmlich zusammengesetzten Beton geltenden Gesetzmäßigkeiten auch auf rezyklierten Beton übertragbar sind. Zur Bestimmung des Chloridtransports wurden hierzu Schnell-Migrationsversuche und stationäre Lagerungsversuche in Chloridlösung mit anschließender Bohrmehlentnahme durchgeführt. Zur Bestimmung des Wassertransports wurden neben der herkömmlichen Methode über die Wägung etc. auch Messungen des Beton-Elektrolytwiderstandes durchgeführt.

Zur Klärung der Transportprozesse bei einer „inneren“ Chloridquelle wurden spezielle Modellprobekörper entwickelt. Mit diesen konnte ein „eindimensionaler“ Transportprozess von Chlorionen aus einem simulierten Betonsplittkorn heraus in die umgebende Matrix des neuen Betons hinein untersucht werden. Damit wurde der zentralen Frage nachgegangen, ob die

bislang für das Eindringen von Chloriden bekannten betontechnologischen Einflüsse der Chloridbindung auch auf den Vorgang der Umverteilung aus einem Beton bzw. Betonsplitt heraus übertragen werden können. Mit diesen Versuchen war auch beabsichtigt die Einflussgrößen zu ermitteln, die eine besondere Gefahr für die Korrosion von Stahl in rezykliertem Beton - bei der Verwendung chloridkontaminierter Betonsplitt - darstellen. Für diese Versuche wurde die Zusammensetzung des Betonsplitts (w/z-Wert, Zementart) variiert. Besonderes Augenmerk wurde dabei auch auf eine Lagerung der simulierten Betonsplittkörner vor dem Aufbringen der neuen Betonmatrix gelegt. Diese Lagerung sollte alle Aspekte umfassen, die auch bei der Lagerung von rezyklierten Zuschlägen nach der Aufbereitung (im Aufbereitungswerk oder im Frischbetonwerk) möglich sind. Zusätzlich wurden auch Waschprozesse untersucht, um mögliche sinnvolle Vorbehandlungsmaßnahmen für chloridkontaminierte, rezyklierte Zuschläge zu erarbeiten, die auch in der Praxis durchführbar sind. Nach bis zu 100 tägiger Lagerungsdauer wurden die Modellprobekörper gespalten und so konnten mit Hilfe chemischer Analysen die Wanderung der Chlorionen und über Wägung der Wassertransport bestimmt werden.

Da die Beobachtung von Wassertransportprozessen in Beton mit Hilfe von Wägung keine besonders hohe Auflösung zulässt, wurde daneben an ebenfalls speziell entwickelten Modellprobekörpern der Wassertransport mit Hilfe der Dämpfung eines den Probekörper durchstrahlenden Mikrowellensignals untersucht. Mit dieser Methode ist eine hohe Orts- und Zeitauflösung möglich. Bei der Versuchsreihe wurde neben der Art und Zusammensetzung des simulierten, rezyklierten Zuschlagkorns auch die Zusammensetzung der umgebenden Betonmatrix variiert (Zementart, Zusätze, w/z-Wert).

Schließlich wurde das tatsächliche Risiko der chloridinduzierten Korrosion infolge sich umverteilender Chlorionen mittels eines modifizierten Korrosionsversuchs beobachtet. Bei diesem wurden gezielt einzelne chloridhaltige Betonsplittkörner unter Variation diverser betontechnologischer Parameter in eine Probe einbetoniert und mögliche Korrosionsprozesse messtechnisch erfasst.



**Bild 1:** Übersicht über die Vorgehensweise und Kapitelstruktur dieser Arbeit

## 2 Stand des Wissens

### 2.1 Grundsätzliches zur Technologie von rezykliertem Beton

#### 2.1.1 Historie

Die Herstellung von rezykliertem Beton, also Beton, der neben Naturzuschlag auch Mengen an aufbereiteten, mineralischen Bauabfällen, sogen. rezyklierte Zuschläge beinhaltet, ist keine neue Idee. Schon in den Jahren nach dem 2. Weltkrieg wurde aufbereitetes, mineralisches Trümmermaterial (in erster Linie Ziegelsplitt) von zerstörten Bauwerken als Zuschlag für die Herstellung von Beton verwendet [CHA52]. Aufgrund der abnehmenden Trümmer-Mengen verschwand in den Folgejahren der Einsatz von Ziegelsplitt fast vollständig vom Markt. Mit zunehmenden Interesse am Umweltschutz und den Ideen, mineralische Bauabfälle nicht ungenutzt in Deponien zu verkippen, begann man Ende der 70er Jahre diese Technologie wieder aufzugreifen und zu vertiefen [NIX78]. In den darauffolgenden Jahren wurde in der ganzen Welt mit Hilfe zahlreicher Forschungsarbeiten die Technologie des rezyklierten Betons laufend verbessert [WES82, HAT86]. Mittlerweile gibt es in einigen europäischen Ländern, so z.B. in der Schweiz [SIA94] oder auch in Holland [VBT95] Richtlinien und Normen für den Einsatz von mineralischen Bauabfällen als Zuschlag in Beton für Hochbaukonstruktionen. Auch in Deutschland gibt es seit 1998 eine Anwendungsrichtlinie des DAfStb [DAR98], in der die Herstellung von rezykliertem Beton unter Verwendung von Betonsplitt geregelt ist.

Im Bereich des Straßenbetons wurde die Technologie der Wiederverwendung alter Betonfahrbahndecken seit 1990 erforscht [FRA93, FRA94, SOM90, SPR93, SPR96, VOL92, SOD97]. Seit 1998 gibt es hier eine Anwendungsrichtlinie [FGSV] der Forschungsgemeinschaft Straßen- und Verkehrswesen. Der abgebrochene Beton wird jedoch nicht uneingeschränkt eingesetzt. Als Zuschlag wird dieser nur in den Unterbeton mehrschichtiger Betonfahrbahndecken eingebaut.

## 2.1.2 Rezyklierte Zuschläge

### 2.1.2.1 Zusammensetzung

Aufgrund der Situation beim Abbruch von Gebäuden können sich Art, Herkunft und Zusammensetzung der rezyklierten Zuschläge stark unterscheiden. Bei einem kontrollierten Rückbau ist es möglich nahezu sortenreine Abfälle zu gewinnen. So sind Reinheitsgrade von 95 % (bei z.B. Ziegelsplitt oder Betonsplitt) technisch ohne weiteres machbar, beim Abbruch von reinen Betonkonstruktionen wie z.B. Betonfahrbahndecken, sind Reinheitsgrade von mindestens 99 % üblich. Generell überwiegt jedoch der Mischabfall, also das, was üblicherweise als Bauschutt bezeichnet wird und dieser kann, auch regional bedingt, größere Schwankungen in der Zusammensetzung besitzen [GEW98].

Betonsplitt besitzt je nach Herkunft des Altbetons und der gewählten Aufbereitungsmethode unterschiedliche Anteile an Naturzuschlag und Zementstein. Tendenziell besitzen Betonsplitt aus Altbetonen niedrigerer Druckfestigkeit und Korngrößen  $> 8$  mm geringere Anteile an Zementstein als solche aus Albetonen hoher Druckfestigkeit und Korngrößen  $< 8$  mm [FRI99].

Die Art und Menge der schädlichen Bestandteile in rezyklierten Zuschlägen hängt i.d.R. von der Kontamination des Abbruchbauwerks ab. Hinsichtlich der maximalen Anteile an schädlichen Bestandteilen werden jedoch die Grenzwerte, wie sie für Naturzuschlag gelten, als ausreichend angesehen [BUD96]. Zur besonderen Problematik bei chloridhaltigen, rezyklierten Zuschlägen wird auf das Kapitel 2.1.2.3 verwiesen.

### 2.1.2.2 Eigenschaften

Die Rohdichte von rezykliertem Zuschlag ist einer der wichtigsten Qualitäts-Parameter, da über diese die Gleichmäßigkeit des Produkts gut kontrolliert werden kann. Die Rohdichte beträgt zwischen 2,0 und 2,5 kg/dm<sup>3</sup> und ist stark von der Zusammensetzung des aufbereiteten Materials abhängig. Tendenziell existieren bei allen rezyklierten Zuschlägen in den kleineren Kornklassen niedrigere Rohdichten als in den größeren Kornklassen, da sich während der Aufbereitung niederfestes, also in erster Linie auch poröseres Material in den kleineren Kornklassen ansammelt [DAH96, FRI99, BUY02].

Ähnlich verhält es sich auch mit der Wasseraufnahme. Aufgrund der beim Brechen sich sammelnden Feinteile in den kleineren Kornklassen wurden bei diesen höhere Wasseraufnahmen festgestellt [RAV88, KOB88]. Die höchste Wasseraufnahme zeigt grundsätzlich der

rezyklierte Brechsand. Dieser kann eine Wasseraufnahme von bis zu 12 M.-% aufweisen, rezyklierte Splitte dagegen weisen je nach Zusammensetzung Wasseraufnahmen zwischen 2 und 6 M.-% auf. Die Wasseraufnahme ist gerade bei der Herstellung von Frischbeton ein sehr wichtiger Wert, da stark wassersaugende Zuschläge dem Frischbeton so viel Wasser entziehen können, dass dieser nicht mehr verarbeitbar ist. Auch hinsichtlich möglicher Transportprozesse im rezyklierten Beton ist die Wasseraufnahme eine wichtige Größe, da Sie eine direkte Aussage über das kapillare Saugvermögen gibt.

Rezyklierte Zuschläge besitzen i.d.R. eine raue Oberfläche [BUD96]. Die Kornform ist, wie schon aus der Herstellung von Naturzuschlägen bekannt, von der Aufbereitungstechnik abhängig [FEI78]. Durch optimierte Aufbereitungstechnologien ist es heutzutage kein Problem, rezyklierte Zuschläge im Sieblinienbereich zwischen A und B herzustellen [KRA94].

Der Frostwiderstand von rezyklierten Zuschlägen wird durch die porösen Bestandteile des Gemisches entscheidend beeinflusst. Da diese in Abhängigkeit von der Art und Herkunft des rezyklierten Zuschlags stark variieren können, sind Aussagen zur generellen Frostbeständigkeit nicht möglich [GLU93, KRA94, FRA93, SPR93].

Die Festigkeitseigenschaften von Naturzuschlägen können im Rahmen der Überwachung mit Verfahren bestimmt werden, die z.T. aus der Untersuchung von Straßenbausplitten (Schlagzertrümmerungsversuch, Los-Angeles-Versuch) oder Leichtbetonzuschlägen (Kornfestigkeit) stammen. Bei rezyklierten Zuschlägen macht das jedoch keinen Sinn, da keine Zusammenhänge zwischen den im Versuch ermittelten Festigkeitseigenschaften von rezyklierten Zuschlägen und mechanisch/physikalischen Eigenschaften von rezykliertem Beton bestehen. Demzufolge besteht auch keine Notwendigkeit, die Festigkeitseigenschaften von rezyklierten Zuschlägen – im Rahmen von Überwachungs- oder Eignungsprüfungen – zu bestimmen [FRI99].

Auch die Bestimmung der Altbetongüte bei der Verwendung von Betonsplitten ist keine zielführende Kenngröße, da gerade hinsichtlich der Wasseraufnahme zahlreiche sich widersprechende Forschungsergebnisse vorliegen [RAV88, DAH96, FRI99].

### 2.1.2.3 Chloridgehalte

Bei der Herstellung von rezyklierten Zuschlägen wird im Rahmen der Überwachung der Chloridgehalt der rezyklierten Zuschläge bestimmt [DAR98]. Dabei wird infolge der Fremdüberwachung zweimal im Jahr und infolge der werkseigenen Produktionskontrolle, deren Prüfintervall vom Fremdüberwacher festgelegt wird, der Chloridgehalt bestimmt. Die Probe-

nahme ist in der DIN 4226-100 [DIN1] geregelt und gibt vor, dass in Abhängigkeit vom Größtkorn des untersuchten Zuschlaggemisches maximal 65 kg aus der laufenden Produktion entnommen werden müssen. Von dieser Menge wird dann anschließend 1 kg abgetrennt und daran der Chloridgehalt bestimmt. Dieser darf nicht mehr als 0,04 M.-% betragen. Selbst wenn im Rahmen der werkseigenen Produktionskontrolle die Prüfhäufigkeit auf mindestens einmal pro Woche erhöht werden würde, können größere Mengen chloridhaltiger rezyklierter Zuschläge im Rahmen der Überwachung nicht erfasst werden.

In [HAT86] sind verschiedene Arbeiten zitiert, in denen der Chloridgehalt verschiedener Betonsplitt untersucht wurde. Demzufolge wurden Chloridgehalte von 0,2 M.-% bei Betonsplitt aus Straßenbeton, von 0,37-3,4 M.-% bei einem Betonsplitt aus Beton von einem Parkhaus und von bis zu 7,5 M.-% bei einem Betonsplitt aus Beton, der mit chloridhaltigem Sand hergestellt wurde, festgestellt (die angegebenen Gehalte beziehen sich auf den Zementgehalt im Altbeton).

### 2.1.3 Betonherstellung / Frischbetoneigenschaften

Rezyklierte Zuschläge saugen aufgrund ihrer Porosität deutlich mehr Wasser als herkömmliche Naturzuschläge. Bei der Herstellung von Frischbeton kann dies zu einem Verlust der Verarbeitbarkeit führen. Zwar könnte dies durch die Verwendung von modernen Fließmitteln kompensiert werden, aus betontechnologischer Sicht ist dies jedoch nicht empfehlenswert, da das von den Zuschlägen aufgesaugte Wasser nicht wieder abgegeben und dadurch der rechnerische  $w/z$ -Wert verändert wird.

In der Literatur sind zahlreiche, z.T. sehr voneinander abweichende Methoden genannt, mit denen das Wassersaugen berücksichtigt wird. In [HAT86] wird der höhere Wasseranspruch durch eine Zugabe von pauschal 5 M.-% des Anmachwassers berücksichtigt. Bei [ACK96] wird der rezyklierte Zuschlag nur durch einen Wasser-Sprühnebel benetzt. Häufig wird der Zuschlag aber im „vorgenässten“ Zustand (Lagerung unter Wasser) dem Mischer zuzugeben [PAD00, BUY02]. Dieses Vorgehen ist im übrigen auch bei der Anwendung von Betonsplitt im Straßenbau üblich [SPR93]. Von [DAH96] wurde dagegen eine Methode erarbeitet, mit der die Menge an Saugwasser exakt berücksichtigt werden kann und so eine Einhaltung des rechnerischen  $w/z$ -Werts möglich ist. Dabei wurde nachgewiesen, dass ofengetrocknete rezyklierte Zuschläge innerhalb von 10 Minuten rund 90 % der maximalen Saugwassermenge aufnehmen und nicht wieder abgeben. Von daher wird vor der Herstellung von Frischbeton das sogenannte „10-minütige Saugwasser“ an ofentrockenen Betonsplitt bestimmt und dann diese Menge an Wasser dem Zuschlaggemisch 10 Minuten vor dem eigentlichen Herstellen

des Betons in der Mischtrommel zuzugeben. Bei Verwendung von kernfeuchten rezyklierten Zuschlägen wird nur die Differenz zur Eigenfeuchte zugegeben. Eine ähnliche Vorgehensweise ist auch in [HÜN90, WES82] beschrieben, hier wird jedoch anstelle des 10-minütigen das 30-minütige Saugwasser und bei [IVA85] das 60-minütige Saugwasser angesetzt. Die mit den unterschiedlichen Saugwasser-Zeiten hergestellten Betone weisen jedoch keine charakteristischen Unterschiede auf.

Während des Mischens können von minderfesten Anteilen des rezyklierten Zuschlaggemisches feine Bestandteile abgerieben werden. Demzufolge besteht bei längerem Mischen die Gefahr eines stärkeren Ansteifens des Frischbetons im Vergleich zu Normalbetonen mit Naturzuschlag [HAT86].

## 2.1.4 Mechanische und physikalische Festbetoneigenschaften

### 2.1.4.1 *Druckfestigkeit*

Rezyklierter Beton, bei dem der Naturzuschlag vollkommen durch Betonsplitt ersetzt und das Wassersaugen der Zuschläge bei der Frischbetonherstellung berücksichtigt wurde, weist im Vergleich zu einem Beton mit Naturzuschlag bei gleicher Mischungszusammensetzung eine um ca. 20-30 % niedrigere Druckfestigkeit auf [NIX78, HAT83, RAV88, WES82, IVA85].

Wenn bei der Herstellung von rezykliertem Beton die Kornklasse 0/4 ausschließlich mit Natursand hergestellt wird, beträgt der Festigkeitsabfall nur noch 10-20 % gegenüber einem Vergleichsbeton mit Naturzuschlag [DEI93, LUK93].

Bei der Druckfestigkeit und auch bei den weiteren und im Folgenden beschriebenen Festigkeitseigenschaften von rezykliertem Beton ist es nicht immer ganz einfach, die Ergebnisse verschiedener Forscher direkt miteinander zu vergleichen. Dies liegt daran, dass das Wassersaugen der rezyklierten Zuschläge völlig unterschiedlich gehandhabt, manchmal sogar gar nicht berücksichtigt wird. Folglich kann nicht vollständig ausgeschlossen werden, dass Änderungen der Eigenschaften darauf zurückzuführen sind, dass durch die saugenden Zuschläge der rechnerische  $w/z$ -Wert beeinflusst wird. Dies zeigt z.B. auch die Arbeit von [SCHU87]. Hier wurden rezyklierte Betone unter Verwendung von ofengetrockneten rezyklierten Zuschlägen hergestellt und die Verarbeitbarkeit ausschließlich über Fließmittel eingestellt. Dadurch wurden um bis zu 35 % höhere Druckfestigkeiten als bei einem Vergleichsbeton mit Naturzuschlag und gleicher Mischungszusammensetzung erreicht.

Grundsätzlich ist der Abfall der Druckfestigkeit wohl damit zu erklären, dass im rezyklierten Beton ungünstigere Steifigkeitsverhältnisse im Gefüge vorhanden sind (im Vergleich zu Normalbeton), möglicherweise aber auch eine Vorschädigung des Betonsplitts durch die Aufbereitung nicht auszuschließen ist [IVA85].

Aufgrund dieser Erkenntnisse wird in der deutschen Baupraxis rezyklierter Beton im Außenbauteil unter Frostbeanspruchung nur mit einer maximalen Verschnittmenge von 20 Vol.-% Betonsplitt (bezogen auf das Volumen des gesamten Zuschlags) unter Berücksichtigung des 10-minütigen Saugwassers des Betonsplitts bei der Frischbetonherstellung zugelassen<sup>1</sup>. Ein so zusammengesetzter Beton zeigt dann keine signifikanten Druckfestigkeitseinbußen im Vergleich zu Beton mit Naturzuschlag.

Bei der Verwendung von Mauerwerksabbruch wird die Druckfestigkeit des rezyklierten Betons durch die Festigkeit des aufbereiteten Ziegels beeinflusst, d.h., je höher die Steifigkeit ist, desto geringer ist der Abfall der Druckfestigkeit im Vergleich zu Betonen mit Naturzuschlag [PAD01, DEV99]. Bei der Verwendung von Betonsplitt dagegen konnte keine Abhängigkeit zur Druckfestigkeit des Altbetons nachgewiesen werden [HAT83, RAV88, FRI00, PAD00].

#### 2.1.4.2 E-Modul

Ähnlich wie bei der Druckfestigkeit liegt auch der E-Modul um ca. 10 bis 30 % unter dem E-Modul von Vergleichsbeton mit natürlichen Zuschlägen. Durch die Verwendung von Natursand anstelle Brechsand kann der E-Modul von rezykliertem Beton aber erhöht werden. Der E-Modul von Beton wird i.W. von den E-Moduln seiner Komponenten, also dem Zementstein und dem Zuschlag, bestimmt. Von daher sind die im vorliegenden Fall geringeren E-Moduln der rezyklierten Betone eindeutig auf den – im Gegensatz zu Naturzuschlägen – deutlich geringeren E-Modul der rezyklierten Zuschläge zurückzuführen. Bei der Verwendung von Betonsplitt ist es der insgesamt erhöhte Anteil an Zementstein, der dazu führt, dass der E-Modul reduziert wird [IVA85]. Auch die Herkunft des Naturzuschlags im Altbeton und damit im Betonsplitt wirkt sich sehr stark auf den E-Modul von rezykliertem Beton aus [HAT86].

---

<sup>1</sup> Diese Vorgabe wird zur Zeit überarbeitet. In der zukünftigen Regelung sind höhere Ersatzraten aber auch die Verwendung von Baumischabfällen (bislang nur sortenreiner Betonsplitt) vorgesehen. In Abhängigkeit von der Umweltklasse sind dann Ersatzraten von bis zu 45 Vol.-% (bezogen auf das Volumen des gesamten Zuschlags) bei den rezyklierten Zuschlägen > 2 mm möglich.

### 2.1.4.3 *Schwinden/Quellen*

Rezyklierte Betone zeigen gegenüber Betonen mit Naturzuschlag ein um 40 bis 60 % höheres Schwinden [HAT85, HAT86, SAG01]. Alleine die Verwendung von rezykliertem Sand verschlechtert das Schwindverhalten sehr stark. Denn bei rezyklierten Betonen, bei denen lediglich die Kornklasse 0/4 durch Betonbrechsand ersetzt wurde, wurden schon um 40 % höhere Schwindmaße gemessen als bei einem Beton mit Natursand [RAV87]. Auch das Vornässen der Zuschläge wirkt sich auf das Schwind- und Quellverhalten aus, da rezyklierter Beton mit vorgemischten Zuschlägen mehr schwindet und dementsprechend weniger quillt als ein Vergleichsbeton mit Naturzuschlag [SPR96]. Die höheren Schwindmaße resultieren in erster Linie daraus, dass rezyklierter Zuschlag aufgrund seines deutlich niedrigeren E-Moduls die Schwindverformung weniger behindern kann [TAV96]. Darüber hinaus spielt natürlich auch die Porosität und damit die Fähigkeit Wasser leicht ab- bzw. aufnehmen zu können eine Rolle.

### 2.1.5 Bisherige Erkenntnisse zur Dauerhaftigkeit

#### 2.1.5.1 *Carbonatisierung*

Die in Laborversuchen an rezyklierten Betonen gemessenen Carbonatisierungstiefen sind wegen der insgesamt höheren Gesamtporosität i.d.R. um ca. 5-10 % größer als bei Normalbeton mit Naturzuschlag [FRI99, RYU02, BUY02, SAG02]. Es wurden aber auch bis zu 100 % größere Carbonatisierungstiefen gemessen [HAT86]. Bei Verwendung von Betonsplitt können aber auch durch die insgesamt deutlich höhere Alkalitätsreserve geringere Carbonatisierungstiefen im Vergleich zu Beton mit Naturzuschlag auftreten [IKE88, COR02]. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass der verwendete Betonsplitt unmittelbar nach dem Brechen weiterverarbeitet werden muss, da er sonst selbst Carbonatisierungsprozessen und damit einer Reduzierung der Alkalitätsreserve ausgesetzt ist. Ähnlich zu betrachten sind auch Waschprozesse bei Betonsplitten, da dadurch Bestandteile ausgewaschen werden können, die zur Alkalitätsreserve beitragen [YAN88].

#### 2.1.5.2 *Eindringen von Wasser und Chlorid*

In [PIE02] wurden Chloridprofile an Betonproben aus rezyklierten Beton bestimmt, die 5 Wochen in 3 %-iger NaCl-Lösung gelagert wurden. Anhand der Chloridprofile und unter Annahme der Fick'schen Diffusionsgesetze wurden dann Chloriddiffusionskoeffizienten berechnet. Dabei wurde bei rezykliertem Beton mit Betonsplitt und Betonbrechsand eine Erhöhung

des Diffusionskoeffizienten um 50 %, bei Beton mit Mischabbruch und Mischbrechsand um 165 % festgestellt. Bei geringeren Brechsandgehalten jedoch nahm der Diffusionskoeffizient wieder deutlich ab. Bei [COR02] hingegen wurde bei Chloridlagerungsversuchen in 10 %-iger NaCl-Lösung eine Erhöhung des Chlorideindringwiderstandes bei Beton mit Betonsplitt festgestellt. Bei zyklischen Chlorid-/Trocken-Wechselagerungen an Betonen mit Betonsplitt wurde festgestellt, dass der Chlorideindringwiderstand der rezyklierten Betone anstieg, wenn Betonsplitt mit höherer Altbetongüte verwendet wurde [KIK94]. Bei [LIM00] wurde in klassischen Diffusionsversuchen an Betonen mit Betonsplitt keine Veränderung der Chloriddiffusion in Abhängigkeit von der Zugabemenge an Betonsplitt festgestellt. Diese an sich völlig unterschiedlichen Ergebnisse können nur dadurch erklärt werden, dass bei der Herstellung von rezyklierten Beton das Wassersaugen der rezyklierten Zuschläge entweder gar nicht oder völlig unterschiedlich gehandhabt wurde.

Bezüglich des Transports von Wasser in rezykliertem Beton wurde in kapillaren Saugversuchen festgestellt, dass rezyklierter Beton mehr Wasser aufnimmt als vergleichbar zusammengesetzter Beton mit Naturzuschlag [PAD02, BUY02, WIR00]. Ähnlich widersprüchlich wie bei den Chloridversuchen gibt es aber auch hier Ergebnisse, die darauf hinweisen, dass die kapillare Wasseraufnahme mit natürlichem Beton vergleichbar ist [SAG01]. Darüber hinaus konnte ermittelt werden, dass rezyklierter Beton mehr Wasser aufnimmt, wenn: a) Zuschläge aus kleineren Kornfraktionen verwendet werden, b) Betonsplitt mit höherer Festigkeit des Ausgangsbetons verwendet wird und c) Ziegelsplitt anstelle Betonsplitt verwendet wird [PAD02].

### 2.1.5.3 Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand

Die an zyklischen Frost-Tauwechsel-Versuchen bestimmten Frostwiderstände von rezykliertem Beton zeigen, dass rezyklierter Beton, der unterschiedliche Anteile an Beton, Mauerziegel oder Kalksandstein enthält, durchaus mit hohem Frostwiderstand hergestellt werden kann, jedoch mit zunehmendem Anteil an rezyklierten Zuschlag eine Abnahme des Frostwiderstandes festzustellen ist [MÜL01, KAS88, YAM88].

#### 2.1.5.4 *Korrosion von Stahl in rezykliertem Beton*

Bei [LIM00] wurden in eine Beton-Korrosionszelle Stähle eingebaut und diese anschließend einer zyklischen Nass-/Trockenlagerung in 2,5 %-iger NaCl-Lösung ausgesetzt. Gleichzeitig wurden kontinuierlich Strom- und Potentialmessungen an den Beton-Korrosionszellen durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass keine signifikanten Veränderungen auftraten, wenn anstelle von grobem Naturzuschlag Betonsplitt verwendet wurde.

Bei [TIT02] wurden Stahlbleche in Betonplatten einbetoniert und durch Vorbelastung gezielte Risse in den Betonplatten erzeugt. Die vorgerissenen Proben wurden dann in 10 %-iger NaCl-Lösung gelagert und auf der Betonoberfläche wurden Potential- und Widerstandsmessungen durchgeführt. Die Auswertung der Messungen ergab, dass Stahl in Beton mit Betonsplitt eine geringfügig stärkere Korrosionsneigung aufweist als in Beton mit Naturzuschlag.

## **2.2 Transportvorgänge von Wasser und Chlorionen in Beton**

### 2.2.1 Allgemeines

Der Transport von Wasser und Chlorionen in Beton ist schon seit mehreren Jahrzehnten Gegenstand der Forschung. Aus diesem Grund hat sich im Laufe der letzten Jahre eine sehr große Anzahl an Forschungsarbeiten und Veröffentlichungen zu dieser Thematik angesammelt. Diese alle hier darzustellen ist nicht möglich. Tatsächlich existiert eine sehr große Anzahl an Feuchtetransportphänomenen im Beton, sowohl im flüssigen als auch im gasförmigen Aggregatzustand des Wassers. Ein guter Überblick hierüber ist in [KIE83] gegeben. Aus baupraktischen Gesichtspunkten werden in der vorliegenden Arbeit lediglich der flüssige Transport von Wasser in Form von kapillarem Saugen und Diffusion von Chlorionen berücksichtigt, da diese die maßgebenden Mechanismen sind und auch am häufigsten in der Praxis auftreten.

Im folgenden werden u.a. auch die Erkenntnisse der Literatur zitiert, die an Leichtbetonen mit porösen Zuschlägen gewonnen wurden, da Leichtbetonzuschläge ein den rezyklierten Zuschlägen ähnliches Verhalten und Eigenschaften aufweisen können. In einem ergänzenden Kapitel wird ebenfalls auf die Bedeutung der Mikrostruktur des Zementsteins in der Kontaktzone bei Transportprozessen eingegangen.

## 2.2.2 Transportarten

### 2.2.2.1 Kapillartransport

Für den Fall, dass ein Beton nicht ununterbrochen im durchfeuchteten Zustand vorliegt oder mit einer wechselnden Befeuchtung belastet ist, muss für von außen eindringendes Chlorid oder Wasser der Kapillartransport im porösen Zementstein als wesentlicher Mechanismus angesehen werden. Eine exakte theoretische Beschreibung des kapillaren Wassertransports in Beton bzw. Zementstein liegt bis heute noch nicht vor. Das liegt vor allem daran, dass die Hohlraumstruktur des Zementsteins viel zu komplex ist, als dass sie durch mathematisch/physikalische Modelle exakt erfasst werden kann. Eine gute Annäherung der kapillar transportierten Wassermenge ist für viele poröse Baustoffe mit der folgenden Gleichung möglich:

$$m_w(t) = A\sqrt{t} \quad \text{(Gleichung 1)}$$

mit  $A$  = Wasseraufnahmekoeffizient [ $\text{kg}/\text{m}^2\sqrt{\text{s}}$ ]

$t$  = Zeit

$m_w$  = aufgenommene Wassermenge [ $\text{kg}/\text{m}^2$ ]

Der sogenannte Wasseraufnahmekoeffizient  $A$  hängt stark von den Eigenschaften des Baustoffs (Porosität, Porenverteilung) ab und ergibt sich aus dem Zusammenhang zwischen der flächenbezogenen Wasseraufnahme und der Quadratwurzel der Saugzeit. Mit der **Gleichung 1** ist jedoch keine Aussage über die tatsächliche Wassergehaltsverteilung im Beton möglich. Daneben ist zu berücksichtigen, dass die kapillare Steighöhe in Beton nur anfangs nach dem  $\sqrt{t}$ -Gesetz erfolgt aber schon sehr bald verlangsamt und schließlich eine maximale Steighöhe, je nach Porenverteilung und Feuchtigkeitsgehalt des Betons, erreicht [BED99]. Die Ursache für diese sogenannte „Selbstabdichtung“ sind bis heute nicht genau bekannt und für die Erklärung werden verschiedene Mechanismen genannt [RUC03].

Mit dem Wasser können gleichzeitig Chlorionen oder auch andere Ionen transportiert werden. Dieser Vorgang wird als Konvektion oder „Huckepack-Transport“ bezeichnet. Allgemein wird der Huckepack-Transport durch Erweiterung der **Gleichung 1** formuliert:

$$m_{Cl}(t) = \frac{c_f}{\rho_w} A \sqrt{t} \quad (\text{Gleichung 2})$$

mit  $c_f$  = Salzkonzentration der Lösung [kg/m<sup>3</sup>]  
 $\rho_w$  = Dichte des Wassers [kg/m<sup>3</sup>]  
 $m_{Cl}$  = aufgenommene Chloridmenge [kg/m<sup>2</sup>]

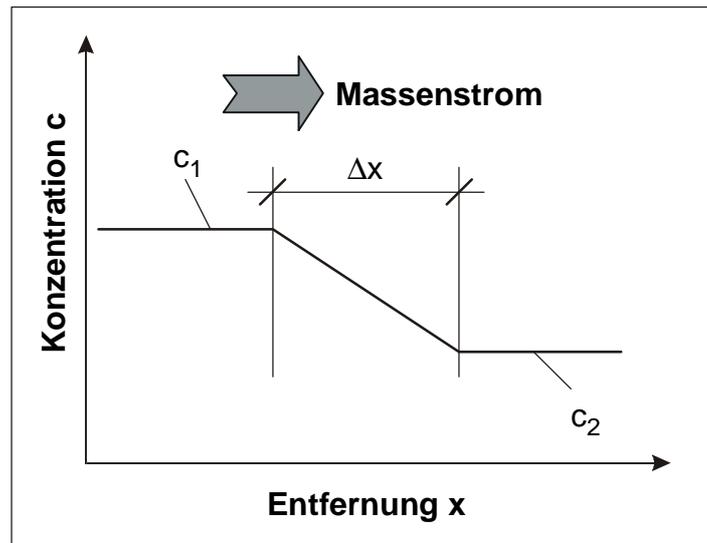
Häufig können jedoch mit dieser physikalischen Beziehung Versuchsergebnisse nicht bestätigt werden, was vor allem daran liegt, dass die Chlorideindringfront der Eindringfront durch das kapillar eindringende Wasser hinterherläuft [VOL91]. Darüber hinaus hat sich auch bei Messungen von kapillar saugenden Betonproben gezeigt, dass die Wasseraufnahme - insbesondere wenn salzhaltige Lösungen verwendet werden - nicht mit dem Wurzel-t-Gesetz beschrieben werden kann [BED02].

#### 2.2.2.2 Diffusion

Für einen Beton/Zementstein, dessen Porenraum nahezu vollständig gesättigt vorliegt, ist davon auszugehen, dass ein Eindringen von Chlorionen im wesentlichen mit den mathematisch/physikalischen Gesetzen der Diffusion beschrieben werden kann. Generell lässt sich ein Konzentrationsausgleich gut mit den Fickschen Gesetzen darstellen. Für den stationären Fall, also wenn die Ausgangskonzentration örtlich und zeitlich konstant bleibt und innerhalb des durchströmten Stoffes keine Bindeprozesse stattfinden, gilt das 1. Ficksche Diffusionsgesetz, **Bild 2**. Die Zusammenhänge werden durch die folgende Gleichung beschrieben:

$$J = -D \frac{\Delta c}{\Delta x} \quad (\text{Gleichung 3})$$

mit  $J$  = je Zeit und Flächeneinheit transportierte Stoffmenge [g/cm<sup>3</sup>s]  
 $\Delta c$  = Konzentrationsgefälle  $c_1 - c_2$  in der Lösung [g/cm<sup>3</sup>]  
 $\Delta x$  = Diffusionsweg [cm]  
 $D$  = Diffusionskoeffizient [cm<sup>2</sup>/s]



**Bild 2:** Beispielhafte Darstellung des stationären Diffusionsvorgangs

Der Diffusionskoeffizient stellt ein Maß für die Beweglichkeit des diffundierenden Mediums dar und hängt ganz entscheidend von den Eigenschaften der Stoffstruktur ab. Daneben wird der Diffusionskoeffizient aber auch von der Temperatur und der Konzentration der Lösung beeinflusst. Für den instationären Fall, also wenn sich die Konzentration örtlich und zeitlich ändert, wird die Diffusion mit dem 2. Fickschen Diffusionsgesetz dargestellt:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (\text{Gleichung 4})$$

Mit den Randbedingungen, dass ein einseitig weit ausgedehntes Volumen mit der Konzentration  $c_0$  und an dessen Außenfläche die konstante Konzentration  $c_s$  vorliegt, kann die Differentialgleichung durch Substitution über das Gauß'sche Fehlerintegral gelöst werden. Jedoch gelten die Fickschen Gesetze per Definition nur, wenn keine chemische Reaktion des diffundierenden Mediums mit der Matrix auftritt. Da Chlorionen sowohl physikalisch als auch chemisch vom Zementstein gebunden werden können, gibt es zahlreiche Ansätze, mit denen die **Gleichung 4** entsprechend modifiziert bzw. erweitert wird.

## 2.2.3 Betontechnologische Einflüsse auf den Transport von Wasser und Chlorid

### 2.2.3.1 Allgemeine Erkenntnisse

Das Eindringen von Wasser und Chlorid wird grundsätzlich durch alle betontechnologischen Maßnahmen reduziert, mit denen der Kapillarporenanteil des Zementsteins verringert wird. So erreicht man durch die Verringerung des w/z-Werts einen deutlich höheren Eindringwiderstand gegenüber Wasser und Chlorionen [JEN96, TAN92, MID84, RAN85, AZA93]. Durch

Zusatz von Silikastaub wird der Diffusionskoeffizient um ca. 5-20 % erniedrigt [SAN98, JEN99]. Wobei dieser Effekt sich bei einer Zugabe von bis zu 5 % ausschließlich in Betonen bzw. Mörteln und nicht in reinem Zementstein auswirkt, da durch den Silikastaub in erster Linie die Mikrostruktur der Kontaktzone verbessert wird [POO99].

Durch die Zugabe von Flugasche kann der Diffusionskoeffizient ebenfalls verringert werden. Hier liegen Versuchsergebnisse vor, die an ausreichend hydratisierten Betonen eine Verringerung von 20 bis nahezu 90 % ergaben [DHI96, SCH96, HAC85]. Durch eine Verfeinerung von Flugasche kann der Chlorideindringwiderstand noch einmal verbessert werden [SCH95]. Auch die Verwendung von Beton mit Hochofenzement wirkt sich positiv auf den Chlorideindringwiderstand aus, da sich bei diesen mit zunehmendem Hydratationsfortschritt und ausreichender Nachbehandlung die Kapillarporen stärker verengen als bei Beton mit Portlandzement [RAN85]. Dagegen wirkt sich die Verwendung von Portlandzement mit einem niedrigen  $C_3A$ -Anteil schlecht auf den Chlorideindringwiderstand aus, da hier weniger Chlorionen chemisch gebunden werden können und somit eine größere Menge für den Transport zur Verfügung steht [ARY90, HAC85, TRI84].

Über die Auswirkung der Art und Herkunft des Zuschlags gibt es unterschiedliche Ergebnisse, wobei aber das Ausmaß der festgestellten Einflüsse gegenüber den vorgenannten als eindeutig untergeordnet eingestuft werden muss. Nach [VO95A] kann die Herkunft des Zuschlags die im Porenwasser auftretende  $OH^-$ -Konzentration beeinflussen. Da diese im Zusammenhang mit dem Chloridbindevermögen des Zementsteins steht, ist der Gehalt an freien Chlorionen auch von der Art des Zuschlags bestimmt. Als besonders günstig erweisen sich hier offensichtlich Basalt-Zuschläge, wohingegen Quarzzuschläge sich auf den Chlorideindringwiderstand neutral auswirken [JEN99].

### 2.2.3.2 Erkenntnisse aus Untersuchungen mit Leichtbetonzuschlägen

Offenporige Leichtbetonzuschläge sind – ähnlich den rezyklierten Zuschlägen – deutlich poröser und damit durchlässiger gegenüber Gasen und Flüssigkeiten als dichte Naturzuschläge. Demzufolge können Ergebnisse an diesen als Grundlage für Erkenntnisse an rezyklierten Zuschlägen herangezogen werden. Die höhere Durchlässigkeit der Leichtzuschläge führt dazu, dass auch Leichtbeton eine höhere Durchlässigkeit gegenüber eindringenden Medien aufweist. So zeigen hochfeste Betone mit Leichtbetonzuschlägen eine höhere Wasserdurchlässigkeit unter Druckbeaufschlagung als vergleichbare Betone mit Naturzuschlägen [ZHA91]. In einer Meer-Spritzwasser-Umgebung zeigen Betone mit Leichtzuschlag nach bis zu 270 tägiger Auslagerung geringfügig höhere Chloridgehalte als Betone mit Naturzuschlag

und vergleichbarer Festigkeit [ALK99]. Auch in stationären Diffusionsversuchen ergaben Versuche an Leichtbetonen höhere Diffusionskoeffizienten als an Betonen mit Naturzuschlag [POL95]. Schließlich zeigen auch Leichtmörtel ein ähnliches Verhalten. Bei Untersuchungen zur Porosität und zur Wasserdurchlässigkeit unter Druck wiesen Leichtmörtel eine nahezu doppelt so hohe Durchlässigkeit auf, wie Mörtel mit Natursand und gleichem Zuschlaggehalt [NYA85].

## 2.2.4 Die Bedeutung der Mikrostruktur des Zementsteins in der Kontaktzone

### 2.2.4.1 Allgemeines, Untersuchungsmethoden

In der Mikrostruktur von Beton besitzt die Grenzfläche zwischen Zuschlag und Zementstein eine große Bedeutung. Denn diese und der sich daran anschließende Übergangsbereich im Zementstein ( $d \approx 50\text{-}70 \mu\text{m}$ ) unterscheiden sich in erster Linie durch eine größere Porosität von den tiefer liegenden Bereichen, in denen der Zementstein homogen zusammengesetzt ist. Dies hat zur Folge, dass die mechanischen Eigenschaften, aber auch die Transporteigenschaften von Beton durch die Übergangzone entscheidend beeinflusst werden. Gemäß der in der Literatur üblichen Konvention wird für die weiteren Ausführungen die Phasengrenzfläche zwischen Zuschlag und Zementstein selbst als Kontaktschicht, der daran anschließende Bereich als Übergangzone bezeichnet.

Rezyklierte Zuschläge weisen gegenüber Naturzuschlägen eine wesentlich größere Porosität auf. Dadurch kann einerseits – bei trockenen Zuschlägen – dem Zementleim Wasser entzogen und andererseits – bei feuchten Zuschlägen – auch Wasser zugeführt werden. Von daher ist zu erwarten, dass sich beim rezyklierten Beton die Mikrostruktur in der Kontaktzone und in der Übergangzone ganz wesentlich von Beton mit Naturzuschlägen unterscheidet. Untersuchungen zur Mikrostruktur von rezykliertem Beton liegen bislang noch nicht vor.

Neben einigen apparativ sehr aufwendigen Methoden wie Röntgen-Diffraktions-Analyse oder Röntgen-Photoelektronen-Spektroskopie [MON85A, GR80A, GR80B] wurde die Mikrostruktur lange Jahre alleine durch Betrachtung von Rasterelektronenmikroskopie (REM) – Bildern analysiert [DIA76, DIA86]. Wenn man sich jedoch vor Augen hält, dass durch die REM-Analyse immer nur ganz eng begrenzte Ausschnitte der Oberfläche betrachtet werden können, ist klar, dass damit allgemeingültige Aussagen sehr schwierig sind.<sup>2</sup> Von daher hat

---

<sup>2</sup> Bei der Betrachtung einer nur  $1 \text{ cm}^2$  großen Probe mit einer üblichen Vergrößerung von 10.000 unter dem REM repräsentiert eine Aufnahme nur 0,001 % der Oberfläche.

sich in den letzten Jahren immer mehr ein Verfahren durchgesetzt, mit dem auch größere und damit repräsentativere Bereiche der zu analysierenden Oberfläche untersucht werden können: die quantitative Bildanalyse anhand von Rückstreuelektronenbildern polierter Schliffe [ZHA89, SCR87, DIA96, SCR84].

In der Vergangenheit wurde immer wieder postuliert, dass die Mikrostruktur im Bereich zwischen Zuschlag und Zementstein einen nur geringen Einfluss auf die Transportprozesse besitzt [WAK84]. Das wurde häufig damit begründet, dass es keine Nachweise für einen bevorzugten Transport von Wasser bzw. Gasen in diesem Bereich gibt, aber auch mit der Theorie, dass die Diffusion von Ionen durch Zementstein unabhängig von der vorhandenen Porengröße ist [OLL96]. Zudem könnte man vermuten, dass durch die Zugabe von Zuschlag zu reinem Zementstein die Durchlässigkeit gegenüber Gasen und Flüssigkeiten herabgesetzt ist, da die möglichen Transportwege, also die Poren und Kapillaren, durch den Zuschlag unterbrochen werden. Jedoch trifft genau das Gegenteil zu. Mit zunehmendem Zuschlaggehalt und/oder mit zunehmender Korngröße der Zuschläge nimmt die Durchlässigkeit von Beton bzw. Mörtel zu [LAR93], wobei Leichtmörtel noch wesentlich stärker durchlässig sind als Mörtel mit dichtem Naturzuschlag [NYA85]. Dies ist letztlich nur dadurch zu erklären, dass die bei Verwendung von Zuschlägen entstehende Kontaktzone eine höhere Durchlässigkeit besitzen muss als der homogene Zementstein.

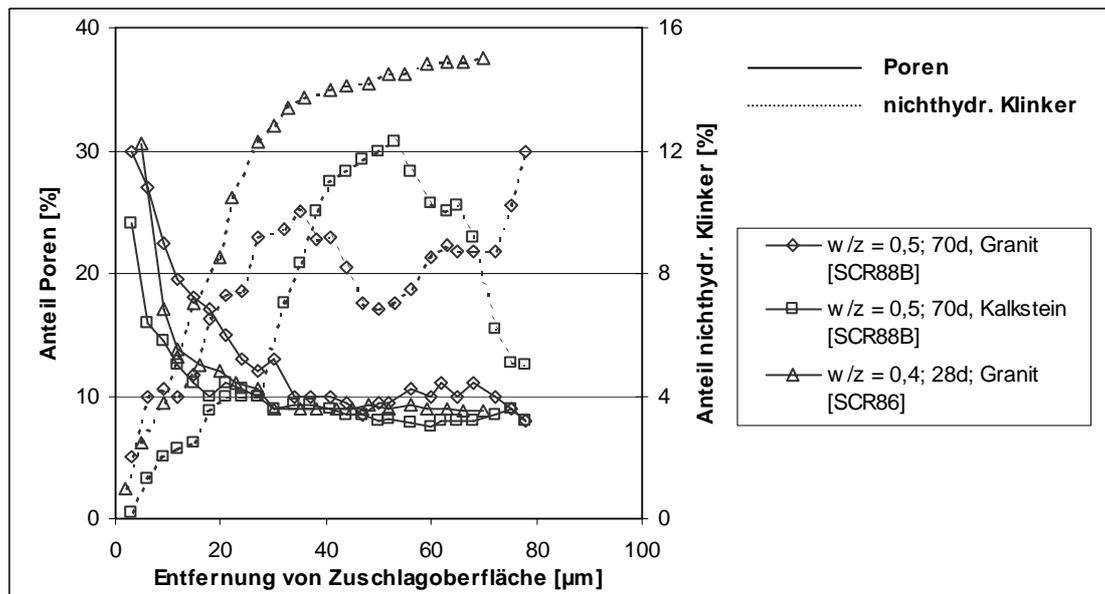
Einen weiteren klaren Hinweis auf die höhere Durchlässigkeit der Kontaktzone ergab die Analyse von Rückstreuelektronenbildern von Proben, in die zuvor eine hochviskose, mit der Zeit erstarrende Flüssigkeit eingepreßt wurde. Dabei konnte festgestellt werden, dass in Bereichen von 30-100  $\mu\text{m}$  um die Zuschläge herum – also im Bereich der Kontaktzone – eine Anreicherung dieser Flüssigkeit vorhanden war [SCR96]. Gleichzeitig wurde mit diesem Versuch nachgewiesen, dass die Poren in der Kontaktzone miteinander verbunden sind [BRE93, BOU95].

#### *2.2.4.2 Aufbau und Struktur des Zementsteins in der Kontaktzone*

Der grundsätzliche Aufbau der Mikrostruktur im Bereich zwischen natürlichem Zuschlag und Zementstein wird in der Literatur immer noch diskutiert [STA00]. Dabei ging man lange Jahre davon aus, dass in dem Bereich zwei Phasen bzw. Schichten unterschieden werden können: die Kontaktschicht (auch Duplex-Schicht genannt) und die Kontaktzone (auch Übergangszone – engl. transition zone – genannt). Die Kontaktschicht soll sich unmittelbar im Anschluss an die Zuschlagoberfläche befinden und ca. 1  $\mu\text{m}$  dick sein. Die Seite, die im Kontakt mit dem Zuschlag steht, soll aus einer 0,5  $\mu\text{m}$  dicken Portlandit- (CH-) Schicht bestehen,

daran anschließend sollen sich kurze CSH-Fasern befinden. In der jüngeren Vergangenheit wurde die Existenz der Duplex-Schicht sogar generell angezweifelt [SCR88A, SCR88B]. Auch die Struktur der Übergangszone wurde in der Literatur z.T. widersprüchlich beschrieben, wobei vor allem die Verteilung und die Ausrichtung der hexagonal geformten CH-Kristalle im Kern der Diskussionen stand [MON85A, MON85B, ZIM85, LAR90].

Nach den jüngeren wissenschaftlichen Publikationen ist die Übergangszone etwa 50  $\mu\text{m}$  dick und unterscheidet sich von einer homogenen Zementsteinmatrix durch einen leicht höheren Anteil an Portlandit und Ettringit. Darüber hinaus befinden sich in der Übergangszone übermäßig viele sogen. „Hadley-Grains“ - also Hohlschalen aus Hydratationsprodukten mit einem Durchmesser von ca. 5  $\mu\text{m}$ . Schließlich weist die Übergangszone eine deutlich höhere Porosität und einen geringeren Anteil an nichthydratisierten Klinkerpartikeln auf als die reine Zementsteinmatrix [SCR88B, SCR86], **Bild 3**.



**Bild 3:** Verteilung der Poren und der nichthydratisierten Klinkerbestandteile in der Übergangszone von verschiedenen Betonen mit natürlichen Zuschlägen

Der Gradient in der Verteilung der Klinkerbestandteile ist relativ anschaulich mit geometrischen Modellvorstellungen erklärbar. Denn wenn man idealisiert von einer Kugelpackung der Klinkerbestandteile in der Zementsteinmatrix ausgeht, geht ganz zwangsläufig an einer Grenzfläche z.B. der Zuschlagoberfläche, die durch die Kugelpackung beanspruchte Fläche zurück, bis sie an der Grenzfläche selbst Null erreicht.

Dem gegenläufig nimmt mit Annäherung an die Zuschlagoberfläche natürlich die Porosität, also die Anzahl der Hohlstellen, die durch eine ungleichmäßige Kugelpackung entstehen, zu.

Die etwas höheren Gehalte an  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  in der Übergangszone werden damit erklärt, dass sich beim Mischen um dichte Naturzuschläge herum ein feiner Wasserfilm bildet, an dem dann in Kontakt mit Zementleim insbesondere das Wachstum von CH-Kristallen gefördert wird.

#### 2.2.4.3 Einflüsse aus der Herkunft des Zuschlags

Insgesamt hat die chemische Zusammensetzung von Naturgestein einen sehr geringen Einfluss auf die Ausbildung der Kontaktschicht oder Übergangszone, da i.d.R. keine Reaktionsprodukte zwischen Zuschlägen und Zementstein nachzuweisen sind, die Haftung also nur über Oberflächenkräfte an der Zuschlagoberfläche zustande kommt [ZIM85, ZIM87]. Bei calcitischen Gesteinen jedoch wurden Calciumcarbonat-Calciumhydroxid-Komplexe an der Zuschlagoberfläche nachgewiesen, die mit der Kontaktschicht verwachsen [BEN96, MON86]. Da neben den Verspannungen im Kristallgefüge durch diese Verwachsungen die Festigkeit und zusätzlich durch die Reaktion mit dem CH der Phasengrenzfläche die Dichtigkeit zunimmt, sind auch deutlich höhere Festigkeiten in zentrischen Zugversuchen festzustellen [SCA84, YUA87]. Inwiefern diese Erkenntnisse auf rezyklierten Zuschlag übertragbar sind, ist bislang noch nicht untersucht worden. Eine Ausbildung von Verwachsungen zwischen rezyklierten Zuschlägen und der Zementsteinmatrix ist aber auch denkbar.

Für die Anlagerung der Zementklinker an die Zuschlagoberfläche und damit deren Verteilung in der Übergangszone ist die Oberflächeneigenschaft des Zuschlags verantwortlich. Damit hat diese einen viel größeren Einfluss als die Herkunft der Zuschläge, da sich auf rauen Zuschlagoberflächen viel mehr feinere Zementpartikel ansammeln können als auf glatten Zuschlagoberflächen [GRA80A] und somit deren Mikrostruktur in der Übergangszone dichter gestaltet ist.

Hinsichtlich des Saugverhaltens und damit möglicher Auswirkungen auf die Mikrostruktur können Leichtbetonzuschläge ein den rezyklierten Zuschlägen ähnliches Verhalten aufweisen. Bei Untersuchungen an der Mikrostruktur von sehr dichten Leichtzuschlägen hat sich gezeigt, dass sich an der Kontaktschicht, in Analogie zu Naturzuschlägen, CH-Kristalle ansammeln. Bei porösen Leichtzuschlägen dagegen lagert sich verstärkt Ettringit an. Bei letzteren besteht zudem eine verbesserte Verbundfestigkeit und es existiert signifikant weniger Portlandit in der Übergangszone als bei dichten Leichtzuschlägen. Zudem können an besonders porösen Stellen calcium- und siliziumhaltige Bestandteile in die Matrix des Leichtzuschlags hineinwandern [ZHA89, ZHA90].

---

Andere Untersuchungen zur Porosität und Permeabilität von Leichtmörteln zeigen, dass mit zunehmendem Leichtbeton-Zuschlaggehalt die Porosität des Zementsteins sinkt, aber gleichzeitig die Permeabilität (nahezu doppelt so hoch wie bei Normalmörteln) steigt. Das Sinken der Porosität führen die Autoren darauf zurück, dass die saugenden Zuschläge dem Zementleim Wasser entziehen und so die Porosität der Mikrostruktur, insbesondere im Bereich der Übergangszone verringert wird. Ein Nachweis hierzu wird nicht erbracht. In diesem Zusammenhang wird zur Verbesserung der Dauerhaftigkeit empfohlen, Leichtbetonzuschläge getrocknet und nicht feucht oder wassergesättigt zu verwenden [NYA85].

### **3 Untersuchungen zur Charakterisierung der Mikrostruktur in der Kontaktzone von rezykliertem Beton**

#### **3.1 Zur Auswahl der Versuchsparameter und Wahl des Messverfahrens**

Aus heutiger Sicht muss zur vollständigen Beschreibung von Transportprozessen innerhalb von Beton/Zementstein auch dessen Mikrostruktur in der Kontaktzone einbezogen und bewertet werden (s. Kap. 2). Für rezyklierten Beton liegen jedoch bislang noch keinerlei Untersuchungen der Mikrostruktur vor, weswegen diese hier erstmals durchgeführt wurden. Es wurde erwartet, dass gerade das unterschiedlich starke Saugverhalten der diversen rezyklierten Zuschläge Auswirkungen auf die Struktur und den Aufbau der Mikrostruktur besitzt. Von daher wurden besonders stark saugende Ziegelsplitte und moderat saugende Betonsplitte bei diesen Untersuchungen verglichen. Daneben wurde auch die Vorbefeuchtung in die Untersuchung miteingeschlossen, da ofengetrocknete Zuschläge gegenüber vorbefeuchteten Zuschlägen (10-min-Saugwasser) selbstverständlich ein deutlich ausgeprägteres Saugverhalten aufweisen.

Für die Untersuchungen sollte ein Messverfahren verwendet werden, mit dem möglichst große Bereiche der Mikrostruktur qualitativ und quantitativ bewertet werden können und bei dem die Probenherstellung bzw. -vorbereitung einen möglichst geringen Einfluss auf die Mikrostruktur aufweist.

Die lange Jahre gängige Praxis, Bruchflächen in der Mikrostruktur zu erzeugen und diese hinsichtlich charakteristischer morphologischer Erscheinungen auszuwerten, ist mittlerweile stark umstritten. Für diese Untersuchungen wurden sehr häufig Naturzuschläge glatt poliert und auf diese eine Zementstein- bzw. Mörtelmatrix aufgebracht. Nach dem Erhärten wurden diese Proben entweder senkrecht zur Kontaktstelle oder parallel dazu gebrochen [ZIM85]. Es hat sich jedoch herausgestellt, dass durch die polierten Zuschlagoberflächen die in der Praxis auftretenden Verhältnisse mit wesentlich rauerer Zuschlagoberflächen nicht repräsentativ abgebildet werden. Das Erzeugen einer Bruchfläche ist auch sehr problematisch, da der Bruch in erster Linie entlang einer Schwachstelle verlaufen wird und somit bei der Untersuchung keine repräsentativen Querschnitte analysiert werden. Selbst Schneiden oder Schleifen bergen die Gefahr, dass durch thermische Prozesse das Mikrogefüge verändert wird. Letztlich ist es auch wichtig, dass die Proben, die im REM untersucht werden, einem wirklichen Beton entsprechen, also entsprechend gemischt und verdichtet sind. Bei vielen Modellprobekörpern ist

das nicht der Fall und so besteht die Gefahr, dass durch das Aufbringen einer Mörtel- oder Zementmatrix auf ein Zuschlagkorn völlig andere Verhältnisse entstehen als in einem gemischten und verdichteten Beton. Und schließlich ist auch die rein morphologische Betrachtung von Proben in herkömmlichen Rasterelektronenmikroskopen nicht unproblematisch, da durch das hohe Vakuum sämtliche Feuchtigkeit aus der Probe ausgetrieben wird und somit möglicherweise Gefügeänderungen an den Kristallen entstehen, bevor die Probe analysiert wird.

Nach Abwägung der Aussagekraft der verschiedenen Verfahren und vor allem der mangelnden Verfügbarkeit diverser Mess- und Untersuchungsgeräte wurde entschieden, die Mikrostruktur an polierten Betonproben mittels Auswertung von im REM betrachteten Rückstreuungselektronenbildern durchzuführen. Bei dieser Meßmethode ist gewährleistet, dass der Einfluss aus der Probenvorbereitung auf ein Minimum reduziert wird, die Untersuchungen werden an realen Betonen durchgeführt und es werden tatsächlich große Bereiche der Mikrostruktur erfasst, mit denen belastbare Daten gewonnen werden.

### 3.2 Probenherstellung, Probenvorbereitung

#### 3.2.1 Beton

Für die hier durchgeführten Untersuchungen wurden nur rezyklierte Betone hergestellt. Die Zusammensetzung dieser Betone wurde wie folgt gewählt:

Zement:	CEM I 32,5 R
Zementgehalt:	450 kg/m <sup>3</sup>
Zuschlag:	Betonsplitt (BS), Ziegelsplitt (ZS)
Sieblinie:	nur Kies der Kornklasse 4/8, 8/16, kein Sand Zuschläge sowohl ofengetrocknet (t) als auch vorbefeuchtet (n) <sup>3</sup>
w/z-Wert:	0,55

Die Betone wurden in einem Zwangs-Intensivmischer gemischt, in Würfelschalungen (10x10x10 cm<sup>3</sup>) durch Stochern bzw. leichte Vibration auf dem Rütteltisch verdichtet und danach sofort feucht gelagert. Nach 1 d wurden die Betonwürfel ausgeschalt und unter Wasser gelagert.

---

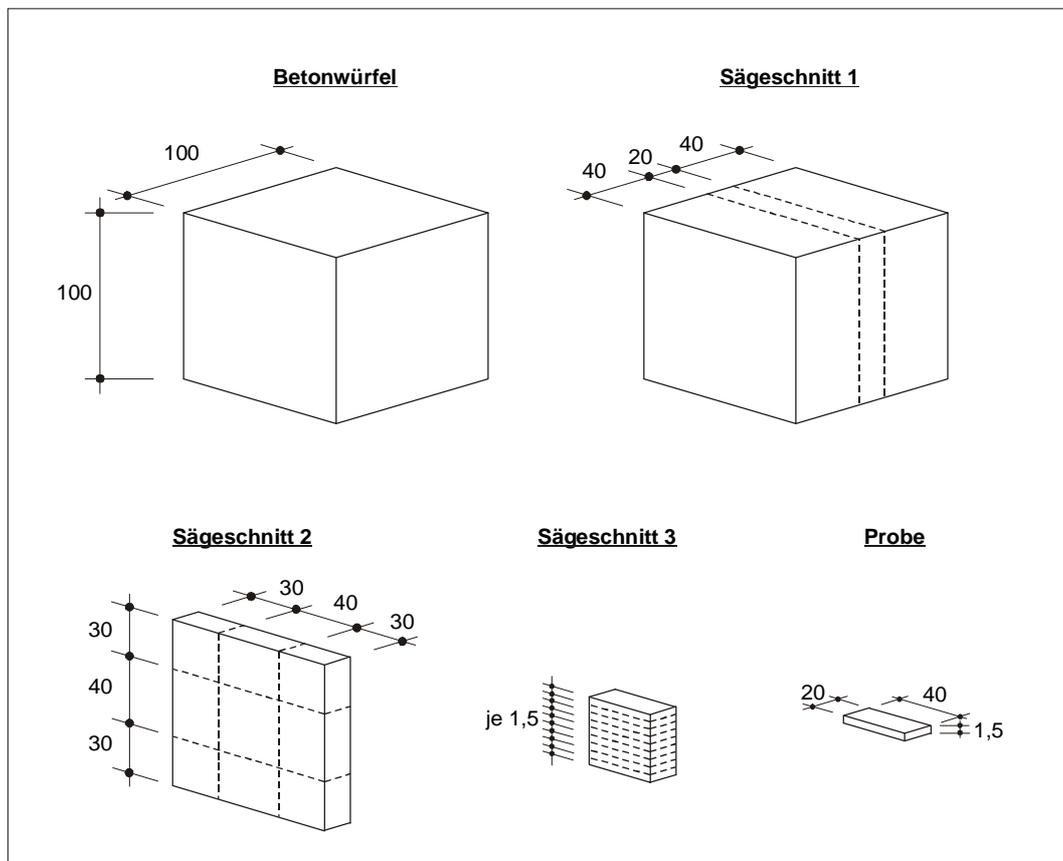
<sup>3</sup> Für die Vorbefeuchtung wurden die ofengetrockneten Zuschläge 10 Minuten vor dem Betonieren in Wasser gelagert

### 3.2.2 Proben für das REM

Für die Untersuchung im REM war es notwendig, das gesamte in den Poren befindliche freie Wasser zu entfernen. Denn einerseits mussten für die korrekte Auswertung der Rückstreuungselektronenbilder alle Poren mit einem Harz gesättigt sein, was nur gelingen konnte, wenn das zuvor darin eingelagerte Wasser daraus entfernt wurde. Andererseits sollten aber alle Proben zum gleichen Zeitpunkt nach der Betonherstellung untersucht werden. Bedingt durch die aufwändige Probenvorbereitung war es jedoch nicht möglich, die REM-Aufnahmen bei allen Proben zum gleichen Zeitpunkt zu gewährleisten. Folglich wurde entschieden, die Hydratation zu einem festgelegten Untersuchungszeitpunkt „einzufrieren“ indem das für die Hydratation zur Verfügung stehende Wasser aus den Betonproben entfernt wurde.

Hierfür standen zwei Wege zur Verfügung: entweder eine Vakuumbehandlung oder eine Lagerung in reinem Ethanol. Die Vakuumbehandlung birgt jedoch die Gefahr, dass ungewünschte Risse im Gefüge des Betons entstehen, welche die Auswertung der REM-Bilder erschweren. Dies ist bei der Lagerung in Ethanol zwar nicht der Fall, aber dafür ist die Probenvorbereitung aufwändiger. Denn für die Lagerung in Ethanol sind besonders dünne Proben notwendig, damit das Ethanol entsprechend schnell in das Betongefüge eindringen kann und so die Hydratation zum Stillstand kommt. Bei den vorliegenden Untersuchungen wurde schließlich der Lagerung in Ethanol der Vorzug gegeben.

Um also entsprechend dünne Proben herzustellen, wurden 28 d nach der Beton-Herstellung mit einer Steinsäge aus dem Inneren der Betonwürfel Prismen mit den Abmessungen 40x40x20 mm<sup>3</sup> herausgesägt, **Bild 4** (Sägeschnitt 1 und 2). Die Kühlung erfolgte dabei mit Wasser. Von diesen Prismen wurden dann sofort Scheiben mit einer Dicke von 1,5 – 2 mm abgetrennt, **Bild 4** (Sägeschnitt 3). Damit die thermische Erhitzung durch das Schneiden nicht das Gefüge des Betons verändert, wurde eine langsam laufende Säge mit einem sehr dünnen Diamantsägeblatt verwendet. Die Kühlung des Sägeblatts erfolgte in diesem Fall mit Propanol, weil eine Kühlung mit Wasser die Gefahr birgt, dass Ca(OH)<sub>2</sub> aus der Mikrostruktur des Zementsteins ausgewaschen wird [KJE91]. Sofort danach wurden die Proben für zwei Wochen in reiner Ethanol-Lösung (Reinheitsgrad 99,99 %) gelagert.



**Bild 4:** Übersicht über die Herstellung der Proben für die Untersuchung im REM

Anschließend wurden die Proben in einem sehr niedrigviskosen Harz bei einer Temperatur von 4°C für weitere zwei Wochen gelagert. Erfahrungen aus der Literatur [STU99] zeigen, dass diese Zeit ausreicht, um nahezu alle zugänglichen Poren im Gefüge des Betons von dem Harz zu durchströmen. Zur Polymerisierung des Harzes wurden die Proben für 24 h im Ofen bei einer Temperatur von 60 °C gelagert. Danach wurde in aufeinanderfolgenden Schritten, beginnend mit Schleifpapier der Körnung 100 bis hin zu einer Körnung von 600 die Oberfläche der Proben vorgeschliffen und dann mit Diamant-Paste auf Öl-Basis, in den Körnungsabstufungen 6, 3, 1 und 0,25 µm die Oberfläche poliert.



**Bild 5:** Proben für die Untersuchung im REM; links: nach dem Sägen, in der Mitte: nach dem Aushärten des Harzes, rechts: nach dem bedampfen mit Kohlenstoff

Im letzten Arbeitsschritt wurden die Proben für die Aufnahmen im REM noch mit Kohlenstoff bedampft, **Bild 5**. Die bei REM-Aufnahmen übliche Gold-Bedampfung war für die Erstellung von Rückstreuelektronenbildern nicht ausreichend, da diese – im Gegensatz zu mit Kohlenstoff bedampften Proben – nicht genügend Kontrast aufwiesen.

### 3.3 Durchführung der Versuche mit dem REM

Bei der üblichen Betrachtung im REM werden Bilder erzeugt, welche die Oberflächenbeschaffenheit der Probe wiedergeben. Für die Darstellung werden dabei die rückgestrahlten „sekundären“ Elektronen genutzt. Deren messbare Intensität ist dabei in erster Linie von der Neigung der Oberfläche im Verhältnis zum aufgetragenen Elektronenstrahl abhängig, wodurch diese optimal wiedergegeben werden kann. Die sogenannten „Rückstreuelektronen“ dagegen werden in tieferen Regionen der Probe freigesetzt und können auch nur mit speziellen Detektoren, die an ein herkömmliches REM adaptiert werden, gemessen werden. Die Rückstreuelektronen besitzen zwar eine niedrigere Intensität als die sekundären Elektronen, haben aber den Vorteil, dass die Intensität der Rückstreuung in direktem Zusammenhang mit der Ordnungszahl der Elemente steht. So streuen Bereiche hoher Ordnungszahl die Elektronen stärker zurück und diese Bereiche erscheinen heller als solche, deren Ordnungszahl niedriger

ist [SCR84]. Auf diese Weise können in Betonproben folgende Bereiche voneinander unterschieden werden:

- Poröse, nach der Probenpräparation mit Harz gefüllte Poren erscheinen schwarz
- Hydratationsprodukte wie CSH-Phasen erscheinen dunkelgrau
- Portlandit ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) erkennt man als leicht graue Bereiche
- Nichthydratisierte Zementklinker-Partikel erscheinen sehr hell

Jedoch besteht auch die Gefahr, dass die Oberflächenrauigkeit Fehlsignale liefert. Ungenügend glatt polierte Proben zeigen an ihren geografischen Hochpunkten ebenfalls Aufhellungen, die sich dann nicht mehr von tatsächlichen Elementeigenschaften unterscheiden lassen. Aus diesem Grund muss die Probe auch möglichst glatt poliert sein [KJE91]

Im REM wurden auf den präparierten Proben die Übergangszonen zwischen Zuschlag und Zementstein an mehreren Stellen sukzessive abgerastert. Insgesamt wurden so je betrachteter Übergangszone ca. 30 – 40 Bilder aufgenommen. Die Vergrößerung wurde i.d.R. auf 600 x eingestellt. Daneben wurden aber auch Aufnahmen bei einer Vergrößerung von 200 x und 50 x durchgeführt.

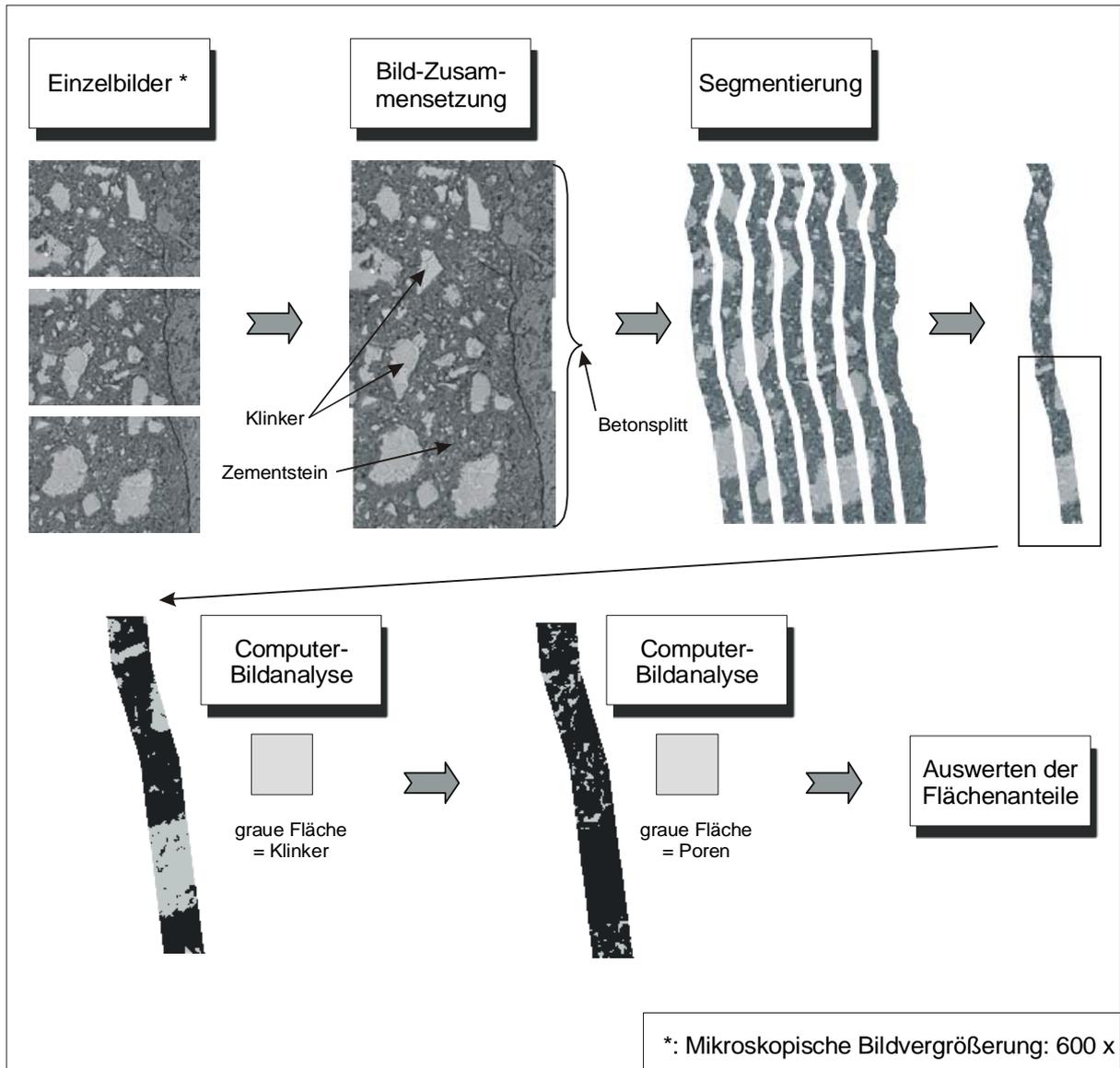
Das verwendete REM war ein Gerät der Fa. Cambridge. Die Bilder wurden bei der Aufnahme sofort mit einer Auflösung von 1024 x 705 Pixel digitalisiert und konnten so direkt für die Auswertung weiterverwendet werden.

### **3.4 Auswertung der Rückstreuelektronenbilder**

Für die Auswertung der Rückstreuelektronenbilder wurde im vorliegenden Fall die Software PicEd Cora der Fa. Jomesa verwendet. Im ersten Schritt wurden mit dieser Software je zwei bis drei Bilder zu einem Bild zusammengesetzt, um zu vermeiden, dass die Überlappungsbereiche mehrfach ausgewertet werden. Ausgehend von der Zuschlagoberfläche wurden dann jeweils 20  $\mu\text{m}$  dicke Streifen bis zu einer Entfernung von mindestens 120  $\mu\text{m}$  von der Zuschlagoberfläche definiert. Jeder einzelne Streifen stellte somit einen Bereich der Übergangszone mit einer fixierten Entfernung von der Zuschlagoberfläche, z.B. 20-40  $\mu\text{m}$ , dar. Anschließend wurde von dem Bild ein Graustufen-Histogramm erstellt. Aufgrund der darin erkennbaren Hochpunkte konnten die auszuwertenden Phasen gut zugeordnet werden [SCR87]. Der tiefschwarze Bereich der Poren war immer gleich definiert. Je nach Helligkeit und Kon-

trast der Bilder mussten dagegen zur Erkennung der Klinkerbestandteile aber auch des  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  die relevanten Graustufenbereiche immer wieder leicht angepasst werden.

Im letzten Schritt wurden die Flächenanteile der Phasen vom Computer ausgewertet. Dabei wurden alle Flächenanteile bei der jeweils vorhandenen Bildauflösung maßstäblich ausgegeben. Für eine Übersicht über das Vorgehen siehe auch **Bild 6**.



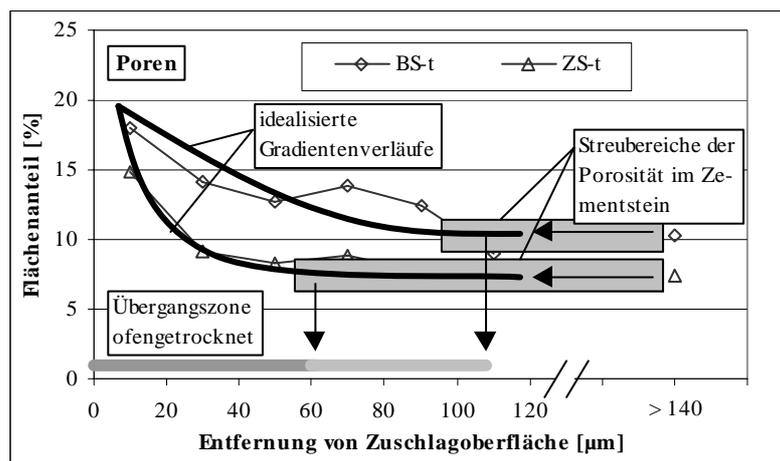
**Bild 6:** Schematischer Überblick über das Vorgehen zur Auswertung der Rückstreuungsbilder

### 3.5 Ergebnisse

#### 3.5.1 Allgemeines, Vergleich mit Ergebnissen von Betonen mit Naturzuschlag

Die REM-Bilder wurden bei einer 600-fachen Vergrößerung aufgenommen und je Parameter wurden ca. 40 bis 60 Bilder der Übergangszone erstellt. So war sichergestellt, dass je Parameter ca. 1 bis 2 cm der Übergangszone erfasst wurden.

Die Dicke der Übergangszone wird bestimmt, indem man die Länge des Gradienten in der Porenverteilung und der Verteilung der nichthydratisierten Klinkerbestandteile misst. Im vorliegenden Fall jedoch wiesen die Verläufe z.T. stärkere Sprünge oder auch Unstetigkeiten auf, wodurch die Erfassung der Gradienten erschwert wurde. Um trotzdem eine belastbare Aussage zu erhalten, wurde zusätzlich noch die Verteilung der Poren und der nichthydratisierten Klinkerbestandteile in einer Entfernung von  $> 140 \mu\text{m}$  von der Zuschlagoberfläche entfernt bestimmt. Hierzu wurden je Parameter bis zu 10 REM-Aufnahmen bei einer 600-fachen Vergrößerung durchgeführt und ausgewertet. Diese Werte wurden dann mit den Verläufen in der Nähe der Zuschlagoberfläche verglichen und dann anhand der Streubereiche die Übergangszone festgelegt. Dieses Vorgehen ist beispielhaft für rezyklierten Beton mit ofengetrocknetem Ziegelsplitt in **Bild 7** dargestellt.

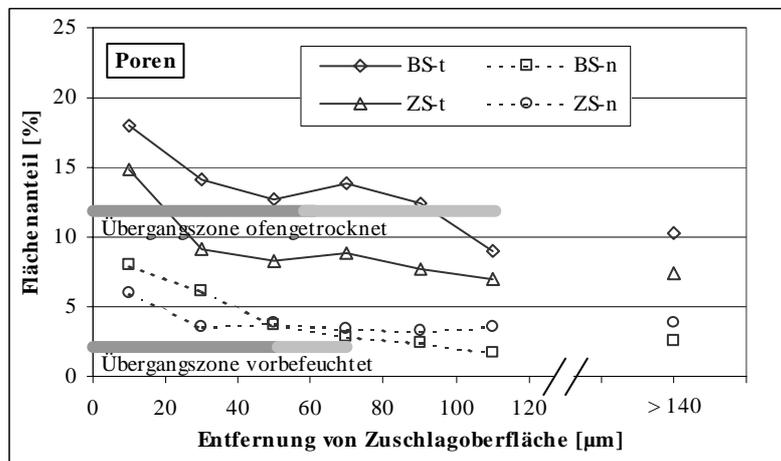


**Bild 7:** Darstellung der Vorgehensweise zur Bestimmung der Dicke der Übergangszone

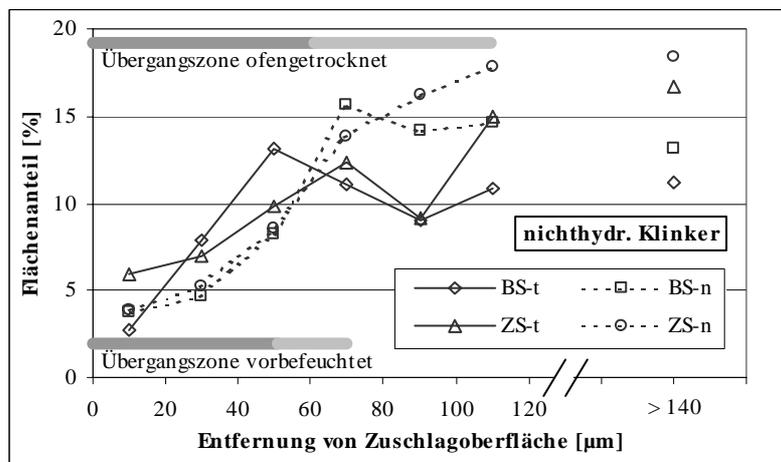
Demnach konnte die Dicke der Übergangszone wie folgt klassifiziert werden, siehe hierzu auch **Bild 8** und **Bild 9**:

- Betone mit vorbefeuchteten Zuschlägen: 50-70  $\mu\text{m}$
- Betone mit ofengetrockneten Zuschlägen: 60-110  $\mu\text{m}$

Damit unterscheidet sich die Dicke der Übergangszone von Betonen mit vorbefeuchteten Zuschlägen nicht wesentlich von herkömmlichen Betonen mit Naturzuschlag, für welche eine mittlere Dicke von 50  $\mu\text{m}$  angegeben wird. Die Dicke der Übergangszone von Betonen mit ofengetrockneten Zuschlägen ist jedoch größer.

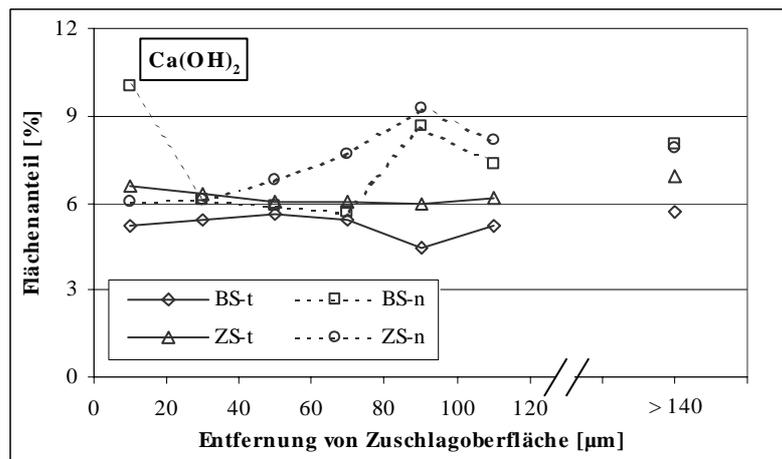


**Bild 8:** Porenverteilung in der Übergangszone und der Zementsteinmatrix von Betonen mit Betonsplitt (BS) und Ziegelsplitt (ZS)



**Bild 9:** Verteilung der nichthydratisierten Klinkerbestandteile in der Übergangszone und der Zementsteinmatrix von Betonen mit Betonsplitt (BS) und Ziegelsplitt (ZS)

Betone mit Naturzuschlag weisen neben den Gradienten in der Porenverteilung und der nichthydratisierten Klinkerbestandteile auch noch Gradienten in der Verteilung des  $\text{Ca(OH)}_2$  auf. Begründet wird dies mit einem lokal erhöhten  $w/z$ -Wert, der sich infolge von Flüssigkeitsfilmen bildet, wenn die Zuschlagoberfläche beim Anmachen mit Wasser benetzt wird [STA00]. Bei den hier durchgeführten Untersuchungen wies die Verteilung des  $\text{Ca(OH)}_2$  keinen Gradienten auf, **Bild 10**. Offensichtlich kann sich aufgrund der saugenden Zuschläge kein Flüssigkeitsfilm auf den Zuschlagoberflächen bilden.



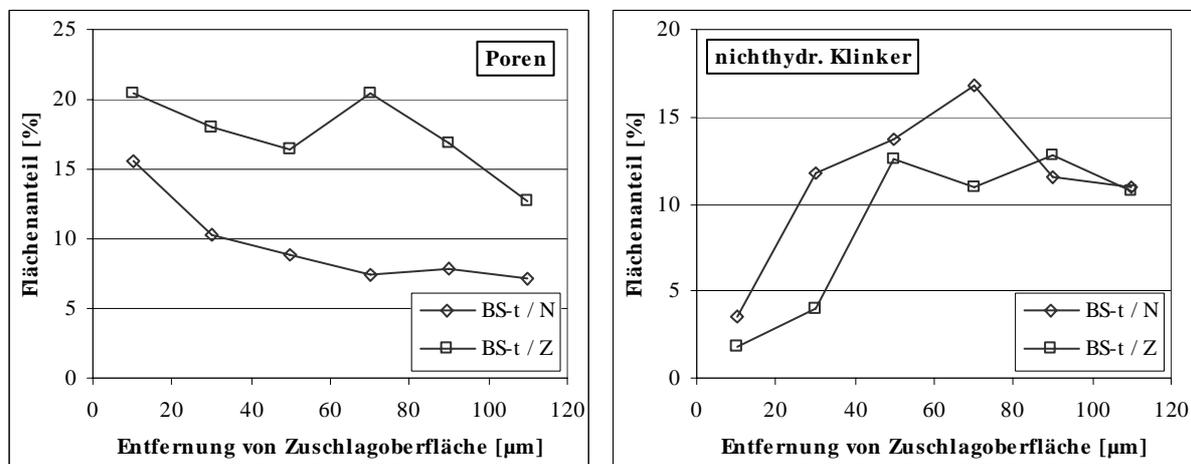
**Bild 10:** Verteilung des  $\text{Ca(OH)}_2$  in der Übergangszone und der Zementsteinmatrix von Betonen mit Betonsplitt (BS) und Ziegelsplitt (ZS)

### 3.5.2 Einflüsse aus unterschiedlicher Vorbefeuchtung von rezyklierten Zuschlägen auf die Mikrostruktur der Übergangszone

Die Übergangszone im Beton mit trockenen Zuschlägen wies eine wesentlich höhere Porosität auf als die im Beton mit vorbefeuchteten Zuschlägen, **Bild 8**. Dies entsprach nicht den Vorüberlegungen. Es wurde nämlich erwartet, dass durch das Saugen der trockenen Zuschläge eine Reduktion des  $w/z$ -Werts und damit eine Verringerung des Porenraums in der Übergangszone hervorgerufen wird. Offensichtlich wurde aber die in den Poren der Zuschläge vorhandene Luft nicht komprimiert, sondern verdrängt und sammelte sich dann an den Austrittsstellen des rezyklierten Zuschlags, also insbesondere im Bereich der Übergangszone, an.

Dieses Phänomen konnte insbesondere durch die Auswertung der Übergangszone von Beton mit Betonsplitt bestätigt werden. Denn Betonsplitt besteht zu unterschiedlichen Anteilen aus dichtem Naturzuschlag und porösen, „altem“ Zementstein. Diesem Aspekt wurde schon bei der Aufnahme und letztlich auch bei der Auswertung der REM-Bilder besondere Aufmerk-

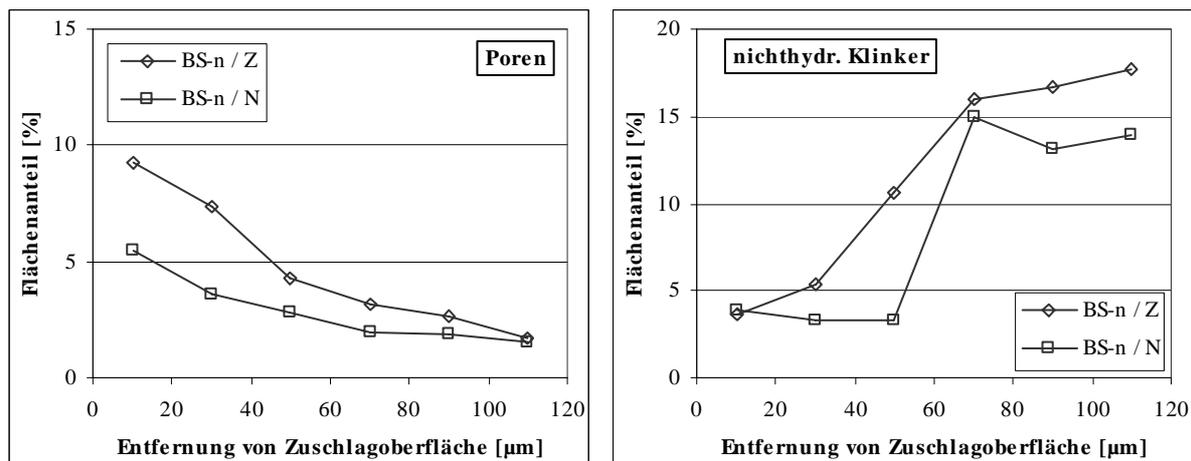
samkeit gewidmet. Die Darstellung der Porenverteilung und der nichthydratisierten Klinkerpartikel, unterschieden nach den Übergangszonen, die im Kontakt mit Naturzuschlag oder altem Zementstein stehen, ist in **Bild 11** zu sehen.



**Bild 11:** Verteilung der Poren (links) und der nichthydratisierten Klinkerbestandteile (rechts) in der Übergangszone von Beton mit trockenem Betonsplitt, unterteilt in Bereiche, die mit altem Zementstein (Z) oder Naturzuschlag (N) in Kontakt stehen

Demnach besaß die Übergangszone von Betonsplitt im Bereich der dichten Naturzuschläge einen im Mittel ca. 10 % geringeren Anteil an Poren als die Übergangszone im Bereich mit altem Zementstein. Gleichzeitig wies der neue Zementstein in beiden Bereichen keinen signifikanten Unterschied in der Verteilung der nichthydratisierten Klinkerbestandteile auf. Dies deutete darauf hin, dass durch das in den Betonsplitt eindringende Wasser Luft verdrängt wurde und diese dann nur über die Poren des alten Zementstein austreten und sich in der Übergangszone des neuen Zementsteins ansammeln konnte.

Aber auch bei den feucht betonierten Betonsplitten wies die Übergangszone im Bereich mit dichtem Naturzuschlag im Mittel eine um ca. 2,5 % geringere Porosität auf als die im Bereich mit altem Zementstein, **Bild 12**. Da mit dem gewählten Vorbefeuchtungsprocedere [DAR98] nur ca. 90 % der maximalen Saugwassermenge berücksichtigt wird, also ca. 10 % der Poren im alten Zementstein des Betonsplitts mit Luft gefüllt bleibt, ist auch hier zu folgern, dass die in die Übergangszone verdrängte Luft die Porosität erhöht.



**Bild 12:** Verteilung der Poren (links) und der nichthydratisierten Klinkerbestandteile (rechts) in der Übergangszone von Beton mit vorbefeuchtetem Betonsplitt, unterteilt in Bereiche mit altem Zementstein (Z) und Naturzuschlag (N)

Die Verteilung des  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  in der Übergangszone wies sowohl bei trocken als auch bei vorbefeuchtet betonierten Zuschlägen keinen erkennbaren Gradienten auf. Auch beim Betonsplitt konnte beim Vergleich der Übergangszone im Bereich von Naturzuschlag- und altem Zementstein kein Unterschied festgestellt werden. Lediglich die in der Übergangszone vorhandene Menge des  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  war bei den trocken betonierten Zuschlägen erwartungsgemäß etwas niedriger, da sich durch das starke Saugen an der Oberfläche der Zuschläge noch weniger Überschusswasser ansammeln konnte und somit noch etwas geringere  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Anreicherungen entstehen konnten, **Bild 10**.

### 3.5.3 Einflüsse aus der Zuschlagart auf die Mikrostruktur der Übergangszone

Um Einflüsse aus der Zuschlagart erkennen zu können, ist es sinnvoll, lediglich die Betone mit vorbefeuchteten Zuschlägen zu betrachten. Da das Wassersaugen des Ziegelsplitt ( $w_{\text{ZS},24\text{h}} = 12,1 \text{ M.-%}$ ), wesentlich größer ist als das Wassersaugen des Betonsplitts ( $w_{\text{BS},24\text{h}} = 4,1 \text{ M.-%}$ ), können die Einflüsse in der Mikrostruktur bei ofengetrockneten Zuschlägen schlecht separiert werden.

Bei den vorbefeuchteten Zuschlägen konnte beim Vergleich von Ziegel- und Betonsplitt kein signifikanter Unterschied in der Verteilung der Poren, des  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  oder der nichthydratisierten Klinkerbestandteile festgestellt werden. Daraus kann abgeleitet werden, dass die Transporteigenschaften des neuen Zementsteins bei Berücksichtigung des Wassersaugens unabhängig von der Art bzw. Porosität des rezyklierten Zuschlags sind. Darüber hinaus wird damit

erneut bestätigt, dass die Berücksichtigung des Wassersaugens eine große Bedeutung für die Technologie des rezyklierten Betons darstellt. Denn nur so ist gewährleistet, dass weitere physikalische Eigenschaften, insbesondere Festigkeitseigenschaften, nicht durch eine veränderte Mikrostruktur beeinflusst werden.

#### 3.5.4 Zusammenfassung, Folgerungen

Die Untersuchungen zur Mikrostruktur von Betonen mit rezyklierten Zuschlägen haben gezeigt:

- dass bei der Verwendung von ofengetrockneten Zuschlägen die Luft durch eindringendes Wasser aus den Poren in den Zementleim verdrängt wird. Dies führt zu einer Erhöhung der Porosität in der Übergangszone.
- dass die Übergangszone von vorbefeuchteten Zuschlägen mit ca. 50-70  $\mu\text{m}$  in etwa gleich ausgebildet ist wie die von Beton mit Naturzuschlag
- dass bei Betonen mit rezyklierten Zuschlägen keine Gradienten in der Verteilung von  $\text{Ca(OH)}_2$  festgestellt werden konnten

Für den Transport von Flüssigkeiten und Gasen in der Übergangszone von rezyklierten Beton bedeutet dies, dass mögliche Veränderungen im Transportverhalten nicht mit einer veränderten Mikrostruktur in der Übergangszone begründet werden können. Bei der Verwendung von ofengetrockneten Zuschlägen gilt dies jedoch nicht, da deren Übergangszone eine wesentlich höhere Porosität aufweist als Beton mit Naturzuschlag.

## 4 Untersuchungen zum Chlorid- und Wassertransport bei „äußerer“ Chloridquelle

### 4.1 Allgemeines

Wie bereits in den Grundlagen ausführlich beschrieben, ist bislang nicht im Detail geklärt, wie sich rezyklierter Beton hinsichtlich des Eindringens von Chloriden gegenüber Beton mit dichtem Naturzuschlag verhält. Von daher ist es notwendig, diese Unterschiede hier genauer zu untersuchen. Wichtig ist auch die Beantwortung der Frage, ob es Maßnahmen gibt, mit denen der Eindringwiderstand von rezykliertem Beton gegenüber Chlorid wesentlich verbessert werden kann und/oder ob herkömmliche betontechnologische Maßnahmen ausreichen, um einen genügenden Eindringwiderstand sicherzustellen. Um die in der Praxis am häufigsten auftretenden Transportvorgänge im Beton - das kapillare Saugen und die Diffusion - zu berücksichtigen, wurden in dieser Arbeit einerseits praxisgerechte Chlorid-Saugversuche und andererseits Schnell-Migrationsversuche (RCM-Versuch [TAN92]) unter Variation diverser betontechnologischer Parameter durchgeführt.

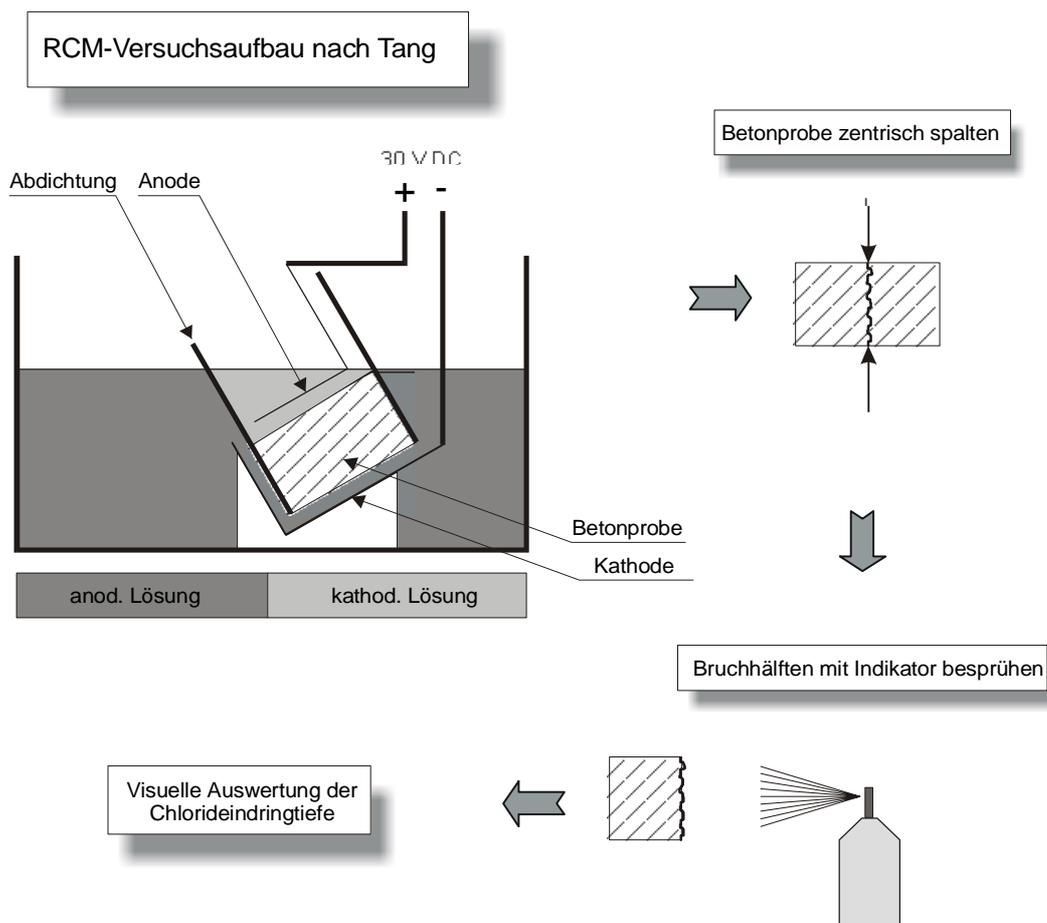
### 4.2 Versuchsbeschreibung

#### 4.2.1 RCM-Versuch

Mit Chlorid-Diffusionskoeffizienten können sowohl die Stoffeigenschaften von Beton eingeschätzt als auch Transportvorgänge berechnet und modelliert werden. Diffusionskoeffizienten können i.d.R. jedoch nur in sehr zeitaufwendigen, teilweise über mehrere Monate dauernden Versuchen ermittelt werden. Eine gute Alternative bieten hier die sogenannten Schnell-Migrationsversuche. Die im Rahmen dieser Versuche ermittelbaren Chlorid-Migrationskoeffizienten stehen in direkter Korrelation zu Chlorid-Diffusionskoeffizienten und es besteht die Möglichkeit, innerhalb nur weniger Tage ein Versuchsergebnis zu erhalten. Ein weiterer großer Vorteil des Migrationsversuchs besteht auch darin, dass der Migrationskoeffizient zu einem bestimmten Alter des Betons ermittelt werden kann, während beim klassischen Diffusionsversuch nur ein mittlerer Diffusionskoeffizient über die gesamte Dauer des Versuchs ermittelt wird.

Für die Bestimmung des Migrationskoeffizienten wurde der sogen. RCM-Versuch nach Tang [TAN92] mit einer konstanten Treibspannung von 30 Volt gewählt, s. **Bild 13**. Die kathodische Lösung bestand aus 0,2 n KOH und die anodische Lösung aus 0,2 n KOH mit Zusatz

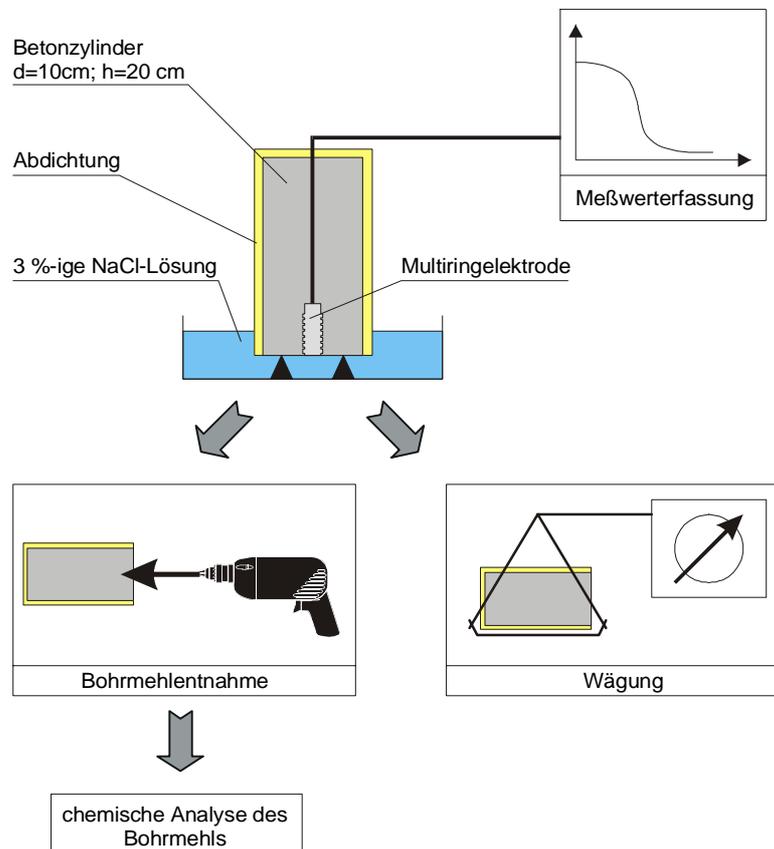
von 3 M.-% NaCl. Vor dem Einbau wurden die Proben 15 min in einem Ultraschallwasserbad gereinigt. Dann wurden sie in Gummischläuche eingepasst, die mit Rohrschellen an die Proben gepresst wurden. Die Versuchsdauer wurde entsprechend der sich einstellenden Stromstärke nach Erfahrungswerten festgelegt. Diese Werte entstammen ebenfalls aus [TAN92]. Unmittelbar nach dem Ausbau der Proben wurden diese in einer hydraulischen Presse gespalten und die leicht angetrockneten Bruchflächen zuerst mit in 20 %-iger Ethanollösung gelöstem Fluorescein und anschließend mit 0,2 n AgNO<sub>3</sub>-Lösung besprüht. Danach wurden die Proben ca. einen halben Tag vor Lichtzutritt geschützt gelagert. Nach spätestens einem Tag stellte sich der Farbumschlag der Chlorideindringfront durch eine sichtbare Violettverfärbung deutlich dar. Der Verlauf dieser Front wurde auf Papier übertragen. Die Eindringtiefe wurde dabei in 1 cm-Schritten mit einer Genauigkeit von 1 mm ermittelt. Der jeweilige Migrationskoeffizient wurde nach [TAN92] berechnet.



**Bild 13:** Versuchsaufbau zur Bestimmung des Chlorid-Migrationskoeffizienten von Beton (sogen. RCM-Versuch nach [TAN92])

## 4.2.2 Kapillare Saugversuche mit und ohne Multiringelektrode

Da neben der Diffusion vor allem der Transport von Chloriden quasi „Huckepack“ mit dem Wasser eine maßgebende Rolle spielt, wurde ein Versuchsaufbau gewählt, mit dem dieser Transportprozess entsprechend beobachtet werden konnte, **Bild 14**.



**Bild 14:** Übersicht über die Untersuchung zum kapillaren Saugverhalten von rezyklierten Betonen

Hierzu wurden bis zur Massekonstanz getrocknete zylindrische Beton-Probekörper verwendet, die an der Mantelfläche und der Oberseite (Schalseite unten) mit einem aluminiumbeschichteten Butylkautschukband abgedichtet waren. Die Probekörper wurden für das kapillare Saugen auf schmale Kunststoffleisten ca. 1 cm tief in 3 %-ige NaCl-Lösung gestellt. Diese Versuche wurden in einer Klimakammer bei 20°C und 65 % r.F. durchgeführt.

Nach 2, 7, 28 und 56 Tagen und bis zu 21 Tagen zyklischer Wechsellagerung (3 Tage bei 40 °C im Ofen, 4 Tage in Chloridlösung) wurden die zu untersuchenden Probekörper aus der Chloridlagerung herausgenommen. Gleich anschließend wurde mit einem Bohrer (Ø 25 mm) mittig ein Loch in den Probekörper gebohrt und das dabei entstandene Bohrmehl aufgefangen. Die Entnahme des Bohrmehls erfolgte in 1 cm-Schritten bis zu einer maximalen Tiefe

von 5 cm. Die Chloridgehalte des Bohrmehls wurden gemäß Heft 401 des DAfStb [SPR89] photometrisch bestimmt.

Um die Wasseraufnahme (Wasser bzw. NaCl-Lösung) des Probekörpers zu beobachten, wurden diese zu Beginn und am Ende der jeweiligen NaCl-Lagerung gewogen. Dadurch ließ sich die relative Wassergehaltsänderung der Probekörper im Versuchszeitraum berechnen (auf das Gewicht zu Versuchsbeginn bezogen). Daneben wurde der zeit- und tiefenabhängige Wassertransport auch über die Änderung des elektrolytischen Widerstands des Betons gemessen. Hierzu wurden in ausgewählte Probekörper Multiringelektroden (MRE) einbetoniert (Aufbau, Wirkungsweise und Auswertung der MRE-Messung im Anhang A3). Mit der MRE ließen sich einstellende Feuchteprofile bis in eine Tiefe von 4 cm beobachten. Die Aufzeichnung der Messwerte erfolgte über eine fest installierte Anlage, die alle 10 Minuten die Messwerte abfragte und auf einem Datenträger abspeicherte.

#### 4.2.3 Untersuchte Einflussgrößen

Bei den Versuchen wurde die Zuschlagart, das Bindemittel, der Anteil des Zuschlags am Gesamtgemisch und der w/z-Wert variiert. Für die Auswahl der einzelnen Parameter und die gewählten Versuchsbezeichnungen s. **Bild 15**.

Parameter		Bezeichnung
Zuschlagart:	Ziegelsplitt	Z
	Bauschutt	BAU
	Betonsplitt	BI, BII
Ersatzrate:	Splitt (4-16 mm): 0-100 %	0-100
	Betonbrechsand (0-4 mm): 0-100 %	0-100S
w/z-Wert:	0,45	45
	0,55	55
	0,60	60
	0,75	75
Bindemittel:	CEM I 32,5 R	I
	CEM I 32,5 R NW/HS	HS
	CEM III/B 32,5 NW/HS	III
	Flugasche	FA

Beispiel: BI/100S/HS/60

Erläuterung: Betonsplitt BI, 100 % Brechsand, Zement CEM I 32,5 R NW/HS, w/z = 0,60

**Bild 15:** Untersuchungsparameter und Versuchsbezeichnung

#### 4.2.4 Betonausgangsstoffe, Betonzusammensetzung

Die Betone wurden alle einheitlich mit einem Zementgehalt von  $320 \text{ kg/m}^3$  und einer Regelsieblinie A/B 16 hergestellt. Die rezyklierten Zuschläge wurden im laufenden Herstellungsprozess einer stationären Aufbereitungsanlage hergestellt. Die Herkunft der rezyklierten Zuschläge und deren Eigenschaften (wie z.B. Betonfestigkeitsklasse oder Ziegelfestigkeitsklasse) sind bis auf eine Sorte Betonsplitt unbekannt. In ihrer Zusammensetzung entsprechen sie Gemischen wie sie in der Praxis häufig vorkommen. Die Kennwerte sämtlicher Betonausgangsstoffe sind in den **Tabellen A1-A3** in der Anlage zusammengestellt. Aus der **Tabelle A4** geht auch die Bezeichnung der einzelnen Mischungen hervor.

#### 4.2.5 Betonherstellung und -lagerung

Bei der Herstellung der rezyklierten Betone wurde das Wassersaugen der rezyklierten Zuschläge berücksichtigt. Hierzu wurde gemäß den Herstellungsanforderungen der Richtlinie des DAfStb [DAR98] vor dem Betonieren die Menge an Wasser bestimmt, die ofengetrockneter Betonsplitt in den ersten 10 Minuten in reiner Wasserlagerung aufnimmt (entspricht ca. 90 % der maximal aufnehmbaren Wassermenge).

Beim Mischen wurde zunächst die Menge an 10-minütigem Saugwasser (unter Berücksichtigung des Eigenfeuchtegehalts) und 20 % des erforderlichen Anmachwassers zu den abgewogenen Zuschlägen (Betonsplitt und Naturzuschlag) zugegeben und 30 s gemischt. Anschließend wurde das Mischgut abgedeckt und 10 Minuten stehen gelassen. Erst danach wurden der Zement und die restlichen 80 % des Anmachwassers zugegeben und weitere 90 s gemischt. Die weiteren Vorgänge wie die FM-Zugabe, der Einbau oder das Verdichten unterschieden sich nicht von denen, die üblicherweise bei der Herstellung von Beton mit Naturzuschlag angewendet werden.

Für die Untersuchungen zum kapillaren Saugen und für den RCM-Versuch wurden Zylinder mit 200 mm Höhe und 100 mm Durchmesser hergestellt. Zusätzlich wurden für die Untersuchung der Druckfestigkeit Würfel mit einer Kantenlänge von 150 mm hergestellt. Die Probekörper wurden nach dem Betonieren im Feuchteschrank gelagert, nach einem Tag ausgeschalt und dann bei  $20^\circ\text{C}$  unter Wasser gelagert.

Die Würfel wurden vom 7. bis zum 28. Tag (= Tag der Festigkeitsermittlung) im Normklima bei  $20^\circ\text{C}$  und 65 % r.F. gelagert. Die Zylinder für die Untersuchung der kapillaren Transport-

vorgänge wurde nach 14 Tagen aus der Wasserlagerung genommen und bei 40°C bis zur Massekonstanz getrocknet.

Die Zylinder für den RCM-Versuch wurden bis zur Prüfung vollständig unter Wasser gelagert. In der 3. und der 11. Woche nach der Herstellung wurden aus den Betonzylindern jeweils 3 kleinere Zylinder (Höhe ca. 50 mm) mit einer Steinsäge nass herausgetrennt.

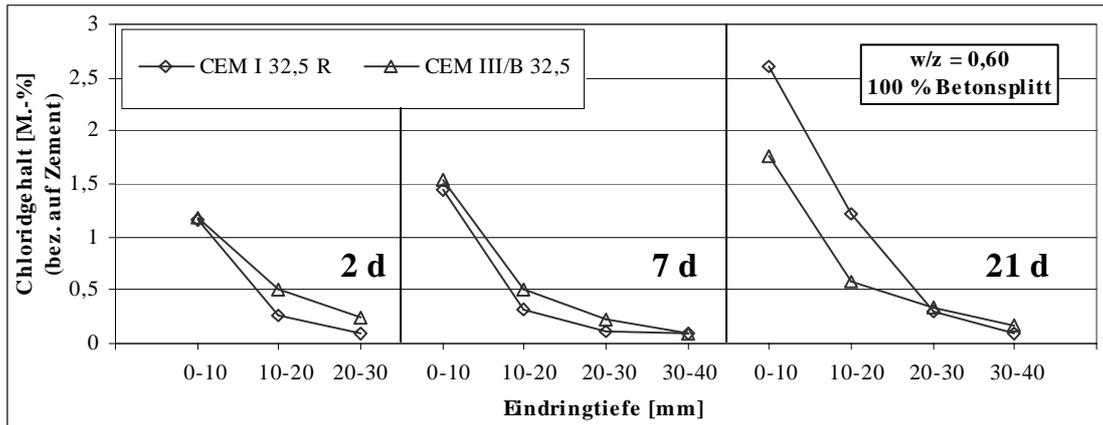
Zur Kontrolle wurden an allen hergestellten Betonen das Ausbreitmaß, die Frischbetonrohichte, die Festbetonrohichte sowie die 28-Tage-Druckfestigkeit gemäß den Anforderungen der DIN1048 [DIN2] durchgeführt. Diese Ergebnisse sind im Anhang in der **Tabelle A5** zusammengestellt.

In den **Tabellen A6 bis A9** im Anhang sind alle Einzelergebnisse der Chloridgehaltsbestimmung, der Wasseraufnahme und der RCM-Versuche zusammengestellt.

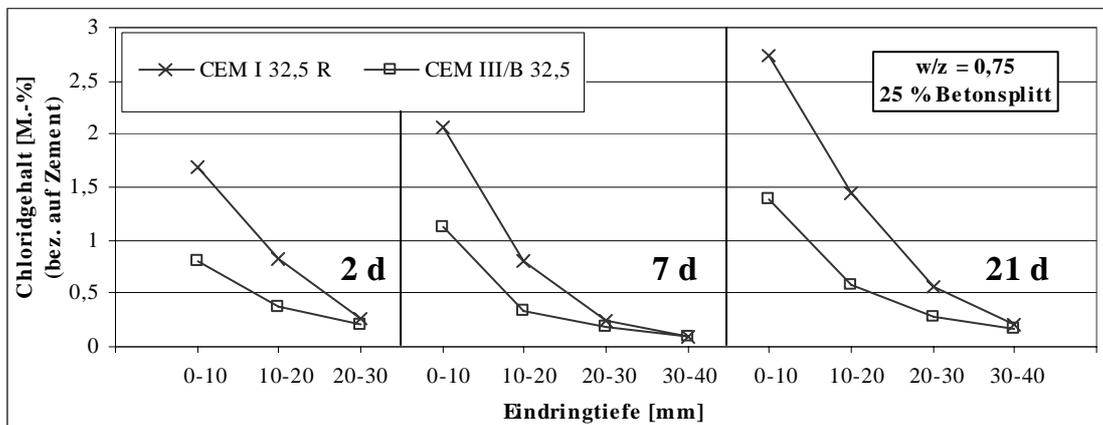
### 4.3 Einflüsse aus der Bindemittelart und dem w/z-Wert

Die Einflüsse des Bindemittels und des w/z-Werts wurden ausschließlich mit kapillaren Saugversuchen nach 2- und 7-tägiger Konstantlagerung sowie 21-tägiger Wechsellagerung untersucht. Erwartungsgemäß wurde festgestellt, dass die bei Beton mit natürlichen Zuschlägen bekannten betontechnologischen Einflüsse auf das Eindringen von Chlorionen und Wasser auch auf rezyklierte Betone übertragbar sind.

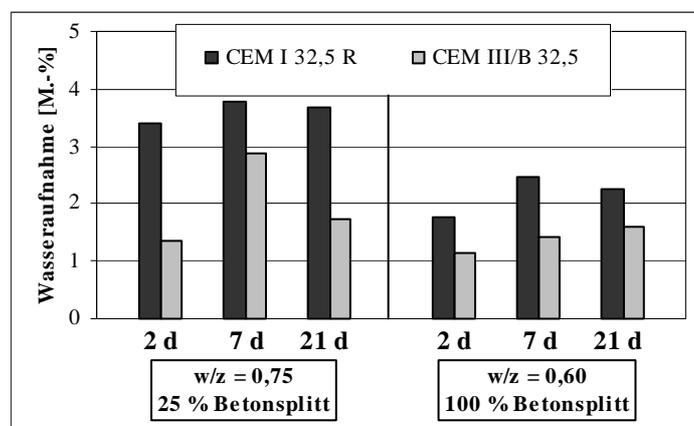
So wirkt sich z.B. der Einsatz von Hochofenzement erwartungsgemäß besonders positiv auf den Chlorideindringwiderstand aus, **Bild 16+17**. Sowohl bei einem w/z-Wert von 0,60 als auch bei einem w/z-Wert von 0,75 weisen die Betone mit Hochofenzement geringere Oberflächenkonzentrationen aber auch geringere Eindringtiefen auf. Insbesondere bei einem w/z-Wert von 0,75 ist die Oberflächenkonzentration um rund 50 % geringer als bei dem gleich zusammengesetzten rezykliertem Beton mit reinem Portlandzement. Auch bei der Feuchtezunahme ist erkennbar, dass rezykliertes Beton mit Hochofenzement aufgrund des verringerten Anteils an Kapillarporen weniger Wasser (und damit auch weniger im Wasser gelöste Chloride) aufnehmen kann als rezykliertes Beton mit Portlandzement, **Bild 18**. Ergänzend muss aber erwähnt werden, dass der rezyklierte Beton mit Hochofenzement bei diesen Untersuchungen optimal nachbehandelt wurde (14 Tage unter Wasser) und somit die latent hydraulische Reaktion des Hüttensandes besonders weit fortgeschritten war (Beginn der Saugversuche ca. 6 Wochen nach Herstellung der Proben). In der Praxis ist dies nicht immer sichergestellt, weswegen sich dort, bei schlechter Nachbehandlung, auch Betone mit Hochofenzement schlechter verhalten können als solche mit Portlandzement.



**Bild 16:** Chloridprofile von rezyklierten Betonen nach unterschiedlicher Lagerungszeit in 3 %-iger NaCl-Lösung, hier: Vergleich zwischen der Verwendung von Hochofenzement und Portlandzement bei w/z = 0,60 und 100 % Betonsplitt

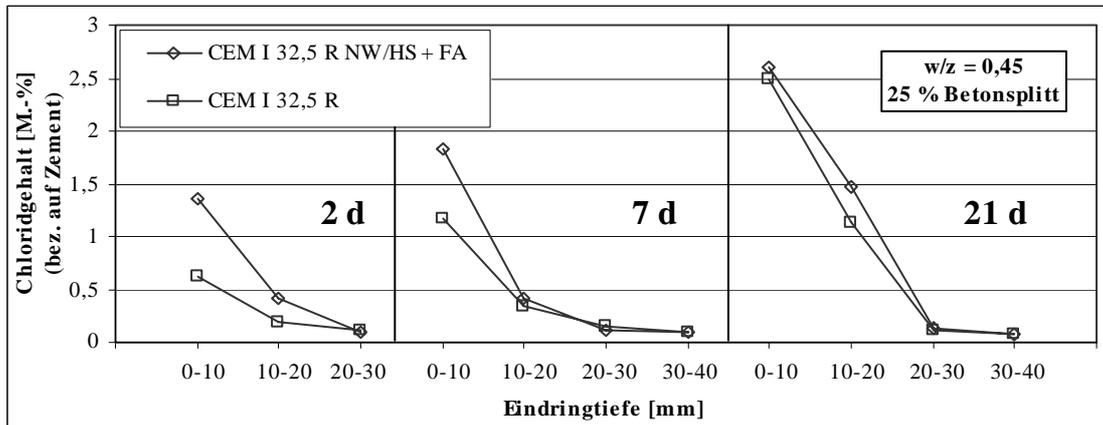


**Bild 17:** Chloridprofile von rezyklierten Betonen nach unterschiedlicher Lagerungszeit in 3 %-iger NaCl-Lösung, hier: Vergleich zwischen der Verwendung von Hochofenzement und Portlandzement bei w/z = 0,75 und 25 % Betonsplitt



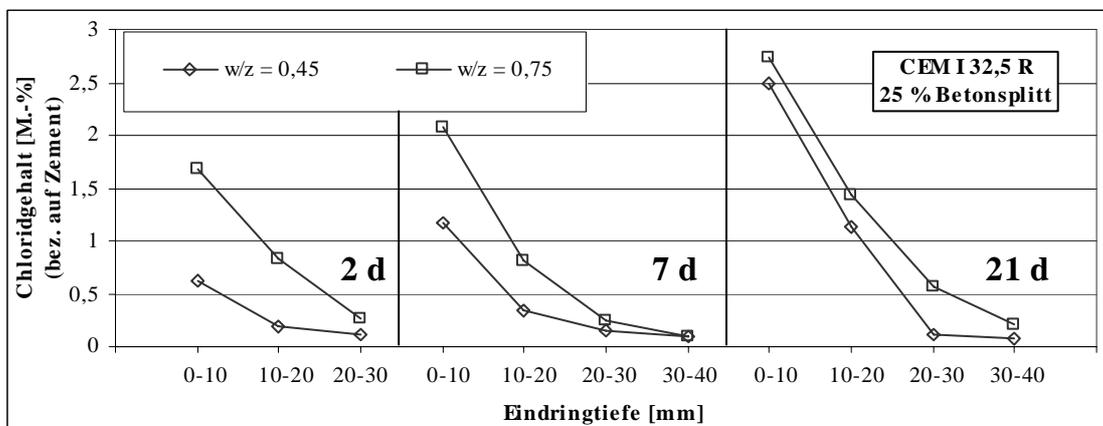
**Bild 18:** Wasseraufnahme von rez. Betonen nach unterschiedlicher Lagerungszeit in 3 %-iger NaCl-Lösung, hier: Vergleich zwischen der Verwendung von Hochofenzement und Portlandzement

Die Verwendung von C<sub>3</sub>A-armen Portlandzement in rezyklierten Beton ergab erwartungsgemäß einen geringeren Chlorideindringwiderstand gegenüber einem Beton mit reinem Portlandzement. Selbst bei der Zugabe von 60 kg Flugasche und ausreichender Hydratationsdauer war bei einem w/z-Wert von 0,45 die Oberflächenkonzentration im Mittel um rd. 50 % größer als bei einem Beton mit ausschließlich Portlandzement, **Bild 19**.

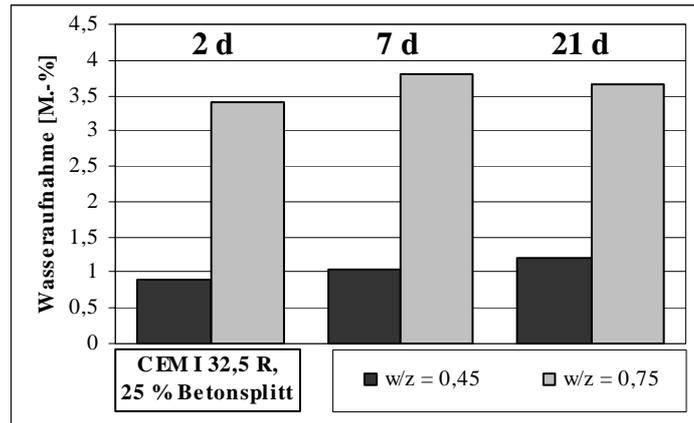


**Bild 19:** Chloridprofile von rez. Betonen nach unterschiedlicher Lagerungszeit in 3 %-iger NaCl-Lösung, hier: Einfluss von C<sub>3</sub>A-armen Portlandzement

Schließlich wurde bestätigt, dass die Verringerung des Kapillarporenraums durch eine Erniedrigung des w/z-Werts auch bei rezyklierten Betonen zu einer deutlich niedrigeren Wasseraufnahme und zu einem erhöhten Chlorideindringwiderstand führt, **Bild 20 + 21**. Ein mit reinem Portlandzement hergestellter rezyklierter Beton mit einem w/z-Wert von 0,45 hatte gegenüber einem Beton mit w/z-Wert von 0,70 um rund 50 % geringere Oberflächenkonzentrationen, die kapillare Wasseraufnahme war um rund 1/3 geringer.



**Bild 20:** Chloridprofile von rez. Betonen nach 2- und 7-tägiger Konstantlagerung sowie 21-tägiger Wechsellagerung in 3 %-iger NaCl-Lösung, hier: Einfluss des w/z-Werts



**Bild 21:** Wasseraufnahme von rez. Betonen nach 2- und 7-tägiger Konstantlagerung sowie 21-tägiger Wechsellagerung in 3 %-iger NaCl-Lösung, hier: Einfluss des w/z-Werts

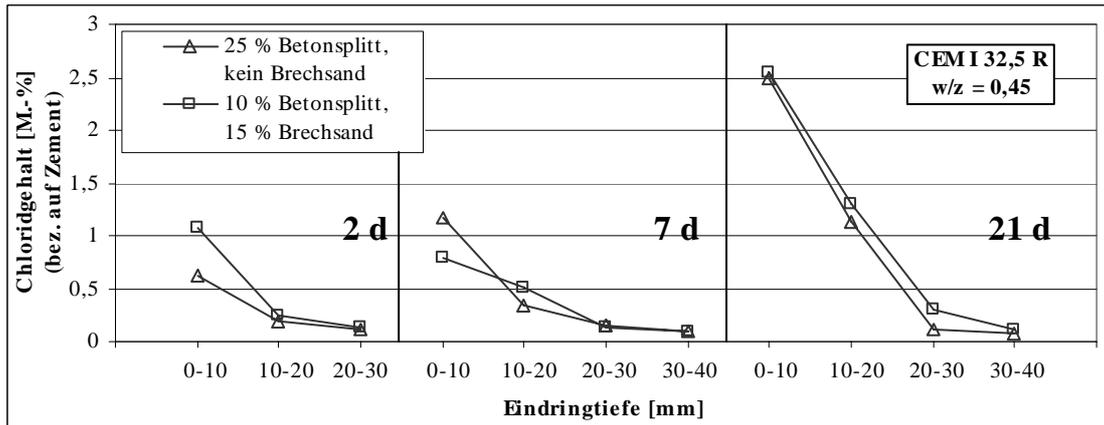
Dieses Ergebnis deckt sich auch gut mit Erkenntnissen zum Chlorideindringen an Betonen mit ausschließlich natürlichen Zuschlägen. So wurde z.B. in [JEN99] an Betonproben mit reinem Portlandzement bei einer Erhöhung des w/z-Werts von 0,4 auf 0,7 rund 60 % höhere Oberflächenkonzentrationen nach rund 4-wöchiger Lagerung in Chloridlösung festgestellt. Bei [TAN95] wurden an Betonproben mit reinem Portlandzement, die 24 h in Chloridlösung gelagert wurden, rund 30 % höhere Oberflächenkonzentrationen bei einer Erhöhung des w/z-Werts von 0,40 auf 0,60 festgestellt.

Die Ergebnisse zeigen, dass die für Beton mit Naturzuschlag geltenden Zusammenhänge auch auf den rezyklierten Beton übertragen werden können. Aufgrund dieser Erkenntnisse wurden die Einflüsse des Zements und des w/z-Werts auf das Chloriddiffusionsverhalten von rezykliertem Beton nicht näher betrachtet.

#### 4.4 Einfluss von rezykliertem Sand

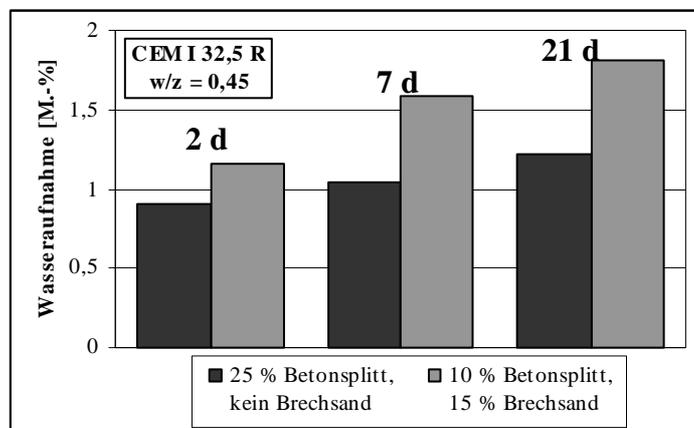
Bei der Ermittlung des Einflusses aus der Verwendung von rezykliertem Sand wurde sowohl das kapillare Saugverhalten als auch das Chloriddiffusionsverhalten untersucht.

Die Ergebnisse der an rezyklierten Betonen mit w/z = 0,45 ermittelten Chloridprofile sind in **Bild 22** dargestellt. Es ist gut zu erkennen, dass bei dem rezyklierten Beton, bei dem lediglich 15 Vol.-% Betonbrechsand in der Sandfraktion eingesetzt wurde, sowohl die Oberflächenkonzentration aber insbesondere auch die Eindringtiefe größer war, als bei dem Beton mit 25 Vol.-% Betonsplitt. Am größten war der Unterschied bei der konstanten Lagerung in NaCl-Lösung, hier war die Oberflächenkonzentration nahezu doppelt so groß wie bei einem rezyklierten Beton mit 25 Vol.-% Betonsplitt.



**Bild 22:** Chloridprofile von rez. Betonen nach 2- und 7-tägiger Konstantlagerung sowie 21-tägiger Wechsellagerung in 3 %-iger NaCl-Lösung, hier: verschiedene Anteile an Betonbrechsand/Betonsplitt bei einem w/z-Wert von 0,45

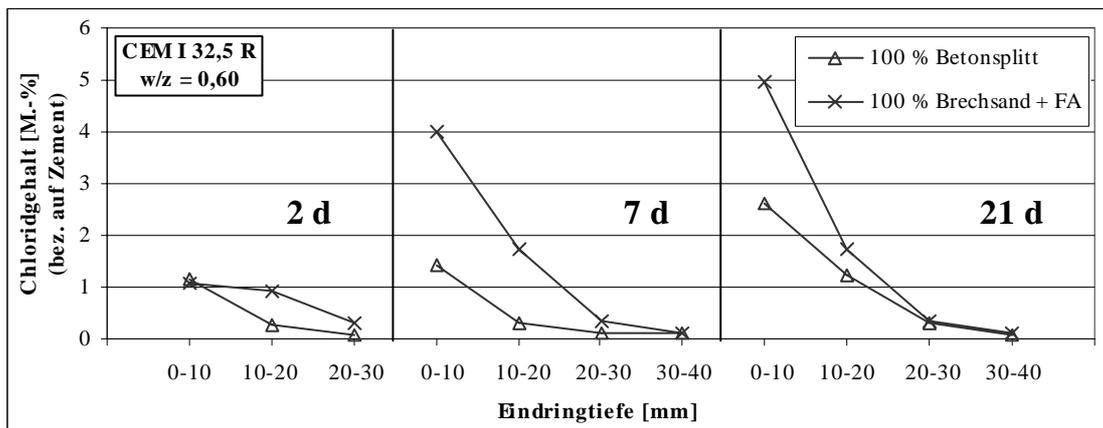
Noch deutlicher ist der Einfluss des Brechsandes bei der Wasseraufnahme zu erkennen. Selbst wenn nur 15 Vol.-% des natürlichen Sandes durch Betonbrechsand ersetzt wurden, stieg die kapillare Wasseraufnahme um ca. 50 % gegenüber dem rezyklierten Beton mit 25 Vol.-% Betonsplitt, **Bild 23**.



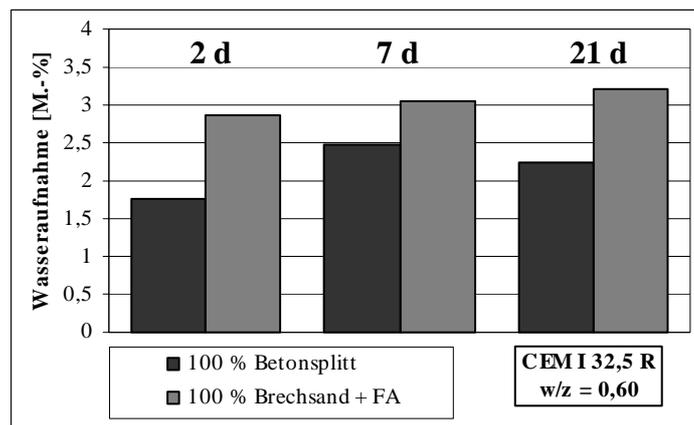
**Bild 23:** Wasseraufnahme von rez. Betonen nach 2- und 7-tägiger Konstantlagerung sowie 21-tägiger Wechsellagerung in 3 %-iger NaCl-Lösung, hier: verschiedene Anteile an Betonbrechsand/Betonsplitt bei einem w/z-Wert von 0,45

Selbstverständlich wirkte sich auch bei einem w/z-Wert von 0,60 der Einsatz von Betonbrechsand entsprechend negativ auf den Chlorideindringwiderstand aus. Bei diesem w/z-Wert wurde auch untersucht, ob durch eine betontechnologische Maßnahme, welche den Kapillarporenraum des Zementsteins verringert, die negativen Eigenschaften des Betonbrechsandes kompensiert werden können. Hierzu wurde zu einer Betonmischung mit 100 % Betonbrech-

sand 60 kg/m<sup>3</sup> FA zugegeben. Zum Zeitpunkt des Lagerungsbeginns in der NaCl-Lösung war dieser Beton bereits 7 Wochen alt. Demzufolge kann davon ausgegangen werden, dass zu diesem Zeitpunkt durch die Reaktion der Flugasche das Zementsteingefüge schon entsprechend verdichtet wurde [SCH95]. Trotzdem ergaben sich Oberflächenkonzentrationen, die rd. 2-3 x so groß waren, wie bei einem rezyklierten Beton der im Grobkornbereich (> 4 mm) 100 % Betonsplitt beinhaltet, **Bild 24**. Dieses Verhalten wurde auch durch die kapillare Wasseraufnahme bestätigt, welche um 30 – 50 % zunahm, **Bild 25**.



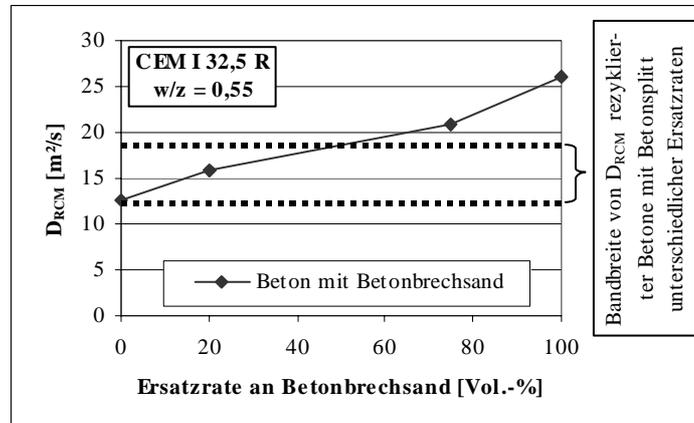
**Bild 24:** Chloridprofile von rez. Betonen nach 2- und 7-tägiger Konstantlagerung sowie 21-tägiger Wechsellagerung in 3 %-iger NaCl-Lösung, hier: verschiedene Anteile an Betonbrechsand/Betonsplitt bei einem w/z-Wert von 0,60



**Bild 25:** Wasseraufnahme von rez. Betonen nach 2- und 7-tägiger Konstantlagerung sowie 21-tägiger Wechsellagerung in 3 %-iger NaCl-Lösung, hier: verschiedene Anteile an Betonbrechsand/Betonsplitt bei einem w/z-Wert von 0,60

Da rezyklierter Beton mit Betonbrechsand ein so schlechtes Verhalten beim kapillaren Saugverhalten aufwies, wurde darüber hinaus auch das Chloriddiffusionsverhalten mit dem RCM-

Versuch untersucht. Hierzu wurden rezyklierte Betone mit unterschiedlichen Ersatzraten an Betonbrechsand bei einem w/z-Wert von 0,55 (Zement CEM I 32,5 R) hergestellt und nach 28 Tagen geprüft. Das Ergebnis dieser Untersuchung ist in **Bild 26** zu sehen.



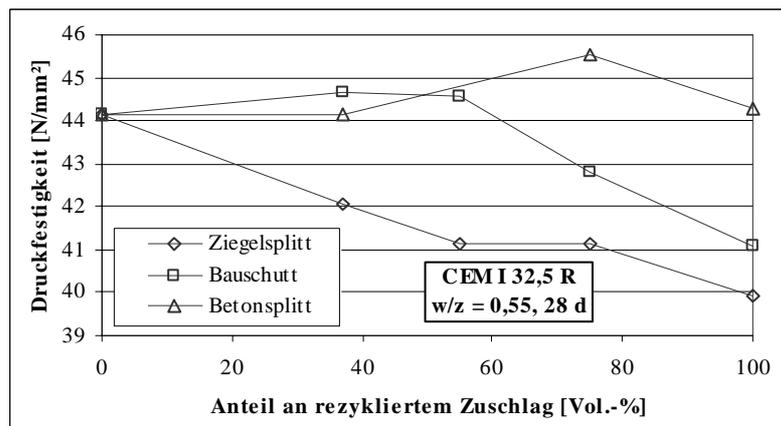
**Bild 26:** Chlorid-Migrationskoeffizient  $D_{RCM}$  ermittelt im RCM-Versuch nach 28 Tagen rezyklierten Betonen mit unterschiedlichem Anteil an Betonbrechsand

Der Chlorideindringwiderstand nahm dabei mit zunehmender Ersatzrate kontinuierlich ab. Schon bei 75 % Ersatzrate (also kein Natursand) erhöhte sich der Migrationskoeffizient gegenüber einem Beton ohne Betonbrechsand um nahezu 80 %.

Die Ursache des schlechten Verhaltens von Betonbrechsand beim Eindringen von Wasser und Chlorid hängt in erster Linie mit der Aufbereitung zusammen. In konventionellen Aufbereitungsanlagen erfolgt der letzte Zerkleinerungsschritt üblicherweise in einem Rotationsbrecher bzw. in einer Prallmühle. Dadurch erhält das aufbereitete grobkörnige Material eine optimale Kornform. Darüber hinaus weisen solche Körner auch besonders gute mechanische Eigenschaften auf, da beim Prallbrechen die Körner an ihren Schwachstellen zerkleinert werden. Bei rezyklierten Zuschlägen führt diese Brechmethode aber auch dazu, dass sich gerade die niederfesten und damit besonders porösen Bestandteile in den Kornfraktionen mit kleineren Korngrößen ansammeln. Demnach besitzt der Brechsand gegenüber den groben Fraktionen eine wesentlich höhere Porosität, insbesondere im Porengrößenbereich der Kapillarporen, was sich auch in der deutlich höheren Wasseraufnahme widerspiegelt. Je höher nun der Anteil an Brechsand im rezyklierten Beton ist, desto leichter können eindringende Gase und Flüssigkeiten durch die Poren des Brechsandes weitergeleitet werden.

#### 4.5 Einflüsse aus der Ersatzrate und der Herkunft von rezyklierten Grob-Zuschlägen

Die mechanischen Eigenschaften von rezyklierten Betonen verschlechtern sich, wenn bei sonst gleicher Mischungszusammensetzung der Anteil an rezykliertem Grobzuschlag erhöht und der Anteil an Natur-Grobzuschlag verringert wird. Diese Erkenntnis wurde auch in der Anwendungsrichtlinie des DAfStb „Beton mit rezykliertem Zuschlag“ berücksichtigt. In der Richtlinie wurde vorgegeben, den Anteil an rezykliertem Grobzuschlag nach oben auf 20 Vol.-% (bezogen auf den Gesamtzuschlag) zu begrenzen, um im Vergleich zu Normalbeton mit Naturzuschlägen ähnliche mechanische Eigenschaften zu erreichen. Bei den hier untersuchten Betonen wurden neben den Versuchen zum Transportverhalten auch die Druckfestigkeiten bestimmt. Mit Ausnahme der rezyklierten Betone mit Betonsplitt konnten die Ergebnisse aus der Literatur bestätigt werden, wonach mit zunehmendem Anteil an rezykliertem Zuschlag die Druckfestigkeit abnimmt, **Bild 27**. Bei der Verwendung von Ziegelsplitt und einer Ersatzrate von 100 % betrug der Druckfestigkeits-Abfall rund 10 %, bei Bauschutt rund 7 %.



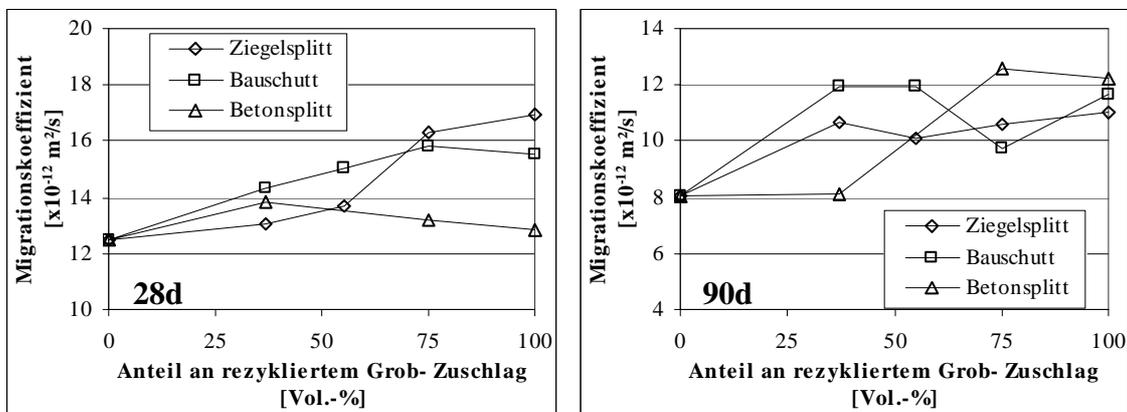
**Bild 27:** Würfeldruckfestigkeit  $\beta_{w200}$  nach 28 Tagen in Abhängigkeit vom Anteil an rezykliertem Grobzuschlag

Um die Auswirkungen der Ersatzrate und der Herkunft des rezyklierten Zuschlags auf das Eindringen von Wasser und Chlorid zu überprüfen, wurden sowohl kapillare Saugversuche als auch Migrationsversuche durchgeführt.

In **Bild 28** sind die Migrationskoeffizienten  $D_{RCM}$  nach 28 und nach 90 Tagen in Abhängigkeit vom Anteil an rezykliertem Grobzuschlag dargestellt. Es ließ sich zwar tendenziell feststellen, dass mit zunehmendem Anteil an rezykliertem Grobzuschlag ein geringerer Chlorideindringwiderstand vorlag. Jedoch lag der Unterschied zwischen einem Beton mit ausschließlich natürlichem und einem Beton mit ausschließlich rezykliertem Grobzuschlag nach 28 Ta-

gen bei nur knapp 30 % und nach 90 Tagen bei nur knapp 40 %. Aus anderen Untersuchungen ist bekannt, dass das Ergebnis des RCM-Versuchs um bis zu 20 % streuen kann. Demnach ist aus baupraktischer Sicht mit den vorliegenden Untersuchungen kein signifikanter Einfluss aus dem Anteil an rezyklierten Grob-Zuschlag auf das Chloriddiffusionsverhalten im rezykliertem Beton zu erkennen.

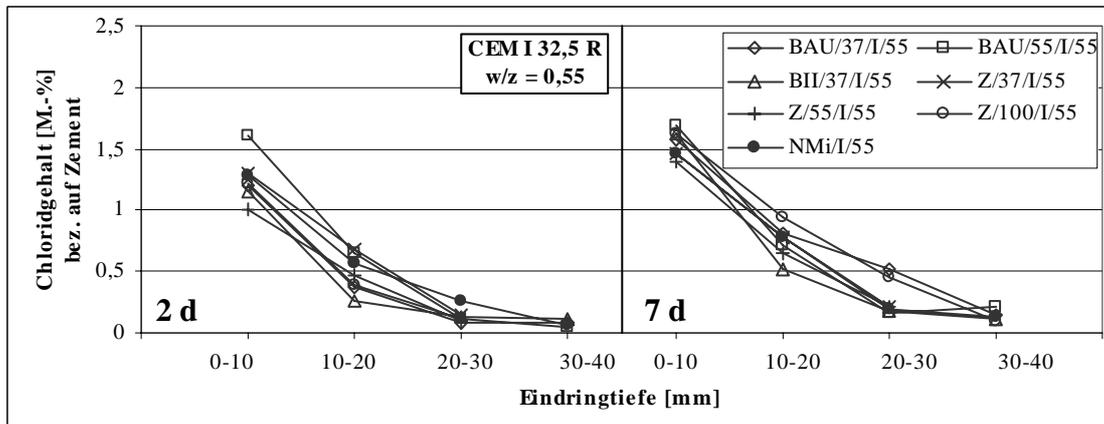
Darüber hinaus konnte auch aus der Herkunft des rezyklierten Zuschlags kein signifikanter Einfluss auf das Chloriddiffusionsverhalten festgestellt werden. Insbesondere da die schwachen Tendenzen, die nach 28 Tagen vorlagen, durch die Versuche nach 90 Tagen nicht bestätigt werden konnten, **Bild 28**.



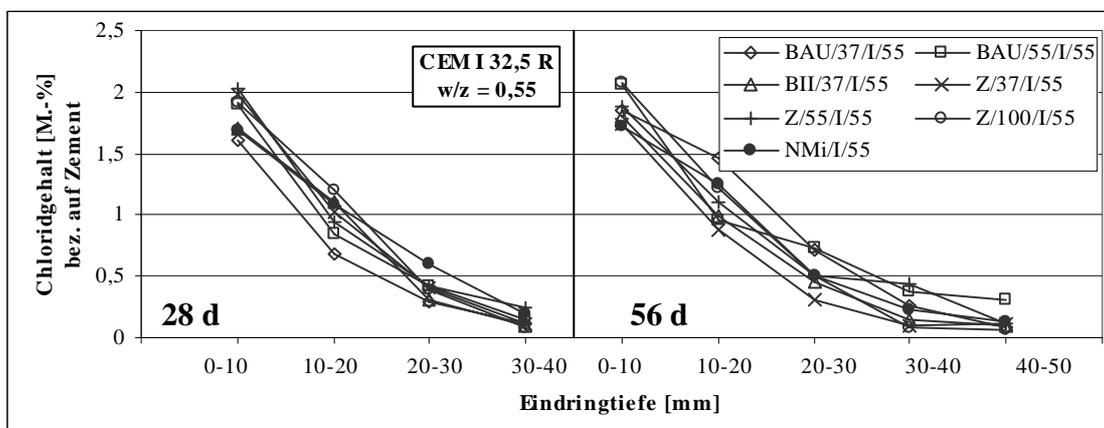
**Bild 28:** Chlorid-Migrationskoeffizient  $D_{RCM}$  ermittelt im RCM-Versuch nach 28 Tagen (links) und nach 90 Tagen (rechts) in Abhängigkeit vom Anteil an rezykliertem Grobzuschlag

Die Chloridprofile die infolge kapillaren Saugens in 3 %-iger NaCl-Lösung an rezyklierten Betonen bestimmt wurden, sind in **Bild 29 + 30** dargestellt. Aus den ermittelten Verläufen ließ sich weder eine Abhängigkeit zur Ersatzrate von Grobzuschlag noch eine Abhängigkeit zur Herkunft des rezyklierten Zuschlags ableiten. Dies wird besonders deutlich, wenn man das Chloridprofil des Beton mit ausschließlich Naturzuschlag näher betrachtet. Aufgrund der Ergebnisse des Migrationsversuchs wurde erwartet, dass dieser Beton (NMi/I/55) im Vergleich zu den rezyklierten Betonen die geringsten Chloridgehalte aufweist. Dies war jedoch zu keinem untersuchten Zeitpunkt der Fall. Einzelne rezyklierte Betone wiesen geringere Chloridgehalte als der Beton mit Naturzuschlag auf. Betrachtet man nun die einzelnen Datenpunkte der Chloridprofile in der jeweiligen Entnahmetiefe, dann kann man gut erkennen, dass die Einzelwerte um eine gewisse Streubreite ( $\pm 0,3-0,5$  M.-%) streuen. Aus anderen Untersuchungen ist bekannt, dass gerade Chloridprofilbestimmungen aus Bohrmehlproben, auch

wenn – wie im vorliegenden Fall – Mittelwerte aus mehreren Proben gebildet werden, entsprechenden Streuungen unterworfen sind. Von daher ist aus der Auswertung der Chloridprofile zu folgern, dass keine Abhängigkeiten, weder zur Herkunft des rezyklierten Zuschlags noch zur Ersatzrate vorliegen.

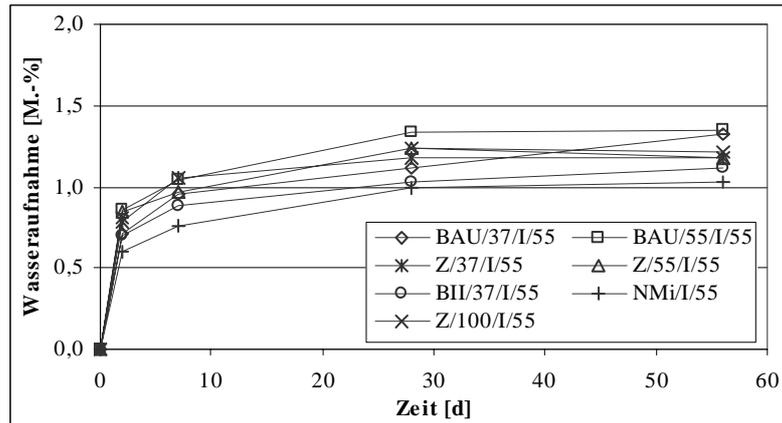


**Bild 29:** Chloridprofile von rez. Betonen nach 2- und 7-tägiger Konstantlagerung in 3 %-iger NaCl-Lösung, hier: Variation der Zuschlagherkunft und der Ersatzrate



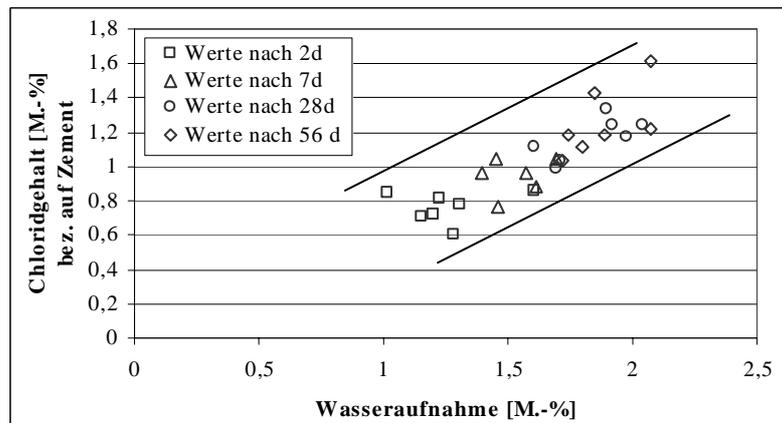
**Bild 30:** Chloridprofile von rez. Betonen nach 28- und 56-tägiger Konstantlagerung in 3 %-iger NaCl-Lösung, hier: Variation der Zuschlagherkunft und der Ersatzrate

Die Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme dagegen ist im Labor erfahrungsgemäß wesentlich exakter zu bestimmen als der Gehalt eindringender Chloride. Die ermittelten Verläufe sind in **Bild 31** dargestellt. Hier zeigt der Beton mit dichten Naturzuschlägen die erwartungsgemäß geringste Wasseraufnahme, der rezyklierte Beton mit Bauschutt (55 Vol.-% Ersatzrate) zeigt die größte Wasseraufnahme. Jedoch sind auch hier keine signifikanten Abhängigkeiten zu den untersuchten Parametern zu erkennen.



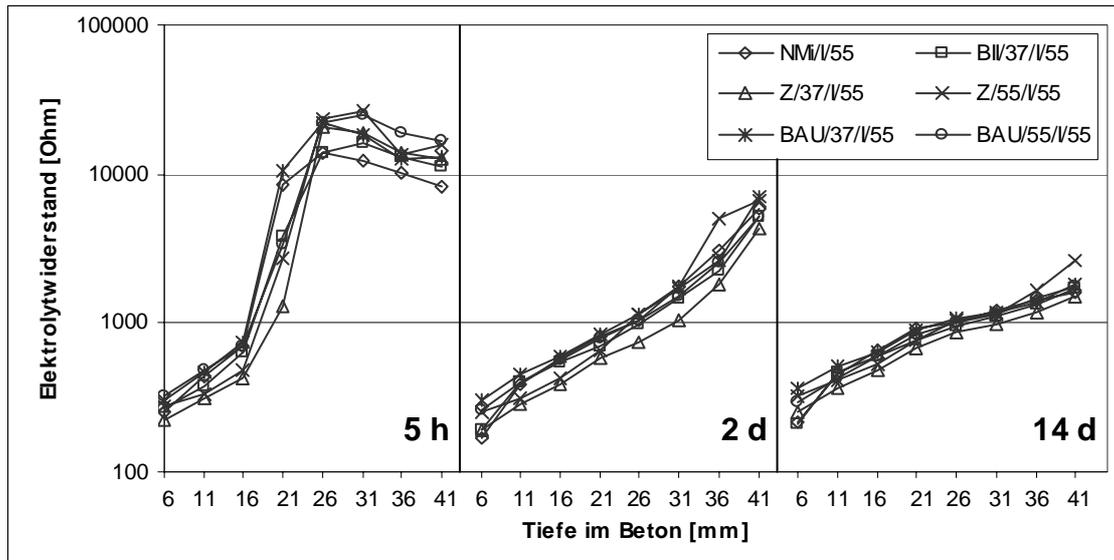
**Bild 31:** kapillare Wasseraufnahme von rezyklierten Betonproben unter Variation des Anteil an rezyklierten Zuschlägen

In **Bild 32** sind die ermittelten Chloridgehalte im Tiefenprofil 0-10 mm über der zugehörigen Wasseraufnahme aufgetragen. Es ist gut zu erkennen, dass mit zunehmender Wasseraufnahme auch der Chloridgehalt ansteigt.



**Bild 32:** Zusammenhang zwischen Wasseraufnahme und Chloridgehalt (bez. auf Zement) infolge kapillaren Saugens nach der Lagerung in 3 %-iger NaCl-Lösung

Um das Verhalten von kapillar eindringendem Wasser noch präziser betrachten zu können, wurden einzelne Proben mit Multiringelektroden versehen. Die sich nach 5 h, 2 d und 14 d in der Betonrandzone einstellenden Verläufe der Elektrolytwiderstände sind im **Bild 33** dargestellt. Auch hier ist gut zu erkennen, dass die Verläufe bei den rezyklierten Betonen im Vergleich zu Beton mit dichtem Naturzuschlag nahezu keine Unterschiede aufweisen, d.h. dass die Geschwindigkeit des kapillar eindringenden Wassers bei allen untersuchten Betonen als annähernd gleich angesehen werden kann.



**Bild 33:** Verläufe der Elektrolytwiderstände in der Betonrandzone, 5 h, 2 d und 14 d nach der Lagerung in 3 %-iger NaCl-Lösung, gemessen mit der MRE

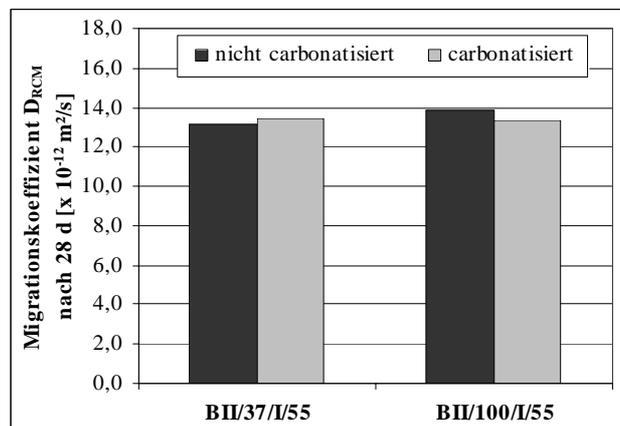
Eigentlich wäre zu erwarten gewesen, dass gerade die rezyklierten Betone mit besonders porösen Zuschlägen, wie z.B. Ziegelsplitt, ein wesentlich stärkeres Wassersaugen aufweisen. Insbesondere wenn man berücksichtigt, dass ofengetrockneter Ziegelsplitt rd. dreimal so viel Wasser aufnehmen kann als ofengetrockneter Betonsplitt. Da mit den vorliegenden Versuchsergebnissen aber kein schlüssiger Beweis zur Erklärung dieses Verhaltens vorgelegt werden kann, muss die Beantwortung der Frage nach den Ursachen für dieses Verhalten unbeantwortet bleiben.

#### 4.6 Einfluss aus carbonatisiertem Betonsplitt

Die bei der Carbonatisierung von Zementstein ablaufenden chemischen Reaktionen tragen dazu bei, dass das ursprüngliche Porengefüge verändert wird. Bei Zementstein aus Portlandzement ist beispielsweise bekannt, dass der Kapillarporenanteil abnimmt und der Gelporenanteil zunimmt [KRO83]. Hinsichtlich des Transportverhaltens von carbonatisiertem Beton gibt es z.T. widersprüchliche Ergebnisse, aber auch klare Hinweise, dass dieser gegenüber dem Eindringen von Flüssigkeiten und Gasen einen geringeren Widerstand aufweisen kann [SPR85].

Auch Betonsplitt bzw. der darin enthaltene Zementstein kann carbonatisiert vorliegen. Einerseits ist es möglich, dass der Altbeton bereits vor seiner Aufbereitung carbonatisiert war. Andererseits kann Betonsplitt nach der Herstellung auch längere Zeit auf einer Halde liegen und dort carbonatisieren. Um festzustellen, ob durch die Verwendung von carbonatisiertem Be-

tonsplitt das Transportverhalten von rezykliertem Beton mit Betonsplitt beeinflusst wird, wurde in einer Versuchsreihe das Chloriddiffusionsverhalten untersucht. Die Betonsplitt wurden hierzu 4-6 Wochen in einer CO<sub>2</sub>-Kammer bei 25°C, 70 % r.F. und 2 % CO<sub>2</sub>-Gehalt künstlich carbonatisiert, bevor sie für die Herstellung von rezyklierten Beton verwendet wurden. Die ermittelten Migrationskoeffizienten sind im **Bild 34** dargestellt. Demnach sind die Unterschiede zu den Vergleichsbetonen mit nicht carbonatisiertem Betonsplitt mit 2,3 % (37 Vol.-% Ersatzrate) bzw. 3,4 % (55 Vol.-% Ersatzrate) äußerst gering. Darüber hinaus kann aus den bei unterschiedlichen Ersatzraten durchgeführten Versuchen keine Tendenz erkannt werden. Von daher wird daraus abgeleitet, dass die durch Carbonatisierung entstehenden Veränderungen des Zementsteins im Betonsplitt keinerlei Auswirkungen auf das Transportverhalten von rezykliertem Beton mit Betonsplitt besitzen.



**Bild 34:** Vergleich der Migrationskoeffizienten von rezykliertem Beton mit carbonatisierten und nicht carbonatisierten Betonsplitt, 28 Tage nach der Herstellung

#### 4.7 Zusammenfassung

Mit den vorliegenden Versuchsergebnissen wurde nachgewiesen, dass durch die Verwendung von rezykliertem Splitt, also rezykliertem Zuschlag mit einer Korngröße von  $> 4\text{mm}$ , keine praxisrelevanten Verschlechterungen gegenüber dem Eindringen von Wasser und Chloriden eintritt, wenn der rezyklierte Beton entsprechend den Vorgaben der DAfStb-Richtlinie, also unter der Berücksichtigung des 10-minütigen Wassersaugens, hergestellt wird. Dabei ist es unbedeutend, ob der Transportvorgang „kapillares Saugen“ oder „Diffusion“ betrachtet wird. Es spielt auch keine Rolle, in welchem Umfang rezyklierter Zuschlag durch Naturzuschlag ersetzt wird und welche Art (Porosität) von rezyklierten Zuschlägen verwendet wird. Bei Betonsplitt ist es auch nicht von Belang, wenn dieser vollständig carbonatisiert vorliegt. Für den Fall, dass dennoch eine Verbesserung des Eindringwiderstandes gewünscht ist, können kon-

ventionelle betontechnologische Maßnahmen, wie sie auch bei herkömmlichen Betonen zur Verbesserung des Eindringwiderstandes verwendet werden, als uneingeschränkt übertragbar eingestuft werden.

Bei der Verwendung von Betonbrechsand sieht das Ergebnis jedoch völlig anders aus. Hier können Wasser und Chloride im Vergleich zu Beton mit Naturzuschlag viel leichter eindringen. Dabei ist es unabhängig, ob Transportprozesse infolge kapillarem Saugen oder Diffusion betrachtet werden. Von einer Verwendung von rezykliertem Sand ist aus diesem Grunde abzuraten. Selbst die Anwendung von betontechnologischen Maßnahmen, wie z.B. die Erniedrigung des w/z-Werts oder die Verwendung von Flugasche oder auch geringere Ersatzraten bieten kein ausreichendes Mittel, dem extrem schlechten Verhalten des rezyklierten Sandes entgegenzuwirken.

## **5 Untersuchungen zum Chlorid- und Wassertransport bei „innerer“ Chloridquelle**

### **5.1 Allgemeines, Übersicht**

In diesem Kapitel wird der Fragestellung nachgegangen, ob und in welchem Umfang durch die Verwendung von chloridhaltigem Betonsplitt in Stahlbeton mit Korrosion an der Bewehrung gerechnet werden muss. Darüber hinaus soll untersucht werden, ob es einfache Maßnahmen gibt, mit denen die korrosionsfördernden Eigenschaften von chloridhaltigem Betonsplitt schon während der Aufbereitung so beeinflusst werden können, dass das Korrosionsrisiko deutlich reduziert wird. Zwar ist die Verwendung chloridhaltiger rezyklierter Zuschläge grundsätzlich verboten, wenn diese einen Eigenchloridgehalt von  $> 0,04$  M.-% aufweisen. Tatsächlich aber kann nicht ausgeschlossen werden, dass einzelne, aber auch größere Mengen an chloridhaltigem Betonsplitt übersehen werden und schließlich in Beton gelangen können. Hierzu muss man sich nur vor Augen halten, welche großen Mengen an Altbeton in einer Aufbereitungsanlage verarbeitet werden. Im Rahmen der Eingangskontrolle kann zwar schon viel dazu beigetragen werden, dass chloridbelasteter Altbeton für eine Verwertung als Zuschlag ausgeschlossen wird. Es ist aber praktisch nicht möglich, jeden chloridbelasteten Altbeton zu erkennen und auszusortieren. Schließlich ist es auch nicht möglich, vereinzelte chloridhaltige Betonsplitt nach der Aufbereitung zu erfassen und auszusortieren, da die derzeit im Rahmen der Eigenüberwachung vorgegebenen Prüfintervalle zur Untersuchung des Chloridgehalts nicht ausreichen und kürzere Prüfintervalle wirtschaftlich nicht vertretbar sind. Es ist also grundsätzlich nicht zu vermeiden, dass chloridhaltiger Betonsplitt in rezyklierten Beton gelangen kann und – wenn er in der Nähe von Stahlbewehrung zum Liegen kommt – durch Abgabe der Chloride Korrosion verursachen kann.

Um die Korrosionsgefahr infolge sich umverteiler Chlorionen ausreichend sicher erfassen zu können, wurden zunächst die grundlegenden Zusammenhänge für die Umverteilung von Chlorionen (Kap. 5.2) und Wasser (Kap. 5.3) durch speziell hierfür entwickelte Versuche erfasst. Ergänzend wurden dann noch Korrosionsversuche (Kap. 5.5) durchgeführt, mit denen tatsächlich ablaufende Korrosionsprozesse am Stahl beobachtet werden konnten.

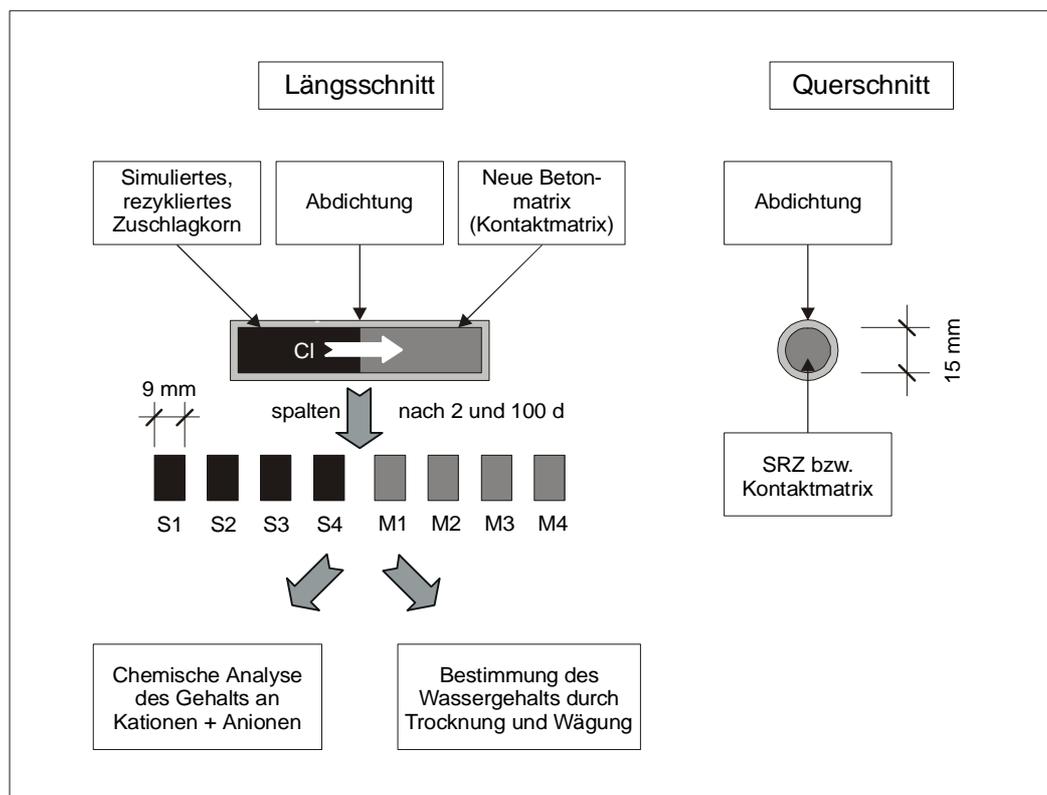
Mit den grundlegenden Versuchen der Kapitel 5.2 und 5.3 war beabsichtigt, die tatsächlichen Einflussgrößen auf mögliche Transportvorgänge und damit indirekt auch auf mögliche Korrosionsvorgänge zu separieren und diese später im Korrosionsversuch (Kap. 5.5) entsprechend

zu verifizieren. Denn mit den Korrosionsversuchen kann zwar grundsätzlich geklärt werden, ob Korrosionsvorgänge ablaufen, die zugrundeliegenden Umverteilungsvorgänge zwischen Betonsplittkorn und neuem Beton können damit aber nicht dargestellt werden.

## 5.2 Umverteilung von Chloriden

### 5.2.1 Entwicklung eines geeigneten Versuchsaufbaus, Untersuchungen

Wenn ein chloridhaltiger Betonsplitt von frischem Zementleim umhüllt wird, dann werden Chloride aus dem Betonsplitt heraus in die frische Zementleimmatrix umverteilt. Der Transport der Chloride in der frischen Zementleimmatrix und mit fortschreitender Zeit im erhärteten Zementstein sind wissenschaftlich beschreibbar. Bislang war aber noch nicht bekannt, in welchem Maße die betontechnologischen Eigenschaften des Betonsplitts die Umverteilungsvorgänge aus dem Betonsplittkorn heraus beeinflussen. Denn die unterschiedlichen betontechnologischen Eigenschaften wirken sich unmittelbar auf die Chloridbindung und damit die tatsächliche Mobilisierbarkeit von Chloridionen innerhalb des Betonsplittkorns aus.



**Bild 35:** Schematische Übersicht über den Versuchsaufbau zur Untersuchung der Umverteilungsvorgänge

Von daher sollten die Umverteilungsvorgänge in einem Laborversuch simuliert werden und zwar so, dass alle relevanten Einflussparameter mit berücksichtigt werden konnten. Im Rahmen von Voruntersuchungen [KRO00] wurde schließlich ein Versuchsaufbau entwickelt, mit dem die Umverteilungsprozesse gut beobachtet werden konnten, **Bild 35**.

Der Probekörper bestand einerseits aus einem „simulierten“ rezyklierten Zuschlagkorn (SRZ) und andererseits aus einer Mörtelmatrix (im folgenden Kontaktmatrix genannt). Um einen weitestgehend eindimensionalen Umverteilungsprozess zu erzeugen, wurde die Abmessung des Probekörpers möglichst klein gewählt: der Durchmesser der zylindrischen Probe betrug 15 mm, die Länge insgesamt 72 mm.

Um eine dichte Ummantelung des Probekörpers zu gewährleisten, wurde ein Stück Schrumpfschlauch mit Innenschmelzkleber auf das SRZ aufgeschrumpft. Danach wurde als Schalung für die Kontaktmatrix ein 36 mm langes Stück eines Kunststoffrohres (PE, ebenfalls  $\varnothing$  15 mm) auf diesen Schrumpfschlauch gestellt und mit einem dampfdichten Isolierband fixiert.

Der fertig gemischte Mörtel/Zementleim (Kontaktmatrix) wurde dann mit einem Spatel in dünnen Schichten in das Kunststoffrohr gefüllt und nach jeder Schicht durch Aufsetzen des gesamten Probekörpers auf einem Rütteltisch verdichtet. Anschließend wurde die Probe im Feuchtklima 20 °C/95 % r.F. gelagert. Nach einem Tag wurde die bis dahin noch offene Unterseite sowie die Oberseite der Probe mit Silikon abgedichtet.

Zu den jeweiligen Untersuchungsterminen wurde zuerst die gesamte Abdichtung entfernt und anschließend der Probekörper in Scheibchen gespalten. Mit einer eigens hierfür entwickelten Apparatur war es möglich, Scheibchen mit einer Dicke von ca. 9 mm ( $\pm$  1 mm) und nahezu glatten Bruchflächen zu erzeugen.

Die gebrochenen Scheibchen wurden sofort in Bechergläser gegeben, deren Leergewicht zuvor ermittelt worden war. Zur Bestimmung des Wassergehalts wurden die Bechergläser mit den Scheibchen sofort und nach der Lagerung im Trockenschrank bei 105°C bis zur Massenkonzanz gewogen.

Nach der Bestimmung des Wassergehalts wurden die zu untersuchenden Scheibchen in einem Achat-Mörser gemahlen und dabei gleichzeitig homogenisiert. Anschließend kam das Mehl zum nochmaligen Trocknen für 24 Stunden in den Trockenschrank bei 105°C.

Von dem Mehl wurde anschließend eine Probe von 1 g mit 25 ml 18%iger Salpetersäure aufgeschlossen. Nach einer Reaktionszeit von 10 Minuten wurde die Lösung über einen Blau-

bandfilter filtriert. 1 ml des klaren Filtrats wurde in eine Testküvette pipettiert und in einem Spektralphotometer über die Färbungsintensität der Testlösung der Chloridgehalt bestimmt.

Neben der Bestimmung der Gesamtchloridgehalts wurden an ausgewählten Probekörpern auch die Gehalte von löslichen bzw. „freien“ Chloriden bestimmt. Hierzu wurde die Mehlprobe mit 40 ml bidestilliertem Wasser bei 20 °C unter 30-minütigem Rühren eluiert. Anschließend wurde das Eluat über einen Membranfilter filtriert und dieses auf ein Gesamtvolumen von 50 ml aufgefüllt. Das Filtrat wurde anschließend wiederum mit einem Spektralphotometer hinsichtlich des Chloridgehalts analysiert.

Selbstverständlich ist der Begriff „freies“ Chlorid im vorliegenden Fall wissenschaftlich nicht belastbar. Denn die Bestimmung des exakten Gehalts an freien Chloriden ist mit der hier gewählten Methode nicht gewährleistet. Grundsätzlich kann der freie Chloridgehalt nur durch das Auspressen einer Porenlösung annähernd genau abgeschätzt werden [TUT82, TR89A]. Aber selbst hier ist die Gefahr groß, dass durch zu hohe Drücke während des Auspressen ein Großteil der physikalisch gebundenen Chloride ebenfalls mit ausgepresst wird. Zudem benötigt man einerseits feucht gelagerte Beton/Zementsteinproben und andererseits größere Mengen an Beton/Zementstein, um eine Menge an Porenlösung zu erhalten, die chemisch noch analysiert werden kann. Im vorliegenden Fall waren die Proben jedoch so klein, dass diese nicht ausgepresst werden konnten. In der Literatur wurden aber noch weitere Wege begangen, um den freien Chloridgehalt abzuschätzen. So wurden z.B. gemahlene Proben in Ethylalkohol eluiert [TEN67]. Daneben wurde aber auch untersucht, inwieweit durch Elution gemahlener Proben in Wasser Aussagen über den freien Chloridgehalt möglich sind [ARY87]: im direkten Vergleich zu Auspressversuchen ergaben sich bei den wässrig eluierten Proben um rd. 20 % größere Chloridgehalte. Demnach ist klar, dass durch eine wässrige Elution der freie Chloridgehalt nicht exakt bestimmt werden kann. Grundtendenzen sind aber auf jeden Fall erkennbar, weswegen diese Methode letztlich auch gewählt wurde.

Für jeden zu untersuchenden Parameter wurden 4 Proben hergestellt. Je 2 Proben wurden 2 d und 100 d nach dem Aufbringen der Kontaktmatrix gespalten und die gewonnenen Scheibchen wurden weiter analysiert. Um den Aufwand für die chemischen Untersuchungen in einem vertretbaren Rahmen zu halten, wurden nicht alle Scheibchen analysiert. Lediglich die ersten beiden Scheibchen der Kontaktmatrix, die in direkter Nähe zum SRZ lagen und die für die Betrachtung der Chlorid-Umverteilung besonders relevant waren, wurden bei allen untersuchten Parametern hinsichtlich des Gesamtchloridgehalts untersucht. Nur an ausgewählten

Proben wurden komplette Chloridprofile (Gesamtgehalt und auch frei löslicher Gehalt) ermittelt.

### 5.2.2 Ausgangsstoffe

Die betontechnologischen Einflüsse und Zusammenhänge beim Eindringen von Chloriden und Wasser in Beton sind bislang ausführlich erforscht worden. Es ist davon auszugehen, dass diese Zusammenhänge auch auf den Transport von Chloriden in der Kontaktmatrix bzw. neuen Zementstein zutreffen, da dieser Vorgang dem Eindringen von Chloriden von „außen“ sehr ähnlich ist.

Auf der anderen Seite ist aber nicht bekannt, wie sich betontechnologische Einflüsse auswirken, wenn Chloride aus einem Beton bzw. Betonsplittkorn heraus umverteilt werden, also z.B. das Chloridbindeverhalten diverser Zemente die Umverteilung von Chloriden aus einem Betonsplittkorn heraus behindert. Aus diesem Grund wurde nur die betontechnologische Zusammensetzung des SRZ verändert, die Eigenschaften der Kontaktmatrix für alle Versuche aber gleich belassen.

- SRZ

Zur Herstellung der SRZ wurden Betonbalken ( $l \times b \times h = 100 \times 150 \times 700 \text{ mm}^3$ ) hergestellt und aus diesen nach 100 d Wasserlagerung Bohrkerne ( $\varnothing = 15 \text{ mm}$ ) entnommen. Bei den Betonen wurde die Zementart und der w/z-Wert wie folgt variiert:

w/z:        0,40  
              0,70

Zementart: CEM I 32,5 R

              CEM I 32,5 NW/HS

              CEM III/B 32,5 (Eigenschaften s. **Tabelle A1** im Anhang)

Für die Mischungszusammensetzung der Betone s. **Tabelle A10** im Anhang.

Die Bohrkerne wurden mit Diamantbohrkronen an einer Ständerbohrmaschine trocken entnommen. Es wurde nicht nass gebohrt, um Auslaugvorgänge und andere Beeinflussungen der Zusammensetzung der Porenflüssigkeit zu vermeiden. Für die Bohrkronen wurden speziell für diesen Zweck gehärtete, segmentierte und mit Kaliberschutz versehene Schneidelemente angefertigt. Die Kühlung erfolgte über eine Spülmanschette an der an Stelle des Wassers Druckluft eingeblasen wurde. Durch eine Abstimmung von Drehzahl und zugeführter Druckluft konnten die Bohrkerne unter einer maximalen Erhitzung bis auf ca. 40°C gebohrt

werden. Nach der Entnahme wurden die Bohrkern aus Beton zur Vermeidung von Carbonatisierungsprozessen in speziellen Behältern, die mit reinem Stickstoff gefüllt waren, zwischengelagert.

Um die SRZ mit Chloriden zu dotieren, wurden diese nach dem Bohren für mindestens 8 Wochen in 3 %-iger NaCl-Lösung gelagert. Somit war sichergestellt, dass aufgrund der geringen Probekörperabmessungen in allen Poren ein Konzentrationsausgleich stattfinden konnte.

- Kontaktmatrix

Zur Nachstellung der Matrix, die im rezyklierten Beton das rezyklierte Zuschlagkorn umgibt, wurden Mörtel hergestellt (sogen. Kontaktmatrix). Dafür wurde ein CEM I 32,5 R und als Zuschlag Isarsand ( $\rho = 2,70 \text{ kg/dm}^3$ ) in der Lieferkörnung 0/4 mm verwendet. Der w/z-Wert betrug 0,70 und der Zementgehalt wurde bei ausreichender Verarbeitbarkeit und geringer Neigung zum Bluten auf  $340 \text{ kg/m}^3$  festgelegt.

### 5.2.3 Variation der Vorbehandlung von SRZ

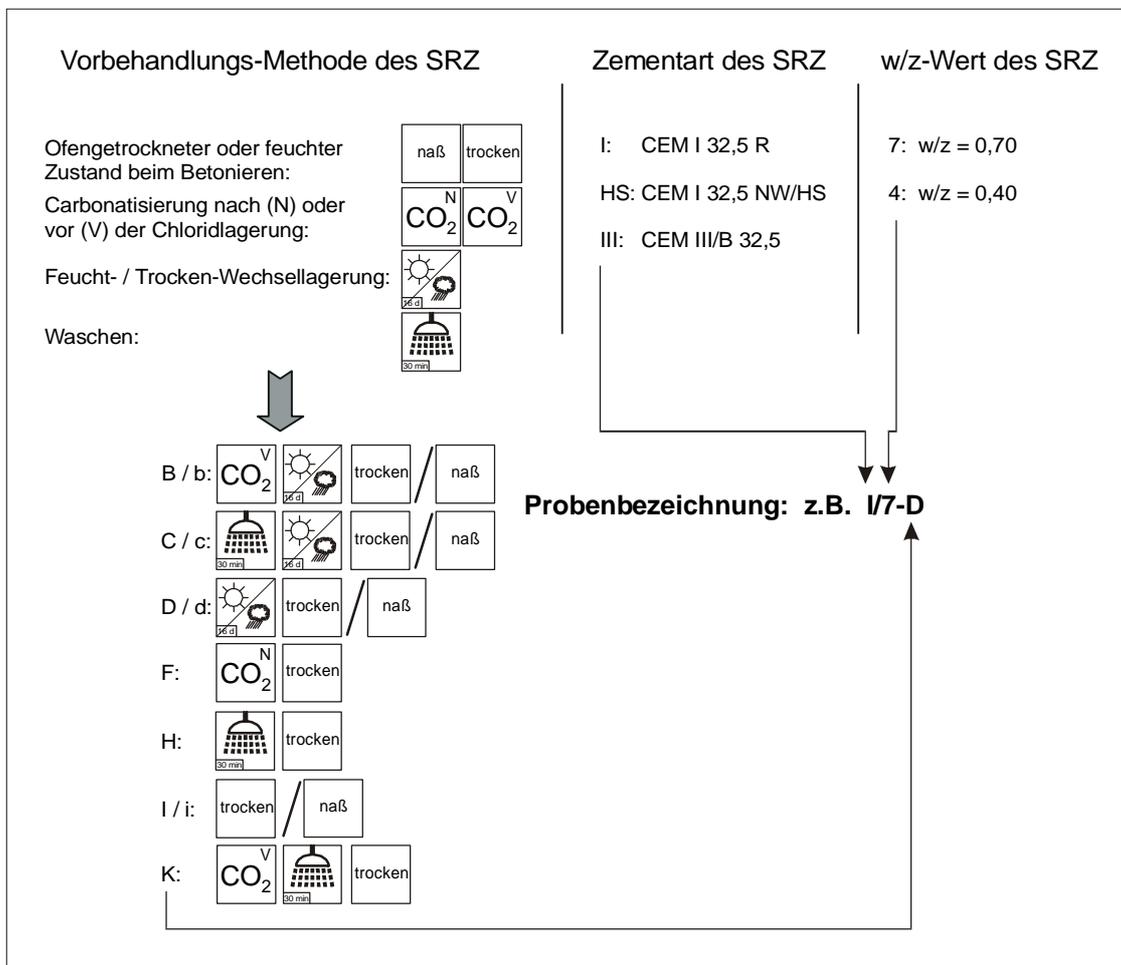
Um diverse Einflüsse auf die Umverteilung besser erfassen zu können, wurden die SRZ mit unterschiedlichen Maßnahmen vorbehandelt. So sollte u.a. untersucht werden, wie sich die Verwendung ofengetrockneter bzw. wassergesättigter SRZ auswirkt. Hierzu wurden die SRZ nach der Chloridlagerung bei  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  im Ofen und unter Stickstofflagerung bis zur Massekonstanz getrocknet. Dann wurden die SRZ entweder im ofengetrockneten Zustand weiterverarbeitet oder für die Simulation des praxisrelevanten Vorbefeuchtens 10 Minuten vor dem Aufbringen der Kontaktmatrix mit einer Pipette mit Wasser kontinuierlich beträufelt.

Daneben wurde auch der Frage nachgegangen, ob aus carbonatisierten SRZ mehr Chloride umverteilt werden. Hierzu wurden die SRZ nach der Lagerung im Ofen bis zur Massekonstanz in einem Carbonatisierungsschrank ( $\text{CO}_2$ -Gehalt der Umgebungsluft ca. 2 %) bei einer Temperatur von  $20^\circ\text{C}$  und einer relativen Luftfeuchtigkeit von ca. 70 % vollständig carbonatisiert. Beendet wurde die Lagerung, wenn an frisch gespaltenen Bruchflächen von SRZ kein Farbumschlag durch aufgesprühtes Phenolphthalein mehr feststellbar war.

Schließlich war es aber auch wichtig abzuklären, ob mit einfachen baupraktischen Methoden der Chloridgehalt von chloridhaltigen Splittkörnern schon im Rahmen der Aufbereitung reduziert werden kann. Aus der Untersuchung von salzhaltigen mineralischen Baustoffen ist bekannt, dass die in der Porenflüssigkeit gelösten Salze beim Trocknen der Probe an der Oberfläche auskristallisieren können [LAR99, NAE92]. Dieser Vorgang sollte genutzt werden.

Von daher wurden einige SRZ nach der Lagerung im Ofen bis zur Massekonstanz einer wechselnden Nass- / Trocken-Lagerung ausgesetzt. Dabei wurden die SRZ in 4 Zyklen jeweils 2 Tage im Wasser und 2 Tage im Trockenschrank bei 40°C gelagert. Daneben wurde aber auch nur ein einmaliger Waschvorgang betrachtet. Für diesen wurden die Zuschläge 30 min lang mit 40 °C warmen Wasser gespült. Die erhöhte Wassertemperatur wurde gewählt, weil bei Auswaschversuchen von chloridkontaminierten Bauteilen nachgewiesen werden konnte, dass bei höheren Wassertemperaturen die Effusionsrate von Chloriden erheblich verstärkt wird [FRE82] und dieser Vorteil auch bei den vorliegenden Versuchen genutzt werden sollte.

In **Bild 36** sind alle Vorbehandlungs-Methoden einschließlich der für die Ergebnisdarstellung gewählten Beschriftung erläutert.



**Bild 36:** Vorbehandlungs-Methoden der SRZ und die für die Ergebnisdarstellung gewählten Symbole und Probenbezeichnungen

## 5.2.4 Ergebnisse

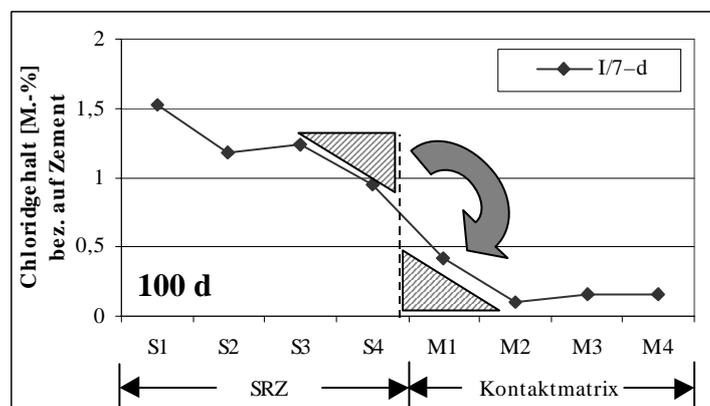
## 5.2.4.1 Grundsätzliches

Alle ermittelten Ergebnisse sind im Anhang A1 in den **Tabellen A13-A16** zusammengestellt.

**Tabelle 1:** Ausgangschloridgehalte der SRZ nach der Chloridlagerung

SRZ	Chloridgehalt [M.-%]	
	bez. auf Beton	bez. auf Zement
I/7	0,262	2,038
I/4	0,172	1,250
III/7	0,173	1,346
III/4	0,143	1,040
HS/7	0,237	1,844

Alle im folgenden dargestellten und genannten Chloridgehalte beziehen sich grundsätzlich auf den in der jeweiligen Probe vorhandenen Zementgehalt. Die Ausgangschloridgehalte der SRZ nach der Chloridlagerung sind der **Tabelle 1** zu entnehmen. Durch die Lagerung in 3%-iger NaCl-Lösung ergaben sich Gesamtchloridgehalte von 1,04 bis 2,04 M.-%. Aus umfangreichen Untersuchungen von Brückenbauwerken [LAY03] ist bekannt, dass diese Konzentrationen in Beton alleine durch Spritzwasserbeaufschlagung entstehen können. Konzentrationen von größer 2 M.-% stellen jedoch eher die Ausnahme dar.

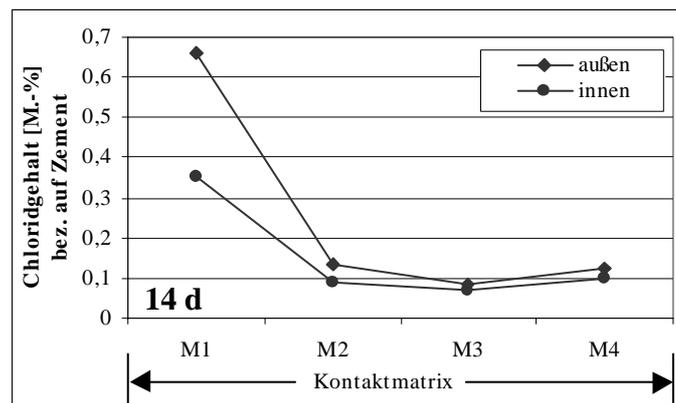


**Bild 37:** Ausgewähltes Chloridprofil (Gesamtchloridgehalt) zur Darstellung der Umverteilung

In **Bild 37** ist beispielhaft ein Verlauf des Gesamtchloridgehalts der Probe I/7/d dargestellt, wie er sich 100 d nach dem Aufbringen der Kontaktmatrix im Modellprobekörper einstellte. Es ist gut zu erkennen, dass die Chloride aus dem SRZ in die Kontaktmatrix umverteilt wurden. Selbstverständlich waren die Verläufe nicht bei allen Proben so ideal, häufig wiesen diese stärkere Sprünge auf. Diese Unregelmäßigkeiten sind aber auch aus der Bestimmung

von Chloridprofilen an existierenden Bauwerken bekannt und sind durch die nicht immer homogene Betonzusammensetzung (ungleichmäßiger Zuschlaganteil) bedingt.

In der Nähe von geschalteten Bereichen ist die Zusammensetzung von Beton/Mörtel im Vergleich zu tiefer liegenden Bereichen nicht vergleichbar. Es ist dort i.d.R. eine Erhöhung des Zementleimanteils mit einem leicht erhöhten w/z-Wert gegenüber der Zusammensetzung im Inneren des Betons festzustellen. Im vorliegenden Fall wurde die Kontaktmatrix über eine Schalung aufgebracht. Von daher wurde vor den Hauptversuchen überprüft, ob durch Zementleimanreicherung auch die Umverteilung der Chloride ungleichmäßig über den Querschnitt der Kontaktmatrix stattfand. Hierzu wurde an einer ausgewählten Probe der Zementleim der Kontaktmatrix in einer Dicke von 1 mm abgedreht, aufgefangen und separat hinsichtlich des Gesamtchloridgehalts analysiert. Im **Bild 38** ist der Verlauf des Chloridgehalts (bezogen auf die Masse des Zements) des „äußeren“ gegenüber dem „inneren“ Bereich dargestellt, der Chloridgehalt wurde auf den Zementanteil in der Kontaktmatrix bezogen.



**Bild 38:** Verläufe des Gesamtchloridgehalts in der Kontaktmatrix, hier: Unterschiede im äußeren und inneren Bereich

Demnach wurden erwartungsgemäß im äußeren Bereich mehr Chloride umverteilt als im Inneren. Aufgrund der Volumenverhältnisse (der äußere Bereich hat nur einen Anteil von rd. 20 % am Gesamtquerschnitt) kann dieser Unterschied aber für die weiteren Untersuchungsergebnisse vernachlässigt werden.

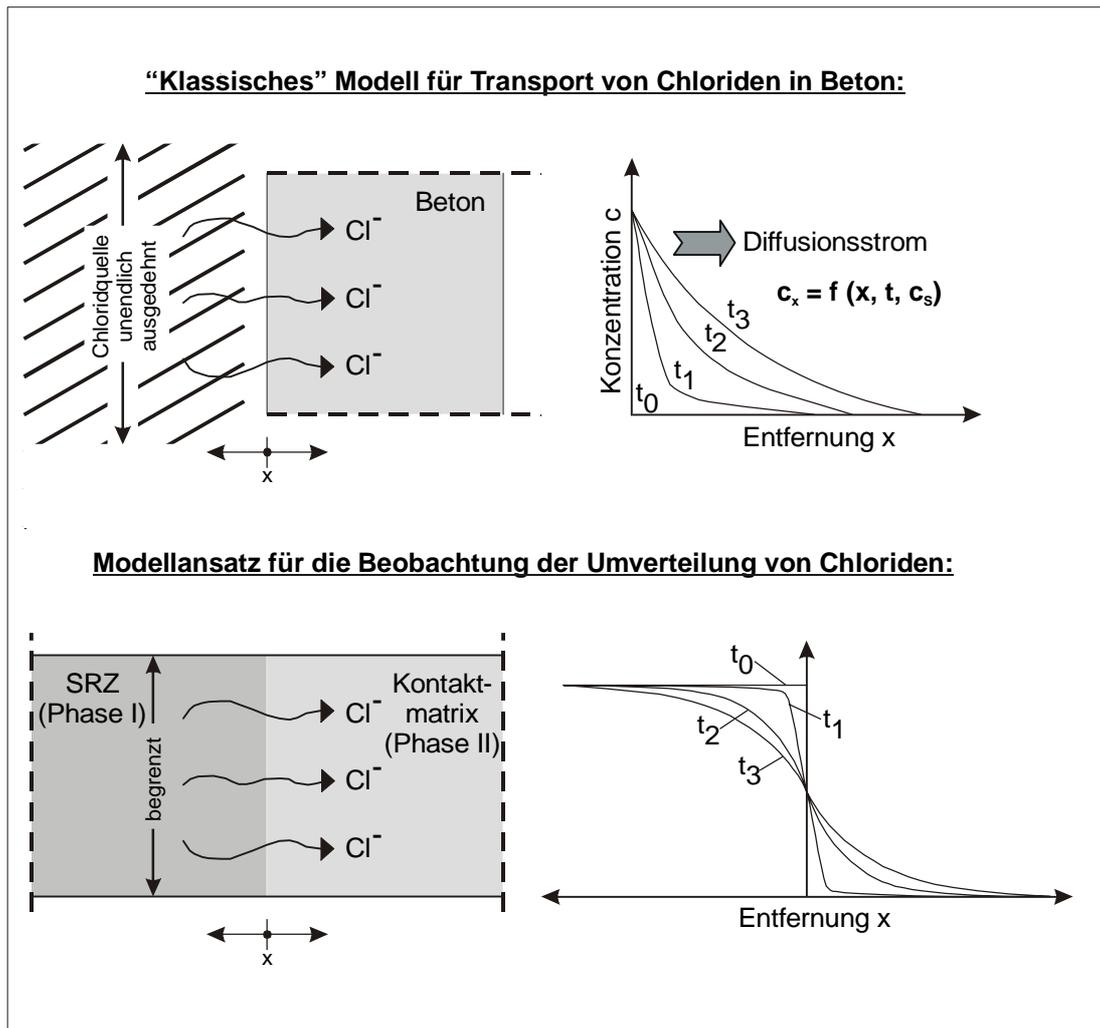
#### 5.2.4.2 Maßgebender Transportmechanismus, Vergleichsrechnung

Wenn alle Kapillaren im Beton mit Wasser gesättigt sind und weder Druck, elektrische Spannung oder Temperatur auf den Beton einwirken, dann können Ionen i.d.R. nur über Diffusionsvorgänge transportiert werden. Da bei den hier durchgeführten Versuchen ein Austrocknen der Probe nicht möglich war und keine externen Einflüsse vorlagen, ist also davon auszugehen, dass der Transport von Ionen i.W. durch Diffusionsvorgänge bestimmt war.

Für die Berechnung von Diffusionsvorgängen in Beton gibt es zahlreiche veröffentlichte Lösungsansätze, die eine Vielzahl von Randbedingungen erfassen. Eine Übertragbarkeit dieser auf die Vorgänge bei der Umverteilung ist jedoch nicht möglich. Bei diesen Berechnungsansätzen wird nämlich ausschließlich der Vorgang betrachtet, wenn Chloride von einer externen Quelle in den Beton eindringen. Darüber hinaus werden nur Systeme betrachtet, die durch zwei zur x-Achse senkrechten Ebenen begrenzt werden (eindimensional). Die Übertragbarkeit auf die dreidimensionale Ebene im Beton ist gewährleistet, da ein Chloridangriff i.W. über große Oberflächenbereiche verteilt vorliegt. Demzufolge handelt es sich dabei im klassischen Sinne um „Diffusion in einem einphasigen System“.

Bei den hier vorliegenden Versuchen bzw. bei der Umverteilung von Ionen handelt es sich per Definition aber um Diffusion in einem zweiphasigen System. Im Unterschied zum vorher genannten wird der Diffusionsvorgang von den Eigenschaften zweier Phasen bestimmt und nicht nur einer. Im **Bild 39** ist dieser Unterschied schematisch dargestellt.

Die im Eindimensionalen ermittelten Versuchsergebnisse sind aber nicht ohne Einschränkungen auf die Praxis übertragbar, denn dort laufen Umverteilungsvorgänge aus dem Betonsplittkorn in die umgebende Matrix tatsächlich über die x, y und z-Achse ab. Um also die Versuchsergebnisse der Umverteilung bewerten zu können, wird im folgenden auf die Berechnung von Diffusionsvorgängen in einem eindimensionalen zweiphasigen System eingegangen.



**Bild 39:** Schematische Darstellung des Unterschiedes zwischen der Diffusion infolge einer konstanten Chloridquelle (1-Phasen-System) und infolge von Umverteilungsvorgängen (2-Phasen-System)

Bei dem hier dargestellten Rechenansatz zur Diffusion in einem zweiphasigen System wird davon ausgegangen, dass die Phasen I und II unendlich ausgedehnt sind. Nach [JOS57] können die Rechenansätze in 2-Phasen-Systemen für unendliche Systeme auf endliche Systeme angewandt werden, solange Konzentrationsänderungen in der Nähe der Enden vernachlässigbar sind. Für die vorliegenden Versuche ist diese Annahme gerechtfertigt, da sowohl infolge der Probengeometrie als auch infolge der Versuchsdauer Konzentrationsänderungen am Ende des SRZ als auch der Kontaktmatrix nicht zu erwarten sind. Des weiteren wird davon ausgegangen, dass sich an der Phasengrenzfläche ein Gleichgewicht einstellt und bei  $x = 0$  die Phasengrenzfläche vorliegt. Bezeichnet man nun die Diffusionskoeffizienten der Phasen I bzw. II mit  $D_I$  und  $D_{II}$ , so ergeben sich folgende Differentialgleichungen und Randbedingungen:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_I \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad \text{für } x < 0$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_{II} \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad \text{für } x > 0$$

$$c = c_0 \quad \text{für } x < 0, \quad c = 0 \quad \text{für } x > 0 \quad \text{bei } t = 0$$

Geht man davon aus, dass an der Phasengrenzfläche die Strömung kontinuierlich für  $t > 0$  erfolgt, so gelten folgende Beziehungen:

$$\frac{c_{x=0}^I}{c_{x=0}^{II}} = \chi$$

$$D_I \left( \frac{\partial c}{\partial x} \right)_{x=0}^I = D_{II} \left( \frac{\partial c}{\partial x} \right)_{x=0}^{II}$$

Für diese Randbedingungen wurden die Differentialgleichungen bereits von [JOS57] gelöst. Die Konzentration  $c$  in der Tiefe  $x$  wird dann wie folgt beschrieben:

$$c = c_0 \left\{ 1 - \frac{\chi \sqrt{D_{II}}}{\chi \sqrt{D_{II}} + \sqrt{D_I}} \left[ 1 + \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{D_I t}} \right) \right] \right\}, \quad \text{für } x < 0 \quad \text{(Gleichung 5)}$$

$$c = c_0 \frac{\chi \sqrt{D_I}}{\chi \sqrt{D_{II}} + \sqrt{D_I}} \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{D_{II} t}} \right) \right], \quad \text{für } x > 0 \quad \text{(Gleichung 6)}$$

wobei:  $c_0$ : Ausgangskonzentration in der Phase I

$\chi$ : Quotient der Konzentration  $c_{I,0}$  und  $c_{II,0}$  bei  $x = 0$ , hier  $\chi = 1$ ,

$D_{I,II}$ : Diffusionskoeffizienten in den Phasen I und II

$t$ : Zeit

Um die Übertragbarkeit des Rechenansatzes auf die vorliegenden Versuchsergebnisse zu überprüfen, wurden auf der Grundlage der Versuchsergebnisse über sogenanntes „Kurven-Fitting“ Diffusionskoeffizienten aus den **Gleichungen 5+6** berechnet und diese mit Werten aus der Literatur verglichen.

Dabei wurde die Diffusionskoeffizienten ( $D_I$  und  $D_{II}$ ) der 2 Phasen des Modellprobekörpers in den **Gleichungen 5+6** so lange iterativ optimiert, bis der rechnerische Verlauf der Chloridkonzentration möglichst wenig von den einzelnen Messpunkten abwich. Diese Berechnungen

erfolgten auf der Grundlage der Methode der „kleinsten Quadrate“ (auch „Kleinste Quadrate Schätzung“ KQS genannt) und wurden mit dem Programm Mathematica durchgeführt.

Bei den Randbedingungen wurde  $c_0$  als konstant angenommen. Am Phasenübergang wurde  $\chi = 1$  gesetzt. Gefittet wurden nur Chloridprofile (Gesamtchloridgehalte), die nach 100-tägiger Kontaktdauer vorlagen, **Tabelle A13** im Anhang. Die Konzentration  $c_0$  wurde durch Mittelwertbildung der Chloridkonzentrationen der Scheibchen S1 und S2 bestimmt.

In der **Tabelle 2** sind die unter Verwendung des Rechenansatzes „gefitteten“ und die aus der Literatur entnommenen Diffusionskoeffizienten, welche mit Hilfe verschiedener Methoden (z.B. RCM-Versuch oder Diffusionszelle) an Betonen im Labor und in der Praxis bestimmt wurden, gegenübergestellt. Demnach besteht ein guter Zusammenhang. Es ist also davon auszugehen, dass die Umverteilung nach den Transportgesetzen der Diffusion abläuft.

**Tabelle 2:** Vergleich von berechneten und von der Literatur entnommenen Diffusionskoeffizienten

Werte aus Umverteilungsversuchen			Werte aus der Literatur		Quelle
Zement	w/z-Wert	D [m <sup>2</sup> /s]	w/z-Wert	D [m <sup>2</sup> /s]	
CEM I 32,5 R *	0,7	12 x 10 <sup>-12</sup>	0,75	1,99-24,40 x 10 <sup>-12</sup>	[TAN 00]
CEM I 32,5 R **	0,7	15 x 10 <sup>-12</sup>			
CEM I 32,5 R	0,4	2 x 10 <sup>-12</sup>	0,40	0,4-8,9 x 10 <sup>-12</sup>	[TAN00, GEH00]
CEM I/HS 32,5	0,7	11 x 10 <sup>-12</sup>	-	-	-
CEM III/B 32,5	0,7	3 x 10 <sup>-12</sup>	0,60	3,4 x 10 <sup>-12</sup>	[GEH00]

\*: berechnete Werte für SRZ

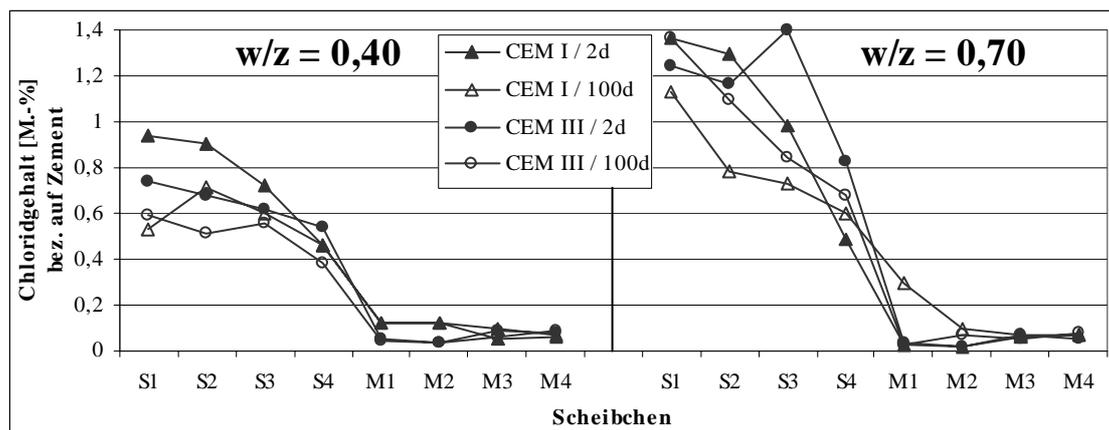
\*\* : berechnete Werte für die Kontaktmatrix

Selbstverständlich ist aus der Betrachtung von Chlorid-Transport-Phänomenen in 1-Phasen-Systemen von Beton bekannt, dass sowohl die Chloridbindung [TAN93, LAR98] als auch die zeitabhängige Veränderung des Chlorid-Diffusionskoeffizienten [GEH00, PET95] den Chloridtransport beeinflusst. Demzufolge wurden auch schon zahlreiche Rechenansätze für 1-Phasen-Systeme vorgelegt, die diese Einflüsse einbeziehen, siehe hierfür z.B. [SER92, JEN99, TRU00]. Im vorliegenden Fall wurden diese Phänomene aber nicht berücksichtigt, da für die Umverteilung im Beton bislang noch kein geeigneter Rechenansatz veröffentlicht wurde und eine Herleitung eines solchen Rechenansatzes keine zentrale Aufgabe dieser Arbeit darstellte. Trotzdem zeigte sich, dass die Annahme der vollständigen Löslichkeit der Chlorionen bei der Berechnung zur Bestimmung der Diffusionskoeffizienten zu sinnvollen Ergebnissen führte und

damit nachgewiesen werden konnte, dass die Diffusion der entscheidende Mechanismus für die Umverteilung von Chlorionen darstellt.

#### 5.2.4.3 Einflüsse aus der Porosität des Betonsplitts

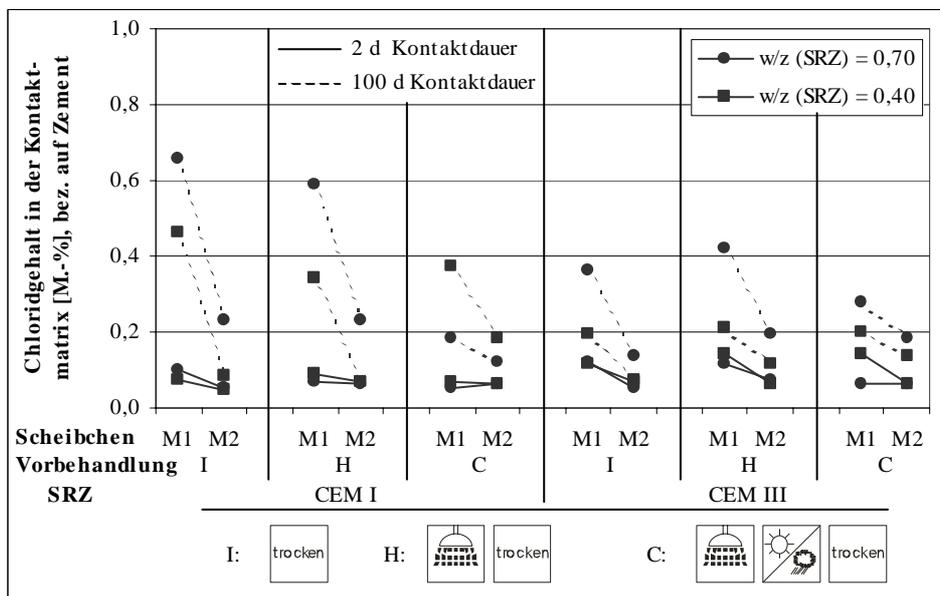
Bei der Betrachtung von Umverteilungsprozessen in porösen Werkstoffen liegt es nahe zu vermuten, dass aus einem Werkstoff mit größerer Porosität eine insgesamt größere Menge an Chloriden umverteilt werden kann als aus einem Werkstoff mit niedrigerer Porosität. Beton jedoch hält dieser simplen Betrachtungsweise nicht stand, da die Zusammensetzung und damit auch die Porosität chemische und physikalische Chloridbindevorgänge beeinflusst, die möglichen Umverteilungsprozessen entgegen wirken können. So ist aus der Literatur bekannt, dass Zementstein bei größer werdendem w/z-Wert eine zunehmende Chlorid-Bindekapazität aufweisen kann [ARY90, TRI84, TRI89A, TRI89B]. Konkrete Erklärungen hierfür liegen jedoch nicht vor und so können keine klaren Rückschlüsse auf mögliche Umverteilungsprozesse gezogen werden. Zumal es auch Versuchsergebnisse gibt, die genau das Gegenteil belegen [TAN93]. Im vorliegenden Fall war also zu untersuchen, ob aus einem Betonsplitt von Altbeton mit größerer Porosität auch tatsächlich mehr Chlorid in den neuen Zementstein von rezyklierten Beton umverteilt wird. Da es in der Praxis durchaus vorstellbar ist, dass chloridbelastete Altbetone sowohl mit sehr hohem als auch sehr niedrigem w/z-Wert vorkommen können, wurden im Laborversuch Betone mit  $w/z = 0,40$  und  $w/z = 0,70$  und aus diesen Betonsplitt (SRZ) hergestellt.



**Bild 40:** Verläufe von „freien“ Chloridgehalten bei Variation der Porosität des SRZ und einheitlicher Vorbehandlungsmethode (hier: Vorbehandlung I)

Im **Bild 40** sind Verläufe „freier“ Chloride dargestellt. Betrachtet man nur die Verläufe im Bereich der Scheibchen S1-S4, also des Altbetons bzw. SRZ, dann ist gut zu erkennen, dass die SRZ mit  $w/z = 0,40$  insgesamt geringere Gehalte an freien Chloriden (Max.  $\approx 0,9$  M.-%) aufwies als die der SRZ mit  $w/z = 0,70$  (Max.  $\approx 1,4$  M.-%). D.h., bei höherer Porosität stehen also auch mehr Chlorionen für die Umverteilung zur Verfügung. Jedoch lassen sich aus den Verläufen der „freien“ Chloride keine Auswirkungen auf die tatsächlich erfolgte Umverteilung erkennen, denn die Gehalte der freien Chlorionen sind in der Kontaktmatrix (Scheibchen M1-M4) insgesamt sehr gering.

Hierzu ist es sinnvoller die Gesamt-Chloridgehalte der Kontaktmatrix und hier insbesondere die Scheibchen M1 und M2 näher zu betrachten, **Bild 41**. In der Kontaktmatrix von Proben mit SRZ höherer Porosität war der Gesamtchloridgehalt insbesondere nach 100 d Kontaktdauer größer als bei Proben mit niedrigerer Porosität. Beim Vergleich der unterschiedlichen Vorbehandlungsmaßnahmen oder auch Zementarten war die Tendenz eindeutig, lediglich die Probe mit einem SRZ aus CEM I und der Vorbehandlungsmethode C zeigte dieses Verhalten nicht.



**Bild 41:** Gesamtchloridgehalte in den Scheibchen M1 und M2 (Kontaktmatrix) nach 2 und 100 d Kontaktdauer, hier: Variation der Porosität des SRZ

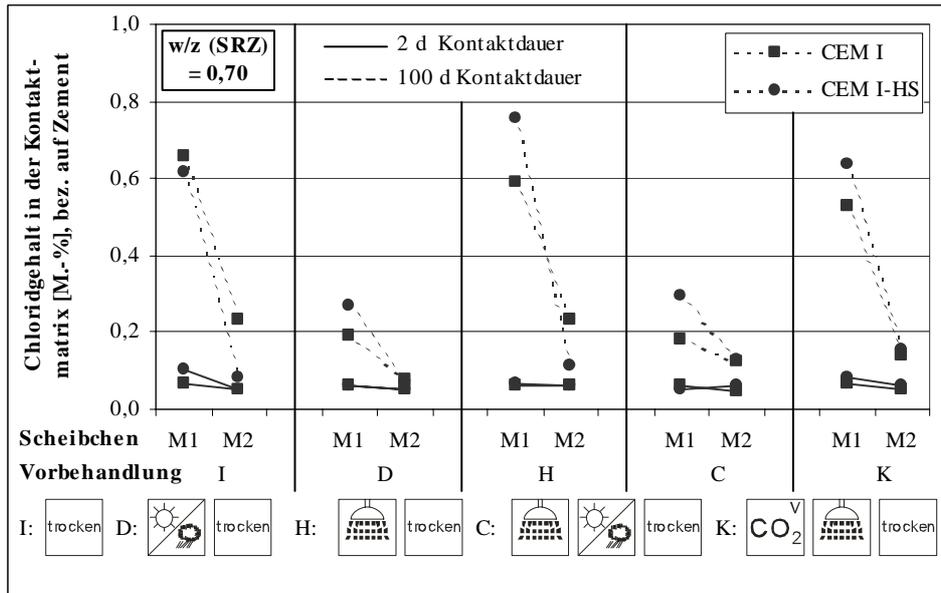
Demzufolge werden bei Umverteilungsprozessen aus einem Betonsplitt mit höherer Porosität mehr Chlorionen transportiert als aus einem Betonsplitt mit niedriger Porosität.

#### 5.2.4.4 Einflüsse aus der Zementart des Betonsplitts

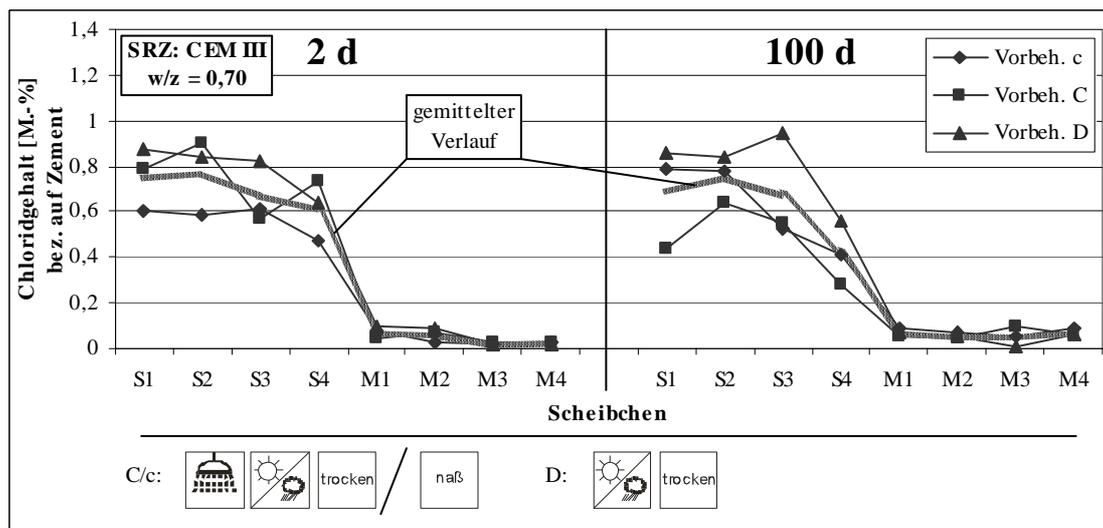
Ähnlich wie der w/z-Wert beeinflusst auch die Art des Bindemittels die Chloridbindekapazität von Zementstein. Neben physikalischen Bindungen des Chlorids über Wechselwirkungen mit den unterschiedlich polaren Hydratationsprodukten des Zementsteins in der Porenwandung, können Chloride auch chemisch gebunden werden. Mittlerweile wurde nachgewiesen, dass alle Ausgangsprodukte von reinem Portlandzement – also die Klinkerbestandteile – im Laufe der Hydratation mit Chlorid komplexe chemische Verbindungen eingehen können. Bei der Hydratation von  $C_3A$  kann jedoch – im Vergleich zu den anderen Klinkerbestandteilen – am meisten Chlorid gebunden werden. Das Reaktionsprodukt ist auch unter dem Namen „Friedel’sches Salz“ bekannt. Je nach Herkunft des Zementklinkers ist der Anteil an  $C_3A$  unterschiedlich. Bei den besonders sulfatbeständigen Portlandzementen ist dieser Anteil  $< 3$  M.-%, damit können diese Zemente auch deutlich weniger Chloride chemisch binden [TRI84, ARY90]. Bei Hochofenzementen mit einem hohen Hüttensandanteil ist zwar ebenfalls wenig Portlandzementklinker und damit  $C_3A$  enthalten, hier werden aber deutlich mehr Chloride gebunden als bei einem Portlandzement mit hohem  $C_3A$  -Gehalt [NAG93, ARY90].

Da mit diesen Erkenntnissen aber nicht eindeutig abgeleitet werden kann, inwiefern die unterschiedliche Chloridbindekapazität der verschiedenen Zementarten sich auf mögliche Umverteilungsprozesse auswirkt, wurde dieser Aspekt im folgenden näher betrachtet. Für die Untersuchungen wurden Proben mit SRZ aus reinem Portlandzement, aus  $C_3A$ -armen Portlandzement und aus Hochofenzement mit einem Hüttensandanteil  $> 80$  % hergestellt.

Aus Betonsplitt bzw. SRZ mit  $C_3A$ -armen Portlandzement wurden i.d.R. die größten Mengen an Chlorid umverteilt. Jedoch war der Unterschied gegenüber SRZ mit reinem Portlandzement nicht allzu groß (mittlerer Unterschied des Gesamtchloridgehalts nach 100 d im Scheibchen M1: 0,065 M.-%). Nach nur 2 d wies die Kontaktmatrix im Scheibchen M1 zwar tendenziell leicht höhere Gesamtchloridgehalte auf, aber erst nach 100 d war der Unterschied im Scheibchen M1 eindeutig zu erkennen, **Bild 42**. Dabei ist aber auch zu berücksichtigen, dass die SRZ aus  $C_3A$ -armen Portlandzement nach der Chloridlagerung um ca. 10 % niedrigere Gesamtchloridgehalte aufwiesen als die SRZ aus reinem Portlandzement, **Tabelle 1**. Demnach ist die Korrosionsgefahr infolge Chlorid-Umverteilung aus Betonsplitt, dessen chloridhaltiger Altbeton mit  $C_3A$ -armen Portlandzement hergestellt wurde, als tendenziell einzustufen.



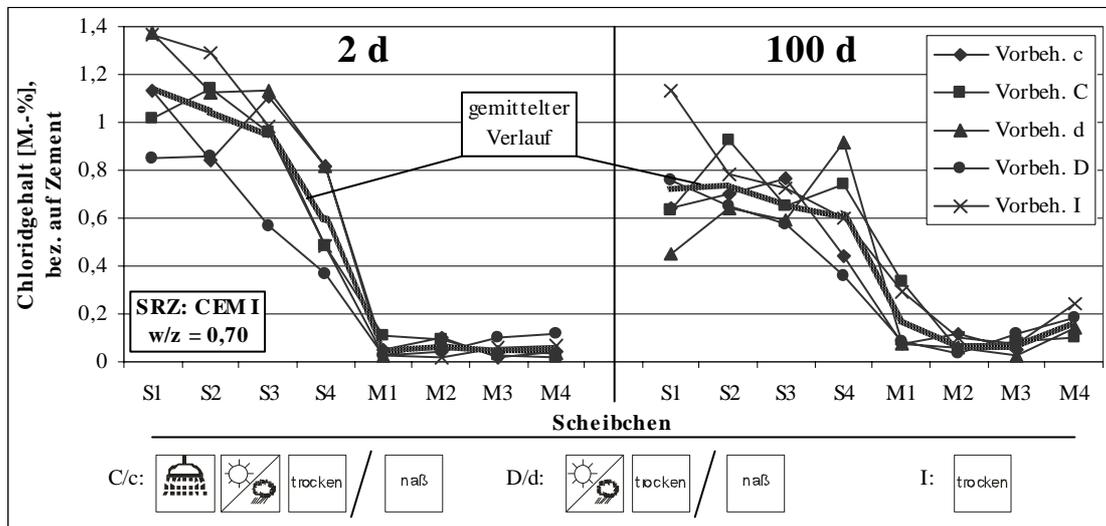
**Bild 42:** Gesamtchloridgehalte in den Scheibchen M1 und M2 (Kontaktmatrix) nach 2 und 100 d Kontaktdauer, hier: Auswirkung der Zementart des SRZ



**Bild 43:** Verläufe der „freien“ Chloridgehalte; SRZ aus Hochofenzement

Aus SRZ, die mit Hochofenzement hergestellt wurden, werden deutlich weniger Chlorionen umverteilt als aus SRZ mit reinem Portlandzement. Besonders gut ist dies aus den Verläufen der freien Chloridgehalte zu erkennen. Die freien Chloridgehalte im SRZ mit Hochofenzement haben sich in den Scheibchen S1-S3 selbst nach 100d Kontaktdauer nur wenig verändert, **Bild 43**. Lediglich im Scheibchen S4 ist nach 100 d eine Abnahme festzustellen. Bei den SRZ mit reinem Portlandzement dagegen ist gut zu erkennen, dass nach 100 d über alle Scheibchen der „freie“ Chloridgehalt abgenommen hat, **Bild 44**. Demzufolge wurden bei die-

sen mehr Chloride umverteilt als bei den SRZ aus Hochofenzement, was zudem noch durch den im Mittel höheren Gehalt an freien Chloriden im Scheibchen M1 der Kontaktmatrix nach 100 d belegt wird.

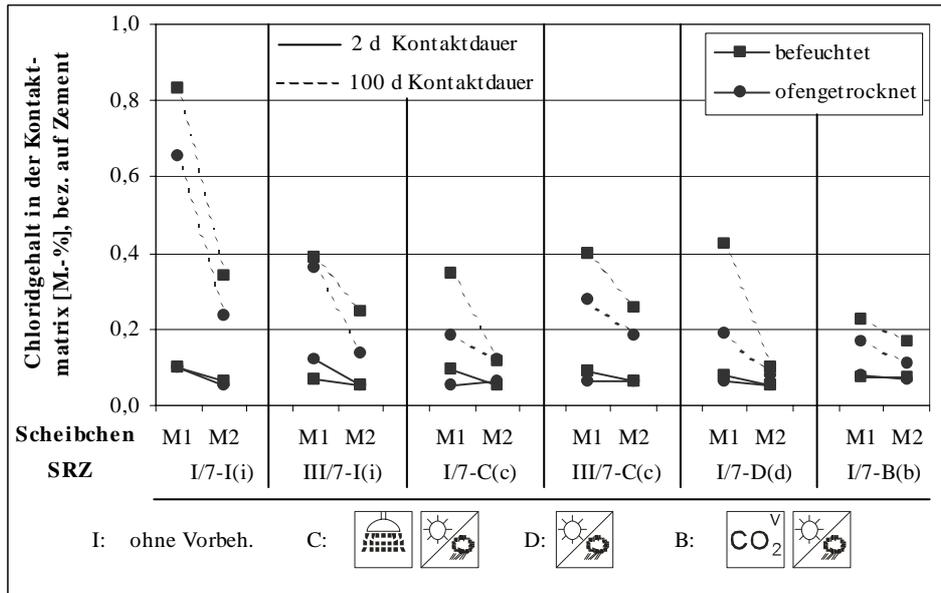


**Bild 44:** Verläufe der „freien“ Chloridgehalte; SRZ aus reinem Portlandzement

#### 5.2.4.5 Einflüsse aus dem Feuchtezustand des Betonsplitts

Bereits nach 2 d insbesondere aber nach 100 d Kontaktdauer wies die Kontaktmatrix sowohl im Scheibchen M1 als auch im Scheibchen M2 bei allen variierten Vorbehandlungsmaßnahmen höhere Gesamtchloridgehalte auf, wenn das SRZ vorbefeuchtet eingesetzt wurde. So ergaben sich im Mittel bei vorbefeuchteten SRZ nach 2 d im Scheibchen M1 rd. 6 % (M2: 2%) und nach 100 d im Scheibchen M1 rd. 47 % (M2: 36 %) größere Gesamtchloridgehalte,

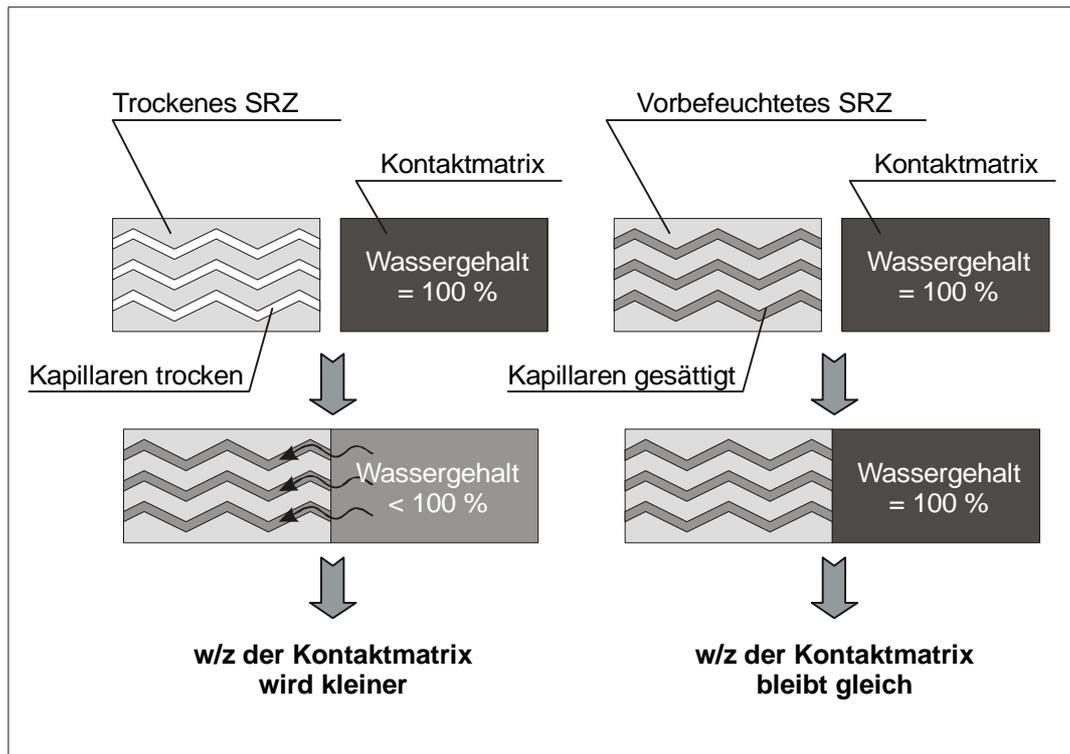
**Bild 45.**



**Bild 45:** Gesamtchloridgehalte in den Scheibchen M1 und M2 (Kontaktmatrix) nach 2 und 100 d Kontaktdauer, hier: Auswirkung der Vorbefeuchtung des SRZ

Wie schon erwähnt, nimmt ofengetrockneter Betonsplitt in den ersten 10 Minuten nach dem Kontakt mit Wasser 90 % der maximal aufnehmbaren Wassermenge auf. Das Wasser wird der Kontaktmatrix also zu einem Zeitpunkt entzogen, bei dem die Hydratationsreaktion gerade erst beginnt. Dies bedeutet, dass die Hydratation der Kontaktmatrix unter einem geringeren w/z-Wert abläuft, **Bild 46**. Demzufolge wird auch die Gesamt-Porosität der Kontaktmatrix reduziert, s. hierzu auch Ergebnisse aus Kapitel 5.2.1. Bei geringerer Porosität ist schließlich auch der Diffusionskoeffizient der Kontaktmatrix geringer. Von daher kann in der Kontaktmatrix weniger Chlorid transportiert und somit auch umverteilt werden als in der von befeuchteten SRZ.

Es muss an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass dieses Ergebnis im Widerspruch zu den Erkenntnissen aus Kapitel 3 steht. Denn dort war bei der Verwendung von ofengetrockneten Splitten eine Zunahme der Porosität sowohl in der Übergangszone als auch der Zementsteinmatrix festgestellt worden. Möglicherweise sind die Unterschiede bei den hier vorliegenden Versuchen an den Modellprobekörpern darauf zurückzuführen, dass die Luft infolge des eindringenden Wassers entweichen konnte und nicht in die Kontaktmatrix verdrängt wurde.



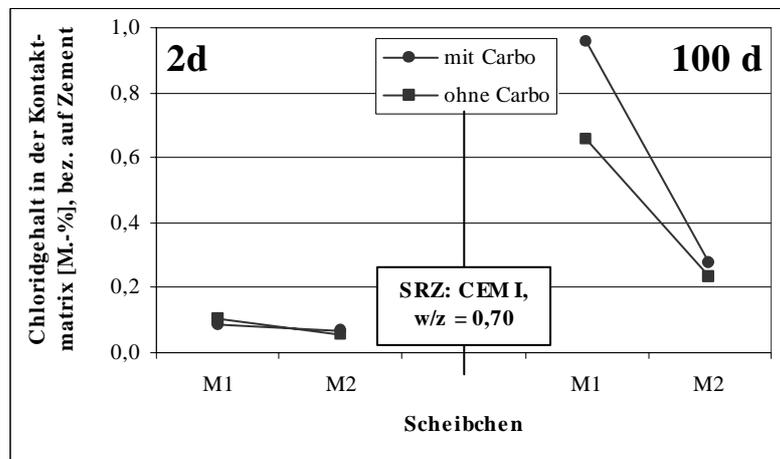
**Bild 46:** Auswirkung der Verwendung ofengetrockneter / vorbefeuchteter SRZ auf den w/z-Wert der Kontaktmatrix

Die geringere Chloridumverteilung bei ofengetrockneten SRZ könnte aber auch dadurch erklärt werden, dass durch das kapillar eindringende Wasser Chloride „huckepack“ in das Innere mittransportiert werden. Dies würde zur Folge haben, dass innerhalb des SRZ an dem Ende zur Kontaktmatrix die Chloridkonzentration abnimmt und am freien Ende eine Aufkonzentration stattfindet. Einige Chloridprofile trockener Betonsplitten nach 2 d bestätigen diese Annahme, s. z.B. **Bild 44**. Demnach stünden in der ersten Zeit nach dem Aufbringen der Kontaktmatrix weniger Chloride für die Umverteilung in die Kontaktmatrix zur Verfügung.

#### 5.2.4.6 Einflüsse aus carbonatisierten Betonsplitten

Die Verbindung des Friedel'schen Salzes steht im hydratisierten Zementstein in einem chemischen Gleichgewicht und wird infolge Carbonatisierung vollständig aufgelöst. D.h., dass ein chloridhaltiger Zementstein infolge Carbonatisierung eine deutlich geringere Chloridbindekazapazität aufweist und entsprechend mehr freie Chloride in der Porenlösung vorhanden sind. Folglich müssen aus carbonatisierten Betonsplitten mehr Chloride umverteilt werden als aus nicht carbonatisierten. Im **Bild 47** sind die Gesamtchloridgehalte in den Scheibchen M1 und M2 infolge der Umverteilung aus carbonatisierten und nicht carbonatisierten SRZ dargestellt. Nach 2 d Kontaktdauer ist noch kein Unterschied festzustellen. Nach 100 d jedoch weist die

Kontaktmatrix bei carbonatisierten SRZ insbesondere im Scheibchen M1 einem um fast 35 % größeren Gesamtchloridgehalt auf als bei nicht carbonatisierten.

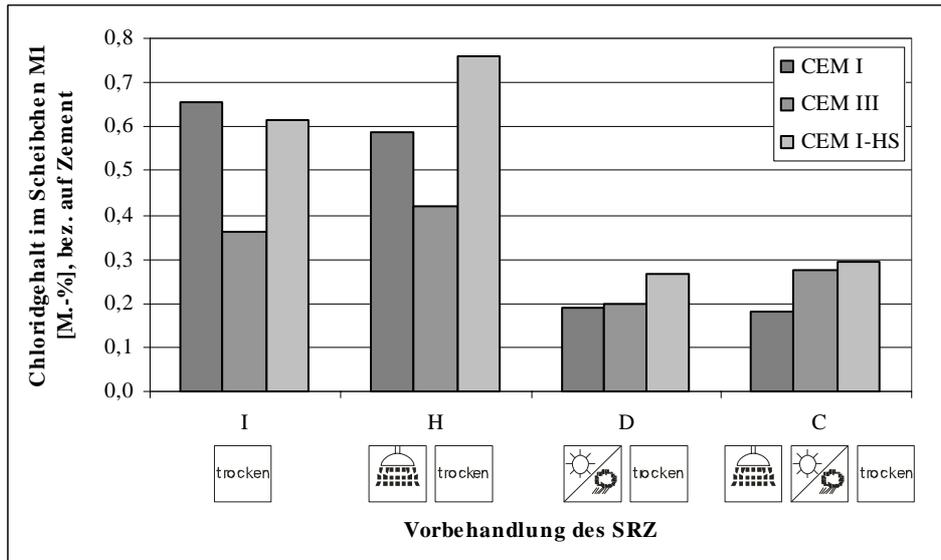


**Bild 47:** Gesamtchloridgehalte in den Scheibchen M1 und M2 (Kontaktmatrix) nach 2 und 100 d Kontaktdauer, hier: Auswirkung der Carbonatisierung von SRZ

#### 5.2.4.7 Einflüsse aus Waschvorgängen

Im **Bild 48** sind die Chloridgehalte im Scheibchen M1 dargestellt, die sich ergaben, wenn die SRZ diversen Waschvorgängen ausgesetzt waren. Es ist gut zu erkennen, dass im Vergleich zu unbehandelten Proben (I) ein einmaliger Waschvorgang (H) keinerlei Auswirkung auf die Umverteilung zeigte, die Chloridgehalte in der Kontaktmatrix waren annähernd gleich groß. Im Gegensatz dazu stand die Wechsellagerung (D und C). Durch diese wurde der Ausgangschloridgehalt der SRZ offensichtlich stark reduziert. Im Vergleich zu unbehandelten Proben wurden nämlich, je nach Zementart des Betonsplitts, um 30 (CEM III/B) bis 70 % (CEM I HS) weniger Chloride in die Kontaktmatrix umverteilt.

Demnach hat sich bestätigt, dass das von salzhaltigen mineralischen Baustoffen bekannte Verhalten, nämlich dass die in der Porenflüssigkeit gelösten Salze beim Trocknen der Probe an der Oberfläche auskristallisieren können, auch auf Trocknungsprozesse von feuchten, chloridkontaminierten Betonsplitten übertragbar ist. Im vorliegenden Fall wurden die SRZ abwechselnd getrocknet und feucht gelagert. So konnten die Salze beim Austrocknen an der Oberfläche auskristallisieren. Bei der Feuchtlagerung wurden die Salze dann in der Lagerungslösung gelöst und standen nicht mehr für Umverteilungsvorgänge zur Verfügung.



**Bild 48:** Chloridgehalt im Scheibchen M1 der Kontaktmatrix, hier: Auswirkung diverser Waschvorgänge auf

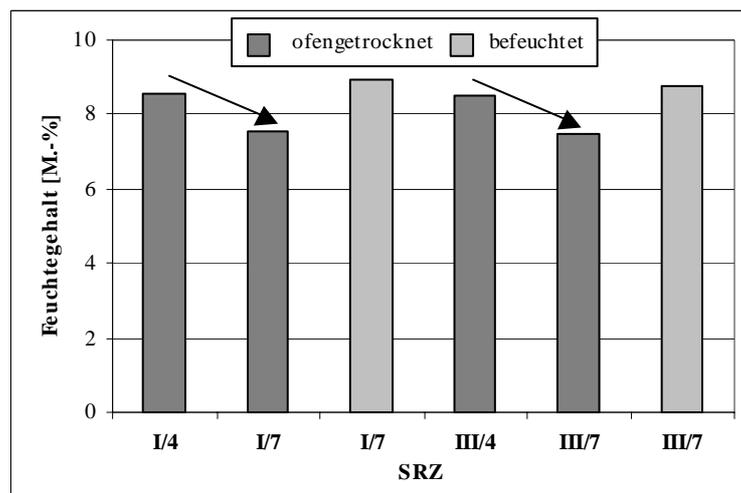
### 5.3 Umverteilung von Wasser

#### 5.3.1 Ergebnisse aus der Wägung abgespaltener Scheibchen

Die durch Wägung der Scheibchen ermittelten Verläufe des Wassergehalts wiesen über die Länge des Modellprobekörpers erwartungsgemäß keine Gradienten auf. Die Wassergehalte der Kontaktmatrix und der SRZ waren über die jeweils 4 Scheibchen annähernd gleichmäßig verteilt. Aus diesem Grund wurden für die folgenden Betrachtungen die Wassergehalte der 4 Scheibchen der Kontaktmatrix und der SRZ nur noch als Mittelwert angegeben.

Die absoluten Wassergehalte der SRZ korrelierten erwartungsgemäß gut mit der aus den Eigenschaften des jeweiligen Altbetons abzuleitenden Porosität. D.h., die durch Rückrechnung des Wassergehalts bestimmte Porosität, unter Annahme einer vollständigen Wassersättigung und einem vollständigen Hydratationsgrad, entsprach i.W. der Porosität der Altbetone, aus denen die SRZ hergestellt wurden.

Bei den Wassergehalten der Kontaktmatrix waren jedoch insbesondere bei den 100 d alten Proben Unterschiede festzustellen, obwohl die Kontaktmatrix bei allen Proben mit der gleichen Betonzusammensetzung hergestellt wurde. Dabei wies die Kontaktmatrix, die auf ofengetrocknete SRZ mit hoher Porosität (w/z-Wert) aufgebracht wurde, um rund 12 % geringere Wassergehalte auf als die, welche auf ofengetrocknete SRZ mit niedriger Porosität aufgebracht wurde, siehe insbesondere Pfeile in **Bild 49**.



**Bild 49:** Wassergehalte der Kontaktmatrix, bestimmt an 100 d alten Proben, unterschieden nach der Porosität und dem Zement des SRZ

Eine Rückrechnung des  $w/z$ -Wertes bei den Proben mit ofengetrockneten SRZ ist jedoch nicht möglich, da nicht davon ausgegangen werden kann, dass die Poren des Kontaktmörtels vollständig mit Wasser gesättigt vorliegen. Dies ist lediglich bei den wassergesättigten SRZ möglich, wobei sich auch erwartungsgemäß ein rechnerischer  $w/z$ -Wert von 0,70 ergab. Trotzdem liefern die Versuchsergebnisse einen klaren Hinweis darauf, dass die Kontaktmatrix bei ofengetrockneten SRZ unter einem geringeren  $w/z$ -Wert hydratisieren konnte als die Kontaktmatrix von vorbefeuchteten Proben. Die Kontaktmatrix wurde dadurch geringfügig dichter. Letztlich wird dies auch durch den höheren Chlorideindringwiderstand bestätigt, welcher an Proben nachgewiesen werden konnte, bei denen die SRZ ofengetrocknet eingesetzt wurden, s. Kap. 5.2.4.5.

Leider ergab die Auswertung der zeitabhängigen Feuchteänderungen der SRZ kein eindeutiges Ergebnis. Manche SRZ zeigten nach 100 d (gegenüber der Messung nach 2 d) eine leichte Zunahme des Wassergehalts, andere SRZ dagegen eine leichte Abnahme. Dabei waren keine Zusammenhänge zu jeglichen betontechnologischen Parametern der SRZ nachzuweisen. Über alle SRZ gemittelt betrug die Änderung des Wassergehalts nach 100 d gegenüber 2 d +3,5 % bei einer Standardabweichung von 7 %.

Da also die Ergebnisse aus der Wägung nicht dazu beitragen konnten, die Frage des mit Wasser gekoppelten Chloridtransports aus einem Betonsplittkorn heraus zu klären, wurden die im folgenden Kapitel beschriebenen Versuche durchgeführt.

### 5.3.2 Feuchtegehaltsbestimmung durch Mikrowellendurchstrahlung

#### 5.3.2.1 Zur Wahl des Messverfahrens, Methodik

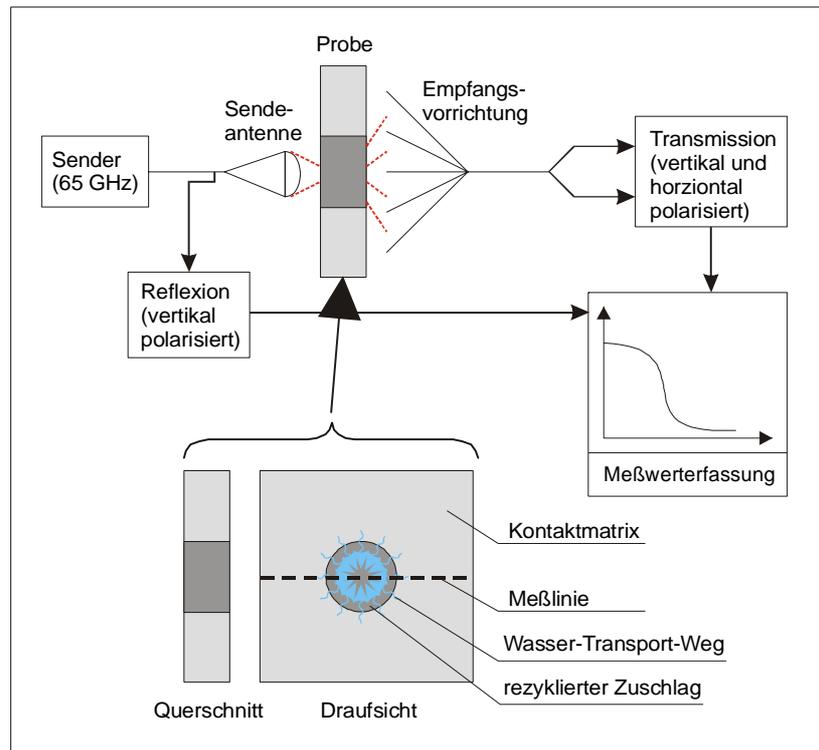
Da über die Wassergehaltsbestimmung infolge Wägung offensichtlich keine ausreichende Messgenauigkeit erzielt werden konnte, um mögliche Transportvorgänge zu erfassen, musste ein Messverfahren ausgewählt werden, das einerseits eine entsprechende Genauigkeit aufwies und andererseits eine hohe Ortsauflösung ermöglichte. Aus diesem Grund wurde die Messung mit Hilfe von Mikrowellen nach Volkwein [VOL91] durchgeführt. Dieses Messverfahren gewährleistet eine hohe örtliche Auflösung und Messungen sind zu beliebiger Zeit und an beliebiger Stelle ohne Eingriff in das Gefüge von Beton möglich. Ein weiterer Vorteil der Messung mit Mikrowellen besteht darin, dass bei der Durchstrahlung einer Betonprobe ausschließlich freies Wasser detektiert wird. Das ebenfalls im Beton vorhandene gebundene Wasser wird durch die Messung nicht erfasst. Dadurch können Wasser-Transportprozesse besonders gut beobachtet werden.

Das Messprinzip beruht auf dem physikalischen Zusammenhang, dass Wasser im Vergleich zu vielen anderen nichtmetallischen Feststoffen hochfrequente elektromagnetische Wellen besonders stark dämpft. Gerade bei einer Frequenz von 65 GHz (Bereich des E-Bandes bzw. Mikrowelle) beträgt die längenbezogene Dämpfung von Wasser 30,5 dB/mm, Dämpfungseinflüsse anderer Stoffe können bei dieser Frequenz vernachlässigt werden.

Im Wesentlichen besteht die verwendete Messanlage aus einem Mikrowellensender, der über eine Sendeantenne die elektromagnetischen Wellen auf die Oberfläche einer Probe abgibt. Über eine an der Rückseite der Probe angebrachte Empfangsantenne und über Bestimmung des Anteils an Reflexion kann der nicht absorbierte Strahlungsanteil (Dämpfung) gemessen werden, **Bild 50**. Für die genauen Zusammenhänge im Aufbau und der Wirkungsweise der Messapparatur wird auf [VOL91] verwiesen.<sup>4</sup>

---

<sup>4</sup> Bei den vorliegenden Untersuchungen wurde die Messeinrichtung leicht modifiziert. Entgegen dem ursprünglichen Aufbau wurden neue Empfangseinheiten ohne Vorverstärkung eingebaut. Die Vorverstärkung brachte den Nachteil mit sich, dass häufig auch während der Messung kalibriert werden musste. Bei den neuen Empfängern war dies nicht mehr notwendig. Darüber hinaus wurde die Anlage so modifiziert, dass die Messwerterfassung nicht mehr analog über einen Schreiber erfolgte, sondern die Messwerte nun über einen Analog/Digital-Wandler direkt in einen PC eingespeist werden konnten.



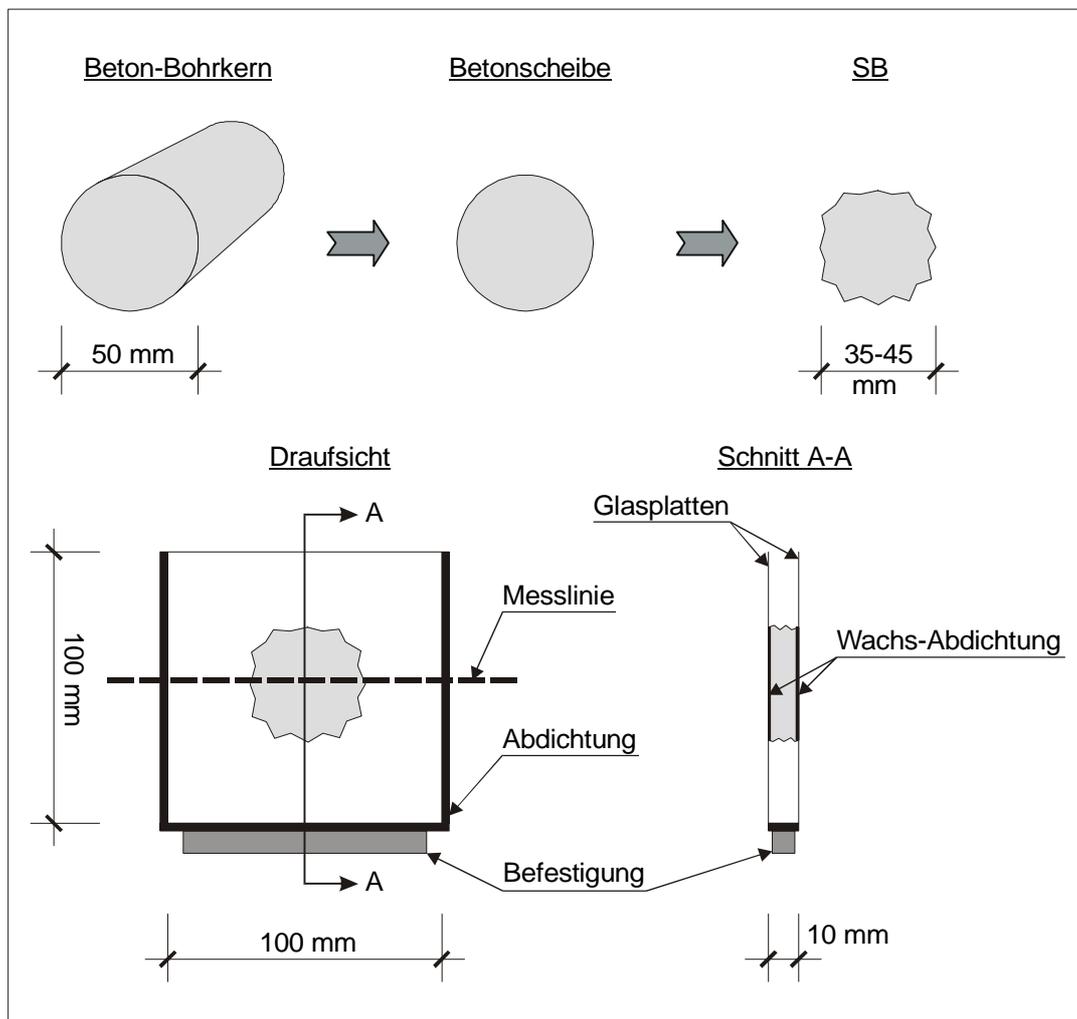
**Bild 50:** Stark vereinfachtes Schema über die Funktionsweise der Mikrowellen-Apparatur

### 5.3.2.2 Entwicklung eines geeigneten Probekörpers, Versuchsdurchführung

Der in Vorversuchen entwickelte Probekörper für die Mikrowellenmessung bestand aus einem in eine Glasküvette eingepassten „simulierten“ Betonsplittkorn (SB), welches von einem Mörtel (Kontaktmörtel) umgeben war.

Für die Herstellung des SB wurde aus einem „Altbeton“ ein Bohrkern ( $\varnothing = 50$  mm) entnommen und aus diesem mit einer Steinsäge Scheiben mit einer Dicke von 10 mm nass herausgesägt. Die Ränder der kreisförmigen Scheibe wurden mit einer Zange so bearbeitet, dass eine raue Oberfläche, ähnlich der Oberfläche eines Betonsplittkorns entstand. Der Durchmesser betrug dann zwischen 3,5 und 4,5 cm. Das SB wurde anschließend zwischen zwei Glasplatten ( $d = 1$  mm, die Mikrowellenstrahlung wurde dadurch nicht messbar gedämpft) eingepasst. Nun wurden drei der vier offenen Seiten abgedichtet, so dass eine nach oben offene Küvette entstand. In Vorversuchen wurde festgestellt, dass die Abdichtung zwischen der Schnittfläche der SB und den Glasplatten besonders sorgfältig ausgeführt werden musste, da sonst das Wasser nicht im Beton, sondern im Spalt zwischen der Glasplatte und dem Beton transportiert wurde. Als geeignet erwies sich hier Modellwachs, welches einerseits die Mikrowellen-

strahlung nicht zusätzlich dämpfte und andererseits eine vollflächige Abdichtung der Fläche gewährleistete. Für den genauen Aufbau und die Abmessungen siehe auch **Bild 51**.



**Bild 51:** Aufbau des Probekörpers für die Feuchtemessung in der Mikrowellen-Apparatur

Bevor der Kontaktmörtel in die Küvette eingebracht wurde, wurde jede Probe mit der Mikrowelle durchstrahlt, um eine Aussage über die Feuchteverteilung im SB zu erhalten. Nach dem Einfüllen des Kontaktmörtels wurde die gesamte Küvette kurz auf einem Rütteltisch verdichtet. Unmittelbar danach wurde eine Messung in der Mikrowellenapparatur durchgeführt. Danach wurden in folgenden Zeitabständen erneut Messungen an jeder Probe durchgeführt:

2 min, 4 min, 6 min, 10 min, 30 min, 1 h, 2 h, 3 h, 1 d, 2 d, 7 d, 28 d, 56 d, 90 d

Für jeden Versuchsparameter wurden 3 Proben hergestellt und die Feuchteverteilung separat bestimmt. Einen Tag nach dem Befüllen mit dem Kontaktmörtel wurde auch die noch nach oben offene Seite abgedichtet.

### 5.3.2.3 Ausgangsstoffe, Versuchsparameter

- SB

Zur Herstellung der SB wurden Betonbalken ( $l \times b \times h = 100 \times 150 \times 700 \text{ mm}^3$ ) hergestellt und aus diesen nach 300 d Wasserlagerung Bohrkerne ( $\varnothing = 15 \text{ mm}$ ) entnommen. Bei den Betonen wurde die Zementart und der w/z-Wert wie folgt variiert:

w/z: 0,40

0,55

0,70

Zementart: CEM I 32,5 R

CEM I 32,5 NW/HS

CEM III/B 32,5 (Eigenschaften s. **Tabelle A1** im Anhang)

Für die Mischungszusammensetzung der Betone s. **Tabelle A10** im Anhang.

- Kontaktmörtel

Zur Nachstellung der Matrix, die im rezyklierten Beton das rezyklierte Zuschlagkorn umgibt, wurden Mörtel hergestellt. Folgende betontechnologische Parameter wurde dabei variiert:

Zementart: CEM I 32,5 R

CEM III/B 32,5 (Eigenschaften s. **Tabelle A1** im Anhang)

w/z-Wert: 0,40

0,70

Um Bluten zu vermeiden und trotzdem zu gewährleisten, dass der Kontaktmörtel in die Küvette gut eingefüllt werden konnte, wurde Basaltmehl als Zuschlag verwendet. Für die genaue Zusammensetzung der Mischungen siehe **Tabelle A11** im Anhang.

Auch bei diesen Versuchen wurde untersucht, inwiefern sich die Verwendung ofengetrockneter bzw. vorbefeuchteter Zuschläge auf den Transport von Wasser auswirkt. Hierzu wurden die SB vor dem Einbau in die Glasküvette bei  $40 \text{ °C}$  im Ofen bis zur Massekonstanz getrocknet. Ca. 1 d vor dem Einfüllen des Kontaktmörtels wurden die Proben aus dem Ofen herausgenommen und bis zur Messung in einem Exsikator gelagert. Bei den Versuchen mit vorbefeuchteten SB wurden die Küvetten 10-15 min vor dem Einbringen des Kontaktmörtels mit Wasser gefüllt. Für die gewählten Probenbezeichnungen s. **Bild 52**.

<u>Parameter SB</u>			<u>Parameter Kontaktmörtel</u>	
Zementart	w/z-Wert	sonstiges	Zementart	w/z-Wert
I: CEM I 32,5 R	7: w/z = 0,70	n: vorbefeuchtet	I: CEM I 32,5 R	7: w/z = 0,70
HS: CEM I 32,5 NW/HS	5: w/z = 0,55	o: ofengetrocknet	III: CEM III/B 32,5	5: w/z = 0,55
III: CEM III/B 32,5	4: w/z = 0,40	c: carbonatisiert		4: w/z = 0,40

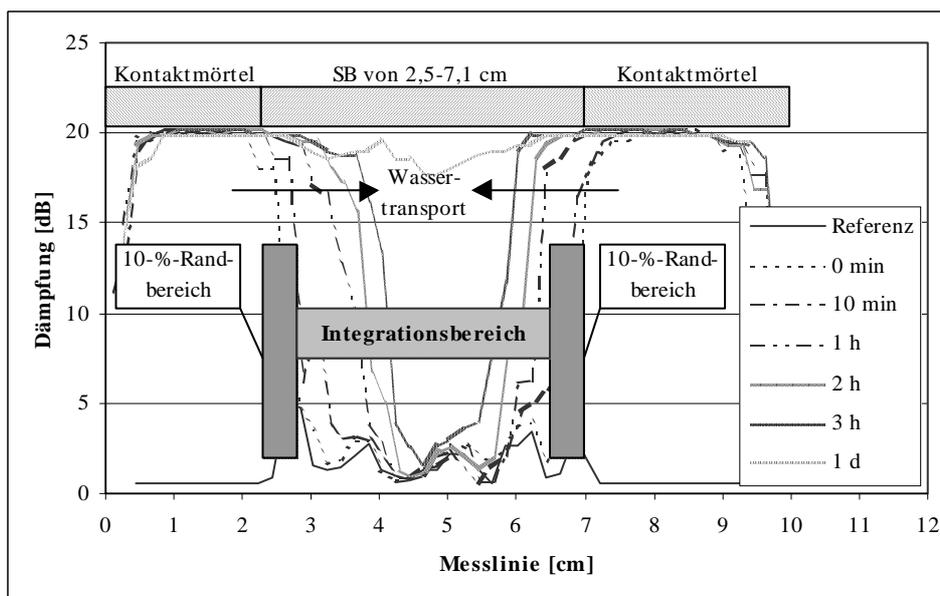
↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓

**Probenbezeichnung: z.B. I/7/n-III/4**

**Bild 52:** Untersuchungs-Parameter und für die Ergebnisdarstellung gewählte Probenbezeichnung für die Versuche zur Feuchtemessung in der Mikrowellen-Apparatur

### 5.3.2.4 Ergebnisse

Im **Bild 53** ist beispielhaft die aufgezeichnete Dämpfung einer Probe zu unterschiedlichen Zeitpunkten dargestellt. Gegenüber der Referenzmessung ohne Kontaktmörtel steigt die Dämpfung im Bereich des SB mit fortschreitender Zeit an. Es ist also gut zu erkennen, wie die Wasserfront von beiden Seiten zur Mitte des SB vordringt.



**Bild 53:** Verläufe der Dämpfung über die gesamte Probe zu unterschiedlichen Zeitpunkten nach dem Befüllen mit Kontaktmörtel, Probe I/7/o-I/7

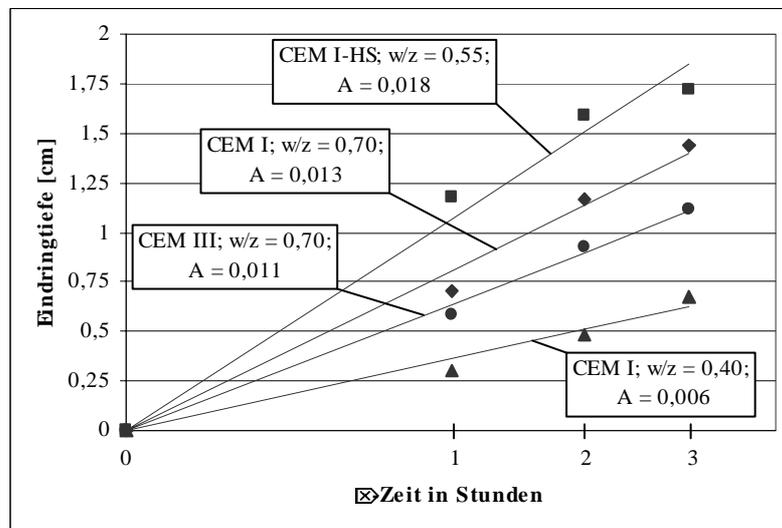
Bedingt durch die bei der Aufzeichnung des Messsignals zur Verfügung stehenden elektronischen Komponenten, betrug die maximal messbare Dämpfung rund 20-25 dB. Die Dämpfung von Wasser beträgt 30,5 dB je mm Wasserschicht. Demnach konnten mit dem Versuchsaufbau Wasserschichtdicken von ca. 0,66-0,82 mm gerade noch erfasst werden. Dadurch ergab sich aber auch, dass der Wassergehalt des Kontaktmörtels nicht ausgewertet werden konnte. Bei der gewählten Zusammensetzung lag schon bei einem w/z-Wert von 0,40 eine rechnerische Wasserschichtdicke von 4,84 mm je cm Probendicke vor. Selbst bei vollständiger Hydratation verblieben im Kontaktmörtel immer noch rechnerisch 1,21 mm Wasserschichtdicke je cm Probendicke, wodurch selbst bei den Messungen nach 90 d Kontaktdauer keine Auswertung möglich war. Von daher konnte nur der Wassertransport im Betonsplittkorn beobachtet und ausgewertet werden.

Um die aufgezeichnete Dämpfung aller Proben miteinander vergleichen zu können, wurde für die weitere Auswertung das innerhalb des BS aufgezeichnete Messsignal integriert und auf die Länge der Integrationsstrecke bezogen, im folgenden auch als „bezogene Dämpfung“ bezeichnet. Die Länge der Integrationsstrecke war jedoch nicht der gesamte Bereich des SB, da der Randbereich beim Übergang zum Kontaktmörtel anhand der Messsignale nicht eindeutig zu erfassen war. Hier lagen Überlagerungen des Feuchtegehalts des SB und des Kontaktmörtels vor. Aus diesem Grund wurden für die Integration nur die inneren 80 % der Messlinie, die über das SB verlief, ausgewertet, s. Erläuterungen in **Bild 53**.

Die Wasseraufnahme des SB war bei allen untersuchten Proben nach spätestens einem Tag beendet. Erwartungsgemäß nahmen die Proben mit hoher Porosität ( $w/z = 0,70$ ) mehr Wasser auf als Proben mit niedriger Porosität ( $w/z = 0,40$ ). Auch die Probe mit vorbefeuchteten SB zeigte noch einen leichte Wasseraufnahme, diese betrug aber nur noch mehr 15-20 % von der maximalen Wasseraufnahme der ofengetrockneten Zuschläge. Dieses Ergebnis deckt sich mit Untersuchungen aus der Literatur [DAH96], wonach Betonsplitt nach 10 Minuten 90 – 95 % seiner maximalen Wasseraufnahme aufnehmen kann, die maximale Wasseraufnahme jedoch erst nach ca. 1 Tag erreicht ist.

Um den Transport des Wassers in das SB hinein näher zu betrachten, wurde das Vorschreiten der Wassereindringfront bis 3 h nach dem Aufbringen des Kontaktmörtels anhand des Mikrowellensignals ausgewertet. Hierzu wurden das Wassereindringen von gleich zusammengesetzten BS gemittelt, ohne dabei die Eigenschaften des Kontaktmörtels zu berücksichtigen. Die sich in Abhängigkeit von der Zeit ergebenden Wassereindringtiefen sind in **Bild 54** dargestellt. In dem Bild sind auch die sich nach dem Wurzel-t-Gesetz ergebenden

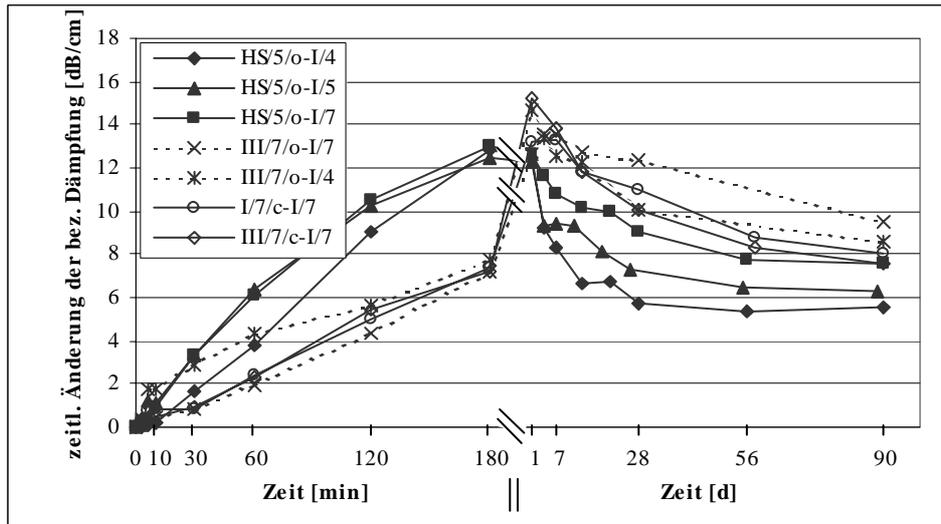
gefitteten Kurven bzw. Geraden und die entsprechenden Wassereindringkoeffizienten eingetragen.



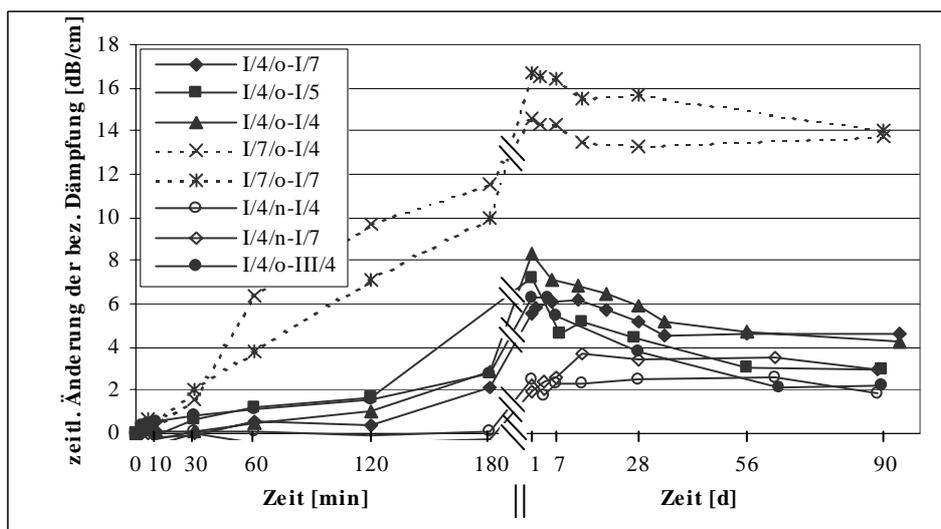
**Bild 54:** Eindringtiefen der Wasserfront in Abhängigkeit von der Zeit in das SB hinein und die sich nach dem Wurzel-t-Gesetz ergebenden Wassereindringkoeffizienten

Bei Klopfer [KLO74] wurden für Betone unterschiedlicher Güte Wassereindringkoeffizienten von 0,009 – 0,022 genannt, bei den vorliegenden Versuchen liegen die Wassereindringkoeffizienten zwischen 0,006 und 0,018. Demnach kann der Vorgang des in die BS eindringenden Wassers gut mit dem Wurzel-t-Gesetz beschrieben werden. Die in den Kapillaren der Poren vorhandene Luft, die ja nicht frei entweichen kann, scheint dem Eindringen des Wassers offensichtlich keinen Widerstand entgegen zu bringen.

Erwartungsgemäß war der Wassereindringkoeffizient von SB mit  $w/z = 0,70$  größer als der eines von SB mit  $w/z = 0,40$  und bei den Proben, die mit gleichem Zement hergestellt wurden.



**Bild 55:** Zeitliche Änderung (Bezugszeitpunkt ist die Nullmessung) der bezogenen Dämpfung, hier ofengetrocknete SB aus CEM III, CEM I-HS und carbonatisierten CEM I mit unterschiedlichen Kontaktmörtel-Kombinationen



**Bild 56:** Zeitliche Änderung (Bezugszeitpunkt ist die Nullmessung) der bezogenen Dämpfung, hier ofengetrocknete und vorbefeuchtete SB aus CEM I ( $w/z = 0,40$  und  $0,70$ ) unterschiedlichen Kontaktmörtel-Kombinationen

Bei allen untersuchten Proben konnte ab dem ersten Tag eine Abnahme der bezogenen Dämpfung festgestellt werden, **Bilder 55 + 56**. Der Rückgang der Dämpfung dauerte ungefähr 28 bis 56 d an, bis sich die Dämpfung auf einem annähernd konstanten Niveau einstellte.

Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass das in der ersten Zeit nur in größere Poren eingedrungene Wasser sich mit fortschreitender Zeit auch in feinere Poren umverteilt, wo es für die

Mikrowelle nicht mehr detektiert werden kann, da es dort wegen der stärkeren Bindung unbeweglicher geworden ist. Nach [VOL91] ändert sich die mittlere Dämpfung innerhalb der ersten 30 bis 40 Stunden aufgrund der Umverteilung in feinere Poren, bei Beton aus Portlandzement mit  $w/z = 0,7$  um maximal 10 %, bei Beton mit  $w/z = 0,40$  um maximal 25 %. Bei den vorliegenden Untersuchungen war der Rückgang von Probe zu Probe verschieden und betrug bei SB mit  $w/z = 0,40$  im Mittel rd. 38 % und bei SB mit  $w/z = 0,70$  im Mittel rd. 20 %. Darüber hinaus wirkt sich nach [VOL91] der Rückgang der Dämpfung besonders stark aus, wenn die zu untersuchenden Proben vor der kapillaren Wasseraufnahme künstlich getrocknet wurden, was für die vorliegenden Untersuchungen auf jeden Fall zutrifft. Bildet man die Differenz zwischen den nach [VOL91] ermittelten und den bei diesen Untersuchungen ermittelten Dämpfungsrückgängen, so verbleiben für die hier untersuchten SB aber immer noch rund 10 % Dämpfungsrückgang, die ein Hinweis darauf sein können, dass die SB einen Teil ihres kapillar gespeicherten Wassers wieder an den Kontaktmörtel abgeben. Zudem fand der hier gemessene Dämpfungsrückgang in einem viel längeren als von Volkwein angegebenen Zeitraum stand.

Bei Beton mit porösen Zuschlägen, insbesondere bei Untersuchungen an Betonen mit Leichtbetonzuschlägen, wurde bislang vermutet, dass Wasser, welches in den Kapillaren von porösem Zuschlag gespeichert ist, für eine optimale Nachbehandlung des Zementsteins in der Übergangszone sorgt. Bei hochfesten Leichtbetonen wurde nämlich festgestellt, dass die Verwendung von wassergesättigten Leichtzuschlägen das autogene Schwinden reduzieren konnte [WEB95, WEB97, LUR02]. Dabei wurde angenommen, dass infolge der Selbstaus-trocknung des Zementsteins während der Hydratation, ein Feuchtegradient zwischen der Feuchte der Poren des Zuschlags und den Poren des Zementsteins entsteht und dadurch Wasser von den Zuschlägen in den Zementstein transportiert wird. Nach Modellrechnungen von [BEN99] jedoch wird der maximale Transportweg innerhalb von Zementstein mit niedrigem  $w/z$ -Wert auf nur 200  $\mu\text{m}$  bestimmt. Und nach [LUR02] stehen insgesamt nur 1/3 des Gesamtwassergehalts von porösen Zuschlägen für die Umverteilung zur Verfügung. Letztlich liegen aber bislang noch keine Versuchsergebnisse vor, mit welchen der Vorgang der „inneren Nachbehandlung“ nachgewiesen wurde. Aus diesem Grund wird bei [LUR02] empfohlen, NMR- oder Röntgen-Absorptions-Messungen durchzuführen.

Die Umverteilung von Wasser aus dem SB heraus könnte aber auch durch den sogen. „Hydratationsog“ erklärt werden. Volkwein hat Druckunterschiede von bis zu -0,3 bar an Betonen mit unterschiedlicher Zusammensetzung gemessen. Der Sog entsteht offensichtlich

infolge der Volumenverringering der Hydratationsprodukte. In [VO95B] wurden Modellrechnungen durchgeführt, mit denen ein Zusammenhang zwischen der Dicke eines Betonbauteils und der sich am Rand dieses Betonbauteils ergebenden Saugtiefe hergeleitet wurde. Wendet man diese Zusammenhänge auf die vorliegenden Versuche an, so ergibt sich bei einem Hydratationsgrad von 0,5 eine maximale Saugtiefe von 2 mm, bei einem Hydratationsgrad von 1 eine maximale Saugtiefe von 10 mm. Diese Saugtiefen würden auf jeden Fall ausreichen, dem SB Wasser aus den Kapillaren zu entziehen.

Auch die bei den vorliegenden Untersuchungen gemessene Dämpfungsabnahme könnte tatsächlich mit dem „Hydratationssog“ oder der „inneren Nachbehandlung“ im Zusammenhang stehen, da die Dämpfungsabnahme nach ca. 28-56 Tagen nahezu abgeschlossen ist und in diesem Zeitraum die Hydratation des Kontaktmörtels ebenfalls als nahezu beendet betrachtet werden kann. Obwohl die Dämpfungsabnahme in den vorliegenden Versuchen keinen der beiden diskutierten Mechanismen eindeutig zugeordnet werden kann, ist damit aber trotzdem erstmals der experimentelle Nachweis der „inneren Nachbehandlung“ gelungen.

Neben dem offensichtlichen Zusammenhang zwischen der Dämpfungsabnahme und der Porosität des SB konnten keine weiteren Abhängigkeiten des Dämpfungsrückgangs zu betontechnologischen Parametern der SB festgestellt werden.

#### 5.4 Zusammenfassung/Diskussion der Untersuchungen zum Wasser- und Chloridtransport

Die vorangegangenen Untersuchungen haben ergeben, dass die aus chloridkontaminierten Betonsplitten heraus ablaufenden Umverteilungsvorgänge diffusionsgesteuert ablaufen. Aus den Betonsplitten wird zwar auch ein gewisser Anteil an Wasser in den neuen Beton abgegeben. Die Menge an Chlorid, die dadurch quasi „huckepack“ mit dem Wasser aus dem Betonsplittkorn heraus transportiert wird, kann aber vernachlässigt werden.

Durch die Verwendung von ofengetrockneten gegenüber vorbefeuchteten Betonsplitten wurden zwar geringere Mengen an Chloriden umverteilt. Aufgrund der Tatsache jedoch, dass die Verarbeitbarkeit des rezyklierten Betons bei der Verwendung von ofengetrockneten Betonsplitten nicht mehr gezielt eingestellt werden kann, ist dieser Vorteil in der Praxis nicht nutzbar.

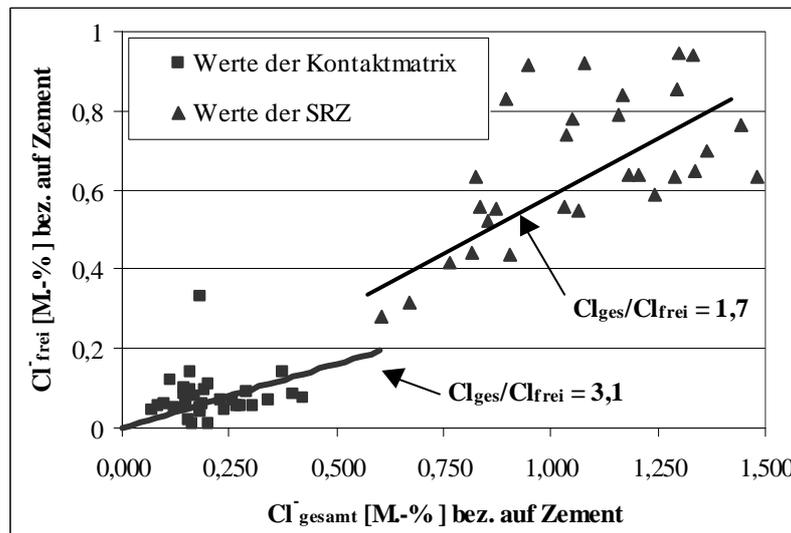
Bei der Verwendung von chloridkontaminierten Betonsplitt aus Altbeton mit niedriger Porosität oder Altbeton, der mit Hochofenzement hergestellt wurde, nahm die Menge an umverteilten Chloriden ab. Bei der Verwendung von chloridkontaminierten Betonsplitt aus Altbeton mit höherer Porosität oder Altbeton, der mit Portlandzement, insbesondere  $C_3A$ -armen Portlandzement hergestellt wurde, nahm die Menge an umverteilten Chloriden zu. Die größten Mengen an Chlorid wurden jedoch aus Betonsplitten umverteilt, die carbonatisiert vorlagen.

Um den Gehalt an Chloriden in chloridkontaminierten Betonsplitten zu reduzieren, hat sich nur eine mehrfache Nass-Trocken-Wechselagerung als effizient herausgestellt. Einfache Waschvorgänge konnten den Ausgangschloridgehalt und damit die Menge an umverteilbaren Chloriden nur unwesentlich reduzieren.

Insgesamt konnten die grundlegenden Zusammenhänge bei der Umverteilung von Chloriden aus chloridhaltigen rezyklierten Betonsplittkörnern gut dargestellt werden. Offen bleibt aber noch die Frage nach der Bedeutung für die Praxis und der aus den Umverteilungsvorgängen ableitbaren chloridinduzierten Korrosionsgefahr von Stahl in Beton.

Betrachtet man lediglich die Gesamt-Chloridgehalte im Scheibchen M1, so lagen diese z.T. – je nach Versuchsbedingung – deutlich über den in der Literatur genannten 0,4 M.-%, welche ausreichen können, Korrosion an Stahl zu initiieren. Dies traf insbesondere bei der Umverteilung aus carbonatisierten Betonsplittkörnern, aus Betonsplittkörnern mit einem Zement CEM I 32,5 NW/HS und Betonsplittkörnern mit einer hohen Porosität (w/z-Wert) zu.

Es ist aber nicht ausreichend, alleine den Gesamtchloridgehalt zu betrachten. Eine große Bedeutung besitzt nämlich auch der freie Chloridgehalt, da nur die freien Chlorionen im wesentlichen korrosionswirksam sind [BRE97]. Im **Bild 57** wurden die Analysenwerte der eigenen Versuche, getrennt nach SRZ und Kontaktmatrix und soweit freie Chloridgehalte bestimmt wurden, eingetragen.



**Bild 57:** Zusammenhang zwischen Gesamtchloridgehalt und freien Chloridgehalt

Dabei ist gut zu erkennen, dass in der Kontaktmatrix wesentlich mehr Chloride gebunden vorliegen als in den SRZ. Das mittlere Verhältnis der gebundenen zu den freien Chloriden ist in der Kontaktmatrix mit 3,1 nahezu doppelt so groß wie in den SRZ (1,7). Da die Chloridumverteilung in den ersten Wochen nach dem Kontakt gleichzeitig mit der Hydratation der Kontaktmatrix stattfand, wurde offensichtlich ein Großteil der transportierten Chloride in die neue Zementsteinmatrix eingebunden. Wie schon weiter vorne begründet, können die in den vorliegenden Versuchen bestimmten freien Chloridgehalte größere Abweichungen von tatsächlich in Porenlösungen vorliegenden Chloridgehalten aufweisen. Demnach ist ein Vergleich oder eine Bewertung der Absolutwerte mit Werten aus der Literatur, wie z.B. [BRE97] nicht zulässig. Grundsätzlich ist aber der höhere Grad der Chloridbindung in der Kontaktmatrix ein Hinweis darauf, dass weniger korrosionsauslösende Chloride vorliegen als z.B. in den Poren der SRZ.

Für die Übertragbarkeit auf die Praxis muss darüber hinaus auch berücksichtigt werden, dass die in der Kontaktmatrix des Modellversuchs gemessenen Gesamtchloridgehalte viel höher waren, als sie bei der Umverteilung aus einem Betonsplittkorn heraus in rezyklierten Beton auftreten können. Denn der gewählte Versuchsaufbau erlaubte nur die Betrachtung der Umverteilung in einer Richtung des Raums, im rezyklierten Beton jedoch können die Chloride aus einem Betonsplittkorn heraus in alle Richtungen des Raums umverteilt werden.

Betrachtet man nur den Fall, dass chloridkontaminierte Betonsplittkörner vereinzelt in einem rezyklierten Beton eingebaut werden, so nimmt die Korrosionswahrscheinlichkeit mit zunehmender Entfernung des chloridkontaminierten Betonsplittkorns von der Stahlbewehrung stark ab. Denn mit zunehmender Entfernung erfolgt der Konzentrationsausgleich infolge Diffusion in alle Richtungen des Raums und es ist dann nicht damit zu rechnen, dass Chloride in ausreichender Menge bis zur Stahloberfläche transportiert werden, um dort Korrosion auszulösen. Es ist aber davon auszugehen, dass chloridkontaminierte Betonsplittkörner, die im unmittelbaren Kontakt zum Betonstahl stehen, die größte Korrosionsgefahr darstellen.

Selbstverständlich besitzt auch der Ausgangschloridgehalt der Betonsplittkörner eine entscheidende Bedeutung. Die im vorliegenden Fall untersuchten Ausgangskonzentrationen stellen aber eher die obere Grenze von Konzentrationen dar, die in Bauwerken auftreten können. Größere Konzentrationen sind aus baupraktischer Sicht eher selten.

## 5.5 Modell-Korrosionsversuche

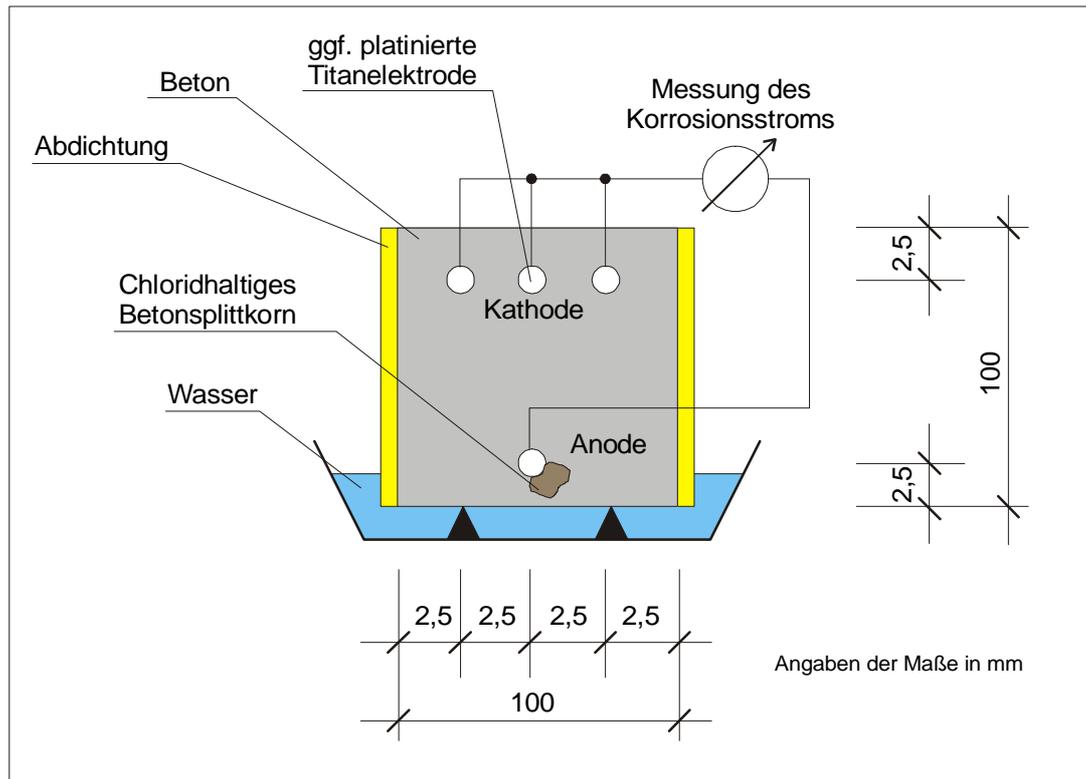
### 5.5.1 Allgemeines

In den vorangegangenen Untersuchungen konnten die Zusammenhänge und Vorgänge bei der Umverteilung von Chloriden aus kontaminierten Betonsplitten heraus dargestellt werden. Aufgrund dieser Ergebnisse war es jedoch nicht möglich, die tatsächlich existierende Korrosionsgefahr exakt zu bestimmen. Denn zum einen wurden die Chloridgehalte im eindimensionalen Versuch ermittelt. Im Beton werden die Chloride aber in alle Richtungen des Raums umverteilt und dadurch werden die Chlorid-Konzentrationen in der Umgebung des Betonsplitts geringer sein als im eindimensionalen Versuch. Zum anderen gelten die als Vergleichskriterium in der Literatur genannten korrosionsauslösenden Chloridgehalte i.d.R. nur für vollständig hydratisierte Betone und entsprechend vollständig passivierte Stähle. Im vorliegenden Fall ist aber davon auszugehen, dass Chloride schon zu einem frühen Zeitpunkt der Hydratation auf die Oberfläche von Stahl gelangen (möglicherweise noch vor Abschluss der vollständigen Passivierung) und dort Korrosion auslösen können. Von daher wurden die folgenden Versuche durchgeführt, um tatsächliche Korrosionsprozesse zu erfassen und relevante betontechnologische Einflussparameter auf die Korrosion zu bestimmen.

### 5.5.2 Methodik, Versuchsparameter

Der Versuchsaufbau wurde in Anlehnung an [RAU92] gewählt. Die Betonbalken mit einbetonierten Anoden und Kathoden wiesen folgende Abmessung auf:  $l \times b \times h = 30 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ . Der Aufbau des Probekörpers ist **Bild 58** zu entnehmen.

An die Anode wurde je Versuch vor dem Betonieren ein chloridhaltiges Betonsplitt-Korn der Kornklasse 8/16 mit einem Faden angebunden. Die Kathoden- wie auch die Anoden-Stähle bestanden aus glattem, gezogenen Stahl St 37, mit einem Durchmesser von 10 mm. Zur Intensivierung der Korrosion (Kathodenfläche  $\gg$  Anodenfläche) wurden als Anode ein Stahl mit einer Länge von 6 cm und als Kathode drei Stähle mit je einer Länge von 26 cm angeordnet. Somit ergab sich ein Flächenverhältnis von 1:10. Die Betondeckung betrug nach allen Seiten  $\geq 20 \text{ mm}$ . Für die elektrischen Anschlüsse wurden an den Enden der Stähle Innen-Gewinde,  $\emptyset 2 \text{ mm}$ , Gewindetiefe ca. 5 mm, eingeschnitten. Auf einen mit PVC isolierten Stahldraht (Außendurchmesser 2,5 mm) wurde am Ende ein Außengewinde aufgeschnitten und dieses fest in den Anoden-/Kathoden-Stahl eingedreht. Die isolierten Drähte dienten gleichzeitig noch zur exakten Fixierung der Stähle in der Schalung.



**Bild 58:** Versuchsaufbau für die Modell-Korrosionsversuche, hier: Querschnitt durch den Probekörper

In Bauteilen in der Praxis können u.U. größere Potentialunterschiede vorkommen, wodurch Korrosionsprozesse beschleunigt werden können. Dies kann z.B. der Fall sein, wenn lokal unterschiedliche Feuchtebedingungen bzw. ungünstige Belüftungsverhältnisse im Beton/Bauteil vorliegen [ELS87, MAR87]. Um dies in die Untersuchungen einzubeziehen, wurde für einige Versuche die mittlere Stahl-Kathode durch eine platinierter Titan-Elektrode ersetzt. Durch die Stellung der platinierter Titan-Elektrode gegenüber Stahl in der elektrischen Spannungsreihe wird eine Treibspannung/Potential erzeugt, welches in etwa durch schlechte Belüftungsverhältnisse in Beton auftreten kann. Die Elektrode besaß einen Durchmesser von 6 mm (Länge 26 cm) und war ebenfalls an ihren Enden mit in Sacklöchern eingearbeiteten Gewinden versehen.

Vor dem Fixieren der Stähle in der Schalung wurden diese gründlich mit Azeton entfettet. Der Beton wurde in die vorbereitete Schalung in mehreren Schichten eingebracht und verdichtet. Unmittelbar nach dem Einbringen des Betons begann die kontinuierliche Messwerterfassung, d.h. die Erfassung des Stroms zwischen Kathode und Anode. Gemessen wurde mit einem Shunt-Widerstand von 1 bzw. 10 Ohm. Die Pole der Messwerterfassung wurden so

gesteckt, dass ein positiver Strom (Vorzeichen +) einen Fluss der Elektronen von der Anode zur Kathode, also entsprechend Korrosion an der Anode, darstellte.

Nach einem Tag wurden die Proben ausgeschalt und sofort an den Seitenflächen mit einem auf der Außenseite mit Aluminium beschichteten bituminierten Dichtband abgedichtet. Daraufhin wurden die Proben mit der Unterseite (Schalseite) auf Dreikantleisten gelagert und für mindestens 90 d in ein Wasserbad gestellt. Der Wasserspiegel wurde auf ca. 1 cm über der Unterkante des Probekörpers eingestellt. Die Oberseite der Proben wurde noch für eine Zeit von 3 Tagen feucht nachbehandelt, anschließend war diese der Raumluft ausgesetzt.

Die Versuchsparameter wurden wie folgt gewählt:

- korrosives Splittkorn, Korngröße 8/16 mm – gebrochen aus rd. 300 d alten und unter Wasser gelagerten Betonen in einer Labor-Prallmühle:

Zementart:	CEM I 32,5 R CEM III B 32,5 CEM I-HS 32,5 R
w/z-Wert:	0,70 0,40
Chloridkontamination:	Lagerung in 3 % und 10 % NaCl-Lösung über 3 Wochen, anschließend Trocknung bei 40 °C über 2 Wochen

Für die Mischungszusammensetzung der Betone s. **Tabelle A10** im Anhang.

- Beton der Korrosionsprobekörper; Parameter zur Untersuchung der betontechnologischen Einflüsse:

Zement:	CEM I 32,5 R CEM III B 32,5 CEM I-HS 32,5 R, Eigenschaften. s. <b>Tabelle A1</b> im Anhang
Betonzusatzstoffe:	Silikastaub, Flugasche, Eigenschaften. s. <b>Tabelle A12</b>
Zuschlag:	Sand 0/4
Zementgehalt:	320 kg/m <sup>3</sup>
w/z-Wert:	0,70

Je Parameter-Variation wurden zwei Proben hergestellt. Nach den 90 Tagen Saugzeit wurde eine Probe (a) aufgespalten und der Zustand der Anode/Kathoden beurteilt. Die zweite Probe

(b) wurde anschließend einer 4 Wochen dauernden Wechsellagerung (jeweils 7 Tage im Ofen bei 45 °C / 7 Tage im Wasserbad) ausgesetzt. Daran anschließend wurde auch diese Probe aufgespalten und der Zustand der Anode/Kathoden beurteilt.

### 5.5.3 Ergebnisse

#### 5.5.3.1 Einflüsse aus den Eigenschaften des Betons

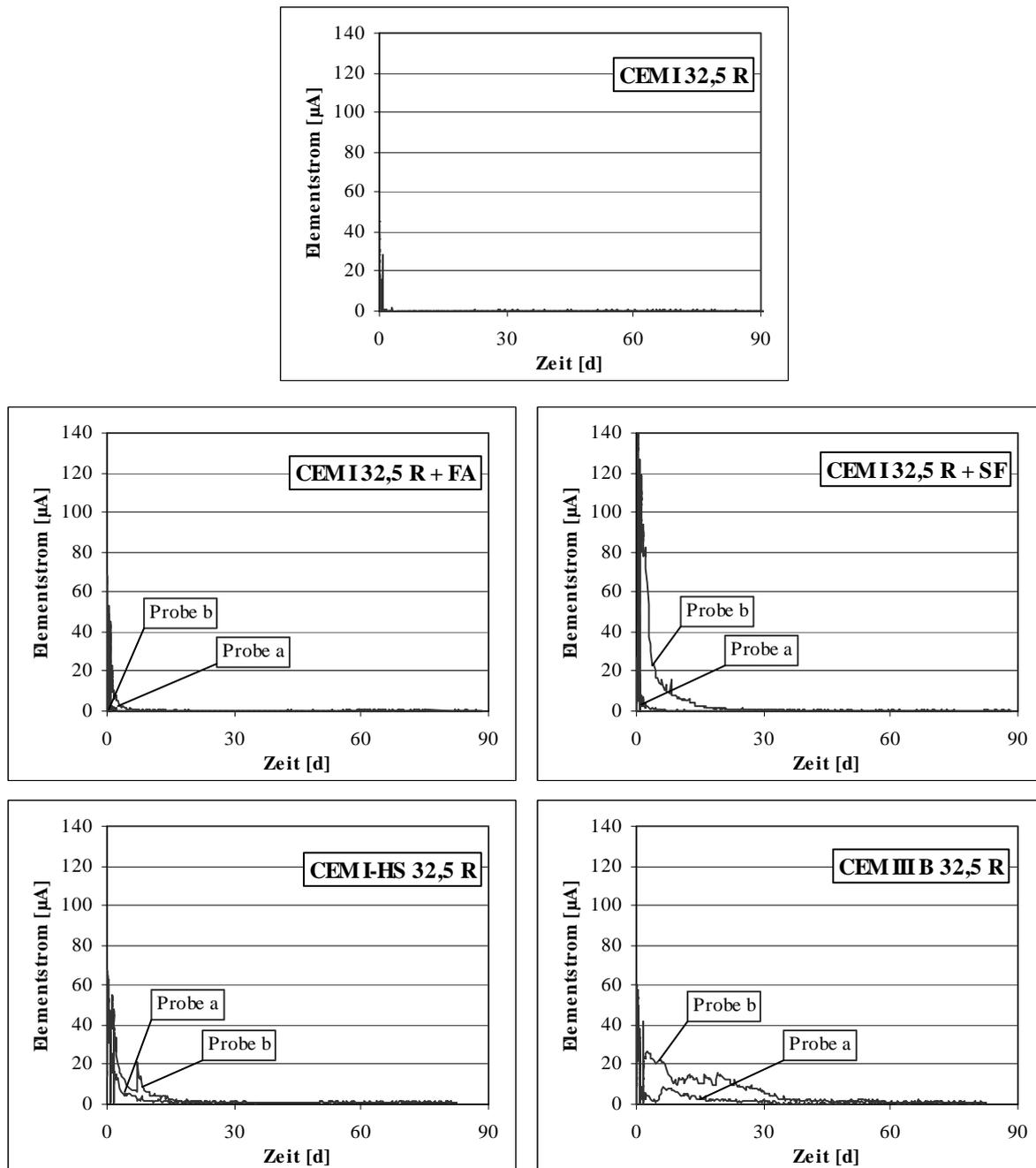
Innerhalb der betontechnologischen Parameter, welche die Geschwindigkeit der chloridinduzierten Korrosion an Stahl in Beton am meisten beeinflussen, besitzt neben der Reduktion des w/z-Werts der Gehalt an puzzolanischen Zusatzstoffen den größten Einfluss. So wurde nach [RAU92] eine Reduzierung der Korrosionsgeschwindigkeit bei folgenden Änderungen festgestellt:

- zunehmender Hüttensandgehalt
- zunehmender Gehalt an Steinkohlenflugasche
- zunehmender Gehalt an Silikastaub

Um diesen Einfluss zu untersuchen, wurden Betonkorrosionszellen mit den Bindemitteln CEM I 32,5 R (ohne und mit Zugabe von Silikastaub oder Flugasche), CEM I-HS 32,5 R und CEM III B 32,5 hergestellt. An die Anoden wurden jeweils gleichartige Betonsplittes (w/z = 0,70, CEM I 32,5 R, Vorlagerung in 3 % NaCl-Lösung) im direkten Kontakt angebracht. In **Tabelle 3** sind die nach 20 und 90 Tagen integrierten Elementströme und im **Bild 59** die zeitlichen Verläufe der Elementströme zusammengestellt, die sich infolge der Variation des Bindemittels im Beton des Korrosionsprobekörpers ergaben.

**Tabelle 3:** Zusammenstellung der nach 20 d und 90 d integrierten Korrosionsströme an Korrosionszellen mit unterschiedlicher Betonzusammensetzung

Bindemittel im Beton	Integrierter Elementstrom [As]				Korrosion auf der Anode	
	nach 20 d		nach 90 d			
	Probe a	Probe b	Probe a	Probe b	Probe a	Probe b
CEM I 32,5 R	70	100	130	140	nein	nein
CEM I 32,5 R + FA	580	110	720	170	ja	nein
CEM I 32,5 R + SF	540	4150	550	4470	ja	ja
CEM I-HS 32,5 R	1300	2330	2120	3200	ja	ja
CEM III B 32,5	1210	3770	1990	6040	ja	ja



**Bild 59:** Darstellung der Elementströme von je zwei untersuchten Betonkorrosionszellen gleicher Zusammensetzung (Probe a + b), hier: Einfluss des Bindemittels im Beton der Korrosionszelle

Man kann gut erkennen, dass bei allen untersuchten Proben nach 90 Tagen die Elementströme  $< 5 \mu\text{A}$  betragen, also zu diesem Zeitpunkt keine Korrosion mehr an den Anoden festzustellen war. An den freigelegten Anoden wiesen lediglich beide Proben mit reinem Portlandzement keinerlei Korrosion auf, bei allen anderen untersuchten Parametern war Korrosion an mindestens einer Probe festzustellen (siehe hierzu auch Bilder im Anhang A2). Das tatsächliche Aus-

maß der Korrosion war aus baupraktischer Sicht als gering einzustufen. Die größte Korrosionsstelle wies die Probe b der Korrosionszelle mit CEM III B auf, hier betrug die Fläche der Lochfraßkorrosion rund 41 mm<sup>2</sup>, die Abtragtiefe war jedoch nicht größer als 1 mm.

Auf den ersten Blick widerspricht das Ergebnis den Messungen von Raupach. Denn bei den vorliegenden Untersuchungen wurden bei den Betonkorrosionszellen, die mit der Zugabe von Flugasche und Silikastaub bzw. mit einem hohen Hüttensandgehalt hergestellt wurden, größere Elementströme gemessen, als bei den Betonkorrosionszellen, die mit reinem Portlandzement hergestellt wurden.<sup>5</sup>

Nach [BYF86, BYF87] liegen in der Porenlösung von Beton mit Silikastaub, FA oder Hochofenzement niedrigere pH-Werte vor als bei Betonen aus Portlandzement, **Tabelle 4**. Der pH-Wert der Porenlösung hat aber einen bedeutenden Einfluss auf die Bildung der den Stahl schützenden Passivschicht, welche beim Kontakt mit frischem Beton/Zementleim nicht plötzlich entsteht, sondern erst langsam aufgebaut wird und deren Bildung i.d.R. erst nach 1-2 Tagen abgeschlossen ist [NÜR95, STO82, REC80]. D.h., je höher der pH-Wert der Porenlösung ist, desto schneller wird die Passivschicht ausgebildet.

**Tabelle 4:** Zusammenstellung der pH-Werte von an Festbetonen ausgepressten Porenlösungen

Zement- / Bindemittelart	Alkalität der Porenlösung (pH-Wert)	Quelle
CEM I	13,40	[BYF86]
CEM I + 10 % SF	13,04	
CEM I + 20 % SF	12,73	
CEM I + 15 % FA	13,07	
CEM I + 40 % FA	13,18	
CEM I	13,51 – 13,72	[BYF87]
CEM III A	13,42 – 13,63	
CEM I + FA	13,12 – 13,47	

Bei den vorliegenden Versuchen ist es offensichtlich entscheidend, wie schnell die aktive bzw. korrosionsbereite Stahloberfläche in den passiven Zustand übergeführt wird. Denn die infolge der Umverteilung an die Stahloberfläche transportierten Chloride erzeugen bei den Proben, die eine langsamere Entstehung der Passivschicht aufweisen (Betone mit Hochofen-

<sup>5</sup> Da bei den Betonkorrosionszellen mit reinem Portlandzement keine Korrosion an den Anoden festgestellt wurde, ist davon auszugehen, dass die gemessenen Elementströme auf die während der Bildung der Passivschicht ablaufenden elektrochemischen Vorgänge zurückzuführen sind.

zement oder Zugabe von Silikastaub), die stärksten Elementströme, d.h. dort wird Korrosion am schnellsten ausgelöst. Schließlich muss auch berücksichtigt werden, dass eine durch Chloride initiierte Korrosionsnarbe sich selbst stabilisiert, unabhängig davon, wie in der Zeit nach der Initiation die Passivschichtbildung fortläuft.

Aufgrund der relativ langsamen chemischen Reaktion der Flugasche wirkt sich deren Zugabe auf den pH-Wert der Porenlösung gerade in den ersten Stunden nur äußerst gering aus. Demnach zeigte diese Probe ähnlich geringe Elementströme und Korrosion wie die mit reinem Portlandzement.

Da aus der Literatur keine Angaben über den pH-Wert der Porenlösung von Beton mit C<sub>3</sub>A-armen Portlandzementen entnommen werden konnten, sind die bei diesen gemessenen höheren Elementströme offensichtlich auf das wesentlich schlechtere Chloridbindevermögen zurückzuführen.

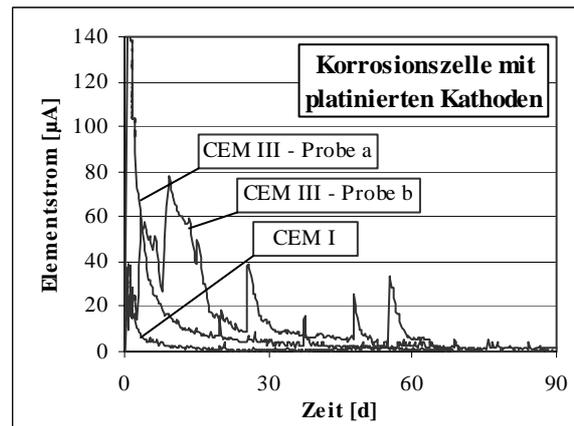
#### 5.5.3.2 Einflüsse bei ungünstigen Belüftungsverhältnissen im Beton

Für diese Untersuchung wurden Betonkorrosionszellen mit einem CEM I 32,5 R hergestellt. An die Anoden wurden Betonsplitt CEM I 32,5 R und CEM III B 32,5 (w/z = 0,70, Vorlagerung in 3 % NaCl-Lösung) im direkten Kontakt angebracht. In **Tabelle 5** sind die nach 20 und 90 Tagen integrierten Elementströme und im **Bild 60** die zeitlichen Verläufe der Elementströme zusammengestellt, die sich infolge der Verwendung einer platinieren Titan-Elektrode ergaben.

**Tabelle 5:** Zusammenstellung der nach 20 d und 90 d integrierten Korrosionsströme an Korrosionszellen mit platinierter Titan-Elektrode und unterschiedlichen Betonsplitten

Betonsplitt		Integrierter Elementstrom [As]				Korrosion auf der Anode	
		nach 20 d		nach 90 d			
Zementart	w/z-Wert	Probe a	Probe b	Probe a	Probe b	Probe a	Probe b
CEM I 32,5 R	0,70	1190	-- *	2610	-- *	ja	-- *
CEM III B 32,5		7070	9760	8770	14940	ja	ja

\* Messaufzeichnung während der Versuchsdurchführung fehlgeschlagen



**Bild 60:** Darstellung der Elementströme von Betonkorrosionszellen gleicher Zusammensetzung bei der Verwendung einer plattinierten Titan-Elektrode und Betonsplitten aus unterschiedlichen Zementen

Bei allen Proben wurden nun erhebliche Elementströme gemessen und auch auf den Anoden waren stärkere Lochfraß-Narben vorhanden. Bei den Proben aus Betonsplitt mit CEM III waren starke Lochfraß-Narben vorhanden (Probe a: Fläche rd. 10 mm<sup>2</sup>, Abtragtiefe ca. 1mm, Probe b: Fläche rd. 45 mm<sup>2</sup>, Abtragtiefe > 2mm) . Und auch an der Probe mit Betonsplitt aus CEM I, welche in den Versuchen ohne plattinierte Titan-Elektrode keine Korrosion aufwies, war nun Korrosion – wenn auch nur geringfügig (Fläche rd. 4 mm<sup>2</sup>, Abtragtiefe < 0,5 mm) – vorhanden. Schließlich waren aber bei allen Proben nach rund 60 Tagen die Elementströme kleiner 5 µA und damit ab diesem Zeitpunkt keine aktive Korrosion mehr festzustellen.

### 5.5.3.3 Einflüsse aus den Eigenschaften des Betonsplitts

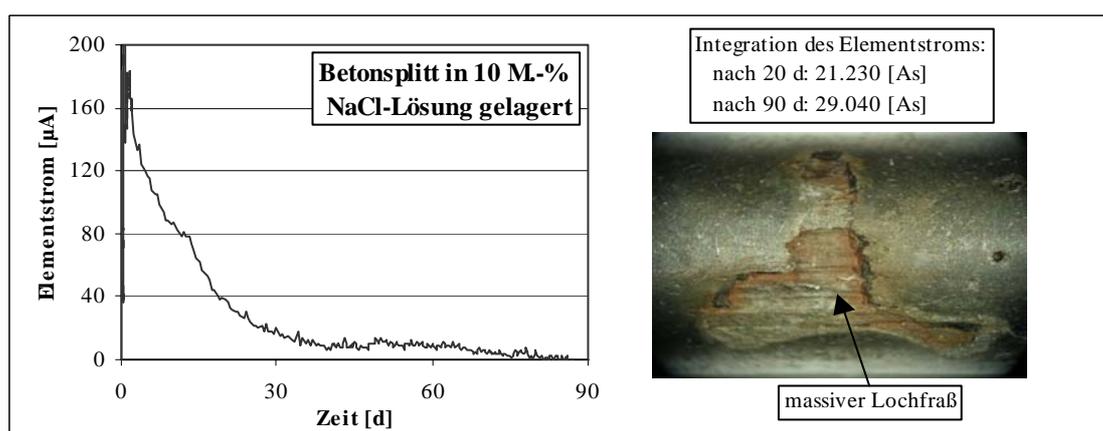
Um den Einfluss aus betontechnologischen Eigenschaften des Betonsplitts zu untersuchen, wurden bei diesen Versuchen an die Anoden Betonsplitt aus CEM I ( $w/z = 0,40$  oder  $0,70$ ), CEM III B und CEM I HS (jeweils  $w/z = 0,70$ ) angebracht. Der Beton der Korrosionszellen war bei allen Versuchen gleich zusammengesetzt (CEM I 32,5 R,  $w/z = 0,70$ ). In der **Tabelle 6** sind die integrierten Elementströme dieser Versuche zusammengestellt. Lediglich an einer Anode, an der ein Betonsplitt aus CEM III B angebracht war, konnte Korrosion festgestellt werden. Die Lochfraßnarbe war jedoch nur 4 mm<sup>2</sup>, die Abtragtiefe war < 1 mm. Bei allen anderen Proben waren die Elementströme so niedrig, dass hier Korrosion ausgeschlossen werden konnte. Die Anoden wiesen auch keinerlei sichtbare Korrosionsnarben auf.

**Tabelle 6:** Zusammenstellung der nach 20 d und 90 d integrierten Korrosionsströme an Korrosionszellen mit gleicher Betonzusammensetzung und unterschiedlichen chloridhaltigen Betonsplitt

Betonsplitt		Integrierter Elementstrom [As]				Korrosion auf der Anode	
		nach 20 d		nach 90 d			
Zementart	w/z-Wert	Probe a	Probe b	Probe a	Probe b	Probe a	Probe b
CEM I 32,5 R	0,40	330	100	420	160	nein	nein
CEM I 32,5 R	0,70	70	100	130	140	nein	nein
CEM I-HS 32,5 R		600	710	1010	1120	nein	nein
CEM III B 32,5		360	2220	790	2590	nein	ja

Aufgrund dieses Ergebnisses liegt die Schlussfolgerung nahe, dass die betontechnologischen Eigenschaften und die Umgebungsbedingungen des rezyklierten Betons einen wesentlich größeren Einfluss auf das tatsächlich vorhandene Korrosionsrisiko ausüben als die betontechnologischen Eigenschaften des Betonsplitts.

Um schließlich zu untersuchen, inwiefern die Korrosion durch Verwendung von Betonsplitt mit besonders hohem Eigenchloridgehalt intensiviert wird, wurde eine Betonkorrosionszelle mit CEM I 32,5 R hergestellt und ein Betonsplitt (w/z = 0,70, CEM I 32,5 R) an die Anode angebracht, der zuvor in 10 % NaCl-Lösung gelagert wurde. Im **Bild 61** ist der zeitliche Verlauf des Elementstroms einer Betonkorrosionszelle und ein Bild der an der Anode entstandenen Korrosionsnarbe dargestellt.



**Bild 61:** Darstellung des Elementstroms und der entstandenen Lochfraß-Korrosion an einer Betonkorrosionszelle mit Betonsplitt, der zuvor in 10 M.-% NaCl-Lösung gelagert war.

Das Integral des Elementstroms dieser Probe war nach 90 Tagen rund doppelt so groß, wie das größte Integral des Elementstroms von allen vorangegangenen Versuchen. Es war hier auch nicht mehr zu erkennen, dass durch den hohen pH-Wert des Betons mit reinem Portlandzement die Korrosion an der Stahloberfläche verhindert werden konnte. Die an der Anode entstandene Korrosionsnarbe war im Vergleich zu allen anderen untersuchten Parametern mit Abstand diejenige, die den größten Flächenabtrag aufwies. Die Korrosionsstelle war ca. 60 mm<sup>2</sup> groß und wies eine mittlere Abtragstiefe von 2-3 mm auf. Dieses Ausmaß an Korrosion ist aus baupraktischer Sicht nicht mehr zu vernachlässigen, da der Querschnitt der Bewehrung infolge Korrosion erheblich geschwächt wurde.

Bei den vorangegangenen Versuchen wurde der chloridkontaminierte Betonsplitt in unmittelbarem Kontakt zum Stahl angebracht. D.h., für die gesamte Versuchsdauer berührte ein Teil des Betonsplitts die Stahloberfläche unmittelbar. In der Praxis stellt dies jedoch nur den Extremfall dar. I.d.R. wird sich zwischen einem Zuschlagkorn und dem Betonstahl immer eine Schicht aus Zementstein ausbilden können. Aus diesem Grund wurden Betonkorrosionszellen hergestellt, bei denen der Beton zuerst bis in die Höhe der Anoden-Lage eingefüllt und verdichtet wurde. Dann wurden zu beiden Seiten und in unmittelbarer Nähe der Anoden je 5 chloridkontaminierte Betonsplittkörner (CEM I 32,5 R, w/z = 0,70) in den Beton eingedrückt und anschließend der restliche Probekörper mit Beton aufgefüllt und verdichtet. Die kontaminierten Betonsplittkörner wurden so eingedrückt, dass diese im unmittelbaren Kontakt zur Anode eingebettet lagen, aber nicht mehr fixiert waren und so bei der anschließenden Verdichtung sich frei bewegen konnten. So war gewährleistet, dass sich zwischen dem Betonsplitt und der Stahloberfläche eine dünne Schicht aus Zementstein / Mörtel ausbilden konnte. Um die tatsächliche Korrosionsgefahr zu intensivieren, wurden für diesen Versuch auch Betonsplittkörner verwendet, die zuvor in 10 %-iger NaCl-Lösung gelagert wurden. Für den Beton der Korrosionszellen wurde aufgrund der ungünstigen Ergebnisse in den vorangegangenen Versuchen ein Zement CEM III B 32,5 R bei einem w/z-Wert von 0,70 verwendet. In der **Tabelle 7** sind die integrierten Elementströme dieser Versuche zusammengestellt.

**Tabelle 7:** Zusammenstellung der nach 20 d und 90 d integrierten Korrosionsströme an Korrosionszellen mit gleicher Betonzusammensetzung und chloridhaltigen Betonsplitten, die nicht im direkten Kontakt zum Anoden-Stahl eingebaut wurden

Chloridgehalt der Lagerungslösung für die Herstellung von kontaminiertem Betonsplitt	Integrierter Elementstrom [As]				Korrosion auf der Anode	
	nach 20 d		nach 90 d			
	Probe a	Probe b	Probe a	Probe b	Probe a	Probe b
3 M.-%	160	860	200	960	nein	nein
10 M.-%	400	420	860	820	nein	nein

Die gemessenen Elementströme waren in etwa so niedrig, wie die bei den vorangegangenen Versuchen, bei denen keinerlei Korrosion festgestellt wurde. Und auch nach dem Freilegen der Anoden konnten auf den Oberflächen keinerlei Hinweise auf Korrosion beobachtet werden. Damit hat sich bestätigt, dass dem Vorgang der Stahlpassivierung eine große Bedeutung für die Entstehung für Korrosion beizumessen ist. Wenn die Chloride erst nach der vollständigen Passivierung auf die Stahloberfläche umverteilt werden, ist die dort anliegende Chloridkonzentration – selbst infolge der Umverteilung aus extrem hoch chloridkontaminierten Betonsplitten – nicht mehr ausreichend entsprechende Lochfraßkorrosion auszulösen.

#### 5.5.3.4 Wechsellagerung

Ohne Ausnahme waren bei allen untersuchten Betonkorrosionszellen die Elementströme  $< 5 \mu\text{A}$ . Somit kann ausgeschlossen werden, dass während der Wechsellagerung Korrosion neu ausgelöst bzw. bereits vorhandene Korrosion intensiviert oder wieder aktiviert wurde, siehe hierzu auch Bilder im Anhang A2.

#### 5.5.4 Zusammenfassung

Das Ergebnis der Korrosionsversuche entsprach nicht ganz den Erwartungen. Es hat sich nämlich gezeigt, dass das tatsächliche Ausmaß der Korrosion an Stahl infolge der Umverteilung von Chloriden aus kontaminierten Betonsplitten viel geringer war als ursprünglich angenommen. Nur in einigen wenigen Fällen waren tatsächlich Korrosionsvorgänge zu beobachten. Bei diesen war aber das Ausmaß der Korrosion aus baupraktischer Sicht unbedeutend. Zudem war bei keinem dieser Versuche nach 90 Tagen noch aktive Korrosion festzustellen. D.h., wenn Korrosionsvorgänge abliefen, dann nur in den ersten 20-30 Tagen nach dem Betonieren, danach kamen alle Korrosionsvorgänge zum Stillstand.

Unabhängig davon konnte aber festgestellt werden, dass die betontechnologischen Einflüsse des Betons der Korrosionszelle eine größere Bedeutung besitzen als die betontechnologischen Einflüsse des Betonsplitts. Demnach konnte die Korrosionsgefahr vor allem durch die Verwendung von reinem Portlandzement verringert werden. Bei der Verwendung von Silikastaub, hüttensandreichem Hochofenzement, Flugasche oder auch  $C_3A$ -armen Portlandzement war eine Erhöhung der Korrosionsgefahr festzustellen. Durch die Variation der betontechnologischen Parameter des Betonsplitts konnten keine Auswirkungen auf die Korrosionsprozesse beobachtet werden. Darüber hinaus bestätigte sich, dass durch ungünstige Potentialverhältnisse im Beton die Korrosionsgefahr anstieg.

Von allen beeinflussenden Parametern besaß aber die Nähe des chloridkontaminierten Betonsplitts zum Stahl den größten Einfluss. Denn nur bei unmittelbarem Kontakt mit Stahl konnten Korrosionsprozesse beobachtet werden.

Schließlich muss auch berücksichtigt werden, dass bei allen vorliegenden Versuchen der Beton der Korrosionszelle lediglich mit einem w/z-Wert von 0,70 hergestellt wurde und dieser damit eine insgesamt sehr hohe Porosität aufwies. Bei Erniedrigung des w/z-Wert des Betons wird das Korrosionsrisiko weiter minimiert, der zeitliche Vorgang der Chloridumverteilung wird noch mehr verlangsamt.

Abschließend kann also gefolgert werden, dass die tatsächliche Korrosionsgefahr und eine daraus ableitbare Schädigung der Stahlbewehrung im Beton durch die Verwendung einzelner chloridkontaminierter Betonsplittkörner aus baupraktischer Sicht als gering einzustufen ist. Aus diesem Grund müssen auch keine Maßnahmen empfohlen werden, welche über das Ausmaß und den Umfang der bislang üblichen Maßnahmen zur Qualitätssicherung bei der Herstellung/Aufbereitung von Betonsplitt hinaus gehen.

## 6 Zusammenfassung

### 6.1 Die Bedeutung der chloridinduzierten Stahlkorrosion in rezyklierten Beton

Heutzutage kann mit den Erkenntnissen aus Forschung und Praxis das Korrosionsrisiko von Stahl in Beton unter Chloridbelastung gut eingeschätzt werden. Beim Einsatz von rezykliertem Beton werden jedoch anstelle von dichten Naturzuschlägen aufbereitete mineralische Baustoffe (rezyklierte Zuschläge) mit einer wesentlich höheren Porosität verwendet. Bislang wurde aber nicht, weder national noch international, der Frage nachgegangen, ob dadurch das Risiko der chloridinduzierten Stahlkorrosion erhöht wird. Von daher war das Ziel dieser Arbeit, alle wichtigen Zusammenhänge und Einflüsse auf das Korrosionsrisiko bei der Verwendung von rezykliertem Beton darzustellen und daraus ableitbare Konsequenzen für die Baupraxis zu erarbeiten.

Dabei musste zum einen abgeklärt werden, ob durch die Verwendung von rezyklierten Zuschlägen Wasser und Chloride von außen leichter in rezyklierten Beton eindringen können. Aus diesem Grund wurden im Rahmen dieser Arbeit Untersuchungen durchgeführt, mit denen die betontechnologischen Zusammenhänge und Einflüsse beim Transport von Wasser und Chlorid in rezykliertem Beton ermittelt wurden.

Zum anderen musste aber auch der Frage nachgegangen werden, ob durch die Verwendung von chloridkontaminierten Betonsplitt Korrosion an Stahl ausgelöst werden kann. Zwar ist die Verwendung von chloridhaltigen rezyklierten Zuschlägen grundsätzlich verboten. Tatsächlich kann aber nicht ausgeschlossen werden, dass einzelne, aber auch größere Mengen an chloridhaltigem Beton bei der Aufbereitung übersehen werden und schließlich als Betonsplitt in rezykliertem Beton eingebaut werden. Aus solchen Betonsplitten können dann Chloride in den Beton umverteilt werden und Korrosion an der Stahlbewehrung auslösen.

## 6.2 Die Eigenschaften der Mikrostruktur von rezyklierten Beton

Der Transport von Flüssigkeiten und Gasen in Beton findet je nach Porosität des verwendeten Zuschlags hauptsächlich in den Poren des Zementstein statt. Im Bereich der Übergangszone zwischen Zementstein und Zuschlag unterscheidet sich die Porosität und die Zusammensetzung des Zementsteins deutlich von der in einer homogenen Zementsteinmatrix. Demnach müssen die Eigenschaften der Übergangszone genau bestimmt werden, um deren Einfluss auf Transportphänomene einschätzen zu können.

Bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen wurden im Rasterelektronenmikroskop Rückstreuелеktronen-Bilder von polierten Betonproben aufgenommen und an diesen mittels computerunterstützter Bildanalyse die Zusammensetzung der Übergangszone bestimmt. Dabei wurde festgestellt, dass die Übergangszone bei vorbefeuchteten rezyklierten Zuschlägen ca. 50-70  $\mu\text{m}$  dick war. Demnach unterschied sich diese nicht von der Übergangszone, die sich bei vergleichbar zusammengesetzten Beton mit Naturzuschlag ausbildet. Allerdings war bei der Übergangszone des rezyklierten Betons kein Gradient in der Verteilung des  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  festzustellen, welcher in der Literatur bei der Untersuchung von Beton mit Naturzuschlägen beschrieben wird. Demnach sind aus den Eigenschaften der Übergangszone von rezykliertem Beton keine Unterschiede im Transportverhalten gegenüber Beton mit Naturzuschlag zu erwarten.

Bei der Verwendung von ofengetrockneten rezyklierten Zuschlägen wies die Übergangszone jedoch eine wesentlich höhere Porosität und Dicke auf. Dies war darauf zurückzuführen, dass durch das kapillar in den Zuschlag eindringende Wasser die darin befindliche Luft nicht komprimiert oder gelöst, sondern zum Großteil in den noch frischen Zementleim verdrängt wurde.

## 6.3 Korrosionsgefahr bei „äußerer“ Chloridquelle

Chloride können im wesentlichen infolge Diffusion und/oder infolge des an Wasser gekoppelten Transportvorgangs von außen in Beton eindringen. Um diese in der Praxis am häufigsten auftretenden Transportvorgänge im Labor zu untersuchen, wurden in dieser Arbeit einerseits praxisgerechte Chlorid-Saugversuche und andererseits Schnell-Migrationsversuche unter Variation diverser betontechnologischer Parameter durchgeführt. Daneben wurde der Wassertransport über Wägung und Multiringelektroden-Messungen betrachtet. Dabei war vor allem abzuklären, ob durch die Ersatzrate oder Herkunft von rezykliertem Zuschlag Verände-

rungen gegenüber Beton mit Naturzuschlag zu erwarten sind. Schließlich wurde auch der Frage nachgegangen, ob es Maßnahmen gibt, mit denen der Eindringwiderstand von rezykliertem Beton gegenüber Chlorid wesentlich verbessert werden kann und/oder ob herkömmliche betontechnologische Maßnahmen ausreichen, um einen genügenden Eindringwiderstand sicherzustellen.

Mit den vorliegenden Versuchsergebnissen wurde nachgewiesen, dass durch die Verwendung von rezykliertem Splitt, also rezykliertem Zuschlag mit einer Korngröße von  $> 4\text{mm}$ , keine praxisrelevanten Verschlechterungen gegenüber dem Eindringen von Wasser und Chloriden eintreten, wenn der rezyklierte Beton unter der Berücksichtigung des 10-minütigen Wasser-saugens hergestellt wird. Dabei ist es unbedeutend, ob der Transportvorgang „kapillares Saugen“ oder „Diffusion“ betrachtet wird. Es spielt auch keine Rolle, in welchem Umfang rezyklierter Zuschlag durch Naturzuschlag ersetzt wird und welche Art (Porosität) von rezyklierten Zuschlägen verwendet wird. Bei Betonsplitt ist es auch nicht von Belang, wenn dieser vollständig carbonatisiert vorliegt. Für den Fall, dass dennoch eine Verbesserung des Eindringwiderstandes gewünscht ist, können konventionelle betontechnologische Maßnahmen, wie sie auch bei herkömmlichen Betonen zur Verbesserung des Eindringwiderstandes verwendet werden, als uneingeschränkt übertragbar empfohlen werden.

Bei der Verwendung von Betonbrechsand jedoch sieht das Ergebnis völlig anders aus. Hier können Wasser und Chloride im Vergleich zu Beton mit Naturzuschlag viel leichter eindringen. Dabei ist es unabhängig, ob Transportprozesse infolge kapillarem Saugen oder Diffusion betrachtet werden. Selbst die Anwendung von betontechnologischen Maßnahmen, wie z.B. die Erniedrigung des w/z-Werts oder die Verwendung von Hochofenzementen oder auch geringere Ersatzraten bieten kein ausreichendes Mittel, dem extrem schlechten Verhalten des rezyklierten Sandes entgegenzuwirken.

Demnach ist das Risiko der chloridinduzierten Korrosion durch die Verwendung von rezykliertem Beton mit rezykliertem Splitt nicht größer, als wenn vergleichbar zusammengesetzter Beton mit Naturzuschlag verwendet wird. Allerdings gilt das nicht für die Verwendung von Beton mit rezykliertem Sand. Durch den im Vergleich zu Beton mit Naturzuschlag wesentlich geringeren Chlorideindringwiderstand ist die Gefahr der chloridinduzierten Korrosion wesentlich größer als bei Beton mit Naturzuschlag. Von einer Verwendung von rezykliertem Sand ist aus diesem Grunde abzuraten.

#### 6.4 Korrosionsgefahr bei „innerer“ Chloridquelle

Für die Betrachtung der Umverteilung von Chloriden und Wasser aus einem kontaminierten Betonsplitt heraus in den rezyklierten Beton hinein wurden neue Modellversuche entwickelt. Dabei wurde der Frage nachgegangen, in welchem Maße die betontechnologischen Eigenschaften von Betonsplitt und des den Betonsplitt umgebenden Zementsteins die Umverteilung beeinflussen.

Die vorliegenden Versuchsergebnisse haben gezeigt, dass die aus chloridkontaminierten Betonsplitten heraus ablaufenden Umverteilungsvorgänge diffusionsgesteuert ablaufen. Daneben konnte aber auch nachgewiesen werden, dass Wasser aus dem Betonsplitt heraus transportiert wird. Dieser Wassertransport fand aber nur sehr langsam statt und zudem wurde nur ein kleiner Anteil des Gesamtwassergehalts des Betonsplitts umverteilt. Von daher kann die Menge an Chlorid, die dadurch quasi „huckepack“ mit dem Wasser aus dem Betonsplittkorn heraus transportiert wird, vernachlässigt werden.

Bei der Verwendung von ofengetrockneten gegenüber vorbefeuchteten Betonsplitten wurden geringere Mengen an Chloriden umverteilt. Aufgrund der Tatsache jedoch, dass die Verarbeitbarkeit des rezyklierten Betons bei der Verwendung von ofengetrockneten Betonsplitten nicht mehr gezielt eingestellt werden kann, ist dieser Vorteil in der Praxis nicht nutzbar.

Bei der Verwendung von chloridkontaminierten Betonsplitt aus Altbeton mit niedriger Porosität oder Altbeton, der mit Hochofenzement hergestellt wurde, nahm die Menge an umverteilten Chloriden ab. Bei der Verwendung von chloridkontaminierten Betonsplitt aus Altbeton mit höherer Porosität oder Altbeton, der mit Portlandzement, insbesondere C<sub>3</sub>A-armen Portlandzement hergestellt wurde, nahm die Menge an umverteilten Chloriden zu. Die größten Mengen an Chlorid wurden jedoch aus Betonsplitten umverteilt, die carbonatisiert vorlagen.

Insgesamt konnten durch diese Versuche die Zusammenhänge bei der Umverteilung von Chloriden gut dargestellt werden. Um letztlich aber eine klare Aussage über das daraus ableitbare Korrosionsrisiko zu erhalten, wurden zusätzlich Korrosionsversuche durchgeführt, bei denen einzelne chloridhaltige Betonsplitt-Körner in Betonkorrosionszellen eingebaut wurden. Damit konnten tatsächliche Korrosionsvorgänge beobachtet werden. Bei diesen Versuchen wurden wiederum die betontechnologischen Einflüsse aus den Betonsplitten bzw. des den Betonsplitt umgebenden Zementsteins untersucht.

Dabei hat sich gezeigt, dass nur bei einigen wenigen Parameter-Kombinationen tatsächlich Korrosionsvorgänge ablaufen. Bei diesen war aber das Ausmaß der Korrosion aus bauprak-

tischer Sicht unbedeutend. Zudem war bei keinem dieser Versuche nach 90 Tagen noch aktive Korrosion festzustellen. D.h., wenn Korrosionsvorgänge abliefen, dann nur in den ersten 20-30 Tagen nach dem Betonieren, danach kamen alle Korrosionsvorgänge zum Stillstand.

Unabhängig davon konnte aber festgestellt werden, dass die betontechnologischen Einflüsse des Betons der Korrosionszelle eine größere Bedeutung besitzen als die betontechnologischen Einflüsse des Betonsplitts. Demnach konnte die Korrosionsgefahr vor allem durch die Verwendung von reinem Portlandzement verringert werden. Bei der Verwendung von Silikastaub, hüttensandreichem Hochofenzement, Flugasche oder auch  $C_3A$ -armen Portlandzement war eine Erhöhung der Korrosionsgefahr festzustellen. Durch die Variation der betontechnologischen Parameter des Betonsplitts konnten keine Auswirkungen auf die Korrosionsprozesse beobachtet werden. Darüber hinaus bestätigte sich, dass durch ungünstige Potentialverhältnisse im Beton die Korrosionsgefahr anstieg.

Von allen beeinflussenden Parametern besaß aber die Nähe des chloridkontaminierten Betonsplitts zum Stahl den größten Einfluss. Denn nur bei unmittelbarem Kontakt mit Stahl konnten Korrosionsprozesse beobachtet werden.

Abschließend kann also gefolgert werden, dass die tatsächliche Korrosionsgefahr und eine daraus ableitbare Schädigung der Stahlbewehrung im Beton durch die Verwendung einzelner chloridkontaminierter Betonsplittkörner aus baupraktischer Sicht als gering einzustufen ist.

## 6.5 Ausblick

Der noch relativ junge Baustoff „rezyklierter Beton“ hat gerade in der Zukunft ein großes Marktpotential. Dies liegt zum einen daran, dass die Ressourcen der natürlichen Zuschläge im Rahmen nicht mehr so leicht zugänglich sind wie in der Vergangenheit. Zum anderen entwickelt sich auch das Umweltbewusstsein in der Bauindustrie zunehmend dahingehend, dass ursprünglich als niederwertig eingeschätzte Abfallstoffe nun als hochwertige Baustoffe Verwendung finden.

Grundsätzlich sind mit der vorliegenden Arbeit alle wichtigen Aspekte der chloridinduzierten Stahlkorrosion bei der Verwendung von rezykliertem Beton geklärt. Mit der vorliegenden Arbeit konnte dazu beigetragen werden, noch verbliebene Unsicherheiten aufzuklären. Jetzt muss der Markt, also die Hersteller und Bauherren, zeigen, ob der Baustoff Akzeptanz findet und entsprechend zur Anwendung kommt.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden einige neue Modellversuche zur Beobachtung von Umverteilungsvorgängen in Beton entwickelt. Dabei hat sich herausgestellt, dass mit den Methoden zuverlässige Ergebnisse gewonnen und Umverteilungsvorgänge gut beobachtet werden können. Es ist also durchaus vorstellbar, dass diese Modellversuche auch in anderen Bereichen der Betontechnologie dazu beitragen können Transportvorgänge zu beobachten und so entsprechende Erkenntnisse für die Forschung bzw. Baupraxis gewonnen werden können.

## 7 Literatur

- [ACK96] **Acker, A. v.:** Recycling von Beton im Fertigteilwerk. Betonwerk und Fertigteiltechnik, 1996, Nr. 6, S. 91-100
- [ALK99] **Al-Khaiat, H., Haque, N.:** Strength and durability of lightweight and normal weight concrete. Journal of materials in civil engineering, 08/1999, S. 231-235
- [ARY87] **Arya, C., Buenfeld, N.R., Newman, J.B.:** Assessment of simple methods of determining the free chloride ion content of cement paste. Cement and Concrete Research, 1987, S. 907-918
- [ARY90] **Arya, C., Buenfeld, N.R., Newman, J.B.:** Factors influencing chloride-binding in concrete. Cement and Concrete Research, 1990, S. 291-300
- [AZA93] **Azari, M.M.:** Chloride ingress in microsilica concrete. Cement & Concrete Composites, 1993, S. 215-221
- [BED99] **Beddoe, R., Springenschmid, R.:** Feuchtetransport durch Bauteile aus Beton. Beton und Stahlbetonbau, 1999, Vol. 94, Heft 4, S. 158-166
- [BED02] **Beddoe, R.:** Transport von Wasser und Chlorid in Beton. Vortrag am 11. Münchener Baustoffseminar – Dauerhaftigkeit von Betonbauteilen, Baustoffinstitut der TU München, 2002
- [BEN96] **Bentur, A., Odler, I.:** Development and nature of interfacial microstructure. Interfacial Transition Zone in Concrete, edited by J.C. Maso, E&FN Spon, London, 1996, S. 3-16
- [BEN99] **Bentz, D.P., Snyder, K.A.:** Protected paste volume in concrete – Extension to internal curing using saturated lightweight fine aggregate. Cement and Concrete Research, 1999, Vol. 29, Nr. 11, S. 1863-1867
- [BOU95] **Bourdette, B., Ringot, E., Ollivier, J.P.:** Modelling of the transition zone porosity. Cement and Concrete Research, 1995, Vol. 25, S. 741-751
- [BRE93] **Breton, D., Carles-Gibergues, A., Ballivy, G., Grandet, J.:** Contribution to the formation mechanism of the transition zone between rock-cement paste. Cement and Concrete Research, 1993, Vol. 23, S. 246-335
- [BRE97] **Breit, W.:** Untersuchungen zum kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalt für Stahl in Beton. Aachener Beiträge zur Bauforschung, Dissertation, Aachen, 1997
- [BUD96] **Budnik, J., Grübl, P., Hora, M.:** Beton aus Recyclingzuschlägen. Umweltgerechter Rückbau und Wiederverwertung mineralischer Baustoffe, DAfStb-Heft, Beuth-Verlag, Berlin, 1996, Nr. 462, S. 141-168

- [BUY02] **Buyle-Bodin, F., Hadjieva-Zaharieva, R.:** Influence of industrially produced recycled aggregates on flow properties of concrete. *Materials and Structures*, 2002, Vol. 35 (September-October), S. 504-509
- [BYF86] **Byfors, K., Hansson, C.M., Tritthart, J.:** Pore solution expression as a method to determine the influence of mineral additives on chloride binding. *Cement and Concrete Research*, 1986, S. 760-770
- [BYF87] **Byfors, K.:** Influence of silica fume and fly ash on chloride diffusion and pH values in cement paste. *Cement and Concrete Research*, 1987, Vol. 17, Nr. 1, S. 115-130
- [CHA52] **Charisius, K., Drechsel, W., Hummel, A.:** Ziegelsplittbeton. DAFStb-Heft, Beuth-Verlag, Berlin, 1952, Nr. 110
- [COR02] **Corinaldesi, V., Moriconi, G.:** Durability of recycled-aggregate concrete incorporating high volumes of fly ash. Proceedings of the 9th international conference on durability of Materials and Components, Brisbane, Australien, 2002, Paper 071
- [DAH96] **Dahms, J., Brune, G.:** Wasseraufnahme und Rohdichte von Betonbruch. *Beton* 1996, Nr. 8, S. 480-486
- [DAR98] Beton mit rezykliertem Zuschlag. DAFStb-Richtlinie, Beuth-Verlag, Berlin, 1998, Teil 1+2
- [DEI93] **Deisl, M.:** Recycling von Hochbaurestmassen - Herstellung von Recyclingbeton aus Hochbaureststoffen. *Zement und Beton*, 1993, Nr. 1, S. 15-19
- [DEV99] **Devenny, A., Khalaf, F.M.:** The use of crushed brick as coarse aggregate in concrete. *Masonry International*, 1999, Vol. 12, Nr. 3, S. 81-84
- [DHI96] **Dhir, R.K., Jones, M.R., McCarthy, M.J.:** Binder content Influences on chloride ingress in concrete. *Cement and Concrete Research*, 1996, S. 1761-1766
- [DIA76] **Diamond, S.:** Cement paste microstructure - an overview at several levels. Hydraulic cement pastes: their structure and properties. Conference-Proceedings, Sheffield, 8.-9. April, 1976, S. 2-30
- [DIA86] **Diamond, S.:** The microstructure of cement paste in concrete. Proceedings, 8th International Congress on the Chemistry of Cement, Rio de Janeiro, 1986, Vol. I, S. 122-147
- [DIA96] **Diamond, S.:** Digital image publication for backscattered SEM micrographs. *Cement and Concrete Research*, 1996, Vol. 26, Nr. 1, S. 3-7
- [DIN1] DIN 4226-100: Gesteinskörnung für Beton und Mörtel, Teil 100: Rezyklierte Gesteinskörnungen. Beuth-Verlag, Berlin, Februar 2002
- [DIN2] DIN 1048: Teil 5: Prüfverfahren für Beton; Festbeton, gesondert hergestellte Prüfkörper. Ausgabe Juni 1991, Beuth Verlag GmbH, Berlin

- [ELS87] **Elsner, B., Böhni, H.:** Lokalisierung von Korrosion in Stahlbeton. Schweizer Ingenieur und Architekt, 1987, Nr. 19, S. 528-533
- [FEI78] **Feix, R.:** Untersuchung über die möglichen Veränderungen spezifischer Gesteinseigenschaften von Splitten durch verschiedene Zerkleinerungssysteme. Forschungsbericht Nr. 9.33, Lst. f. Baustoffkunde und Werkstoffprüfung der TU München, Eigenverlag, 1978
- [FGSV] Merkblatt zur Wiederverwendung von Beton aus Fahrbahndecken. Merkblatt der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Fassung 1998
- [FRA93] **Franke, H.-J.:** Recycling von Betondecken im Autobahnbau (I). Straße und Autobahn, 1993, Nr. 10, S. 615–621
- [FRA94] **Franke, H.-J.:** Recycling von Betondecken im Autobahnbau. Beton, 1994, S. 29–34
- [FRI99] **Friedl, L., Schiebl, P.:** Bewertung der bei der Aufbereitung von Altbeton anfallenden Granulate hinsichtlich der Eignung als Betonzuschlag. BMBF-Forschungsvorhaben, Lst. f. Baustoffkunde und Werkstoffprüfung der TU München, Eigenverlag, 1999, Bericht Nr. F3188
- [FRI00] **Friedl, L.:** Untersuchungen zur Eignung von rezykliertem Zuschlag. 38. Forschungskolloquium des DAfStb, Beuth-Verlag, Berlin, 2000, S. 111-118
- [FRE82] **Frey, R., Weber, B.:** Zur Entfernung von in Betone eingedrungenen Chloriden mittels verschieden temperiertem Wassers. TIZ-Fachberichte, 1982, Vol. 106, Nr. 6, S. 402-406
- [GEH00] **Gehlen, Ch.:** Probabilistische Lebensdauerbemessung von Stahlbetonbauwerken – Zuverlässigkeitsbetrachtungen zur wirksamen Vermeidung von Bewehrungskorrosion. Dissertation, RWTH Aachen, 2000
- [GEW98] **Gewiese, A.:** Kreislaufwirtschaft im Bauwesen. Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 1998
- [GLU93] **Gluth, K.-H.:** Verwitterungsbeständigkeit von Recycling-Baustoffen; Informationen über Straßenbau- und Straßenverkehrsforschung. Straße und Autobahn, 1993, Nr. 9, S. 555
- [GR80A] **Grandet, J., Ollivier, J.P.:** Orientation des hydrates au contact des granulats. Proceedings of the 7th international congress on the chemistry of cement, 1980, Vol. III, S. VII-63-68
- [GR80B] **Grandet, J., Ollivier, J.P.:** Nouvelle méthode d'étude des interfaces ciment-granulats. Proceedings of the 7th international congress on the chemistry of cement, 1980, Vol. III, S. VII-85-89
- [HAT83] **Hansen, T.C., Narud, H.:** Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate. Concrete International (January), 1983, S. 79-83

- [HAT85] **Hansen, T.C., Boegh, E.:** Elasticity and drying shrinkage of recycled aggregate concrete. *ACI Journal* (September-October), 1985, S. 648-652
- [HAT86] **Hansen, T.C.:** Recycled aggregates and recycled aggregate concrete - second state-of-the-art-report developments 1945-1985. *Matériaux et Constructions*, 1986, Vol. 19, Nr. 111, S. 201-246
- [HAC85] **Hansson, C. M., Sorensen, B.:** The influence of cement fineness on chloride diffusion and chloride binding in hardened cement paste. *Nordic Concrete Research*, 1985 (1987), S. 57-72
- [HÜN90] **Hüninghaus, U.:** Gebrochener Beton als Betonzuschlag. *Baustoffrecycling*, 1990, Nr. 6, S. 29-30
- [IVA85] **Ivány, G., Lardi, R., Eßer, A.:** Recycling-Beton. *Forschungsberichte aus dem Fachbereich Bauwesen* (Nr. 33), Essen, Eigenverlag, 1985
- [IKE88] **Ikeda, T., Yamane, S., Sakamoto, A.:** Strength of concrete containing recycled concrete aggregate. *Proceedings of 2<sup>nd</sup> int. RILEM Symposium „Reuse of Demolition Waste“*, Chapman and Hall, 1988, Vol. 2, S. 585-594
- [JEN96] **Jensen, O.M., Coats, A.M., Glasser, F.P.:** Chloride ingress profiles measured by electron probe micro Analysis. *Cement and Concrete Research*, 1996, S. 1695-1705
- [JEN99] **Jensen, O.M., Hansen, P.F., Coats, A.M., Glasser, F.P.:** Chloride ingress in cement paste and mortar. *Cement and Concrete Research*, 1999, S. 1497-1504
- [JOS57] **Jost, W.:** *Diffusion*. Steinkopff-Verlag, Darmstadt, 1957
- [KAS88] **Kasai, Y., Hisaka, M., Yanagi, K.:** Durability of concrete using recycled coarse aggregate. *Proceedings of 2<sup>nd</sup> int. RILEM Symposium „Reuse of Demolition Waste“*, Chapman and Hall, 1988, Vol. 2, S. 623-632
- [KIE83] **KieBl, K.:** Kapillarer und dampfförmiger Feuchtetransport in mehrschichtigen Bauteilen. *Dissertation Essen Gesamthochschule*, 1983
- [KIK94] **Kikuchi, M., Yasunaga, A., Ehara, K.:** The total evaluation of recycled aggregate and recycled concrete. *Proceedings 3<sup>rd</sup> int. RILEM Symposium: Demolition and Reuse of Concrete and Masonry*, London, E + FN Spon, 1994, S. 367-378
- [KJE91] **Kjellsen, K.O., Detwiler, R.J., Gjorv, O.E.:** Backscattered electron image analysis of cement paste specimens: specimen preparation and analytical methods. *Cement and Concrete Research*, 1991, Vol. 21, S. 388-390
- [KLO74] **Klopfer, H.:** *Wassertransport durch Diffusion in Feststoffen*, Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin, 1974
- [KOB88] **Kobayashi, S., Kawano, H.:** Properties and usage of recycled aggregate concrete. *Proceedings of 2<sup>nd</sup> int. RILEM Symposium „Reuse of Demolition Waste“*, Chapman and Hall, 1988, Vol. 2, S. 547-556

- [KRA94] **Krass, K.:** Bautechnische und ökologische Aspekte des Beton-Recyclings. Betonwerk und Fertigteiltechnik, 1994, Nr. 1, S. 103-108
- [KRO83] **Kropp, J.:** Karbonatisierung und Transportvorgänge in Zementstein. Dissertation, Universität Karlsruhe, 1983
- [KRO00] **Krotter, T.:** Modellversuch zur eindimensionalen Umverteilung von Chlorid und Wasser aus einem rezyklierten Zuschlagskorn heraus in die Betonmatrix. Diplomarbeit am Lehrstuhl für Baustoffkunde, München, 2000
- [LAR90] **Larbi, J.A., Bijen, J.M.:** Orientation of calcium hydroxide at the portland cement paste-aggregate interface in mortars in the presence of silica fume: A contribution. Cement and Concrete Research, 1990, Vol. 20, S. 461-470
- [LAR93] **Larbi, J.A.:** Microstructure of the interfacial zone around aggregate particles in concrete. Heron, Vol.38, Nr. 1, 1993
- [LAR98] **Larsen, C.K.:** Chloride binding in concrete – Effect of surrounding environment and concrete composition. Dissertation, NTNU, Trondheim, 1998
- [LAR99] **Larsen, P.K.:** Desalination of painted brick vaults. Department of Structural Engineering and Materials Technical University of Denmark, Series R, No. 52, 1999
- [LAY03] **Lay, S.:** Dauerhaftigkeitsbemessung von Stahlbetonkonstruktionen. Research Report, AiF 12525 N, DBV 225, München, 2003
- [LIM00] **Limbachiya, M.C., Leelawat, T., Dhir, R.K.:** Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete. Materials and Structures, (November) 2000, Vol. 33, S. 574-580
- [LUK93] **Lukas, W.:** Auswirkung auf technologische Kenngrößen von Beton bei Verwendung von Recycling-Material. Zement und Beton, 1993, Nr. 3, S. 33-35
- [LUR02] **Lura, P., Breugel, K. van:** The influence of the moisture flow from the LWA to the paste on the early-age deformations of LWAD. Proc. 6<sup>th</sup> Int. symp. on Utilization of High Strength/High Performance Concrete, 2002, S. 1149-1160
- [MAR87] **Marquardt, H., Ciziesielski, E.:** Anwendung der elektrochemischen Potentialdifferenzmessung zum zerstörungsfreien Auffinden korrodierender Bewehrung im Hochbau, Berlin, 1987
- [MID84] **Midgley, H.G., Illston, J.M.:** The penetration of chlorides into hardened cement pastes. Cement and Concrete Research, 1984, S. 546-558
- [MO85A] **Monteiro, P.J.M., Maso, J.C., Ollivier, J.P.:** The aggregate-mortar interface. Cement and Concrete Research, 1985, Vol. 15, S. 953-958
- [MO85B] **Monteiro, P.J.M., Mehta, P.K.:** Ettringite formation on the aggregate - cement paste interface. Cement and Concrete Research, 1985, Vol. 15, Nr. 2, S. 378-380

- [MON86] **Monteiro, P.J.M., Mehta, P.K.:** Interaction between carbonate rock and cement paste. *Cement and Concrete Research*, 1986, Vol. 16, S. 127-134
- [MÜL01] **Müller, Ch.:** Beton als kreislaufgerechter Baustoff. DAFStb-Heft Nr. 513, Beuth-Verlag Berlin, 2001
- [NAG93] **Nagataki, S., Otsuki, N., Wee, T.-H., Nakashita, K.:** Condensation of chloride ion in hardened cement matrix materials and on embedded steel bars. *ACI Materials Journal*, 07-08/1993, S. 323-332
- [NAE92] **Nägele, E.W.:** Die Rolle von Salzen bei der Verwitterung von mineralischen Baustoffen. WTA – Schriftenreihe, Heft 1, 1992, S. 1-28
- [NIX78] **Nixon, P.J.:** Recycled Concrete as an aggregate for concrete - a review. *Matériaux et constructions*, Paris, 1978, Vol. 11, Nr. 65, S. 371-378
- [NÜR95] **Nürnberger, U.:** Korrosion und Korrosionsschutz im Bauwesen – Band 1. Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin, 1995
- [NYA85] **Nyame, B.K.:** Permeability of normal and lightweight mortars. *Magazine of Concrete Research*, 1985, S. 44-48
- [OLL96] **Ollivier, J.P. Massat, M.:** The effect of the transition zone on the transfer properties of concrete. *Interfacial Transition Zone in Concrete*, edited by J.C. Maso, E&FN Spon, London, 1996, S. 103-116
- [PAD00] **Padmini, A.K., Mathews, M.S., Ramamurthy, K.:** Behaviour of recycled aggregate concrete. *ICI Journal*, (October-December) 2000, S. 35-39
- [PAD01] **Padmini, A.K., Ramamurthy, K., Mathews, M.S.:** Behaviour of concrete with low-strength bricks as lightweight coarse aggregate. *Magazine of Concrete Research*, 2001, Vol. 53, S. 367-375
- [PAD02] **Padmini, A.K., Ramamurthy, K., Mathews, M.S.:** Relative moisture movement through recycled aggregate concrete. *Magazine of Concrete Research*, 2002, Vol. 54, S. 377-384
- [PET95] **Petersson, P.E.:** Scaling Resistance of Concrete-Field Exposure Tests. In: *Concrete in Saline Environment*. Swedish National Testing and Research Institute, in-house publishing, 1995
- [PIE02] **Pietersen, H.S., Fraaij, L.A., de Vries, H.J.:** Durability of concrete with recycled aggregates - results of Dutch laboratory and pilot tests. *Proceedings of the 9th international conference on durability of Materials and Components*, Brisbane, Australien, 2002, Paper 022, S. 128
- [POL95] **Polder, R.B.:** Chloride Diffusion and resistivity testing of five concrete mixes for marine environment. *Chloride Penetration into Concrete: Proceeding of the RILEM international Workshop*, 1995, S. 225-233

- [POO99] **Poon, C.S., Wong, Y.L.:** Effects of fly ash and silica fume on interfacial porosity of concrete. *Journal of materials in civil engineering*, 08/1999, S. 197-205
- [RAN85] **Rankers:** Zum Einfluss der Zementart auf die Chloridionendiffusion in Beton-Untersuchungen nach einer Chloridlagerung. *IBAC Mitteilungen*, 1985, S. 34-35
- [RAU92] **Raupach, M.:** Zur chloridinduzierten Makroelementkorrosion von Stahl in Beton. *DAfStb-Heft*, Beuth Verlag, Berlin, 1992, Nr. 433
- [RAV87] **Ravindrarajah, R.S., Tam, C.T.:** Recycling concrete as fine aggregate in concrete. *The international Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 1987, Vol. 9, Nr. 4, S. 235-241
- [RAV88] **Ravindrajah, R.S. Loo, Y.H., Tam, C.T.:** Strength evaluation of recycled-aggregate concrete by in-situ tests. *Matériaux et Constructions*, 1988, Nr. 21, S. 289-295
- [REC80] **Rechberger, P.:** Grundsätzliche Untersuchungen an Stahl in alkalisch-wässriger Lösung bei Gegenwart von Chloriden als Modell für das Verhalten von Stahleinlagen im Beton unter Chlorideinwirkung. *Forschungsinstitut des Vereins der österreichischen Zementfabrikanten*, Wien, 1980, Bericht P1/80
- [RUC03] **Rucker, P., Beddoe, R., Krus, M.:** Neue Erkenntnisse zu den Transportmechanismen von Feuchte und Chlorid in Beton. (wird noch veröffentlicht), *IBAUSIL*, Weimar, 2003, Paper-No. 3.30
- [RYU02] **Ryu, J.S.:** An experimental study on the effect of recycled aggregate on concrete properties. *Magazine of Concrete Research*, 2002, Vol. 54, S. 7-12
- [SAG01] **Sagoe-Crentsil, K.K., Brown, T., Tayler, A.H.:** Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate. *Cement and Concrete Research*, 2001, S. 707-712
- [SAG02] **Sagoe-Crentsil, K.K., Brown, T., Tayler, A.H.:** Durability and performance characteristics of recycled aggregate concrete. *Proceedings of the 9th international conference on durability of Materials and Components*, Brisbane, Australien, 2002, Paper 090
- [SAN98] **Sandberg, P., Tang, L., Andersen, A.:** Recurrent studies of chloride ingress in uncracked marine concrete at various exposure times and elevations. *Cement and Concrete Research*, 1998, S. 1489-1503
- [SCA84] **Scalny, J., Mindess, S.:** Physico-chemical phenomena at the cement paste-aggregate interface. *10th International Symposium on Reactivity of Solids*, Dijon, 1984, S. 517-521
- [SCH87] **Schulz, R.-R.:** Recycling von Baurestmassen. *Kurzberichte aus der Bauforschung* 1987, Nr. 30, S. 143-146

- [SCH95] **Schießl, P., Wiens, U.:** Rapid determination of chloride diffusivity in concrete with blending agents. Chloride Penetration into Concrete: Proceeding of the RILEM international Workshop, 1995, S. 115-125
- [SCH96] **Schießl, P., Wiens, U., Härdtl, R.:** Long-Term influence of fly ash on chloride diffusion and steel corrosion in concrete. Durability of Building Materials and Components 7, 1996, S. 511-522
- [SCR84] **Scrivener, K.L., Pratt, P.L.:** Backscattered electron images of polished cement sections in the scanning electron microscope. Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference on Cement Microscopy, Albuquerque, New Mexico, 1984, S. 145-155
- [SCR86] **Scrivener, K.L., Pratt, P.L.:** A preliminary study of the microstructure of the cement/sand bond in mortars. Proceedings, 8<sup>th</sup> International Congress on the Chemistry of Cement, Rio de Janeiro, 1986, Vol. III, S. 466-471
- [SCR87] **Scrivener, K.L., Pratt, P.L.:** The characterization and quantification of cement and concrete microstructures. From Materials science to construction materials engineering, Proceedings of the 1. International congress held by RILEM, edited by J.C. Maso, 1987, S. 61-68
- [SC88A] **Scrivener, K.L., Bentur, A., Pratt, P.L.:** Quantitative characterisation of the transition zone in high strength concretes. Advances in Cement Research, 1988, Vol. 1, Nr. 4, S. 230-237
- [SC88B] **Scrivener, K.L., Gartner, E.M.:** Microstructural gradients in cement paste around aggregate particles. Material Research Society Symposium Proceedings, 1988, Vol. 114, S. 77-85
- [SCR96] **Scrivener, K.L., Nemati, K.M.:** The percolation of pore space in the cement paste/aggregate interfacial zone of concrete. Cement and Concrete Research, 1996, Vol. 26, Nr. 1, S. 35-40
- [SER92] **Sergi, G., Yu, S.W., Page, C.L.:** Diffusion of chloride and hydroxyl ions in cementitious materials exposed to a saline environment. Magazine of Concrete Research, 1992, S. 63-69
- [SIA94] Recyclingbeton. Empfehlung Nr. 162/4 des Schweizerischen Ingenieur- und Architektenverein. SIA, Zürich, 1994
- [STU99] **Stutzman, P.E., Clifton, J.R.:** Specimen preparation for scanning electron microscopy. Cement Microscopy, 21st International Conference. Proceedings. April 25-29, 1999, Las Vegas, S. 10-22
- [SOD97] **Sodeikat, Ch., Springenschmid, R.:** Verhalten eines direkt befahrenen Betons mit Recyclingzuschlag im Winter. Forschungsvorhaben des Bundesministeriums für Verkehr, Lst. f. Baustoffkunde und Werkstoffprüfung der TU München, Eigenverlag, 1997
- [SOM90] **Sommer, H.:** Beton aus Altbeton. Zement und Beton, 1990, Nr. 4, S. 46

- [SPR85] **Springenschmid, R., Volkwein, A.:** Langzeitverhalten von Brücken aus Stahlbeton. Bundesminister für wirtschaftliche Angelegenheiten, Straßenforschung, Heft 261, Wien, 1985
- [SPR89] **Springenschmid, R.:** Anleitung zur Bestimmung des Chloridgehaltes von Beton. DAfStb-Heft, Beuth-Verlag, Berlin, 1989, Nr. 401
- [SPR93] **Springenschmid, R., Fleischer, W.:** Zur Technologie der Wiederverwendung von altem Straßenbeton. Straße und Autobahn, 1993, Nr. 12, S. 715-718
- [SPR96] **Springenschmid, R.:** Möglichkeiten und Grenzen für die Wiederverwendung von Beton aus Fahrbahndecken. Straße und Autobahn, 1996, Nr. 4, S. 203-208
- [STA00] **Stark, J., Wicht, B.:** Zement und Kalk. Der Baustoff als Werkstoff. Birkhäuser-Verlag, Basel, 2000
- [STO82] **Stoll, F.:** Elektrochemische Untersuchungen zur Passivität und Spannungsrißkorrosion von Spannstählen in alkalischen und karbonatisierten Calciumhydroxidlösungen. Dissertation, Erlangen, 1982
- [TAN92] **Tang, L., Nilsson, L.-O.:** Rapid Determination of the Chloride Diffusivity in Concrete by Applying an Electrical Field. ACI Materials Journal, 01-02/1992, S. 49-53
- [TAN93] **Tang, L., Nilsson, L.-O.:** Chloride binding capacity and binding isotherms of OPC pastes and mortars. Cement and Concrete Research, 1993, S. 247-253
- [TAN95] **Tang, L., Nilsson, L.-O.:** A new approach to the determination of pore distribution by penetrating chlorides into concrete. Cement and Concrete Research, 1995, S. 695-701
- [TAN00] **Tang, L., Andersen, A.:** Chloride ingress data from five years field exposure in a Swedish marine environment, 2<sup>nd</sup> International RILEM Workshop, Testing and Modelling the Chloride ingress into Concrete, Paris, 2000
- [TAV96] **Tavakoli, M., Soroushian, P.:** Drying shrinkage behaviour of recycled aggregate concrete. Concrete International Nr. 11, 1996, S.58-61
- [TEN67] **Tenoutasse, N.:** Untersuchungen über die Kinetik der Hydratation des Trikalziumaluminats in Gegenwart von Kalziumsulfat und Kalziumchlorid. Zement-Kalk-Gips, 1967, H. 10, S. 459-467
- [TIT02] **Tittarelli, F., Moriconi, G.:** The effect of fly ash and recycled aggregate on the corrosion resistance of steel in cracked reinforced concrete. Proceedings of the 9th international conference on durability of Materials and Components, Brisbane, Australien, 2002, Paper 070, S. 130
- [TR89A] **Tritthart, J.:** Chloride binding in cement - Part I: Investigations to determine the composition of porewater in hardened cement. Cement and Concrete Research, 1989, Vol. 19, S. 586-594

- [TR89B] **Tritthart, J.:** Chloride binding in cement - Part II: The influence of the hydroxide concentration in the pore solution of hardened cement paste on chloride binding. *Cement and Concrete Research*, 1989, Vol. 19, S. 683-691
- [TRI84] **Tritthart, J.:** Bewehrungskorrosion - Zur Frage des Chloridbindevermögens von Zement. *Zement-Kalk-Gips*, 4/1984, S. 200-204
- [TRU00] **Truc, O.:** Prediction of chloride penetration into saturated concrete – Multi-Species Approach. Dissertation, Chalmers University, 2000
- [TUT82] **Tuutti, K.:** Analysis of pore solution squeezed out of cement paste and mortar. *Nordic Concrete Research*, 1982, S. 25.1-25.16
- [VOL91] **Volkwein, A.:** Über das Eindringen von Wasser und Chlorid in Beton. Dissertation, TU München, 1991
- [VOL92] **Vollpracht, A.:** Recycling von Beton - Erfahrungen aus dem amerikanischen Straßenbau. *Beton*, 1992, Nr. 6, S. 348
- [VO95A] **Volkwein, A.:** Penetration of chlorides into concrete - phenomena and consequences; points of view based on 20 years research and site experience with de-icing salts. *Chloride Penetration into Concrete: Proceeding of the RILEM international Workshop*, 1995, S. 325-333
- [VO95A] **Volkwein, A.:** Chloride penetration due to the hydration suction of the cement. *Chloride Penetration into Concrete. Proc. of the RILEM International Workshop*, 1995, S. 334-346
- [VBT95] *Voorschriften Beton Technologie, Niederländische Norm, VBT 1995/NEN 5950, Ausgabe 1995*
- [WAK82] **Wakeley, L.D., Roy, D.M.:** A method for testing the permeability between grout and rock. *Cement and Concrete Research*, 1982, Vol. 12, Nr. 4, S. 533-534
- [WEB95] **Weber, S., Reinhardt H.:** A blend of aggregates to support curing of concrete. 6<sup>th</sup> Int. Symp. on Structural Lightweight Aggregate Concrete, Sandefjord, Norway, 1995, S. 662-671
- [WEB97] **Weber, S., Reinhardt, H. W.:** A new generation of high performance concrete: Concrete with autogenous curing. *Advn. Cem. Mat.*, 1997, Vol. 6, S. 59-68
- [WES82] **Wesche, K., Schulz, R.-R.:** Beton aus aufbereitetem Altbeton - Technologie und Eigenschaften. *Beton*, 1982, Nr. 2, S. 64-68, Nr. 3, S. 108-112
- [WIR00] **Wirquin, E., Hadjieva-Zaharieva, R., Buyle-Bodin, F.:** Use of water absorption by concrete as a criterion of the durability of concrete - Application to recycled aggregate concrete. *Materials and Structures*, (July) 2000, Vol. 33, S.403-408
- [YAN88] **Yanagi, K., Nakagwa, M., Hisaka, M., Kasai, Y.:** Effect of impurities in recycled coarse aggregate upon a few properties of the concrete produced with. Pro-

- ceedings of 2<sup>nd</sup> int. RILEM Symposium „Reuse of Demolition Waste“, Chapman and Hall, 1988, Vol. 2, S. 613-622
- [YAM88] **Yamato, T., Emoto, Y., Soeda, M., Sakamoto, Y.:** Some properties of recycled aggregate concrete. Proceedings of 2<sup>nd</sup> int. RILEM Symposium „Reuse of Demolition Waste“, Chapman and Hall, 1988, Vol. 2, S. 643-651
- [YUA87] **Yuan, C.Z., Guo, W.J.:** Bond between marble and cement paste. Cement and Concrete Research, 1987, Vol. 17, S. 544-552
- [ZEL02] **Zeller, S.:** Geschlossenes probabilistisches Modell zum Chloridmigrationskoeffizient von Beton. Diplomarbeit am Lehrstuhl für Baustoffkunde, München, 2002
- [ZHA89] **Zhang, M.-H., Gjorv, O.E.:** Backscattered electron imaging studies on the interfacial zone between high strength lightweight aggregate and cement paste. Advances in Cement Research, 1989, Vol. 2, Nr. 8, S. 141-146
- [ZHA90] **Zhang, M.-H., Gjorv, O.E.:** Microstructure of the interfacial zone between lightweight aggregate and cement paste. Cement and Concrete Research, 1990, Vol. 20, S. 610-618
- [ZHA91] **Zhang, M.-H., Gjorv, O. E.:** Permeability of high-strength lightweight concrete. ACI Materials Journal, 1991, S. 463-469
- [ZIM85] **Zimbelmann, R.:** A contribution to the problem of cement-aggregate bond. Cement and Concrete Research, 1985, Vol. 15, S. 801-808
- [ZIM87] **Zimbelmann, R.:** A method for strengthening the bond between cement stone and aggregates. Cement and Concrete Research, 1987, Vol. 17, S. 651-660

# Anhang

**Tabelle A1:** Kennwerte der verwendeten Zemente

Zement	Chemische Kennwerte												Klinker-Kennwerte				Blaine	Normdruckfestigkeit
	Hüttensand- gehalt	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	MnO	Cl	GV	C <sub>3</sub> A	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>4</sub> AF		
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]		
CEM I 32,5 R	-	20,4	5,6	2,8	64,6	2,0	3,0	1,20	0,9	-	0,018	2,1	11	54	19	9	3250	48,3
CEM I 32,5 R NW/HS	-	21,9	3,9	6,2	62,8	1,7	3,0	0,70	0,6	-	0,010	2,80	0	41	36	21	3683	48,0
CEM III/B 32,5 NW/HS	70,4	31,63	10,22	0,96	46,70	3,95	3,49	0,74	-	0,57	0,023	1,36	12	59	16	10	4938	47,3

**Tabelle A2:** Kennwerte der verwendeten rezyklierten Zuschläge

rezyklierte Zuschlagart	Kornklasse [mm]	Wasseraufnahme		Rohdichte [kg/dm <sup>3</sup> ]	stoffliche Zusammensetzung					
		W <sub>10min</sub> [%]	W <sub>24h</sub> [%]		Splitt/Kies [%]	Beton [%]	Asphalt [%]	Ziegel/Steinzeug [%]	Porenbeton [%]	Metalle [%]
		Betonsplitt I	0/4		8,7	8,9	2,07	definiert hergestellter Beton, der anschließend gebrochen wurde		
	4/8	4,5	5,4	2,35						
	8/16	3,6	4,1	2,40						
Betonsplitt II	4/8	3,5	4,1	2,34	44,2	54,7	-	1,1	-	-
	8/16	3,4	3,8	2,36	40,1	58,5	0,5	0,9	-	-
Ziegelsplitt	4/8	11,0	11,7	1,91	-	-	0,5	99,5	-	-
	8/16	10,1	12,1	1,91	-	-	1,2	98,8	-	-
Bauschutt	4/8	7,0	7,1	2,10	23,1	60,2	-	16,1	0,6	-
	8/16	5,7	6,2	2,15	26,3	55,1	-	14,1	2,4	2,1

**Tabelle A3:** Kennwerte der verwendeten Naturzuschläge

Naturzuschlag	Kornklasse	Mineralogische Beschaffenheit	Herkunft	Rohdichte
	[mm]			
Isarkies und -sand	0/4	56 % Kalkstein, 37 % Dolomit, 7 % Amphibiolithe	Raum München	2,75
	4/8			2,70
	8/16			2,70
Basaltsplitt	2/8	100 % Basalt	Rhön	2,92
	8/16			2,92
Mainsand	0/2	20 % Quarz, 10 % Granit 10 % Kalk, 60 % Sandstein	Raum Schweinfurth	2,61

**Tabelle A4:** Beton-Mischungszusammensetzung und Bezeichnung bei den Versuchen mit „äußerer“ Chloridquelle

Bezeichnung	rezyklierte Zuschlagart	Naturzuschlag	Vorbehandlung des Zuschlags	Anteil in der angeg. Kornklasse [%]			Zement	Flug- asche [kg/m <sup>3</sup> ]	Wasser- gehalt *) [kg/m <sup>3</sup> ]	w/z	FM- dosierung % **)
				0/4	4/8	8/16					
NMi/I/60	-	Isarkies + -sand	-	-	-	-	CEM I 32,5 R	-	192	0,60	1,2
BI/25/I/45	Betonsplitt I	Isarkies + -sand	-	-	15	10	CEM I 32,5 R	-	144	0,45	2
BI/100/I/60	Betonsplitt I	Isarsand	-	-	100		CEM I 32,5 R	-	192	0,60	1,2
BI/100S/I/60-FA	Betonbrechsand I	Isarkies	-	100	-	-	CEM I 32,5 R	60	192	0,60	1,2
BI/25/HS/45-FA	Betonsplitt I	Isarkies + -sand	-	-	15	10	CEM I 32,5 R NW/HS	60	144	0,45	2
BI/25/III/75	Betonsplitt I	Isarkies + -sand	-	-	15	10	CEM III/B 32,5 NW/HS	-	240	0,75	-
BI/100/III/60	Betonsplitt I	Isarsand	-	-	100		CEM III/B 32,5 NW/HS	-	192	0,60	1,2
BI/100S/III/45	Betonbrechsand I	Isarkies	-	100	-	-	CEM III/B 32,5 NW/HS	-	144	0,45	2
BI/15S10/I/45	Betonbrechsand + Betonsplitt I	Isarkies + -sand	-	15	10		CEM I 32,5 R	-	144	0,45	2
BI/25/I/75	Betonsplitt I	Isarkies + -sand	-	-	15	10	CEM I 32,5 R	-	240	0,75	-
NMi/I/55	-	Isarkies + -sand	-	-	-	-	CEM I 32,5 R	-	176	0,55	1
Z/100/I/55	Ziegelsplitt	Isarsand	-	-	100		CEM I 32,5 R	-	176	0,55	1,6
Z/75/I/55	Ziegelsplitt	Isarkies + -sand	-	-	75		CEM I 32,5 R	-	176	0,55	1,5
Z/55/I/55	Ziegelsplitt	Isarkies + -sand	-	-	55		CEM I 32,5 R	-	176	0,55	0,7
Z/37/I/55	Ziegelsplitt	Isarkies + -sand	-	-	37		CEM I 32,5 R	-	176	0,55	0,7
BAU/100/I/55	Bauschutt	Isarsand	-	-	100		CEM I 32,5 R	-	176	0,55	2
BAU/75/I/55	Bauschutt	Isarkies + -sand	-	-	75		CEM I 32,5 R	-	176	0,55	2
BAU/55/I/55	Bauschutt	Isarkies + -sand	-	-	55		CEM I 32,5 R	-	176	0,55	2
BAU/37/I/55	Bauschutt	Isarkies + -sand	-	-	37		CEM I 32,5 R	-	176	0,55	2
BII/100/I/55	Betonsplitt II	Isarsand	-	-	100		CEM I 32,5 R	-	176	0,55	2
BII/100/I/55-C	Betonsplitt II	Isarsand	Carbonatisiert	-	100		CEM I 32,5 R	-	176	0,55	2
BII/75/I/55	Betonsplitt II	Isarkies + -sand	-	-	75		CEM I 32,5 R	-	176	0,55	1,4
BII/37/I/55	Betonsplitt II	Isarkies + -sand	-	-	37		CEM I 32,5 R	-	176	0,55	2
BII/37/I/55-C	Betonsplitt II	Isarkies + -sand	Carbonatisiert	-	37		CEM I 32,5 R	-	176	0,55	2
BII/20S/I/55	Betonbrechsand II	Isarkies + -sand	-	20	--		CEM I 32,5 R	-	176	0,55	2
BII/75S/I/55	Betonbrechsand II	Isarkies + -sand	-	75	--		CEM I 32,5 R	-	176	0,55	2
BII/100S/I55	Betonbrechsand II	Isarkies + -sand	-	100	--		CEM I 32,5 R	-	176	0,55	2

\*) ohne Berücksichtigung des Wasserausgens der rezyklierten Zuschläge

\*\*) bez. auf den Zementgehalt

**Tabelle A5:** Beton-Kennwerte bei den Versuchen mit „äußerer“ Chloridquelle

Mischungsbezeichnung	Ausbreitmaß	Frischbetonrohddichte *)		Festbetonrohddichte *)	Druckfestigkeit *)
	a	$\rho_{\text{FrBS}}$	$\rho_{\text{FrBI}}$	$\rho_{\text{FB}}$	$\beta_{\text{w200}}$
	[cm]	[kg/dm <sup>3</sup> ]	[kg/dm <sup>3</sup> ]	[kg/dm <sup>3</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]
NMi/I/60	-	2391,9	-	2394,0	40,5
BI/25/I/45	-	2408,3	-	2380,9	56,9
BI/100/I/60	-	2261,4	-	2285,7	42,8
BI/100S/I/60-FA	-	2176,7	-	2226,2	26,9
BI/25/HS/45-FA	-	2320,4	-	2347,1	51,1
BI/25/III/75	-	2251,3	-	2248,0	23,3
BI/100/III/60	-	2261,4	-	2272,9	36,1
BI/15S10/I/45	-	2202,5	-	2361,4	49,0
BI/25/I/75	-	2251,3	-	2276,9	29,3
NMi/I/55	43	2445,5	2417,8	2423,2	44,1
Z/100/I/55	43	2178,7	2180,3	2108,2	39,8
Z/75/I/55	44	2240,9	2239,7	2185,8	41,1
Z/55/I/55	40	2283,4	2266,1	2235,0	41,1
Z/37/I/55	40	2334,5	2315,7	2290,1	42,0
BAU/100/I/55	36	2258,0	2255,3	2204,4	41,1
BAU/75/I/55	39	2288,9	2299,2	2242,9	42,8
BAU/55/I/55	42	2312,1	2326,0	2284,6	44,6
BAU/37/I/55	43,5	2375,7	2356,0	2345,1	44,6
BII/100/I/55	39	2334,5	2316,0	2310,8	47,3
BII/100/I/55-C	40	2336,4	2315,9	2298,9	45,4
BII/75/I/55	47	2357,0	2336,7	2323,7	45,5
BII/37/I/55	43	2402,6	2380,1	2372,9	44,2
BII/37/I/55-C	44	2393,3	2380,1	2370,4	45,1
BII/20S/I/55	41	2399,4	2399,0	2383,3	44,0
BII/75S/I/55	39	2350,9	2342,6	2316,7	35,9
BII/100S/I/55	37	2328,5	2321,6	2309,4	36,2

\*) Mittelwert aus je 3 Proben

**Tabelle A6:** Chloridgehalte der Betone die einem kapillaren Saugen einer 3%-igen NaCl-Lösung ausgesetzt waren; Mittelwert aus je 2 Proben

Mischungs- bezeichnung	Chloridgehalte bez. auf Zement [M.-%] (a: 0-10 mm; b: 10-20 mm; c: 20-30 mm; d: 30-40 mm, e: 40-50 mm)																	
	2 d				7d				28 d					56 d				
	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e
NMi/I/60	1,593	1,226	0,197	-	1,792	0,569	0,120	0,089	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BI/25/I/45	0,628	0,186	0,114	-	1,168	0,331	0,144	0,103	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BI/100/I/60	1,162	0,269	0,094	-	1,437	0,322	0,114	0,101	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BI/100S/I/60-FA	1,084	0,934	0,302	-	3,991	1,735	0,335	0,126	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BI/25/HS/45-FA	1,366	0,418	0,101	-	1,827	0,421	0,108	0,091	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BI/25/III/75	0,812	0,378	0,215	-	1,118	0,333	0,183	0,072	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BI/100/III/60	1,176	0,503	0,244	-	1,531	0,511	0,226	0,113	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BI/15S10/I/45	1,073	0,238	0,134	-	0,793	0,513	0,123	0,110	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BI/25/I/75	1,681	0,829	0,258	-	2,071	0,811	0,238	0,095	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BAU/55/I/55	1,608	0,647	0,113	0,055	1,693	0,722	0,158	0,215	1,893	0,852	0,428	0,141	-	2,069	0,950	0,733	0,366	0,307
BAU/37/I/55	1,204	0,378	0,081	0,789	1,574	0,805	0,522	0,147	1,605	0,678	0,290	0,108	-	1,843	1,461	0,717	0,252	0,088
Z/55/I/55	1,014	0,472	0,098	-	1,391	0,648	0,211	0,100	2,037	0,944	0,429	0,250	-	1,885	1,104	0,503	0,432	0,115
Z/100/I/55	1,222	0,382	0,122	0,027	1,620	0,948	0,450	0,092	1,921	1,204	0,385	0,083	0,069	2,075	1,215	0,506	0,089	0,061
Z/37/I/55	1,305	0,685	0,150	-	1,454	0,778	0,215	0,078	1,979	1,027	0,411	0,122	-	1,738	0,879	0,314	0,100	0,112
BII/37/I/55	1,151	0,259	0,136	0,114	1,615	0,527	0,175	0,114	1,708	1,105	0,313	0,091	-	1,801	0,994	0,461	0,143	0,099
NMi/I/55	1,282	0,574	0,254	0,064	1,460	0,783	0,192	0,131	1,694	1,089	0,593	0,188	0,070	1,720	1,247	0,504	0,221	0,125

**Tabelle A7:** Chloridgehalte der Betone die unter Wechsellagerung einem kapillaren Saugen einer 3%-igen NaCl-Lösung ausgesetzt waren; Mittelwert aus je 2 Proben

Mischungs- bezeichnung	Chloridgehalte bez. auf Zement [M.-%]				
	0-10 mm	10-20 mm	20-30 mm	30-40 mm	40-50 mm
NMi/I/60	2,406	1,552	0,551	0,164	0,071
BI/25/I/45	2,800	1,129	0,113	0,075	-
BI/100/I/60	2,609	1,216	0,303	0,087	0,087
BI/100S/I/60-FA	4,969	1,728	0,345	0,098	-
BI/25/HS/45-FA	2,607	1,476	0,128	-	-
BI/25/III/75	1,387	0,572	0,274	0,163	-
BI/100/III/60	1,758	0,573	0,346	0,168	-
BI/15S10/I/45	2,556	1,306	0,300	0,071	-
BI/25/I/75	2,739	1,440	0,567	0,2	-

**Tabelle A8:** Feuchtegehalte der Betonproben des kapillaren Saugversuchs; Mittelwert aus je 2 Proben

Mischungsbezeichnung	Feuchtegehalt [M.-%]				
	Konstantlagerung				Wechselagerung
	2 d	7 d	28 d	56 d	21 d
NMi/I/60	1,90	2,45	-	-	2,59
BI/25/I/45	0,90	1,04	-	-	1,22
BI/100/I/60	1,77	2,47	-	-	2,25
BI/100S/I/60-FA	2,86	3,06	-	-	3,22
BI/25/HS/45-FA	1,64	1,53	-	-	1,86
BI/25/III/75	1,35	2,88	-	-	1,75
BI/100/III/60	1,16	1,41	-	-	1,59
BI/15S10/I/45	1,16	1,58	-	-	1,81
BI/25/I/75	3,39	3,79	-	-	3,67
BAU/37/I/55	0,72	0,96	1,12	1,32	-
BAU/55/I/55	0,86	1,05	1,34	1,35	-
Z/37/I/55	0,78	1,05	1,17	1,18	-
Z/55/I/55	0,84	0,97	1,24	1,18	-
BII/37/I/55	0,71	0,88	1,03	1,11	-
NMi/I/55	0,60	0,76	0,99	1,04	-

**Tabelle A9:** Ergebnisse der RCM-Versuche; Mittelwerte aus je 3 Proben

Mischungsbezeichnung	Migrationskoeffizient $D_{RCM}$			
	nach 28 Tagen		nach 90 Tagen	
	[x 10 <sup>-12</sup> cm <sup>2</sup> /s]	Varianz	[x 10 <sup>-12</sup> cm <sup>2</sup> /s]	Varianz
NMi/I/60	-	-	8,095	0,044
BI/25/I/45	-	-	6,021	0,074
BI/100/I/60	-	-	5,418	0,001
BI/100S/I/60-FA	-	-	12,448	0,105
BI/25/HS/45-FA	-	-	3,570	0,304
BI/25/III/75	-	-	*)	*)
BI/100/III/60	-	-	*)	*)
BI/15S10/I/45	-	-	8,213	0,046
BI/25/I/75	-	-	16,805	2,103
NMi/I/55	12,580	1,007	8,034	0,655
NMb/I/55	9,746	0,172	0,112	0,001
Z/100/I/55	16,939	3,638	11,051	0,442
Z/75/I/55	16,333	0,564	10,623	0,214
Z/55/I/55	13,675	0,088	10,109	0,987
Z/37/I/55	13,075	1,753	10,643	0,031
BAU/100/I/55	15,498	0,117	11,666	0,190
BAU/75/I/55	15,782	0,892	9,770	0,070
BAU/55/I/55	15,008	0,314	11,967	0,043
BAU/37/I/55	14,322	0,282	11,886	1,714
BII/100/I/55	12,848	0,650	12,739	0,328
BII/100/I/55-C	13,400	0,762	-	-
BII/75/I/55	13,184	1,438	12,236	0,544
BII/37/I/55	13,844	2,050	8,146	0,369
BII/37/I/55-C	13,299	1,526	-	-
BII/20S/I/55	15,965	1,191	-	-
BII/75S/I/55	20,952	4,038	-	-
BII/100S/I/55	26,031	4,215	-	-

\*) an den Proben mit CEM III/B-Zementen war eine Auswertung des RCM-Versuchs nicht möglich (Färbung des Silbernitrat-Indikators auf der tiefblauen Bruchfläche war nicht erkennbar)

**Tabelle A10:** Mischungszusammensetzung der sogen. Altbetone aus denen sowohl SRZ als auch SB gewonnen wurden

	w/z = 0,40	w/z = 0,70
Wassergehalt [kg/m <sup>3</sup> ]	128	224
Zementgehalt [kg/m <sup>3</sup> ]	320	320
Isarsand 0/4 [kg/m <sup>3</sup> ]	1119	977
Isarkies 4/8 [kg/m <sup>3</sup> ]	923	805

**Tabelle A11:** Mischungszusammensetzung des Kontaktmörtels für die Untersuchung des Wassertransports mit der Mikrowelle

	w/z = 0,40	w/z = 0,55	w/z = 0,70
Wassergehalt [kg/m <sup>3</sup> ]	128	176	224
Zementgehalt [kg/m <sup>3</sup> ]	320	320	320
Basaltmehl [kg/m <sup>3</sup> ]	89	144	186

**Tabelle A12:** Eigenschaften der Flugasche und des Silikastaubes für den Beton der Korrosionsversuche

Silika- staub	H <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub>	C	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	Cl <sup>-</sup>	G.V.	ρ <sub>Schütt</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]
	[%]													
	< 0,3	> 98	< 0,4	< 0,3	< 0,05	< 0,3	< 0,1	< 0,05	< 0,25	< 0,1	< 0,2	< 0,01	< 0,6	300-450
Flug- asche	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	Dichte		Kornanteil < 20 μm			
	[%]								[g/cm <sup>3</sup> ]	[%]				
	45	27	11	5,5	2,8	0,5	2,9	0,8	2,4		35			

**Tabelle A13:** Gesamtchloridgehalte der Modell-Umverteilungsversuche als Profil ermittelt, jeweils Mittel aus 2 Proben

Mischungs- bezeich- nung	Gesamtchloridgehalte bez. auf Zement [M.-%]							
	100 d							
	S1	S2	S3	S4	M1	M2	M3	M4
I/4-C	1,438	1,331	1,065	0,896	0,375	0,187	0,201	0,170
I/7-C	1,480	1,077	1,337	1,037	0,182	0,122	0,146	0,147
I/7-c	1,205	1,364	1,446	0,816	0,343	0,114	0,238	0,163
I/7-d	1,520	1,180	1,243	0,946	0,423	0,098	0,154	0,157
III/7-C	0,903	0,827	0,870	0,604	0,277	0,183	0,190	0,149
III/7-c	1,156	1,049	0,855	0,764	0,399	0,257	0,302	0,290
III/7-D	1,293	1,165	1,298	0,833	0,232	0,183	0,199	0,085
HS/7-D	1,525	1,288	1,031	0,672	0,267	0,071	0,165	0,157

**Tabelle A14:** Gesamtchloridgehalte der Modell-Umverteilungsversuche bei den Scheibchen M1 und M2 ermittelt, jeweils Mittel aus 2 Proben

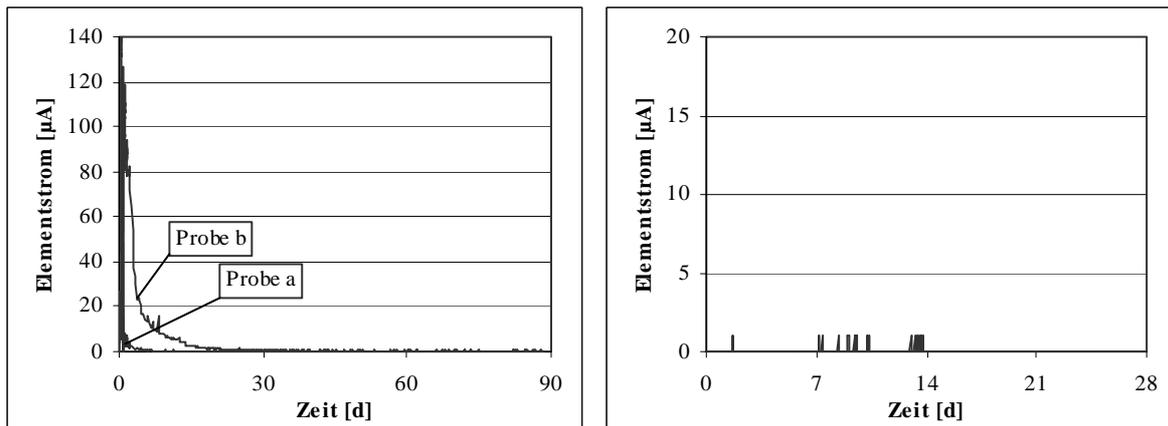
Gesamtchloridgehalte bez. auf Zement [M.-%]									
ofengetrocknete Proben					vorbefeuchtete Proben				
Mischungs- bezeichnung	2 d		100 d		Mischungs- bezeichnung	2 d		100 d	
	M1	M2	M1	M2		M1	M2	M1	M2
I/7-I	0,101	0,054	0,656	0,233	I/7-i	0,101	0,061	0,831	0,338
I/7-D	0,061	0,054	0,189	0,078	I/7-d	0,081	0,054	0,423	0,098
I/7-H	0,068	0,061	0,588	0,237	I/7-c	0,095	0,054	0,343	0,114
I/7-C	0,054	0,061	0,182	0,122	I/7-b	0,074	0,074	0,225	0,165
I/7-K	0,081	0,061	0,527	0,139	III/7-i	0,068	0,054	0,385	0,247
I/7-B	0,081	0,068	0,166	0,110	III/7-c	0,088	0,061	0,399	0,257
I/7-F	0,088	0,068	0,959	0,275					
I/4-I	0,074	0,047	0,463	0,085					
I/4-H	0,088	0,068	0,341	0,068					
I/4-C	0,068	0,061	0,375	0,187					
III/7-I	0,122	0,054	0,362	0,139					
III/7-D	0,061	0,054	0,232	0,183					
III/7-H	0,115	0,074	0,419	0,196					
III/7-C	0,061	0,061	0,277	0,183					
III/7-K	0,074	0,061	0,766	0,160					
III/7-B	0,088	0,074	0,266	0,190					
III/4-I	0,115	0,068	0,193	0,074					
III/4-H	0,142	0,061	0,213	0,118					
III/4-C	0,061	0,068	0,202	0,135					
HS/7-I	0,068	0,054	0,615	0,085					
HS/7-D	0,061	0,054	0,267	0,071					
HS/7-H	0,061	0,061	0,757	0,115					
HS/7-C	0,061	0,047	0,295	0,132					
HS/7-K	0,068	0,054	0,640	0,157					

**Tabelle A15:** Freie Chloridgehalte der Modell-Umverteilungsversuche, jeweils Mittel aus 2 Proben

Mischungs- bezeich- nung	Gesamtchloridgehalte bez. auf Zement [M.-%]															
	2 d								100 d							
	S1	S2	S3	S4	M1	M2	M3	M4	S1	S2	S3	S4	M1	M2	M3	M4
I/4-C	1,139	0,977	0,841	0,698	0,228	0,167	0,019	0,032	1,119	0,941	0,550	0,830	0,142	0,060	0,109	0,081
I/4-I	0,940	0,908	0,721	0,462	0,120	0,120	0,055	0,061	0,532	0,715	0,600	0,459	0,120	0,120	0,096	0,067
I/7-C	1,014	1,142	0,956	0,481	0,111	0,093	0,026	0,016	0,632	0,922	0,648	0,740	0,332	0,049	0,085	0,102
I/7-c	1,134	0,842	1,106	0,815	0,053	0,099	0,017	0,040	0,639	0,699	0,763	0,442	0,071	0,119	0,047	--
I/7-D	0,847	0,861	0,566	0,368	0,025	0,038	0,101	0,115	0,756	0,652	0,572	0,359	0,086	0,029	0,116	0,182
I/7-d	1,372	1,127	1,129	0,817	0,026	0,077	0,039	0,034	0,451	0,641	0,588	0,914	0,074	0,058	0,022	0,142
I/7-F	1,531	1,407	1,171	0,264	0,156	0,120	0,160	0,120	1,003	0,932	1,008	0,994	0,522	0,093	0,108	0,070
I/7-I	1,363	1,295	0,980	0,487	0,022	0,019	0,060	0,070	1,133	0,785	0,727	0,596	0,293	0,098	0,072	0,072
III/4-I	0,743	0,675	0,617	0,543	0,050	0,032	0,090	0,074	0,592	0,511	0,555	0,380	0,048	0,035	0,065	0,083
III/7-C	0,783	0,898	0,569	0,737	0,045	0,067	0,026	0,027	0,438	0,635	0,551	0,282	0,056	0,042	0,095	0,058
III/7-c	0,604	0,583	0,615	0,469	0,076	0,029	0,014	0,026	0,790	0,779	0,524	0,415	0,085	0,071	0,053	0,089
III/7-D	0,876	0,837	0,827	0,636	0,093	0,087	0,015	0,018	0,854	0,839	0,946	0,559	0,068	0,052	0,008	0,058
III/7-I	1,243	1,164	1,400	0,828	0,036	0,014	0,066	0,054	1,365	1,096	0,845	0,164	0,025	0,070	0,055	0,075
HS/7-D	1,055	1,124	0,713	0,349	0,057	0,045	0,013	0,016	0,642	0,631	0,559	0,315	0,057	0,044	0,009	0,097
HS/7-I	1,885	1,564	1,061	0,459	0,013	0,017	0,070	0,065	0,949	0,786	0,867	0,575	0,164	0,015	0,052	0,044

**Tabelle A16:** Feuchtegehalte der Modell-Umverteilungsversuche, jeweils Mittel aus 2 Proben

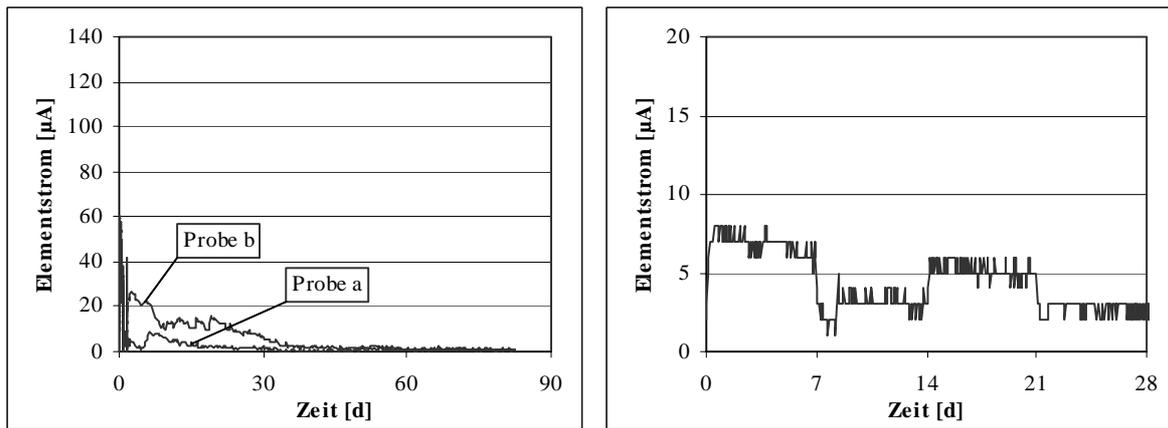
Mischungs- bezeich- nung	Feuchtegehalte [M.-%]															
	2 d								100 d							
	S1	S2	S3	S4	M1	M2	M3	M4	S1	S2	S3	S4	M1	M2	M3	M4
I/7 – H	7,80	8,29	9,25	10,29	8,10	7,20	9,02	8,57	10,26	8,33	7,06	8,99	5,80	6,92	7,34	7,38
I/4 – H	2,80	2,98	3,22	3,65	8,35	8,26	10,00	9,71	4,94	6,98	5,66	5,40	7,94	8,74	8,96	9,90
I/7 – I	6,76	7,20	7,78	8,85	7,60	6,93	8,42	9,46	10,14	8,67	9,28	8,21	8,83	7,77	9,12	12,47
I/7 – i	11,57	9,21	7,39	8,85	9,26	10,00	11,02	12,75	11,03	8,70	9,28	9,17	8,25	8,86	9,16	10,11
I/4 – I	4,16	4,14	4,05	6,55	8,78	9,66	9,06	11,46	6,51	6,47	6,80	5,68	8,64	9,12	10,52	10,12
I/7 – D	7,92	8,74	7,87	10,56	6,83	9,15	8,23	9,07	9,27	9,32	10,15	9,00	8,57	7,97	7,66	8,26
I/7 – d	11,79	8,02	9,09	8,75	9,40	9,17	10,95	10,40	12,07	10,92	9,83	10,61	10,23	11,34	10,71	10,69
I/7 – C	7,16	9,73	9,22	9,15	10,47	10,15	9,97	8,97	4,42	5,83	5,91	6,22	4,99	5,18	5,03	5,33
I/7 – c	9,23	7,91	8,91	9,01	9,23	9,81	10,22	10,05	7,00	7,51	7,34	6,37	7,84	6,63	7,04	6,97
I/4 – C	4,69	3,86	3,88	6,03	8,52	9,75	9,14	10,05	3,67	3,45	3,68	3,80	6,23	7,39	8,19	6,76
I/7 – K	9,69	7,72	7,58	6,89	8,20	8,44	8,20	8,39	8,10	7,07	7,71	6,64	5,95	6,64	7,02	7,43
I/7 – G	5,36	5,87	6,77	7,05	8,32	7,15	7,45	7,23	8,20	8,10	7,40	7,62	6,43	6,76	7,49	7,37
I/7 – F	5,02	5,27	6,87	6,36	7,27	8,62	10,00	11,45	8,48	7,64	8,79	7,00	7,23	7,73	8,70	8,89
I/7 – B	5,33	5,78	7,26	6,12	7,95	6,99	9,30	9,91	8,04	7,69	7,34	8,39	5,65	6,37	7,38	7,81
I/7 – b	4,98	5,84	6,13	7,80	8,95	9,44	10,09	12,69	5,32	7,69	8,66	7,15	7,48	9,41	8,98	9,06
HS/7 – H	5,87	7,49	5,92	7,84	5,86	6,73	7,72	8,44	11,81	9,40	9,08	9,72	7,21	7,85	8,03	8,53
HS/7 – I	8,22	8,20	8,44	7,63	6,63	8,08	7,71	8,89	8,51	7,37	8,33	8,70	6,77	7,46	8,38	7,05
HS/7 – D	8,79	8,13	9,51	11,43	8,09	8,33	8,09	8,09	9,55	9,24	8,96	8,96	7,37	8,92	8,75	7,76
HS/7 – C	6,14	6,74	7,30	6,81	5,32	6,18	5,16	6,40	6,99	5,40	7,20	7,06	5,01	5,27	4,95	5,81
HS/7 – K	7,62	6,92	6,62	6,62	7,87	7,42	7,40	7,60	7,33	6,79	6,67	7,55	7,27	6,66	7,56	7,24
III/7 – H	7,24	9,04	7,01	10,51	7,70	8,04	9,51	9,26	9,07	9,86	8,54	11,07	7,90	8,28	9,06	8,55
III/4 – H	6,44	6,63	4,89	5,63	9,68	10,67	10,49	11,64	7,44	6,41	6,76	5,86	8,61	8,66	9,03	9,68
III/7 – I	7,89	8,06	9,37	9,43	8,16	9,41	11,55	10,19	10,35	10,01	8,97	11,32	8,06	9,78	9,96	9,57
III/7 – i	9,48	8,95	8,16	8,68	8,74	10,27	11,61	10,71	11,29	9,76	10,55	9,49	8,79	10,55	12,16	11,64
III/4 – I	7,06	6,27	5,80	7,14	10,16	10,89	11,44	12,23	7,78	7,16	6,36	6,64	8,29	9,71	9,76	9,46
III/7 – D	5,77	6,30	7,25	8,94	9,15	10,98	9,37	12,18	10,76	8,54	11,08	11,22	9,30	9,54	8,98	10,97
III/7 – C	8,20	7,66	7,42	8,37	8,15	8,59	8,86	10,06	6,99	6,12	5,60	7,63	5,18	5,11	5,65	6,05
III/7 – c	9,39	11,05	10,94	11,22	9,74	10,31	11,15	11,03	8,37	7,62	7,83	8,50	6,21	6,85	6,97	7,11
III/4 – C	5,45	4,37	4,66	5,16	9,48	9,40	10,86	10,57	5,11	3,87	4,36	4,67	6,94	7,20	7,37	7,45
III/7 – K	7,50	8,60	7,63	7,00	5,68	6,38	7,19	8,00	9,69	9,39	10,03	9,97	6,04	4,88	6,27	6,24
III/7 – B	7,87	8,63	9,87	10,17	8,44	4,95	6,09	5,92	9,70	8,43	10,93	8,36	6,67	5,90	5,93	6,66



**Bild A1:** Elementstromverlauf der Betonkorrosionszelle, links: Konstantlagerung, rechts: Wechselagerung;  
Beton der Korrosionszelle: CEM I 32,5 R + Silikastaub, w/z = 0,70  
Betonspalt: CEM I 32,5 R, w/z = 0,70, gelagert in 3 % NaCl, direkter Kontakt zum Stahl



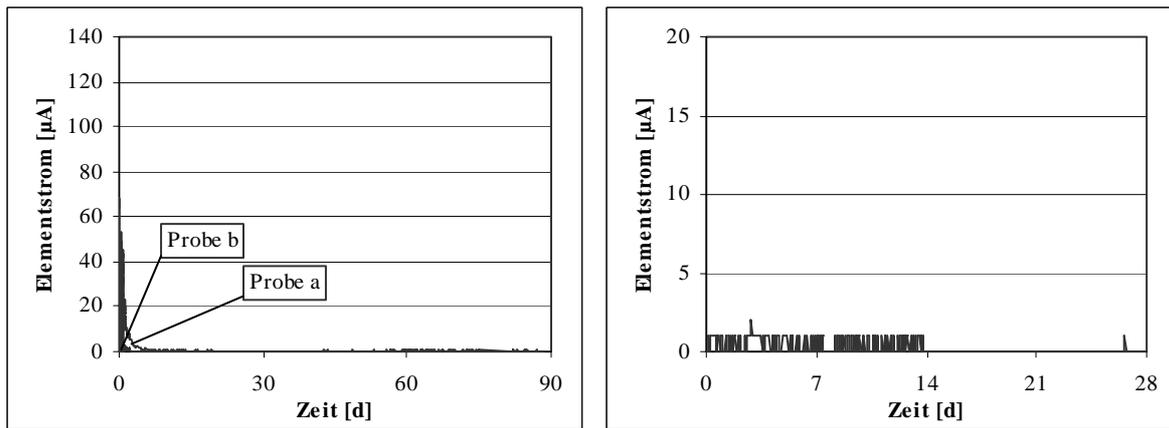
**Bild A2:** Aufnahmen von gebeizten Korrosionsstellen, links: Probe a, rechts: Probe b;  
Versuchsparameter s. Bild A1



**Bild A3:** Elementstromverlauf der Betonkorrosionszelle, links: Konstantlagerung, rechts: Wechselagerung;  
Beton der Korrosionszelle: CEM III B 32,5,  $w/z = 0,70$   
Betonspplitt: CEM I 32,5 R,  $w/z = 0,70$ , gelagert in 3 % NaCl, direkter Kontakt zum Stahl



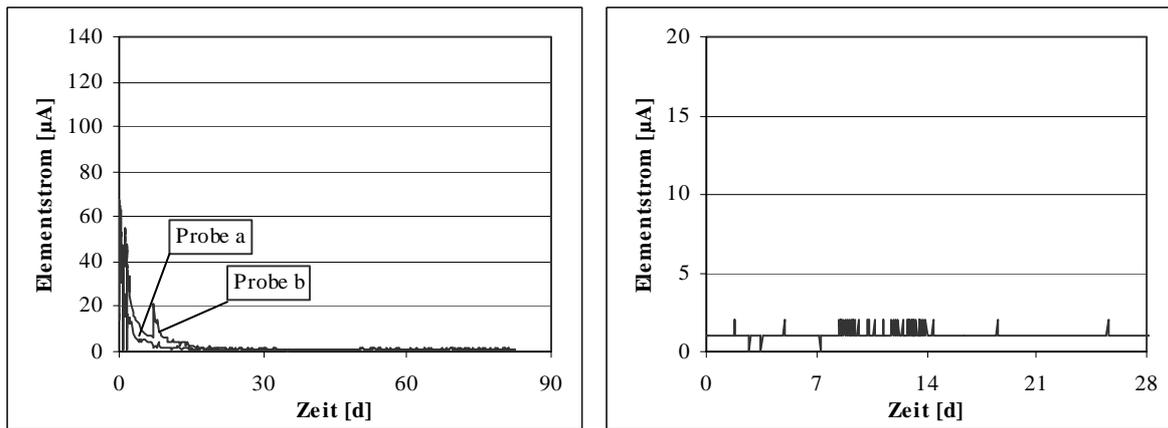
**Bild A4:** Aufnahmen von gebeizten Korrosionsstellen, links: Probe a, rechts: Probe b;  
Versuchsparameter s. Bild A3



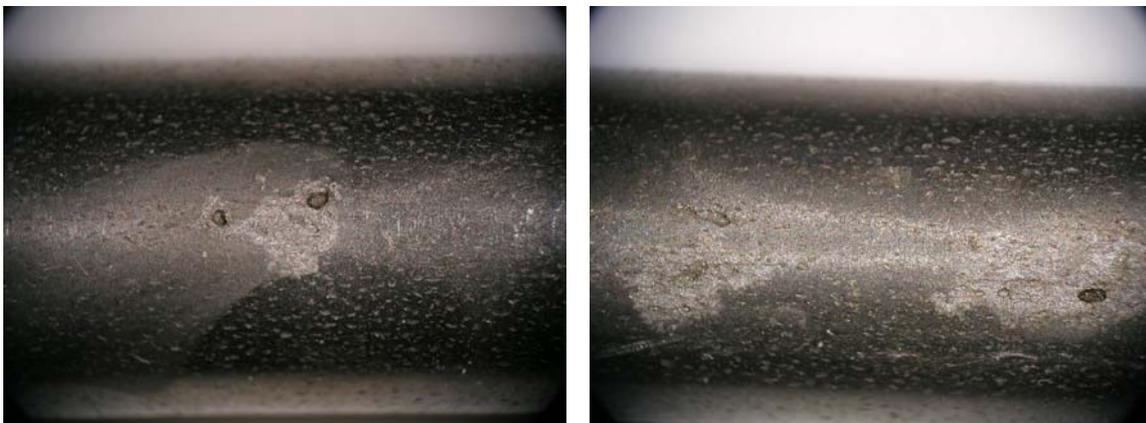
**Bild A5:** Elementstromverlauf der Betonkorrosionszelle, links: Konstantlagerung, rechts: Wechsellagerung;  
Beton der Korrosionszelle: CEM I 32,5 R + Flugasche,  $w/z = 0,70$   
Betonspplitt: CEM I 32,5 R,  $w/z = 0,70$ , gelagert in 3 % NaCl, direkter Kontakt zum Stahl



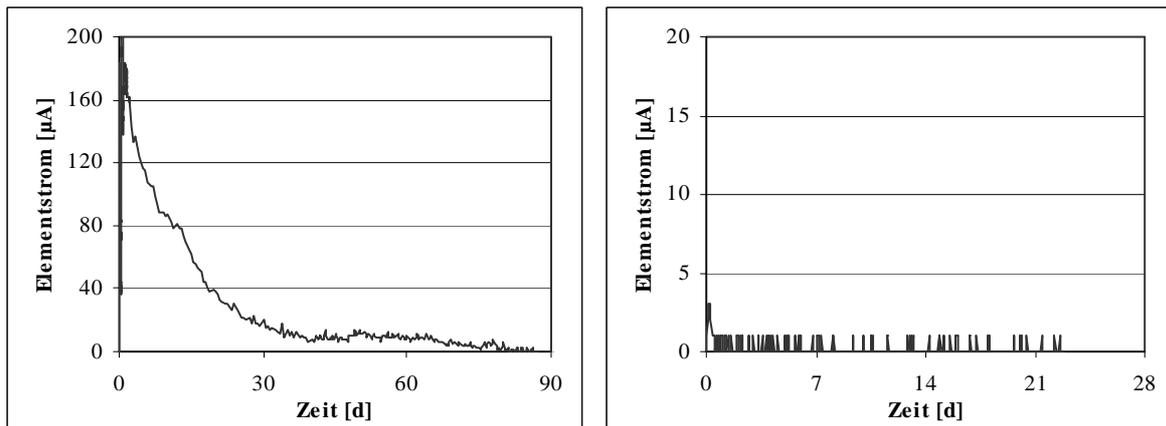
**Bild A6:** Aufnahmen einer gebeizten Korrosionsstelle, Probe b; Versuchsparameter s. Bild A5



**Bild A7:** Elementstromverlauf der Betonkorrosionszelle, links: Konstantlagerung, rechts: Wechselagerung;  
Beton der Korrosionszelle: CEM I-HS 32,5 R, w/z = 0,70  
Betonspplitt: CEM I 32,5 R, w/z = 0,70, gelagert in 3 % NaCl, direkter Kontakt zum Stahl



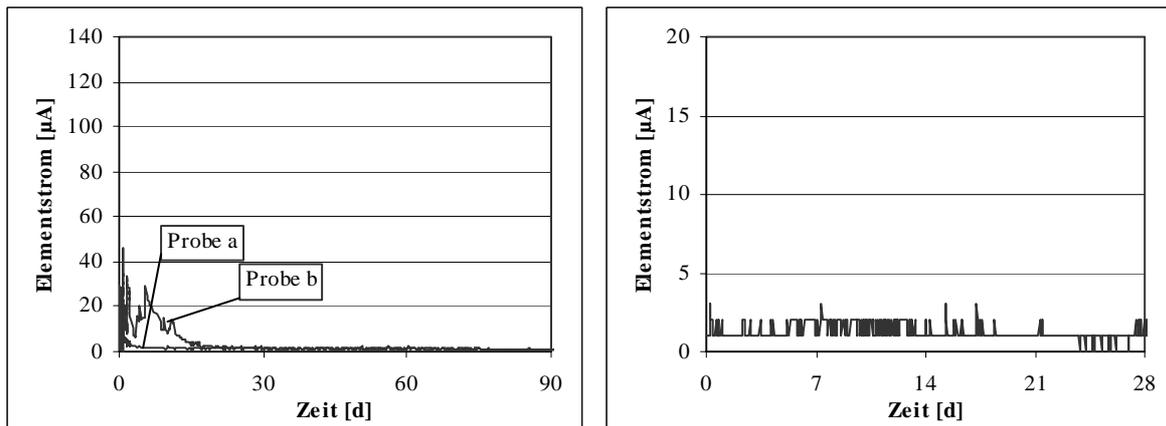
**Bild A8:** Aufnahmen von gebeizten Korrosionsstellen, links: Probe a, rechts: Probe b;  
Versuchsparameter s. Bild A7



**Bild A9:** Elementstromverlauf der Betonkorrosionszelle, links: Konstantlagerung, rechts: Wechselagerung;  
Beton der Korrosionszelle: CEM I 32,5 R, w/z = 0,70  
Betonsplitt: CEM I 32,5 R, w/z = 0,70, gelagert in 10 % NaCl, direkter Kontakt zum Stahl



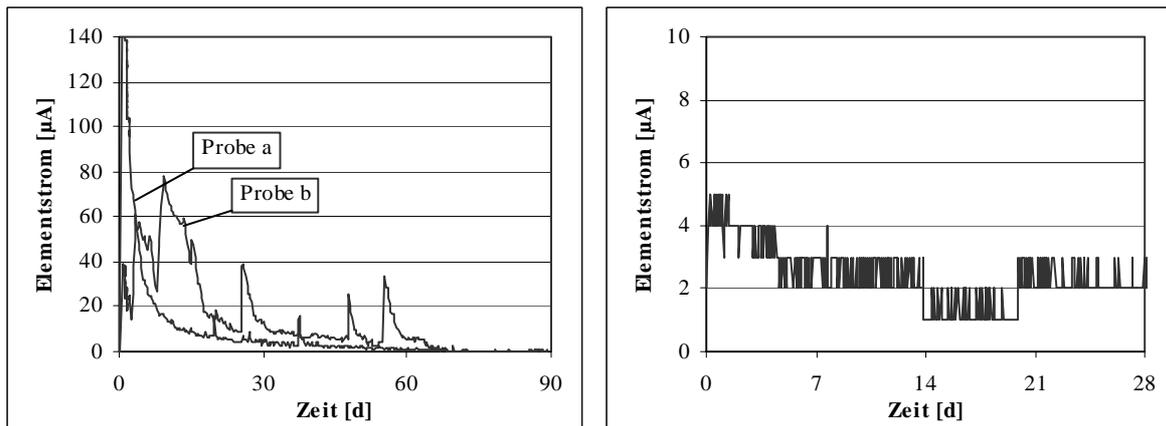
**Bild A10:** Aufnahmen einer gebeizten Korrosionsstelle; Versuchsparameter s. Bild A9



**Bild A11:** Elementstromverlauf der Betonkorrosionszelle, links: Konstantlagerung, rechts: Wechsellagerung;  
Beton der Korrosionszelle: CEM I 32,5 R,  $w/z = 0,70$   
Betonsplitt: CEM III-B 32,5,  $w/z = 0,70$ , gelagert in 3 % NaCl, direkter Kontakt zum Stahl



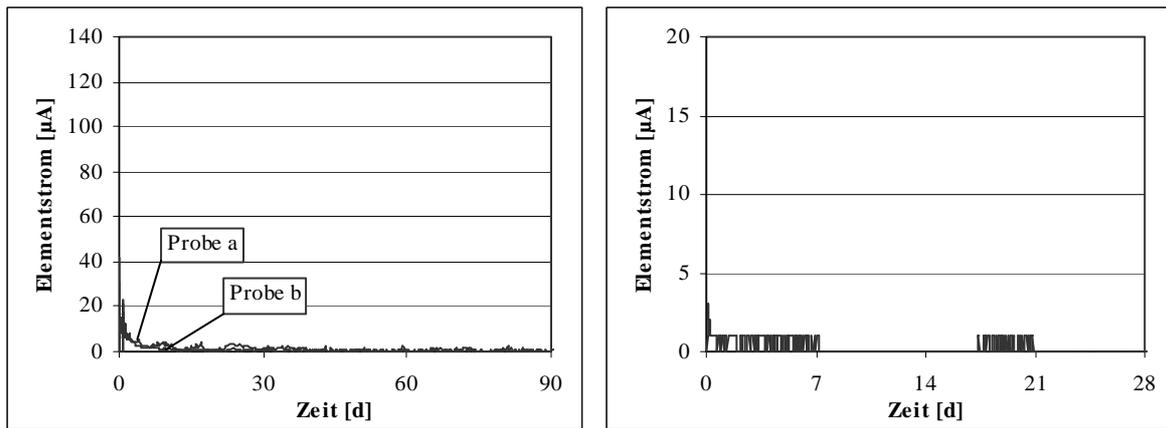
**Bild A12:** Aufnahmen einer gebeizten Korrosionsstelle, Probe b; Versuchsparameter s. Bild A11



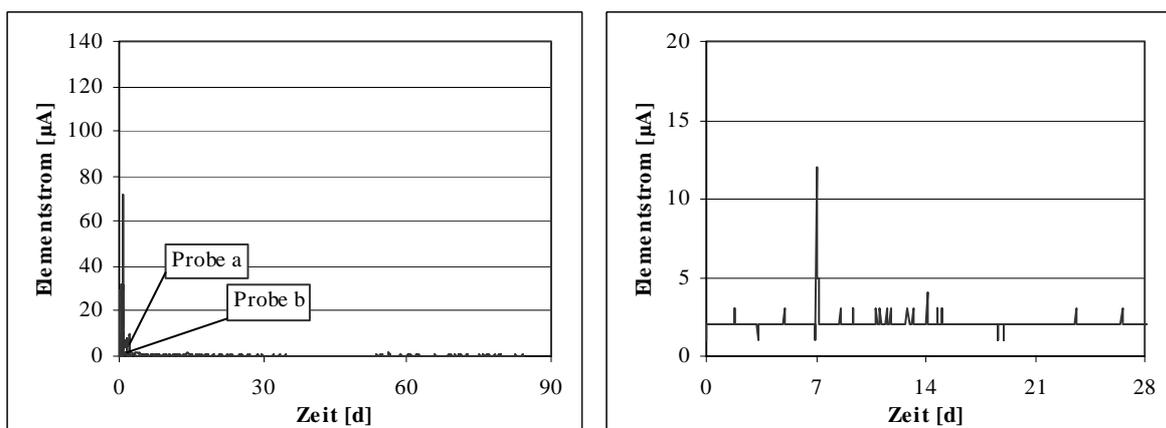
**Bild A13:** Elementstromverlauf der Betonkorrosionszelle, links: Konstantlagerung, rechts: Wechsellagerung;  
Beton der Korrosionszelle: CEM I 32,5 R,  $w/z = 0,70$  + platierte Kathode  
Betonspalt: CEM III B 32,5,  $w/z = 0,70$ , gelagert in 3 % NaCl, direkter Kontakt zum Stahl



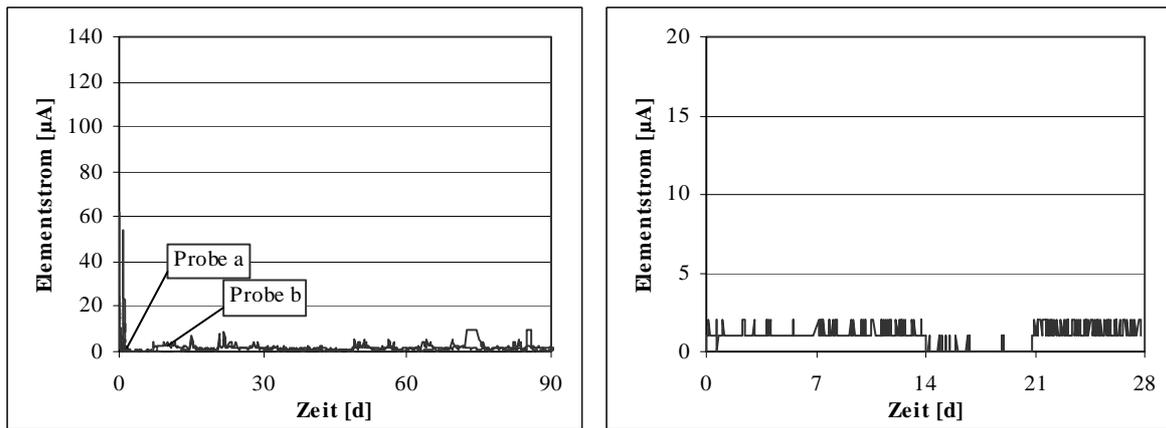
**Bild A14:** Aufnahmen von geätzten Korrosionsstellen, links: Probe a, rechts: Probe b;  
Versuchsparameter s. Bild A13



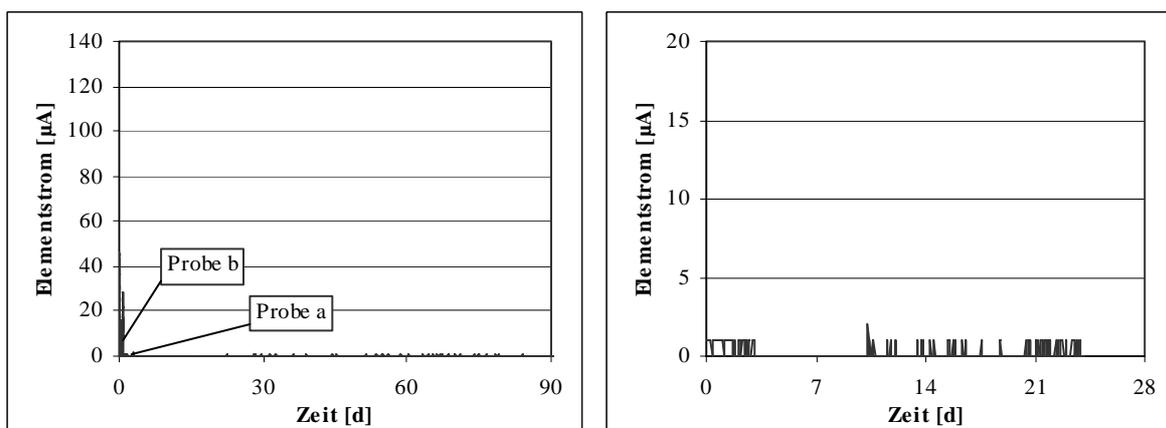
**Bild A15:** Elementstromverlauf der Betonkorrosionszelle, links: Konstantlagerung, rechts: Wechselagerung;  
 Beton der Korrosionszelle: CEM I 32,5 R,  $w/z = 0,70$   
 Betonsplitt: CEM I-HS 32,5 R,  $w/z = 0,70$ , gelagert in 3 % NaCl, direkter Kontakt zum Stahl



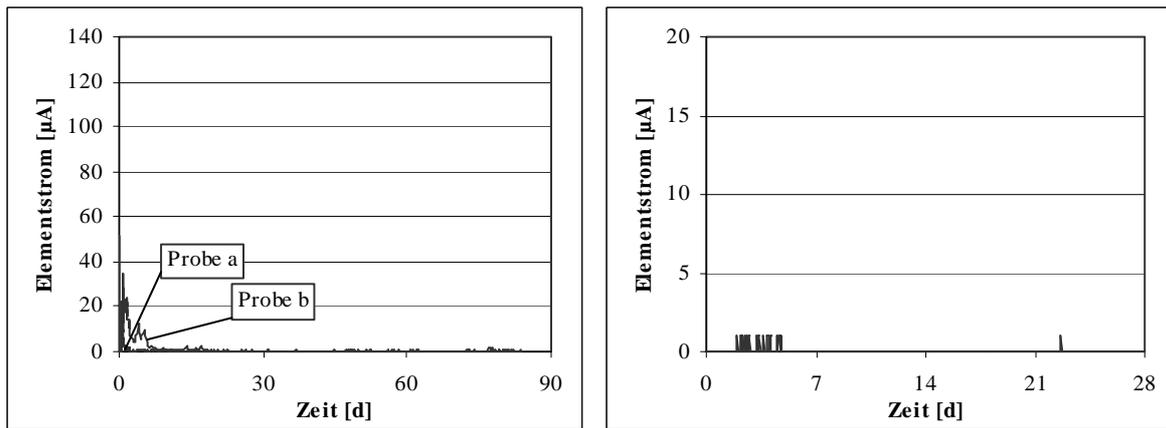
**Bild A16:** Elementstromverlauf der Betonkorrosionszelle, links: Konstantlagerung, rechts: Wechselagerung;  
 Beton der Korrosionszelle: CEM I 32,5 R,  $w/z = 0,70$   
 Betonsplitt: CEM I-HS 32,5 R,  $w/z = 0,40$ , gelagert in 3 % NaCl, direkter Kontakt zum Stahl



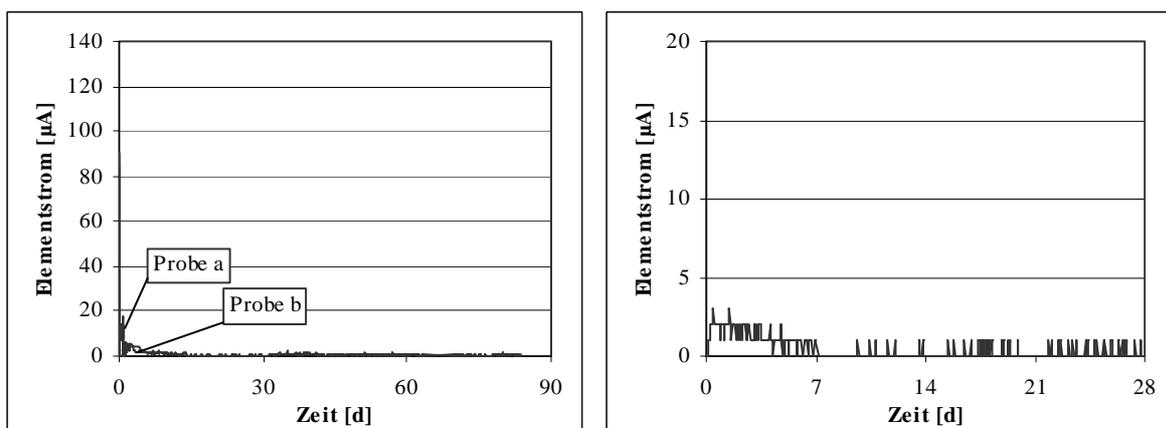
**Bild A17:** Elementstromverlauf der Betonkorrosionszelle, links: Konstantlagerung, rechts: Wechsellagerung;  
 Beton der Korrosionszelle: CEM I 32,5 R,  $w/z = 0,40$ , gelagert in 3 % NaCl  
 Betonsplitt: CEM I 32,5 R,  $w/z = 0,70$ , gelagert in 3 % NaCl, direkter Kontakt zum Stahl



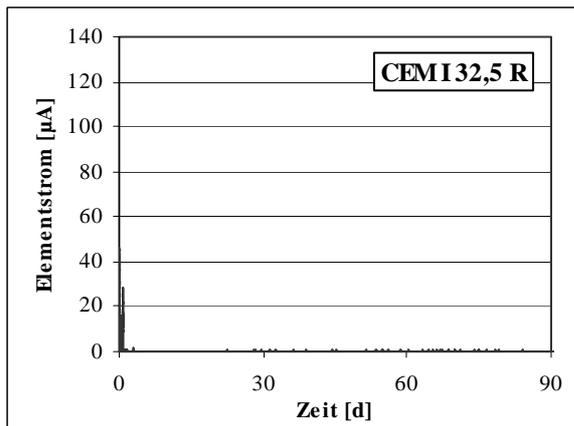
**Bild A18:** Elementstromverlauf der Betonkorrosionszelle, links: Konstantlagerung, rechts: Wechsellagerung;  
 Beton der Korrosionszelle: CEM I 32,5 R,  $w/z = 0,70$   
 Betonsplitt: CEM I 32,5 R,  $w/z = 0,70$ , gelagert in 3 % NaCl, direkter Kontakt zum Stahl



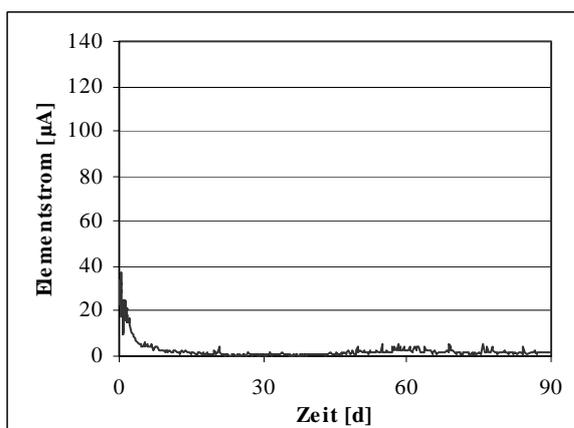
**Bild A19:** Elementstromverlauf der Betonkorrosionszelle, links: Konstantlagerung, rechts: Wechsellagerung;  
 Beton der Korrosionszelle: CEM III B 32,5,  $w/z = 0,70$   
 Betonsplitt: CEM I 32,5 R,  $w/z = 0,70$ , gelagert in 10 % NaCl, kein direkter Kontakt zum Stahl



**Bild A20:** Elementstromverlauf der Betonkorrosionszelle, links: Konstantlagerung, rechts: Wechsellagerung;  
 Beton der Korrosionszelle: CEM III B 32,5,  $w/z = 0,70$   
 Betonsplitt: CEM I 32,5 R,  $w/z = 0,70$ , gelagert in 3 % NaCl, kein direkter Kontakt zum Stahl



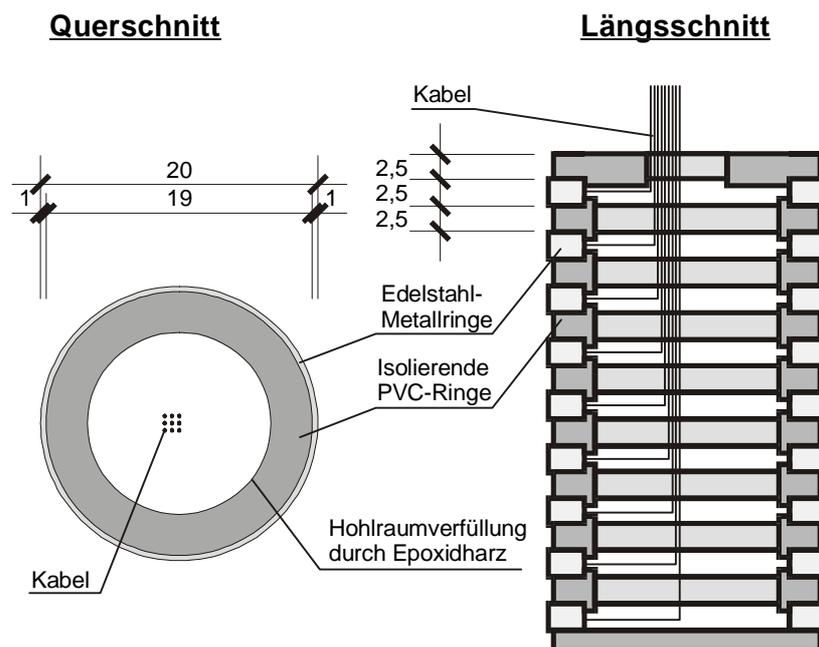
**Bild A21:** Elementstromverlauf der Betonkorrosionszelle, links: Konstantlagerung, keine Wechsellagerung durchgeführt;  
Beton der Korrosionszelle: CEM I 32,5 R,  $w/z = 0,70$   
Betonsplitt: CEM I 32,5 R,  $w/z = 0,70$ , gelagert in 3 % NaCl, direkter Kontakt zum Stahl



**Bild A22:** Elementstromverlauf der Betonkorrosionszelle, links: Konstantlagerung, keine Wechsellagerung durchgeführt;  
Beton der Korrosionszelle: CEM I 32,5 R,  $w/z = 0,70$  + platinierter Kathode  
Betonsplitt: CEM I 32,5 R,  $w/z = 0,70$ , gelagert in 3 % NaCl, direkter Kontakt zum Stahl

### A3: Multiringelektrode

Die Multiringelektrode ist ein Sensor, mit dem sowohl die zeit- als auch die tiefenabhängige Feuchteverteilung in Beton abgeschätzt werden kann. Die MRE besteht aus mehreren Edelstahlringen, die durch Zwischenringe aus Kunststoff in genau definiertem Abstand gehalten werden (Aufbau und Abmessungen s. **Bild A3-1**). Zwischen jeweils zwei benachbarten Edelstahlringen kann der elektrolytische Widerstand des Betons mit einem geeignetem Messgerät bestimmt werden.



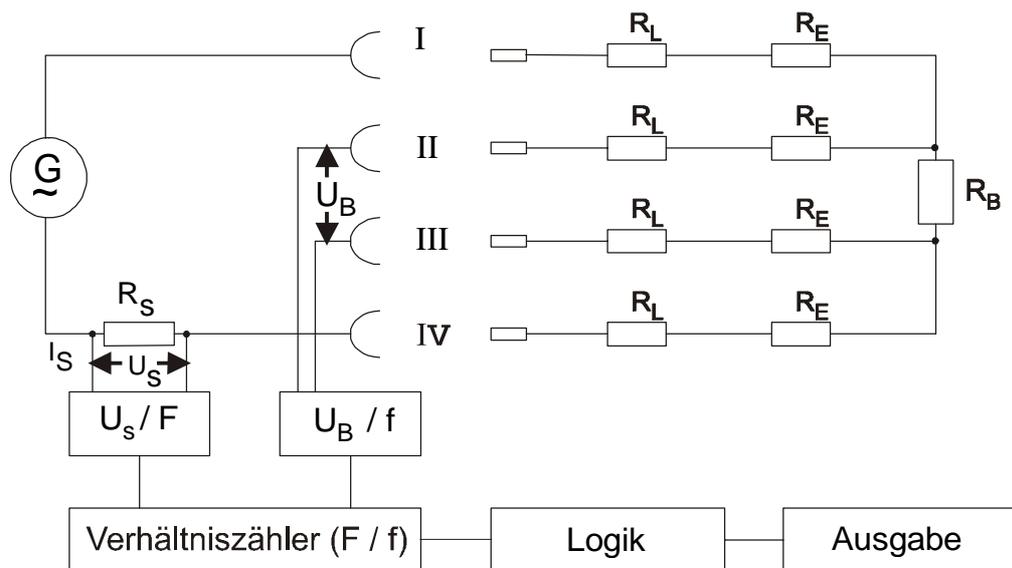
**Bild A3-1:** Aufbau und Abmessungen der verwendeten MRE

Dabei wird ein sinusförmiger Wechselstrom mit maximal 10 mA, einer maximalen Messspannung von 1 V und einer Frequenz von ca. 100 Hz über zwei Edelstahlringe in den Beton eingeleitet. Die Systemwiderstände (Leiter, Elektroden etc.) sind so gering, daß Sie gegenüber den Widerständen des Betons vernachlässigt werden können. Zwischen zwei Edelstahlringen kann nun der Spannungsabfall, hervorgerufen durch den Elektrolytwiderstand, gemessen werden.

Für die Messung liegt dabei folgendes Prinzip zu Grunde (s. **Bild A3-2**): Die Wechselspannung zwischen den zu messenden Edelstahlringen wird abgegriffen und gleichgerichtet. Das gleichgerichtete Signal wird mit einem Spannungs-Frequenz-Wandler in eine zu der abgegriffenen Wechselspannung gehörende proportionale Frequenz umgewandelt. Der den Stromkreis durchlaufende Wechselstrom wird indirekt über einen Widerstand von 100  $\Omega$  gemessen und ebenfalls gleichgerichtet. Der gleichgerichtete Strom wird jetzt durch

einen Strom-Frequenz-Wandler ebenfalls in eine proportionale Frequenz umgewandelt. Mittels eines Verhältniszählers (Quotientenmesser) wird das Verhältnis beider Frequenz-Impulse in einem definiertem Zeitintervall bestimmt. Über eine Logik wird das Ergebnis des Verhältniszählers weiterverarbeitet und als Ergebnis der Widerstand in Ohm ausgegeben. So werden sukzessive alle benachbarten Edelstahlringe abgegriffen. Bei den in dieser Arbeit verwendeten MRE waren 9 Edelstahlringe verbaut, so dass der Elektrolytwiderstand in 8 verschiedenen Tiefenlagen des Betons bestimmt werden konnte. Die obere Grenze des Messbereichs lag bei 200 k $\Omega$ .

Die Bildung von Polarisierungseffekten, wie sie durch Anlegen von Gleichspannungsfeldern entstehen können, wird durch die Messung des elektrischen Widerstands mittels Gleichstrom verhindert. Die Messung des Elektrolytwiderstandes ist stark temperaturabhängig. Da aber alle Versuche in diesem Zusammenhang in Temperatur- und Feuchtegeregelten Klimakammern durchgeführt wurden, ist der Temperatureinfluss bei diesen Versuchen nicht zu berücksichtigen.



**Bild A3-2:** Messprinzip zur Erfassung des Elektrolytwiderstands bei Messung mit Wechselstrom