

## **Langzeitverhalten von zementgebundenen Beschichtungen in Trinkwasserbehältern**

**A. Gerdes<sup>1</sup> und F.H. Wittmann<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Professur für Bauchemie, Fachhochschule Karlsruhe - Hochschule für Technik,  
Deutschland

und

<sup>1</sup>Institut für Technische Chemie (ITC-WGT), Forschungszentrum Karlsruhe,  
Deutschland

<sup>2</sup>Aedificat Institut, Freiburg i. Br., Deutschland

### **Zusammenfassung**

Die Innenflächen von Trinkwasserbehältern werden üblicherweise mit zementgebundenen Beschichtungen versehen. An diesen Beschichtungen wurden in den letzten Jahren zunehmend Schäden beobachtet, für welche ein lokaler, schnell voranschreitender Abbau der Beschichtung charakteristisch ist. Ausgehend von den Ergebnissen verschiedener Untersuchungen wurden neue Beschichtungen entwickelt, welche einen wesentlich höheren Widerstand gegen den als hydrolithische Korrosion von Zementstein bezeichneten Schadensmechanismus aufweisen sollen. In einem Versuchsbehälter sollten diese neuen Beschichtungen unter Praxisbedingungen getestet werden. Weiterhin sollten auch Werkstoffkombinationen und Applikationstechniken in Hinblick auf ihre Bedeutung für die Beständigkeit untersucht werden. In diesem Beitrag werden ausgewählte Ergebnisse dieser Versuche vorgestellt. Es wird gezeigt, dass das Porengefüge, charakterisiert durch die Gesamtporosität und die Porengrößenverteilung, für den Widerstand gegen den hydrolithischen Abbau entscheidend ist. Ohne eine ausreichende Schichtdicke ist aber auch ein dichtes Gefüge, das eher mit einer maschinellen als mit einer händischen Applikationstechnik hergestellt werden kann, nicht ausreichend, um den schnellen Abbau der Beschichtung zu verhindern. Mit den Erkenntnissen aus verschiedenen Untersuchungen wurden technische, mit einer griffigen Qualitätskontrolle überprüfbare Anforderungen an zementgebundene Beschichtungen formuliert, die sich in der Praxis in einer Vielzahl von Trinkwasserbehältern bereits bewährt haben.

## **1 Einleitung**

Die Speicherung von Trinkwasser erfolgt überwiegend in erdgedeckten Betonbehältern. Die Innenflächen dieser Behälter werden häufig sowohl bei der Neuerstellung als auch bei der Sanierung aus technischen und optischen Gründen mit zementgebundenen Beschichtungen versehen. An diesen Beschichtungen wurden in den vergangenen Jahren zunehmend Schäden beobachtet, die gekennzeichnet sind durch den lokalen, rasch voranschreitenden Abbau des Zementsteins. Da diese allgemein mit hydrolithischer Korrosion des Zementsteins beschriebenen Schäden nicht mit den bisher bekannten Schadensmechanismen erklärt werden konnten, wurden eine Reihe von Forschungsaktivitäten zur Aufklärung der Schadensursachen und des Schadensverlaufs initiiert [1-4]. Die Ergebnisse werden kontrovers diskutiert und bis heute gibt es keinen allgemein akzeptierten Konsens über den Schadensmechanismus.

Ausgehend von den vorliegenden Ergebnissen wurden aber trotzdem neue Beschichtungen entwickelt, die einen höheren Widerstand gegen den Abbau des Zementsteins aufweisen sollen.

In diesem Beitrag wird über einen Langzeitversuch in der Praxis, in dem neben neuen Beschichtungswerkstoffen auch der Einfluss der Applikationstechniken auf die Dauerhaftigkeit dieser Systeme charakterisiert werden sollte, berichtet. Begleitend zu diesem Praxisobjekt wurde ein Konzept zur Qualitätssicherung entwickelt, das bereits seit ca. 6 Jahren erfolgreich in der Schweiz eingesetzt wird. Inhalt und Umsetzung dieses Konzeptes soll an dieser Stelle ebenfalls beschrieben und diskutiert werden.

## **2 Hydrolithische Korrosion des Zementsteins - Merkmale und Schadensmechanismus**

### **2.1 Vorbemerkungen**

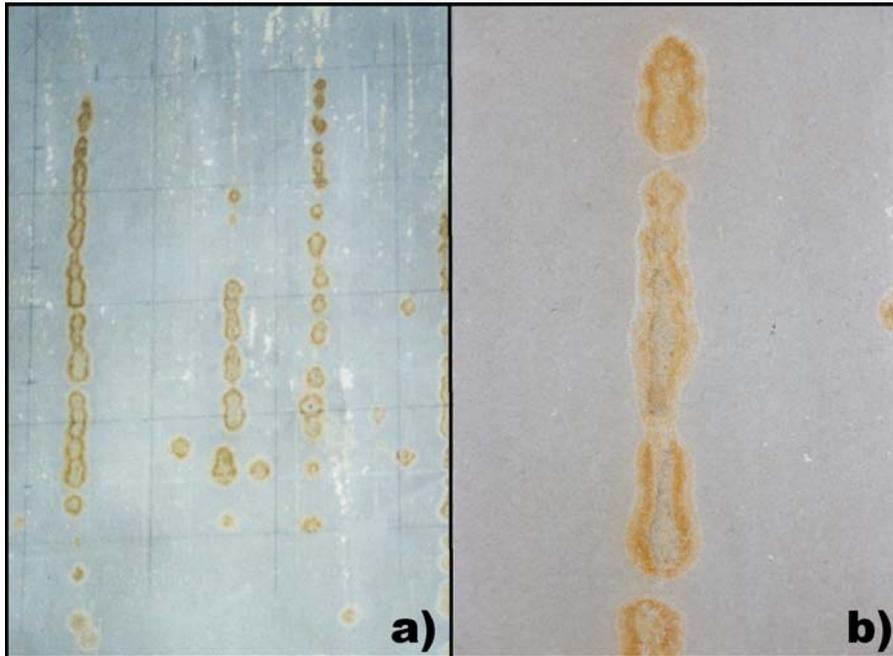
Um die Vorgehensweise bei der Entwicklung der neuen Werkstoffe bzw. bei der Festlegung der Qualitätskontrolle nachvollziehbar zu machen, sollen in diesem Beitrag die typischen Charakteristika des Schadens beschrieben und die bisher diskutierten Schadensmechanismen kurz vorgestellt werden. Vor allem die chemische Analyse ist notwendig, um diesen Schadenstyp von anderen Schadensmechanismen (z.B. Auslaugung durch weiches Wasser) zu unterscheiden. Diese eindeutige Identifizierung ist aber Voraussetzung, um eine dauerhafte Instandsetzung gezielt zu planen, ist aber auch Basis für die Entwicklung einer griffigen und zielorientierten Qualitätskontrolle. Für Details hinsichtlich der Charakterisierung des Schadens und der beschreibenden Modelle sei auf [5-7] verwiesen.

### **2.2 Typische Merkmale der hydrolithischen Korrosion des Zementsteins**

#### **2.2.1 Erscheinungsbild**

Das Erscheinungsbild dieses Schadens ist gekennzeichnet durch das Auftreten von Flecken mit einem Durchmesser von wenigen Millimetern bis zu ca. 5 cm. Die Oberfläche ist oft, aber nicht immer braun verfärbt. Es wurde in einer Reihe von Fällen beobachtet, dass die Flecken auf einer vertikalen bzw. horizontalen Linie angeordnet sind. Vereinzelt wurde sogar eine orthogonale Anordnung beobachtet (Abbildung 1a und 1b). Dieses spezifische Erscheinungsbild führte dazu, dass vor Ort die Lage der Bewehrung ermittelt und mit der Position der Flecken verglichen wurde. Es zeigt sich, dass die Flecken nicht immer, aber sehr häufig oberhalb der Bewehrung angeordnet sind.

Bei diesen Flecken ist keine Volumenänderung des Materials, d.h. Quellen oder Schwinden, zu beobachten. Daher sind viele der Schadensfälle als solche zunächst nicht erkannt worden, da die Betreiber der Trinkwasserbehälter gewohnt sind, dass durch die



**Abbildung 1:** Typisches Schadensbild aus einem Trinkwasserbehälter  
a) Vertikale Anordnung der Flecken  
b) Zu einem späteren Zeitpunkt wachsen einzelne Flecken zusammen

Inhaltsstoffe des Wassers (Eisen, Mangan) braune Ablagerungen auf den weissen Beschichtungen entstehen.

Erst durch Reinigungsarbeiten (z.B. mit Hochdruckreinigern) wurde das defekte Beschichtungsmaterial ausgewaschen. Zurück blieben narbenförmige Vertiefungen, die eindeutig zeigten, dass nicht nur die Beschichtung, sondern auch der darunterliegende Tragwerksbeton durch diesen Schadensmechanismus zerstört wird (Abbildung 2 a und 2b).

### 2.2.2 Mechanische Eigenschaften

Wie im vorangehenden Abschnitt bereits erwähnt, hat das Material in den Flecken die Festigkeit vollständig verloren. Es ist weich und talkartig, so dass es sich bereits ohne Hilfe von Werkzeugen aus den geschädigten Bereichen entfernen lässt (Abbildung 3).

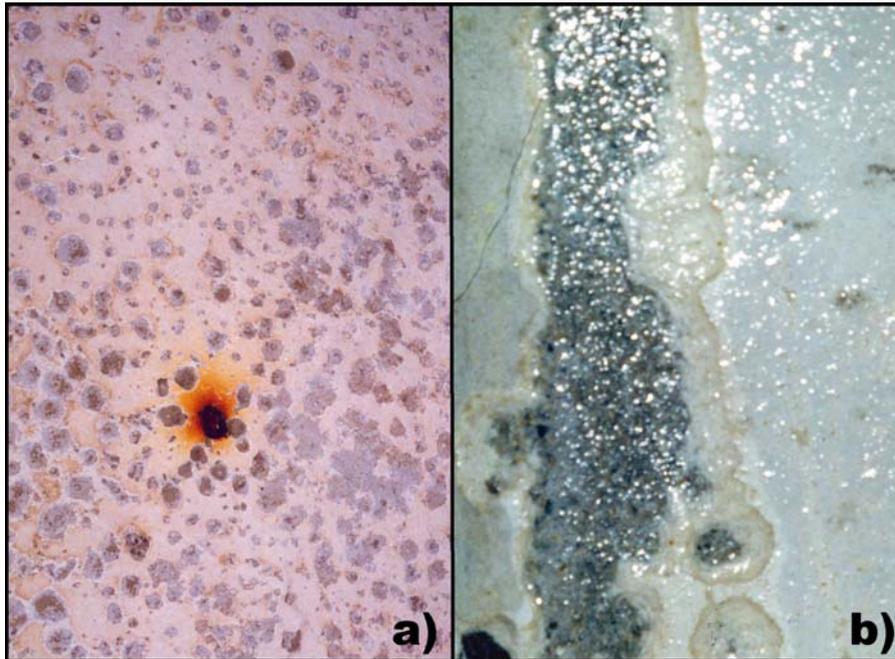
### 2.2.3 Chemische Zusammensetzung des geschädigten Beschichtungsmaterials

Eine Analyse des geschädigten Materials zeigt im Vergleich zur Materialzusammensetzung der intakten Beschichtung deutliche Unterschiede bei zwei, durch eine chemische Analyse leicht bestimmbar Bestandteilen:

- Gehalt an Calciumhydroxid
- Gehalt an Calciumcarbonat

Nach diesen Analysen hat sich der Calciumhydroxidgehalt der intakten Beschichtung, der je nach Zusammensetzung zwischen 5-10 Massen-% beträgt, auf Werte nahe Null reduziert. Es sei an dieser Stelle aber darauf hingewiesen, dass ein solcher Befund nicht ausreichend ist, um eine hydrolithische Korrosion eindeutig zu identifizieren. Dies ergibt sich aus der Tatsache, dass auch ein Angriff durch weiches Wasser zu einer Auslaugung des Zementsteins und damit durchaus zu einer Aufweichung des Materials führen kann.

Es müssen daher bei der Beurteilung des Schadens zusätzlich noch die Ergebnisse der Calciumcarbonatbestimmung berücksichtigt werden. Es ist nämlich bei Schäden, die auf eine hydrolithische Korrosion zurückzuführen sind, immer eine Zunahme des Calcium-



**Abbildung 2:** Schädigung des Tragwerksbetons  
a) Bodenfläche eines geschädigten Behälters  
b) Detailaufnahme eines Fleckens nach der Reinigung

carbonatgehaltes festzustellen. Die Werte für den Calciumcarbonatgehalt, die je nach Materialzusammensetzung zwischen 10% und 50% betragen können, sind im Material aus den geschädigten Bereichen, also den Flecken, deutlich höher. Es wurde teilweise eine Zunahme des Calciumcarbonatgehaltes um bis zum Dreifachen des ursprünglichen Gehaltes gemessen. Diese deutliche Zunahme ist auf die chemischen Reaktionen zurückzuführen, die bei der hydrolitischen Korrosion zwischen den Bestandteilen des Wassers und dem Zementstein ablaufen.

Für eine eindeutige Identifizierung des Schadens ist es daher unbedingt erforderlich, dass beide chemische Analysen durchgeführt und die Ergebnisse mit den Resultaten für Material aus intakten Bereichen verglichen werden.

#### 2.2.4 Geschwindigkeit des Schadensverlaufes

Zementgebundene Werkstoffe sind in ihren zahlreichen Anwendungen nutzungsbedingt unterschiedlichen chemischen Angriffen ausgesetzt, die zur Schädigung des Werkstoffes führen können. Je nach den Randbedingungen dauert dies in der Regel wenige Jahre bis zu einigen Jahrzehnten.

Bei der hydrolitischen Korrosion sind Schäden in einigen Fällen aber bereits 6 Monate nach Fertigstellung dieser Beschichtung beobachtet worden. In anderen Fällen vergingen mehrere Jahre bis das Auftreten der typischen Flecken beobachtet wurde. Vor allem konnte festgestellt werden, dass die Schädigung des darunterliegenden Betons wesentlich langsamer erfolgt. Dies erklärt auch die Beobachtung aus der Praxis, wonach in sehr alten Behältern aus den Anfängen des 20. Jahrhunderts die neuen Beschichtungen bereits Schäden aufwiesen, währenddessen die ursprünglich applizierten Zementmörtel noch völlig intakt waren.

#### 2.2.5 Zusammenfassung

Schäden, die durch die hydrolitische Korrosion des Zementsteins verursacht werden, lassen sich anhand einer Beurteilung



**Abbildung 3:** Aufgeweichtes, mechanisch leicht zu entfernendes Material aus einem geschädigten Bereich

- des Erscheinungsbildes
- der chemischen Analyse des Calciumhydroxid- und Calciumcarbonatgehaltes
- des Schadensverlaufes

eindeutig identifizieren. Voraussetzung ist aber, dass alle diese Punkte erfasst und beurteilt werden, da die Interpretation von Einzelergebnissen die Gefahr von Fehleinschätzungen birgt.

## 2.3 Modelle zum Schadensmechanismus

### 2.3.1 Vorbemerkungen

In diesem Beitrag sollen die einzelnen Modelle nur kurz vorgestellt werden. In einem weiteren, demnächst erscheinenden Beitrag sollen aber detailliert die einzelnen Modelle beschrieben und diskutiert werden [8].

### 2.3.2 Angriff durch das Trinkwasser

Eine Analyse der Wässer aus den betreffenden Behältern zeigte, dass diese hinsichtlich der Carbonathärte als hart bis sehr hart einzustufen sind, aber nach den üblichen Bewertungskriterien als nicht betonaggressiv einzustufen sind.

### 2.3.3 Angriff durch saure Reiniger

Trinkwasserbehälter werden regelmässig gereinigt. Dabei finden auch saure Reiniger Anwendung. Deshalb wurde die Vermutung geäussert, dass saure Reiniger diese Schäden verursachen oder zumindestens mitverantwortlich sind. Diese These konnte nicht zweifelsfrei bestätigt werden. Das lässt sich unter anderem durch die folgenden Befunde begründen.

Die Schäden traten auch in Behältern auf, die nachweislich nicht mit diesen Reinigern behandelt wurden. Ausserdem müsste aufgrund der Zusammensetzung der Reiniger ein anderes Schadensbild zu beobachten sein. Anstatt der Fleckenbildung sollte sich die Beschichtung flächig auflösen.

### 2.3.4 Mikrobiologischer Angriff auf die Beschichtung

Die Zerstörung von zementgebundenen Werkstoffen durch Mikroorganismen im Bereich von Abwasseranlagen oder Kühltürmen ist seit längerem bekannt. Bei dem hier disku-



**Abbildung 4:** Flecken mit weisser Oberfläche

tierten Schadensmechanismus sprechen aber einige Aspekte gegen die These, dass ein mikrobiologischer Angriff diesen Schaden auslöst. Im Detail kann an dieser Stelle darauf nicht eingegangen werden, es sollen aber trotzdem stichpunktartig diese Argumente angeführt werden.

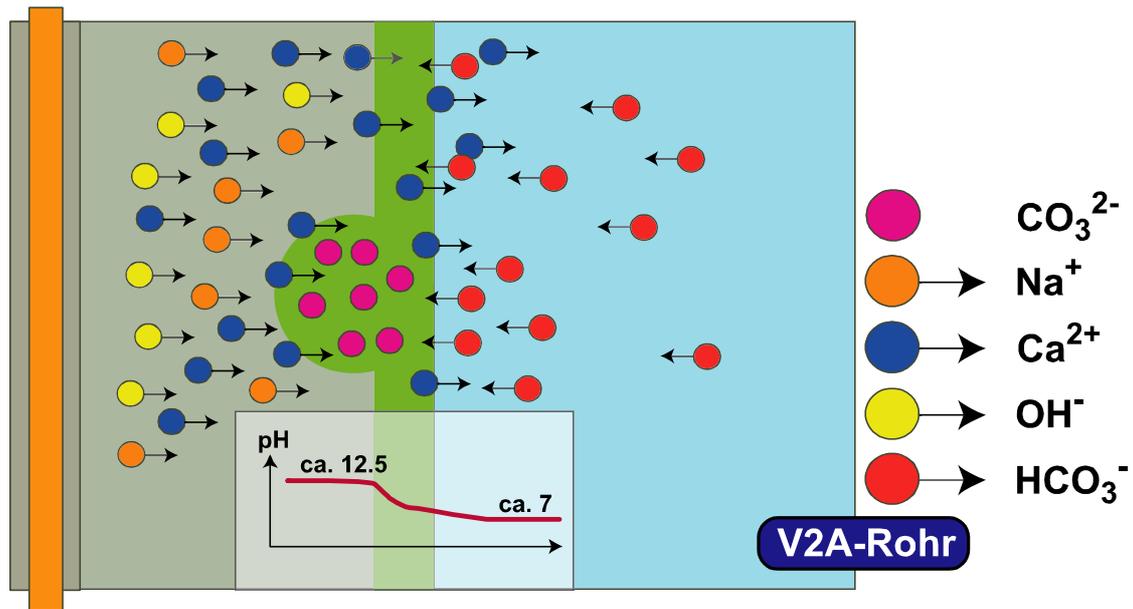
- Der pH-Wert der Beschichtung ist zu hoch, um eine hohe Besiedlungsdichte der Mikroorganismen, die für den Abbau verantwortlich gemacht werden, zuzulassen.
- Für die Menge an gebildetem Carbonat sind die vorhandenen mikrobiologisch nutzbaren Kohlenstoffquellen (Wasser, Beschichtungsmaterial) nicht ausreichend.
- Bakterien konnten nur auf der Oberfläche, nicht aber in tieferen, geschädigten Bereichen der Beschichtung nachgewiesen werden.
- Die Geschwindigkeit, mit der die Beschichtung abgebaut wird, steht nicht im Einklang mit der beobachteten Besiedlungsdichte. So waren in Behältern, die 6 Monate nach der Fertigstellung bereits zerstört waren, keine braunen Verfärbungen, die nach Flemming und Herb durch die Mikroorganismen verursacht werden, zu beobachten (Abbildung 4) [9].

#### 2.3.5 Hydrolithische Korrosion zementgebundener Werkstoffe

Dieses Modell beschreibt einen gekoppelten Prozess aus Transport und chemischer Reaktion von Inhaltsstoffen des Wassers mit Bestandteilen der Beschichtung. In der Abbildung 5 sind diese Prozesse schematisch dargestellt.

1. Reaktionsschritt: Transport von Hydrogencarbonat-Ionen ( $\text{HCO}_3^-$ ) in die Beschichtung
2. Reaktionsschritt: Chemische Umwandlung von Hydrogencarbonat-Ionen ( $\text{HCO}_3^-$ ) zu Carbonationen ( $\text{CO}_3^{2-}$ ).

Nach diesem Modell wird im 1. Reaktionsschritt das im Wasser befindliche Hydrogencarbonat ( $\text{HCO}_3^-$ ) in die Beschichtung transportiert. Dabei spielt der Transportwiderstand der Beschichtung, charakterisiert durch Gesamtporosität und Porengrößenverteilung, für die Schadensgeschwindigkeit eine zentrale Rolle. Die in einer Vielzahl der Behälter gemessenen elektrischen Potentiale zwischen Bewehrung und Edelstahlbauten sind eine mögliche Erklärung für die Beschleunigung der Transportprozesse und das lokale



**Abbildung 5:** Schematische Darstellung der hydrolithischen Korrosion zementgebundener Werkstoffe

Auftreten der Schädigung, aber nicht Voraussetzung für das Ablaufen eines diffusiven Ionentransportes.

Beim 2. Reaktionsschritt findet zunächst innerhalb der Beschichtung eine pH-abhängige Umwandlung der Hydrogencarbonat-Ionen ( $\text{HCO}_3^-$ ) zu Carbonationen ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) statt. Die Löslichkeit des Calciumcarbonats ist mit 14 mg/l aber deutlich niedriger als die Hydrogencarbonat-Konzentration im harten Wasser ( $\gg 100$  mg/l). Die Folge ist daher eine Fällung von Calciumcarbonat unter Verbrauch von Calciumhydroxid, das als Reaktionsprodukt bei der Hydratation des Zementes entsteht. Ist das Calciumhydroxid vollständig verbraucht, kann der fallende pH-Wert in der Porenlösung nur durch Freisetzung von zusätzlichem Calciumhydroxid aus dem Zementstein stabilisiert werden. Da dieses freigesetzte Calciumhydroxid sofort wieder mit dem eingedrungenen Hydrogencarbonat reagiert, findet letztendlich unter Abbau der Hydratationsprodukte eine komplette Auslaugung des Zementsteins statt [6].

### 2.3.6 Transport durch hydraulische Gradienten

Bei diesem erst kürzlich vorgeschlagenen Mechanismus soll das im Wasser gelöste Hydrogencarbonat durch einen hydraulischen Gradienten, der sich durch nutzungsbedingte Veränderungen in der Wasserhöhe einstellen soll, verursacht werden. Die bisher dazu veröffentlichten Daten sind derzeit noch nicht ausreichend, um eine Diskussion über diesen Mechanismus führen zu können [10].

## 2.4 Zusammenfassung

Die Ergebnisse verschiedener Studien im Labor und an Objekten in der Praxis zeigen, dass der Widerstand der eingesetzten Beschichtungen massgeblich durch die folgenden Größen bestimmt werden:

- Gesamtporosität
- Porengrößenverteilung
- Schichtdicke

Diese Erkenntnisse waren Ausgangspunkt für die Entwicklung neuer Beschichtungen, bei denen das Gefüge wesentlich dichter ist und die auch mit einer höheren Schichtdicke

appliziert werden. In einem Behälter wurden verschiedene Beschichtungen auf unterschiedliche Weise appliziert und das Langzeitverhalten über einen Zeitraum von 5 Jahren durch die chemische Analyse charakterisiert. Im folgenden sollen wesentliche Ergebnisse dieser Untersuchungen vorgestellt werden.

### **3 Langzeitverhalten von Trinkwasserbeschichtungen im Praxisversuch**

#### **3.1 Einleitung**

Im Trinkwasserbehälter Rosenberg, St. Gallen, wurden handelsübliche Beschichtungen appliziert, die sich durch die folgenden Grössen charakterisieren lassen:

- Gesamtporosität, bestimmt durch Quecksilberdruckporosimetrie: ca. 30-35 Vol.-%
- Kapillarporenanteil an der Gesamtporosität: > 60%
- mittlere Schichtdicke: ca. 3 mm

An diesen Beschichtungen wurden bereits 6 Monate nach Fertigstellung die beschriebenen Schäden beobachtet. Aufgrund dieser hohen Geschwindigkeit bei der Entwicklung der Schäden wurde dieser Behälter ausgewählt, um neu entwickelte Beschichtungen, unterschiedliche Werkstoffkombinationen und Applikationstechniken in Hinsicht auf ihre Beständigkeit gegen diesen Schadensmechanismus zu untersuchen.

#### **3.2 Bescheibung der Probeflächen**

Im Februar 1997 wurde die geschädigte Beschichtung an der Westwand einer Wasserkammer im Reservoir Rosenberg, Gossau, durch Höchstdruckwasserstrahlen entfernt. An dieser Wand wurden insgesamt 6 Probeflächen (A-F) mit jeweils einer Fläche von ca. 20 m<sup>2</sup> angelegt. Eine weitere Fläche mit ca. 8 m<sup>2</sup> (G) wurde auf der Südseite des Behälters angelegt. Bei dieser Fläche wurde auf das vorgängige Entfernen der geschädigten Beschichtung verzichtet.

Für das Anlegen der Probeflächen wurden drei verschiedene Produkte verwendet. Beim Produkt I und Produkt II handelt es sich um zementgebundene Beschichtungen mit einem Grösstkorn von ca. 1 mm bzw. 2 mm. Das Produkt III, ein polymermodifizierter Mörtel, wurde zum Egalisieren des Untergrunds verwendet. Die Produkte wurden auf die einzelnen Flächen mit unterschiedlicher Schichtstärke appliziert. Weiterhin sollte der Einfluss der Applikationstechnik auf die Werkstoffeigenschaften charakterisiert werden. Daher wurde die Beschichtung auf eine Fläche händisch und auf eine andere Fläche maschinell appliziert (Tabelle 1).

Nach der Fertigstellung der Probeflächen wurde der Behälter unter üblichen Betriebsbedingungen wieder genutzt. Im Verlauf der nächsten Jahre wurden zu verschiedenen Zeitpunkten Kerne aus den Probeflächen entnommen und analysiert. Im folgenden Abschnitt werden die Untersuchungen und deren Ergebnisse vorgestellt und diskutiert.

#### **3.3 Durchgeführte Untersuchungen**

Wie bereits ausgeführt, wird der Widerstand gegen den hydrolithischen Abbau durch die Eigenschaften des Porengefüges und die Schichtdicke bestimmt. Nach der Applikation der Beschichtungen wurden daher aus den Einzelflächen mehrere Bohrkerne entnommen. An diesen Bohrkernen wurde die Schichtdicken der einzelnen Lagen überprüft. Die entsprechenden Werte sind in der Tabelle 1 aufgeführt. Weiterhin wurde mittels Quecksilberdruckporosimetrie die Gesamtporosität und Porengrössenverteilung bestimmt.

Um im weiteren Verlauf der Untersuchungen den Abbau der Beschichtung bereits vor dem Auftreten der Flecken erkennen zu können, wurde an den Proben der Calciumhydroxid- und der Calciumcarbonatgehalt bestimmt. Die Bestimmung des Calciumhydro-

**Tabelle 1:** Im Trinkwasserbehälter Rosenberg angelegte Probeflächen

Feld	Aufbau der Beschichtung	Schichtdicke [mm]
A	Beschichtung I, maschinell	3
B	Beschichtung I, händisch	3
C	Beschichtung I, maschinell in 3 Lagen	5
D	Beschichtung II, maschinell, Oberfläche geglättet	10
E	Beschichtung II, maschinell Beschichtung I, maschinell	10 3
F	Beschichtung III, maschinell Beschichtung I, maschinell	10-12 3
G	Beschichtung I maschinell, auf eine bereits geschädigte Beschichtung nach Aufrauung	3

xidgehaltenes erfolgte mit der Methode nach Franke [11], die Bestimmung des Calciumcarbonatgehaltes durch eine Druckmessung mit einer Minicarbonatbombe [11]

### 3.4 Ergebnisse der Praxisversuche

#### 3.4.1 Einfluss der Gesamtporosität und Porengrößenverteilung

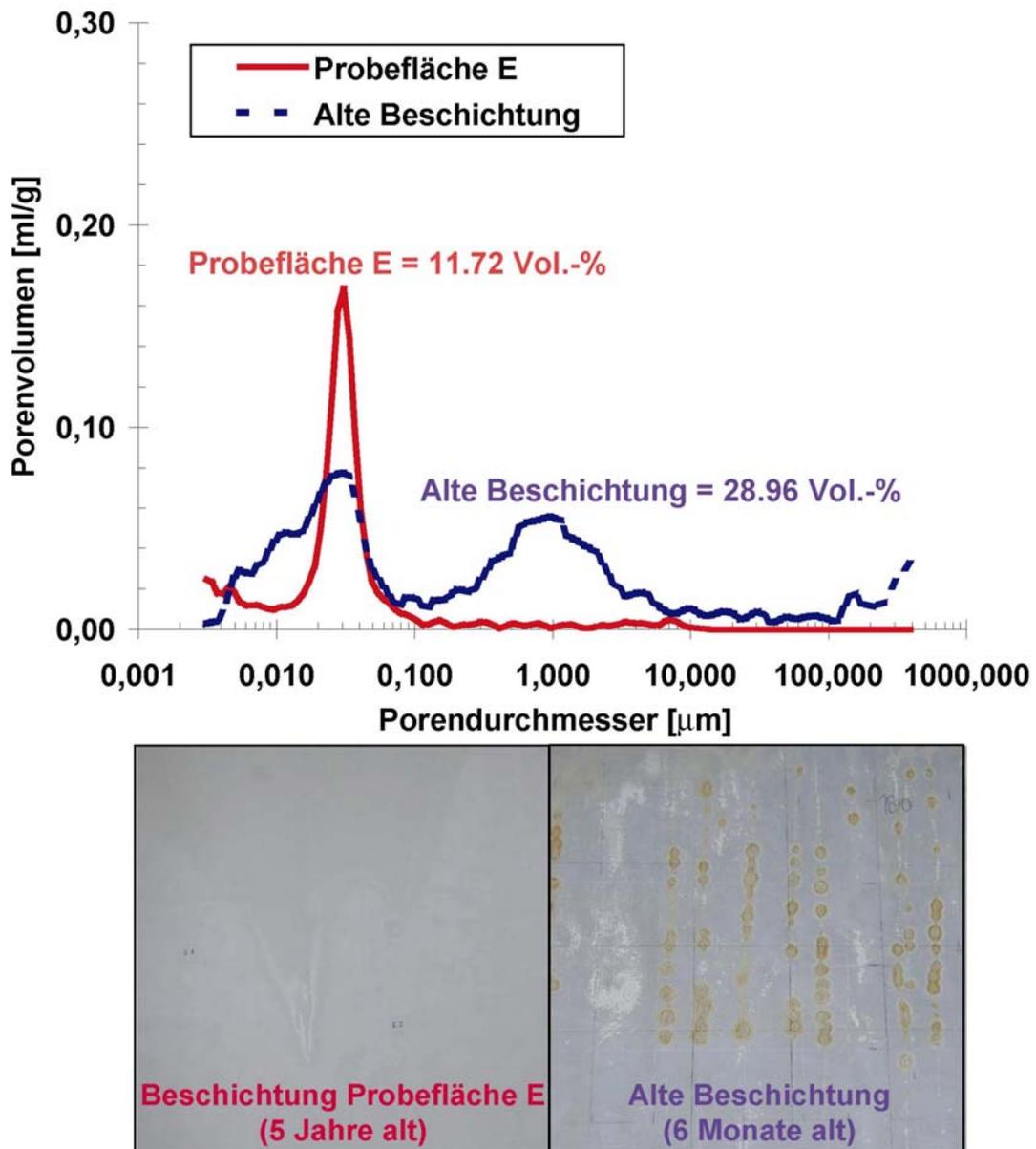
Wie die Untersuchungen gezeigt haben, ist für den hydrolithischen Abbau des Zementsteins der Transport von Hydrogencarbonat-Ionen in die Beschichtung der geschwindigkeitsbestimmende Schritt. Bei der Entwicklung neuer Beschichtungen wurde daher auf eine geringe Porosität und einen geringen Anteil an Kapillarporen besonderen Wert gelegt.

Bei der Probefläche E wurde zunächst das Material II mit einem Grösstkorn von 2 mm appliziert. Bei dieser Beschichtung ist für die Gesamtporosität aufgrund des durch die Rezeptur bedingten geringeren Zementgehaltes mit niedrigeren Werten zu rechnen. Auf diese Beschichtung II wurde als Deckschicht eine weitere Lage des Materials I appliziert. Die typische Porengrößenverteilung für die Beschichtungen I bzw. II sind in der Abbildung 6 dargestellt. Im Vergleich dazu ist in gleichen Abbildung die Porengrößenverteilung und die Gesamtporosität für die bis dahin verwendeten Beschichtungen eingetragen. Ein Vergleich zeigt deutlich, dass die Gesamtporosität bei den neu entwickelten Beschichtungen nur noch ca. 40% beträgt, verglichen mit den Werten für die herkömmlichen Beschichtungen. Besonders zu bemerken ist, dass die für Transportprozesse relevanten Kapillarporen bei den Beschichtungen I bzw. II praktisch nicht mehr vorhanden sind, während bei den alten Beschichtungen im Bereich von 0.3 bis 3  $\mu\text{m}$  ein deutliches Maximum festzustellen ist.

Die Bedeutung dieser Größen für die Dauerhaftigkeit dieser Beschichtungen wird direkt durch die Aufnahmen der unterschiedlichen Beschichtungstypen in Abbildung 6 deutlich. Während bei der Beschichtung der Fläche E auch nach 5 Jahren Versuchsdauer noch keine Flecken zu beobachten sind, ist die herkömmliche Beschichtung bereits nach 6 Monaten mit Flecken übersät, d.h. völlig zerstört. Dieses Ergebnis wird auch durch die chemischen Analysen der Beschichtung nach 5 Jahren bestätigt. Der Calciumhydroxidgehalt ist auch nach 5 Jahren bei Proben der Fläche E noch grösser als 5 Massen-%.

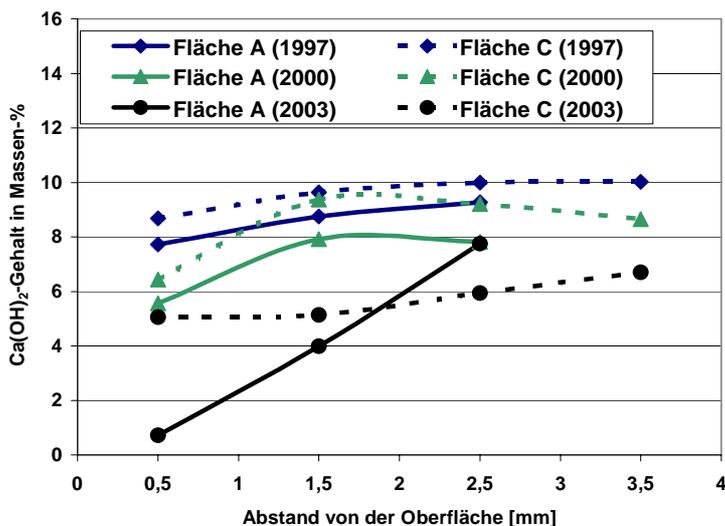
#### 3.4.2 Einfluss der Beschichtungsdicke

Durch Variation der Beschichtungsdicke sollte deren Einfluss auf den Widerstand gegen die hydrolithische Korrosion charakterisiert werden. Dazu wurde die Probefläche C angelegt, in der die Beschichtung A mit 5 mm Schichtdicke aufgetragen wurde. Die Messung der Gesamtporosität war mit einem Wert von 12.34 Vol.-% dem Wert für die Beschich-



**Abbildung 6:** Vergleich der Porenkennwerte zwischen den Proben aus der Probenfläche A und Proben einer alten Beschichtung

tung auf der Probefläche A (11.72 Vol.-%) vergleichbar. Auch bei der Porengrößenverteilung sind zwischen beiden Flächen keine signifikanten Unterschied feststellbar. Der Einfluss der Schichtdicke auf den Widerstand der Beschichtung ist aber aus der Abbildung 7 abzulesen. Im Gegensatz zur Beschichtung auf der Probefläche A, sind bei der Probefläche C auch noch nach 5 Jahren signifikante Mengen an Calciumhydroxid nachweisbar. Dies deutet darauf hin, dass zwar der Transport von Hydrogencarbonat in die Beschichtung der Fläche C stattfindet und die Umwandlung von Calciumhydroxid zu Calciumcarbonat abläuft. Im Gegensatz zur dünneren Beschichtung kann aber bei der Beschichtung C aus grösseren Tiefen Calciumhydroxid via Diffusion in den Randbereich transportiert werden. Auf diese Weise wird der Abbau des Zementsteins zeitlich verzögert. An dieser Fläche konnten 5 Jahre nach der Applikation nur vereinzelt Flecken beobachtet werden.



**Abbildung 7:** Mittlerer Calciumhydroxidgehalt als Funktion der Versuchsdauer für die Fläche A und C

### 3.4.3 Einfluss der Applikationstechnologie

Auf der Probefläche A wurde die Beschichtung I händisch aufgetragen, während auf der Probefläche B die gleiche Beschichtung mit vergleichbarer Schichtdicke maschinell appliziert wurde. In der Abbildung 8a sind die Ergebnisse zur Gesamtporosität und Porengrößenverteilung graphisch dargestellt.

Danach ist festzustellen, dass die händisch aufgetragene Beschichtung mit 15,68 Vol.-% eine deutlich höhere Gesamtporosität aufweist als die maschinell verarbeitete Beschichtung (11,72 Vol.-%). Dies ist im wesentlichen auf den höheren Porenanteil zwischen 100 und 1000  $\mu\text{m}$  zurückzuführen.

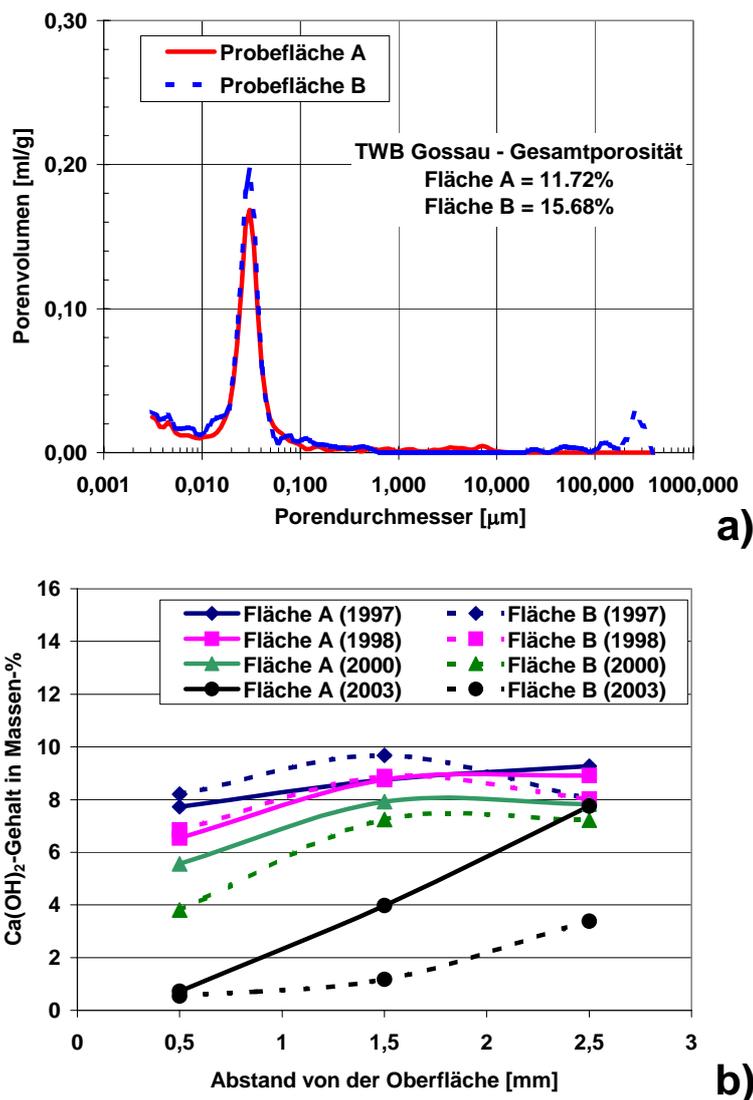
Diese verarbeitungsbedingten Unterschiede machen sich auch im Widerstand der Beschichtungen gegen den hydrolithischen Abbau bemerkbar. In Abbildung 8b ist das Tiefenprofil des Calciumhydroxidgehaltes als Funktion der Versuchsdauer dargestellt. Der Kurvenlauf zeigt deutlich, dass der Calciumhydroxidgehalt nach einer Versuchsdauer von 5 Jahren bei der händisch applizierten Beschichtung deutlich niedriger ist als bei der maschinell applizierten Beschichtung. Das steht auch im Einklang mit der Beobachtung, dass nach 5 Jahren die Probefläche B bereits wieder mit Flecken übersät war, während bei der Fläche A eine deutlich geringere Zahl von Flecken festgestellt wurden.

## 4 Diskussion

Sowohl die Untersuchungen im Labor als auch der Praxisversuch im Trinkwasserbehälter zeigen zunächst, dass das Porengefüge entscheidend für die Beständigkeit der verwendeten Beschichtungen gegen den hydrolithischen Abbau ist. So konnte die Lebensdauer der Beschichtungen im vorliegenden Fall verzehnfacht werden. Dieses dichte Porengefüge lässt sich durch eine maschinelle Verarbeitung eher erreichen als mit einer händischen Applikation.

Mit Resultaten aus Laborversuchen und den Messergebnissen aus dem Versuchsbehälter wurden Anforderungen an zementgebundene Beschichtungen, hergestellt mit Dünn-schichtmörteln hergestellt, formuliert.

- Gesamtporosität: <15 Vol.-%
- Lage des Maximums in der Porengrößenverteilung: < 0,1  $\mu\text{m}$



**Abbildung 8:** a) Mittlere Gesamtporosität und Porengrößenverteilung für Proben aus der Fläche A und B  
 b) Mittlerer Calciumhydroxidgehalt als Funktion der Versuchsdauer für die Fläche A und B

- Schichtdicke: > 10 mm

Diese Anforderungen wurden im Rahmen einer Qualitätskontrolle auch in der Praxis an einer Vielzahl von Behältern überprüft [7]. Ergänzend zu den oben genannten Werten wird nach Fertigstellung der Beschichtung auch der Calciumhydroxidgehalt und der Calciumcarbonatgehalt bestimmt, um gegebenenfalls den Abbau der Beschichtung über die Nutzungsdauer charakterisieren und beurteilen zu können. Dies erlaubt ein frühzeitiges Eingreifen, wenn beispielsweise bei Ablauf der Gewährleistungsfrist nach 5 Jahren durch eine erneut durchgeführte Analyse festgestellt wird, dass ein erheblicher Teil des Calciumhydroxid sich bereits in Calciumcarbonat umgewandelt hat.

Die bisherigen Erfahrungen aus einer Reihe von Trinkwasserbehältern zeigen, dass diese Anforderungen ausreichend sind, um in der überwiegenden Zahl der Fälle das erneute Auftreten der Schäden zu vermeiden. Die Anforderungen an die Gesamtporosität, die nach [12] zukünftig im DVGW-Merkblatt W 300 E [13] und W 312 [14] festgeschrieben werden, sind mit Werten von  $P_{28} \leq 12\%$  nach 28 Tagen und  $P_{90} \leq 10\%$

wesentlich niedriger und können auch mit den beschriebenen modifizierten Beschichtungen aus Dünnenschichtmörteln praktisch nicht erreicht werden. Aufgrund der hier vorgestellten Ergebnisse und Erfahrungen ist es aber fraglich, ob diese Werte tatsächlich so tief angesetzt werden müssen. Um diese Anforderungen zweifelsfrei formulieren zu können, sind weitere Untersuchungen notwendig, um die Kinetik des Schadensverlaufs in Abhängigkeit von den Beschichtungseigenschaften und den Betriebsbedingungen im Behälter beschreiben und vorhersagen zu können. Diese Arbeiten werden derzeit im ITC-WGT am Forschungszentrum Karlsruhe durchgeführt.

Wie gezeigt werden konnte, spielt neben den Porenkennwerten die Beschichtungsdicke für die Dauerhaftigkeit eine zentrale Rolle. Nach den vorgestellten Ergebnissen wird eine Schichtdicke von mindestens 10 mm vorgeschlagen, und zwar unabhängig vom Grösstkorn. Die Anforderung in [12-14], dass die Schichtdicke bei Mörteln mit Grösstkorn  $< 1$  mm mindestens 5 mm betragen soll, erscheint in diesem Zusammenhang als zu gering. Es ist an dieser Stelle aber auch besonders darauf hinzuweisen, dass allein durch Erhöhung der Schichtdicke das Auftreten der Schäden längerfristig nicht zu vermeiden ist, wenn die Beschichtung ein hochporöses Gefüge aufweist (Gesamtporosität  $> 20\%$ ).

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Lebensdauer der zementgebundenen Beschichtungen deutlich verlängert werden kann, falls die Werte für Gesamtporosität, Porengrößenverteilung und Schichtdicke die hier vorgestellten Anforderungen erfüllen. Dies lässt sich mit einer griffigen Qualitätskontrolle bei einem vertretbaren finanziellen Aufwand (ca. 1-1.5% der Gesamtkosten der Massnahme) auch in der Praxis überprüfen.

## 5 Schlussfolgerungen

Aus den Untersuchungen und den Ergebnissen der Praxisversuche lassen sich die folgenden Schlussfolgerungen ziehen:

- Die Lebensdauer zementgebundener Beschichtungen wird im wesentlichen durch Gesamtporosität, Porengrößenverteilung und Schichtdicke bestimmt.
- Die Verbesserung einzelner Qualitätsparameter (Gesamtporosität, Schichtdicke) führt bei aggressiven Betriebsbedingungen nicht zu einer deutlich erhöhten Lebensdauer
- Durch eine griffige Qualitätskontrolle lässt sich mit vertretbarem Aufwand diese Qualität auch in der Praxis erreichen.

## 6 Literatur

- [1] A. Gerdes and F.H. Wittmann, *Electrochemical Degradation of Cementitious Materials*, Proceedings of 9th International Cement Chemistry Congress, New Dehli, Volume V, 409-415 (1992)
- [2] A. Gerdes und F.H. Wittmann, *Beständigkeit zementgebundener Beschichtungen unter dem Einfluss elektrischer Felder*, Int. Z. Bauinstandsetzen, **1**, 73-86 (1995)
- [3] D. Schoenen, *Fleckige Farbveränderungen und Zerstörung von weisser Zementmörtelauskleidung in Trinkwasserbehältern*, gwf Wasser-Abwasser, 155, 669-676 (1994)
- [4] St. Herb, *Beobachtungen an zementgebundenen Beschichtungen - Typische Schäden*, in F.H. Wittmann und A. Gerdes (Hrsg.), *Zementgebundene Beschichtungen in Trinkwasserbehältern*, WTA-Schriftenreihe Heft 12, Aedificatio Verlag, Freiburg, 77-92 (1996)
- [5] F.H. Wittmann, *Zur hydrolithischen Korrosion zementgebundener Werkstoffe*, in F.H. Wittmann und A. Gerdes (Hrsg.), *Zementgebundene Beschichtungen in Trinkwasserbehältern*, WTA-Schriftenreihe Heft 12, Aedificatio Verlag, Freiburg, 27-52 (1996)

- [6] A. Gerdes, *Hydrolyse einer zementgebundenen Beschichtung in ständigem Kontakt mit Wasser* in F.H. Wittmann und A.Gerdes (Hrsg.), *Werkstoffwissenschaften und Bauinstandsetzen - MSR V*, Aedificatio Verlag, Freiburg i. Br., 695 -706 (1999)
- [7] A. Gerdes und F.H. Wittmann, *Dauerhafte zementgebundene Beschichtungen in Trinkwasserbehältern - Anforderungen für die Praxis* in F.H. Wittmann und A.Gerdes (Hrsg.), *Werkstoffwissenschaften und Bauinstandsetzen - MSR V*, Aedificatio Verlag, Freiburg i. Br., 707-718 (1999)
- [8] A. Gerdes, *Zementgebundene Beschichtungen in Trinkwasserbehältern - Teil I: Grundlagen*, erscheint demnächst in *Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen*, **9**, (2003)
- [9] St. Herb, *Biofilmbildung auf mineralischen Oberflächen in Trinkwasserbehältern*, *Berichte aus Wassergüte- und Abfallwirtschaft*, Nr. 149 (1999)
- [10] P. Boos, G. Thielen und C. Schmitt-Riegraf, *Technische Grundsätze bei der Instandsetzung von Trinkwasserbehältern aus Beton (Teil 1)*, *Beton*, Heft 7+8, 399-404 (2003)
- [11] H.F.W. Taylor, *Cement Chemistry*, Academic Press, London (1990)
- [12] J.-J. Mönter (Techn. Komitee „Wasserspeicherung“ des DVGW), *Herstellung dauerhafter Oberflächen in Trinkwasserbehältern aus zementgebundenen Mörteln*, *Energie -Wasser-Praxis*, Heft 3 (2002)
- [13] DVGW-Arbeitsblatt W 312: *Technische Regel Wasserspeicherung: Planung, Bau, Betrieb und Instandhaltung von Wasserbehältern in der Trinkwasserversorgung* (Entwurf erscheint 2002)
- [14] DVGW-Merkblatt W 312: *Wasserbehälter - Massnahmen zur Instandhaltung* (Neufassung wird erarbeitet)