

**AQUAZEM<sup>®</sup>**

Spezialbaustoffe für Trinkwasserbehälter

Instandsetzung von Trinkwasserbehältern  
**Leitfaden für Planer**

**Teil 1 Grundlagen**

# Instandsetzung von Trinkwasserbehältern

## Leitfaden für Planer

**„Kein anderer Bau erfordert größere Sorgfalt in seiner Ausführung als einer, der dem Wasser standhalten soll. Daher ist für einen solchen Bau in allen Einzelheiten Gewissenhaftigkeit vonnöten – ganz im Sinne der Regeln, die zwar alle kennen, aber nur wenige befolgen.“**

(Sextus Iulius Frontinus, Curator Aquarum (Oberaufseher über die Aquädukte) in Rom, 97 n. Chr.)

### Vorwort

Die Speicherung von Trinkwasser wird in Zeiten der Globalisierung und der zunehmenden Knappheit der Ressourcen eine immer wichtigere Aufgabe.

Eine der wichtigsten Herausforderungen kommender Generationen wird die zuverlässige Versorgung mit unserem wichtigsten Lebensmittel Wasser unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten sein. Hohe Versorgungssicherheit und geringe Lebenszykluskosten (Nachhaltigkeit und Werterhaltung) werden dabei immer mehr in den Vordergrund rücken.

Zementgebundene Baustoffe haben sich für diese Aufgabe seit Jahrhunderten bewährt. Heute noch werden beim Bau von Trinkwasserbehältern hauptsächlich mineralische Werkstoffe verwendet.

Nutzungsbedingt sind die Innenflächen von Trinkwasserkammern unterschiedlichen Belastungen (z.B. aggressives Wasser, intensive Reinigung, häufiger Wasserwechsel oder mechanische Belastung) ausgesetzt, die langfristig zum Abbau des Zementsteins führen können. Mögliche Folgen sind Undichtigkeiten des Behälters oder Festigkeitsverlust der Bausubstanz.

Eine Instandsetzung wird dann notwendig, wenn hygienische Mängel keine einwandfreie Speicherung mehr ermöglichen, bauliche Mängel die Nutzungsdauer reduzieren und die Kontrollierbarkeit des gespeicherten Wassers eingeschränkt ist.

Die Instandsetzung ist die Wiederherstellung des Bauwerks insoweit, dass es dem „Neuzustand“ wieder entspricht (DVGW W 300 [1] und DIN EN 1508).

Um eine dauerhafte und leistungsfähige Oberfläche in Wasserkammern herstellen zu können sind spezielle Kenntnisse erforderlich. Die Qualität und Nachhaltigkeit der Instandsetzung wird in Zukunft eine zentrale Rolle bei der Auswahl der Werkstoffe einnehmen.

Wasserversorger benötigen sichere Systeme; Einschränkungen durch Beeinträchtigung der Wasserqualität oder zu geringe Nutzungsdauern müssen vermieden werden.

Diese Sicherheit wird durch eine Kette von richtigen Partnern und Entscheidungen erreicht:

- erfahrene Fachplaner
- umfangreiche Bauwerksuntersuchung vor der Sanierungsplanung
- Auswahl des richtigen Verfahrens
- Beachtung der Schadensmechanismen
- Auswahl des richtigen Werkstoffes
- erfahrenen Verarbeiter

Dieser Leitfaden soll dazu beitragen, Versorgungssicherheit zu schaffen und durch systematische Vorgehensweise die Sanierung der Sanierung zu vermeiden.

Sie finden hier fachspezifische Informationen zu professionellen Zustandsanalysen und Grundlagenermittlung für die Instandsetzung, Auskleidung oder Beschichtung von Trinkwasserbehältern.

## 1. Wasserversorgung

- 1.1 Die Rolle der Speicherung in der Wasserversorgung
- 1.2 Zustandserfassung und Maßnahmen
- 1.3 Sicht- und Funktionsprüfung durch den Betreiber

## 2. Zustandsanalyse

- 2.1 Vorbemerkungen
- 2.2 Notwendige Informationen zum Behälter
- 2.3 Umfang der Zustandsanalyse
- 2.4 Visuelle Begutachtungen am Objekt
  - 2.4.1 Vorbemerkung
  - 2.4.2 Ausgewählte Schadensmechanismen
- 2.5 Chemisch-physikalische Untersuchungen am Objekt
  - 2.5.1 Vorbemerkung
  - 2.5.2 Kurzbeschreibung der Methoden
- 2.6 Chemisch-physikalische Laboruntersuchungen
  - 2.6.1 Vorbemerkung
  - 2.6.2 Probeentnahme
  - 2.6.3 Chemische Untersuchungen im Labor
  - 2.6.4 Physikalische Untersuchungen im Labor
  - 2.6.5 Mikrobiologische Untersuchung im Labor
- 2.7 Schadenskataster

## 3. Ermittlung der Grundlagen

- 3.1 Randbedingungen
- 3.2 Wasseranalyse
- 3.3 Gegenüberstellung: Ist-/ Soll-Zustand
- 3.4 Anlegen von Musterflächen
- 3.5 Ziel einer Instandsetzung
- 3.6 Zusammenfassung

## 4. Weitere Informationen

## 5. Vorschau

## 6. Literaturverzeichnis

## Herausgeber:

Aquazem GmbH  
Spezialbaustoffe für Trinkwasserbehälter  
Au 2  
88353 Kißlegg  
Tel.: 07563/91398-0  
Fax: 07563/91398-9  
info@aquazem.de  
www.aquazem.de

1. Auflage April 2008

## Urheberrecht:

Das Werk einschließlich aller Abbildungen ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der Grenzen des Urhebergesetzes ist ohne Zustimmung von Aquazem GmbH unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Bearbeitung in elektronischen Systemen.

Das Werk erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Es gibt unseren derzeitigen Erkenntnisstand wieder. Für die Vollständigkeit übernehmen wir keinerlei Haftung. Für alle Planungen, Verträge, Ausführungen, usw. bleiben die geltenden Gesetze und Richtlinien der Bundesrepublik Deutschland und/oder der Staaten der Europäischen Union unberührt.

## Danksagung:

Für die vielfältige Unterstützung von Hochschulen, Betreibern, Planern, erfahrenen Verarbeitern und unermüdlichen Praktikanten, die in häufigen Diskussionen wichtige Informationen zu fachlichen Beiträgen geliefert haben, möchten wir an dieser Stelle herzlich danken.

# 1. Wasserversorgung

## 1.1 Die Rolle der Speicherung in der Wasserversorgung

Die störungsfreie Wasserversorgung basiert auf dem komplexen Zusammenspiel verschiedener technischer Anlagen, wobei die Wasserbehälter von besonderer Bedeutung sind. Trinkwasserbehälter sichern nicht nur die Versorgung in Spitzenzeiten, sondern auch den Erhalt der Trinkwasserqualität. Dies wird sowohl durch das Lebensmittel- und Bedarfsgegenstände-Gesetz als auch durch das Infektionsschutz-Gesetz im Hinblick auf die menschliche Gesundheit gefordert:

„Wasser für den menschlichen Gebrauch muss so beschaffen sein, dass durch seinen Genuss oder Gebrauch eine Schädigung der menschlichen Gesundheit, insbesondere durch Krankheitserreger, nicht zu befürchten ist.“

Die Erstellung und der Betrieb der Wasserspeicher fordert von den Verantwortlichen ein hohes Maß an Fachkenntnissen und Kompetenz. Dies gilt im Besonderen für das frühzeitige Erkennen betriebsbedingter Veränderungen an der Bausubstanz, was zum Verlust der geforderten Versorgungssicherheit führen kann. Eine regelmäßige Zustandserfassung der Wasserbehälter ist daher für einen langfristig störungsfreien Betrieb und damit für eine hygienisch einwandfreie Trinkwasserversorgung notwendig.

## 1.2 Zustandserfassung und Maßnahmen

Nutzungsbedingt sind die wasserberührten Innenflächen von Wasserkammern unterschiedlichen Belastungen (z.B. durch verschiedene Wasserqualität, häufige Wasserwechsel oder mechanische Belastungen bei der Reinigung) ausgesetzt, was langfristig zum Werkstoffabbau führt. Undichte Behälter, Verkeimung der Wasserkammern oder eine Schädigung der statisch relevanten Bausubstanz können die Folge sein. Daraus lässt sich für den Zeitpunkt der Instandsetzung ableiten:

- Sie wird umgehend notwendig, wenn hygienische Mängel keine einwandfreie Speicherung mehr ermöglichen,
- Sie ist kurzfristig erforderlich, wenn die allgemeine Betriebssicherheit gefährdet ist
- Sie ist mittelfristig einzuplanen, wenn der wirtschaftliche Betrieb, die Dauerhaftigkeit oder Standsicherheit des Bauwerks eingeschränkt wird.

Eine Herauszögerung der notwendigen Instandsetzungsmaßnahmen reduziert hierbei nicht nur die Versorgungssicherheit der Bevölkerung, sondern führt zu einem exponentiellen Anstieg der Instandsetzungskosten, bedingt durch eine stärkere Schädigung der Bausubstanz.

Um frühzeitig das Auftreten von Schäden zu erkennen und die damit verbundenen Kosten zu reduzieren, hat sich das folgende Vorgehensweise, als zielführend erwiesen.

## 1.3 Sicht- und Funktionsprüfung durch den Betreiber

Bei der jährlich stattfindenden Reinigung und Desinfektion der Wasserkammern sollte der Betreiber durch fachkundige Personen den gesamten Behälter einer Sicht- und Funktionsprüfung unterziehen (DVGW Arbeitsblatt W 291 Abschnitt 7.1 [4]). Dabei sind folgende Aspekte besonders zu beachten:

### Hygienische Mängel

Hygienische Mängel sind nachteilige Veränderungen der Wasserqualität zwischen Zulaufwasser und dem Entnahmewasser. Ursache können Biofilme oder ein zu hoher Gesamtorganischer Kohlenstoffgehalt (TOC) im Wasser selbst sein.

Technische Ursachen dafür können unter anderem sein:

- Hinterwanderung von Dehnfugen (Biofilm, Pilze und Materialveränderungen)
- Von Außen durch Undichtigkeiten eindringendes Wasser und/oder Fremdstoffe
- Blasenbildung bzw. Ablösungen an Werkstoffoberflächen
- Chemisch-biologischer Abbau verwendeter Werkstoffe
- Eindringende Kleintiere



Abbildung 2: Biofilm auf Fuge

Biofilme und Pilze benötigen für ihr Wachstum Nahrung. Organische Werkstoffe (z.B. Kunststoffe und organische Zusatzmittel) haben grundsätzlich den Nachteil, dass sie bioverfügbar werden können.

### Einschränkung der Betriebssicherheit

Nutzungs- oder alterungsbedingte Veränderungen an der Bausubstanz können zu einer deutlichen Einschränkung der Betriebssicherheit führen.

Als technische Ursachen kommen dabei u.a. die folgenden baulichen Mängel in Frage:

- Abplatzungen, Ablösungen, Aufweichungen
- Ausblühungen
- Aussinterungen
- Blasenbildung
- Farbveränderungen, Fleckenbildungen
- Fugendefekte
- Hohlstellen
- Korrosion
- Risse (wasserführend oder trocken)
- Werkstoffmängel (Ausführung oder Schadstoffe)
- Wurzeldurchwachsung
- Zementsteinangreifendes Wasser



Abbildung 3: Wurzeldurchwachsung an Behälterinnenwand

### Einschränkung des wirtschaftlichen Betriebs

Der hygienische Zustand im Behälter wird maßgeblich durch den baulichen Zustand beeinflusst. Eine Fehleinschätzung über die zukünftigen baulichen Verhältnisse im Behälter kann daher zu einer ungeplanten Außerbetriebnahme oder Stilllegung führen. Die aus diesem Zusammenhang erwachsenden Kostenrisiken erschweren einen über den gesamten Lebenszyklus geplanten wirtschaftlichen Betrieb deutlich oder machen ihn gar unmöglich. Das frühzeitige Erkennen von Hinweisen, die auf potentielle Schadensrisiken hindeuten, trägt dazu bei, durch Präventionsmaßnahmen die Entstehung der Schäden zu vermeiden bzw. zu verzögern. Hinweise auf zukünftig auftretende massive Mängel an der

Bausubstanz geben lokal auftretende Veränderungen, wie zum Beispiel:

- Ablösungen vom Untergrund
- Farbliche Veränderungen auf der Werkstoffoberfläche
- Kalkaussinterungen oder Stalaktiten
- Korrosion
- Oberflächennahe Aufweichungen des zementgebundenen Werkstoffes (z.B. Absanden)

Für die Überprüfung der versorgungs- und sicherheitstechnischen Mängel sei auf das DVGW-Arbeitsblatt W 300 [1] verwiesen.

Diese können z.B. sei:

- Zu geringe Speicherkapazität für die Flächenversorgung (Netzkonzept)
- Veraltete oder mangelhafte Mess-/Steuer-/und Regeltechnik (mangelhafte Regeleinrichtungen)
- Keine oder mangelnde Möglichkeit der Fernüberwachung oder Fernsteuerung.
- Schlechte Einsicht in die Wasserkammern während des Betriebs

### Bewertung der Ergebnisse der Sicht- und Funktionsprüfung

Je nach Ergebnis dieser Prüfung werden folglich gezielte Zustandsanalysen erforderlich, um für den zukünftigen Betrieb des Behälters die notwendige Betriebs- und Planungssicherheit zu gewährleisten.

## 2. Zustandsanalyse

### 2.1 Vorbemerkungen

Bei der Zustandsanalyse werden mit Hilfe geeigneter Prüfverfahren und Analysemethoden verschiedene Parameter, wie zum Beispiel der Auslaugungsgrad der verwendeten zementgebundenen Werkstoffe, Festigkeitskennwerte oder der Verbund zum Untergrund erfasst und bewertet.

Sie sollte daher von einem qualifizierten sachkundigen Planer oder einem Prüfinstitut, welches über spezielle Kenntnisse bei der Instandsetzung von Trinkwasserbehältern verfügt, durchgeführt und dokumentiert werden. Im Bericht sind alle festgestellten Mängel und Schäden in Art und Umfang, sowie eventuell zu entsorgende schadstoffhaltige Materialien aufzuführen.

### 2.2 Notwendige Informationen zum Behälter

Folgende Unterlagen für die Zustandsanalyse sollen durch den Betreiber des Trinkwasserbehälters zur Verfügung gestellt werden:

- Bauwerkspläne (Bestandunterlagen)
- Protokolle der bereits durchgeführten Sicht- und Funktionsprüfungen
- Schriftliche Auflagen durch Aufsichtsbehörden (z.B. Gesundheitsamt)
- Angaben zu den Betriebsbedingungen (z.B. Zahl der täglichen Wasserwechsel, Wasseraufbereitung, Angaben zur Reinigung und Desinfektion)
- Untersuchungsprotokolle zur Wasserqualität (z.B. Wasserzusammensetzung der letzten drei Jahre, mikrobiologische Untersuchungen)
- Angaben zu bisherigen Bau- und Instandsetzungsmaßnahmen (z.B. verwendete Baumaterialien und deren Hersteller, Zulassungen und Prüfzeugnisse, Verarbeitungstechniken, Ergebnisse von Qualitätskontrollen, etc.)

### 2.3 Umfang der Zustandsanalyse

Diese Angaben zur Zustandsanalyse von Wasserbehältern beziehen sich hauptsächlich auf die Wasserkammern und Betriebseinrichtungen. Für die Analyse der Betriebseinrichtungen sei auf das DVGW Arbeitsblatt W 300 [1] verwiesen.

Nachfolgendes behandelt die bauliche Untersuchung der Wasserkammern.

Die Begutachtung und Untersuchung der Wasserkammern gliedert sich in 3 Bereiche:

- Visuelle Begutachtung am Objekt
- Chemisch – physikalische Untersuchungen vor Ort
- Laboruntersuchungen

Die visuelle Begutachtung sowie mikrobiologische Untersuchungen am Objekt müssen unmittelbar nach Ablassen des Wassers erfolgen, da sonst evtl. vorhandene Biofilme und/oder Risse durch den Abtrocknungsprozess nicht mehr erkannt werden.

### 2.4 Visuelle Begutachtungen am Objekt

#### 2.4.1 Vorbemerkungen

Die Vollständigkeit und Richtigkeit der Bauwerks- und Installationspläne ist vom Fachplaner vor Ort zu überprüfen. Gerüst, Leiter, Scheinwerfer, sowie Stromaggregat sind beim Orts-termin je nach Ausstattung evtl. erforderlich. Die Inaugenscheinnahme der Oberflächen sollte mit Hilfe eines Erfassungsbogens dokumentiert, Lage und Schadensumfang für ein Kataster genau erfasst werden.

#### 2.4.2 Ausgewählte Schadensmechanismen

Aus der Vielzahl möglicher Schadensmechanismen, die einzeln aber auch gemeinsam auftreten, wurden einige, für die Praxis besonders wichtige Schadensbilder ausgewählt:

##### **Ausblühungen auf mineralischen Werkstoffen**

Salze, wie z.B. Ettringit oder Thaumazit können als Produkte chemischer Reaktionen zwischen Bestandteilen des Wassers und des Werkstoffes entstehen und gefügeschädigend wirken. Für die eindeutige Identifikation ist die Entnahme von Materialproben und eine chemische Untersuchung im Labor erforderlich.



Thaumazitschaden aufgrund einer Materialverunreinigung an der Stütze in einer Wasserkammer

## Aussinterungen

Kalkablagerungen im Bereich von Undichtigkeiten und Rissen (z.B. im Anschlussbereich von Betonierabschnitten, Rohrdurchführungen, undichten Decken) deuten auf eindringendes Wasser hin.



## Farbänderungen / Flecken

Verfärbungen können durch Ablagerungen von Bestandteilen des Wassers, durch Bildung von unlöslichen Produkten als Folge chemischer Reaktionen oder durch die Wirkung von Mikroorganismen (Stoffwechselprodukte) entstehen. Schichtweise Abschaben des verfärbten Bereiches zeigt, ob die Verfärbung oberflächlich ist oder aus dem Inneren des Werkstoffes stammt.

**Rötlich-braune Flecken** ohne Aufweichung des Zementsteins können durch Ausfällung von Eisen und Mangan hervorgerufen werden. Im weiteren Verlauf bilden sich Verkrustungen.



**Braune Flecken** auf einer aufgeweichten zementgebundenen Oberfläche können die Folge der hydrolytischen Korrosion sein. In den Bereichen, in denen der pH-Wert auf 8-9 abgefallen ist, kann sich sekundär ein bräunlich eingefärbter Biofilm auf der Oberfläche ausbilden. Bisher ist kein Fall bekannt, bei dem dieser Biofilm die Wasserqualität negativ beeinträchtigt hat.



**Bläulich-schwarze Farbänderungen** bei Verwendung von Hochofenzementen als Folge von chemischen Reaktionen. Während bei mehrstündiger Erwärmung (z.B. durch einen Scheinwerfer) die Verfärbung zurückgeht, kommt es bei erneuter Einwirkung von Feuchtigkeit wieder zum farblichen Umschlagen.



**Schwarz-braune**, punktförmige Einschlüsse und streifenförmiges Ausbluten können aus Verunreinigungen, beispielsweise aus der Gesteinskörnung resultieren.



### Fugen

Untersuchung von vorhandenen Fugen:

Es ist zwischen Dehn- und starren Arbeitsfugen zu unterscheiden. Eine Hinterwanderung kann zur Verkeimung führen. Dazu reicht die Verbundstörung an einer Stelle. Eine Überprüfung des Verbundes der Fugenflanken gibt Hinweise zur Dichtigkeit.



**Hohlstellen** sind die Folge mangelnder Haftung zwischen zwei Schichten. Sie ermöglichen Hinterwanderungen und Verkeimungen. Die Grenzschichten können Aufschluss über die Ursache geben.



Oberflächennahe Hohlstellen nach dem Abklopfen und Öffnen

### Kondensatbildung

Unter den im Trinkwasserbehälter vorliegenden Klimabedingungen bildet sich sowohl bei der Ausführung der Arbeiten als auch beim späteren Betrieb Kondensat. Bei diesem Kondensat handelt es sich um nahezu entmineralisiertes Wasser („weiches Wasser“ - niedriger pH-Wert), welches die hohe Calcitlösekapazität erklärt. Dabei begünstigt die Einwirkung von Kondenswasser speziell die Korrosion von einem jungen Beton oder eine frisch applizierte Beschichtung.

Besonders auf glatter Deckenunterseite ohne nennenswertes Gefälle liegt, verglichen mit spritzrauen Decken, eine verhältnismäßig lange Verweildauer des Kondenswassers vor. Dies führt zu einer Auslaugung des zementgebundenen Werkstoffes. Weiterhin wird vermutet, dass durch diesen Prozess auch eine Verkeimung des Kondenswassers begünstigt wird.



Schadstellen am Boden durch heruntertropfendes Kondensat kurz nach der Applikation

### Korrosion

#### Korrosion an metallischen Werkstoffen

Elektro-chemische Prozesse an Bewehrung, Rohrleitung, Treppen und sonstigen Einbauten führen zur Werkstoffkorrosion. Durch die Bildung von Lokalelementen (elektrisch leitender Kontakt zwischen zwei verschiedenen Metallen) wird erfahrungsgemäß die Korrosionsgeschwindigkeit deutlich erhöht. Dabei kann das Wasser als Elektrolyt diesen Kontakt auch zwischen zwei räumlich voneinander entfernten Bauteilen herstellen.



### Hydrolytische Korrosion

Unter der hydrolytischen Korrosion versteht man die vollständige Zersetzung des Zementsteins, welche mit einem lokal begrenzten Festigkeitsverlust verbunden ist. Das Erscheinungsbild ist oft durch eine regelmäßige bzw. unregelmäßige Anordnung von kreisrunden Flecken von wenigen Millimetern bis mehreren Zentimetern Durchmesser gekennzeichnet. Diese sind an der Oberfläche meist bräunlich verfärbt. Innerhalb dieser Flecken ist das Material „aufgeweicht“ und kann mechanisch leicht entfernt werden.



Mit dem Abbau des Zementsteins ist auch ein Verlust der hohen Alkalität des Zementsteins verbunden. Durch Anritzen der Oberfläche und Besprühen mit Phenolphthalein können diese chemisch bedingten Veränderungen im Bereich der Aufweichung optisch sichtbar gemacht werden.

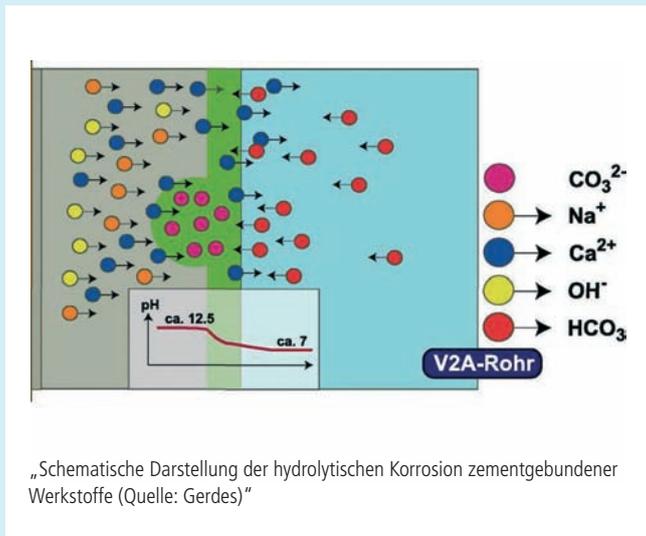


Bei fortschreitender hydrolytischer Korrosion vereinigen sich die beschriebenen Flecken zu flächigen Materialaufweichungen. Dieser Schadensmechanismus ist nicht auf Beschichtungen beschränkt, sondern betrifft alle zementgebundenen Werkstoffe, sodass auch der darunter liegende Konstruktionsbeton davon betroffen sein kann. Die Schädigungsgeschwindigkeit der verwendeten Werkstoffe ist stark von den Eigenschaften, wie z.B. Porosität, Schichtdicke und den Umgebungsbedingungen (z.B. Wasserhärte und Anzahl der Wasserwechsel) abhängig. So wird von Fällen berichtet, bei denen bereits nach einigen Monaten die Beschichtung stark geschädigt war, während in anderen Fällen erst nach vielen Jahren nennenswerte Schädigungen beobachtet wurden.

Zum Verständnis dieser Prozesse erst einige Erläuterungen zu den Grundlagen zur Zementchemie. Bei der Verarbeitung zementgebundener Werkstoffe reagiert der Zement chemisch mit dem Anmachwasser unter Bildung des Zementsteins, der die Gesteinskörnung zum Kompositwerkstoff verbindet. Bei dieser Reaktion werden größere Mengen an Calciumhydroxid ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) (ca. 20 Massen-% des Zements) gebildet. Der überwiegende Teil ist in der Zementsteinmatrix in fester Form eingelagert. Nur ein geringer Teil dieses Calciumhydroxids (ca. 0.3 Massen-%) ist in der Porenlösung des Werkstoffes gelöst. Dieser ist jedoch ausreichend, um bei zementgebundenen Werkstoffen ein hochalkalisches Milieu (pH-Wert zwischen 12 und 13) zu schaffen.

Der Mechanismus der hydrolytischen Korrosion lässt sich nun als Abfolge von Transportprozessen und chemischen Reaktionen beschreiben. In Kontakt mit hartem Wasser werden Hydrogencarbonat-Ionen ( $\text{HCO}_3^-$ ) aus dem Trinkwasser in den porösen, zementgebundenen Werkstoff transportiert. Die Geschwindigkeit der Hydrolyse wird daher auch von der Wasserqualität (Carbonathärte), dem täglichen Wasserwechsel und den Strömungsverhältnissen in der Wasserkammer beeinflusst.

Durch die pH-abhängige Verschiebung des „Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichts (siehe 3.2 Wasseranalyse)“ wandelt sich dort das Hydrogencarbonat-Ion in ein Carbonat-Ion ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) um und bildet mit den vorhandenen Calcium-Ionen schwerlösliches Calciumcarbonat. Durch diesen Prozess wird zunächst das gesamte im Zementstein eingelagerte Calciumhydroxid in Calciumcarbonat umgewandelt, wodurch eine Gefügeverdichtung entsteht. Im weiteren Verlauf der hydrolytischen Korrosion wird direkt der Zementstein angegriffen, d.h. er stellt die für den oben beschriebenen Prozess notwendigen Calcium-Ionen zur Verfügung und wird dadurch ausgelaugt. Mit der voranschreitenden Calciumauslaugung verliert der Zementstein seine mechanische Festigkeit, so dass letztendlich der betroffene Bereich vollständig aufweicht.



### Identifizierung der hydrolytischen Korrosion:

Typischerweise steigt bei der hydrolytischen Korrosion in den geschädigten Bereichen der Calciumcarbonatgehalt, während der Calciumhydroxydgehalt durch die Umwandlung fällt. Im Gegensatz dazu ist bei einem lösenden Angriff z.B. durch zementsteinangreifende Wässer nur ein Abfall des Calciumhydroxid-Gehaltes, nicht aber ein Anstieg des Calciumcarbonat-Gehaltes zu beobachten. Der Zustand einer optisch noch intakt erscheinenden Beschichtung kann daher durch die Analyse beider Größen schnell und kostengünstig erfolgen.

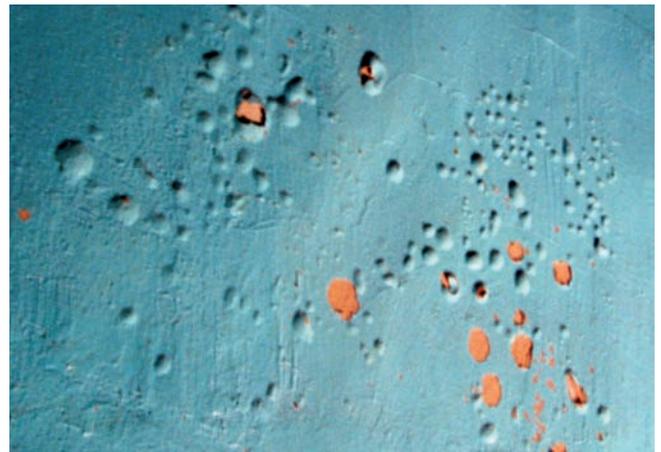
**Abplatzungen und Korrosion** ist meist die Ursache von inhomogenem Beton und/oder fortschreitender Carbonatisierung in Verbindung mit mangelnder Betonüberdeckung. Langfristig kann dieser Korrosionsprozess zur massiven Schädigung der Bewehrung (Querschnittsverminderung) und damit zum Verlust der Standicherheit führen.



## Polymerbeschichtungen

### Blasenbildung an Polymerbeschichtungen

Sie treten häufig lokal oder flächig über das Bauwerk verteilt bei organischen Beschichtungen z.B. aus Chlorkautschuk oder Epoxydharz auf. Die Blasen neigen zur Verkeimung oder Schadstoffeinträger. Durch Entnahme der eingelagerten Flüssigkeit kann im Labor der Verkeimungsgrad sowie die Art der Belastung ermittelt werden.



### Ablösungen, Versprödungen an Polymerbeschichtungen

Diese Veränderungen werden beispielsweise durch den Abbau von Weichmachern oder organischer Bestandteile in der Beschichtung ausgelöst. Im Anfangsstadium treten lokale Schadstellen auf. Im weiteren Verlauf gehen sie zu einer flächigen Ablösung über.



### Risse in zementgebundenen Werkstoffen

Risse werden in trocken, feucht oder wasserführend unterschieden. Die Ursachen für eine Rissbildung sollen von Fachplaner ermittelt und dokumentiert werden (siehe Instandsetzungsrichtlinie des DafStb Teil 1, 3.1(2) [5]).

Dazu kann eine Bohrkernentnahme im gerissenen Bereich Aufschluss geben.



Treten im Konstruktionsbeton Risse auf, werden diese mit hoher Wahrscheinlichkeit auch in der Beschichtung auftreten. Treten die Risse nur in der Beschichtung auf, ist dies eher im Werkstoffverhalten der Beschichtung begründet.

Lastabhängige Verformungen, Temperaturunterschiede und Schwinden sind meist die Auslöser.

Schwindrisse entstehen mit dem Austrocknen zementgebundener Werkstoffe. Eine gute Nachbehandlung, Einhaltung von maximalen Schichtstärken und geringe Feinanteile (gut abgestufte Sieblinie) vermeiden das Risiko.



Schwind- oder Krakeleerissbildung am zementgebundenen Werkstoffen

Bei größeren Unterschieden im E-Modul des Untergrundes und der applizierten Beschichtung führen äußere Spannungen zu unterschiedlich ausgeprägten Verformungen. Auch dieser Faktor provoziert Rissbildung. Weitere Details zur dieser Thematik finden sich im WTA Merkblatt E 2-04-07/D [2].

Wasserführende oder feuchte Risse neigen dazu sich teilweise selbst zu verschließen, indem sich im Wasser gelöstes Calciumhydrogencarbonat bzw. Calciumhydroxid (Kalk) im Riss in wasserunlösliches Calciumcarbonat (Kalkstein) umwandelt. Dieser Prozess verläuft aber über einen Zeitraum von mehreren Wochen bis

Monaten. Deshalb sollte eine Verpressung mit Reaktionsharzen erst dann erfolgen, wenn dieser Abdichtungsprozess zu keiner deutlichen Reduktion des Wassertransports geführt hat.



Aussinterungen an Riss an Deckenuntersichtfläche

Auch Risse  $\leq 0,2$  mm müssen abgedichtet werden, wenn die Gebrauchstauglichkeit eingeschränkt wird.

### Schadstoffhaltige Werkstoffe

Bei einigen älteren Beschichtungssystemen ist mit Schadstoffen zu rechnen. Grundsätzlich empfiehlt es sich, ein Stück der Altbeschichtung oder einen Bohrkern im Labor auf Schadstoffe und deren Konzentrationen untersuchen zu lassen. Sind die Grenzwerte überschritten, können kostenintensive Maßnahmen für deren Ausbau und Entsorgung anfallen.



PCB-haltige Beschichtung

Dasselbe gilt für den Ausbau von Asbestzementrohren (AZ-Rohre). Durch den Prägstempel „AF“ lassen sich asbestfreie Faserzementrohre von AZ-Rohren unterscheiden.

## Instandsetzung von Trinkwasserbehältern

Eine frühzeitige Planung der Entsorgung schadstoffhaltiger Werkstoffe (z.B. PCB in Chor-Kautschuk-Beschichtungen oder Asbest in Faserzementrohren) ist empfehlenswert. Die rechtzeitige Wahl des Ausbauverfahrens, sowie die korrekte Entsorgung nach LAGA schützen die beteiligten Personen vor Gesundheitsschäden und bieten große Kosteneinsparpotentiale.

### Zementsteinangreifendes Wasser (kalklösend)

Wässer, die sich nicht im „Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht“ (siehe 3.2) befinden, greifen zementgebundene Werkstoffe flächig an. Typisches Erscheinungsbild ist eine waschbetonartige Oberfläche, bei der die Gesteinskörnung deutlich erkennbar wird.

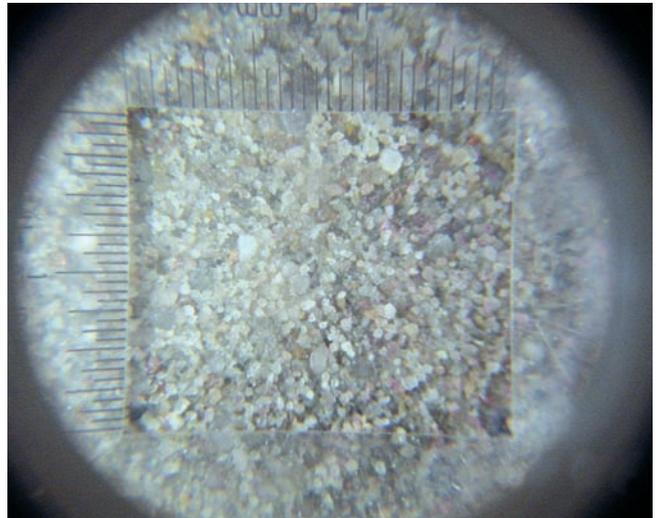


Meist endet die Schädigung der Oberfläche scharfkantig an der Wasserspiegelgrenze.



Unter entsprechenden Bedingungen kann es innerhalb von Monaten zur Auslaugung und damit zur fortschreitenden Werkstoffzerstörung von außen nach innen kommen (z.B. Absanden). In vielen

Fällen bleibt aber auch nach vielen Jahren die Schädigung auf den oberflächennahen Bereich beschränkt. Die Schädigungsgeschwindigkeit hängt dabei von verschiedenen Faktoren, wie z.B. der Zusammensetzung des Wassers, den Eigenschaften des Werkstoffes und der Häufigkeit des Wasseraustausches ab.



Absandende Oberfläche nach Angriff durch zementsteinangreifendes Wasser durch eine Lupe

Untersuchungen im Institut des Vereins Deutscher Zementwerke (VDZ) [3] haben gezeigt, dass sich bei einem Angriff durch kalklösende Kohlensäure auf der Werkstoffoberfläche eine natürliche Schutzschicht ausbildet. Durch Strömung oder intensive Reinigung kann diese Schutzschicht zerstört werden, was über die Zeit zu einer verstärkten Schädigung führt. Dennoch ist es möglich zementgebundene Werkstoffe bei Vorhandensein dieser werkstoffaggressiven Wässer einzusetzen, falls die Beschichtung dann als „Opferschicht“ betrachtet wird. In diesem Fall wird der oberflächennahe Bereich zwar aufweichen, diese Aufweichungszone wird aber den darunter liegenden Mörtel und vor allem den Konstruktionsbeton vor einer schnellen Zerstörung schützen.



Aufgeweichte Oberfläche als labile Schutzschicht bei zementsteinangreifendem Wasser

Hinweis zum Korrosionsstadium bei Einwirkung zementsteinan-greifender Wässer:

Durch mikroskopische Untersuchung bzw. tiefaufgelöste chemische Analysen (Tiefenprofil) der Zusammensetzung erhält man Hinweise auf den Schädigungsgrad. Dabei kann der zeitliche Fortschritt abgeschätzt werden.

## 2.5 Chemisch-physikalische Untersuchungen am Objekt

### 2.5.1 Vorbemerkungen

Durch einfache, vor Ort durch den Ingenieur durchzuführende Prüfungen, wie z.B. Kratzproben, Abklopfen der Oberflächen oder Bestimmung der Carbonatisierungstiefe können bereits Mängel festgestellt werden. Im Folgenden werden dazu ausgewählte Methoden vorgestellt und beschrieben.

Für die spätere Interpretation der Ergebnisse ist es erforderlich, den Ort und Umfang der Prüfungen zu dokumentieren. Mit den Resultaten ist für die jeweilige Wasserkammer ein Schadenskataster zu erstellen.

### 2.5.2 Kurzbeschreibung der Methoden

**Abklopfen der Flächen**, um Verbundstörungen und Hohlstellen zu lokalisieren. Höhe und Ausprägung des Tons liefern Hinweise zur Lage und Ausmaß der Schädigung.

**Abriebversuch**, um Abmahlungen und Absandungen der Oberfläche festzustellen. Dazu werden helle Oberflächen z.B. mit einem schwarzen Tuch abgerieben. Ursachen für diese Erscheinungen können z.B. Herstellungsmängel, Wirkung von betonaggressiven Wässern, sauren Reinigungsmitteln oder die hydrolytische Korrosion sein.



Abriebversuch mit bloßen Händen

## Betonüberdeckung

Ermittlung an allen Innenflächen durch ein geeignetes Messverfahren (Bewehrungssuchgerät, z.B. Profometer). Dazu werden stichpunktartig Bereiche ausgewählt und die Ergebnisse statistisch ausgewertet.



## Bewehrungskorrosion

Ermittlung an der Bewehrung mit Hilfe von Potentialfeldmessungen. Mit diesem Verfahren können zerstörungsfrei Bereiche korrodierender Bewehrung lokalisiert werden. Aussagen zum Zustand der Bewehrung und der Korrosionsgeschwindigkeit lassen sich auf diese Weise nicht machen. Es ist daher empfehlenswert nach der Auswertung der Messergebnisse an ausgewählten Bereichen die Bewehrung freizulegen, um den Korrosionszustand (z.B. flächige Korrosion oder Lochfraßkorrosion, Abtragtiefe) ermitteln zu können.

## Bohrkerne

Zur Ermittlung des Schichtaufbaus der Konstruktion (Material, Schichtstärken) sowie die Beurteilung der Gefügedichte der verwendeten Werkstoffe sollten an repräsentativen Flächen Bohrkerne (z.B. DN 50) entnommen werden.



### Carbonatisierungstiefe

Ermittlung an allen Bauteilgruppen im ständig wasserbenetzten Bereich, in der Wasserwechselzone und oberhalb der Wasserlinie. Dazu kann man Bohrkern entnehmen oder frische Bruchflächen herstellen, auf die unmittelbar ein Indikator aufgesprüht wird (z.B. Phenolphthalein).



Carbonatisierungstiefe an Bohrkernen; (Quelle: Ing.-Büro Prof. Schiebl, München)

Durch die hohe Wassersättigung findet im ständig benetzten Bereich kaum ein CO<sub>2</sub>-Transport in den Werkstoff statt. In den Bereichen mit geringerer Wassersättigung (oberhalb der Wasserlinie) können u.a. CO<sub>2</sub>-Ausgasungen aus dem Wasser für größere Carbonatisierungstiefen ursächlich sein.

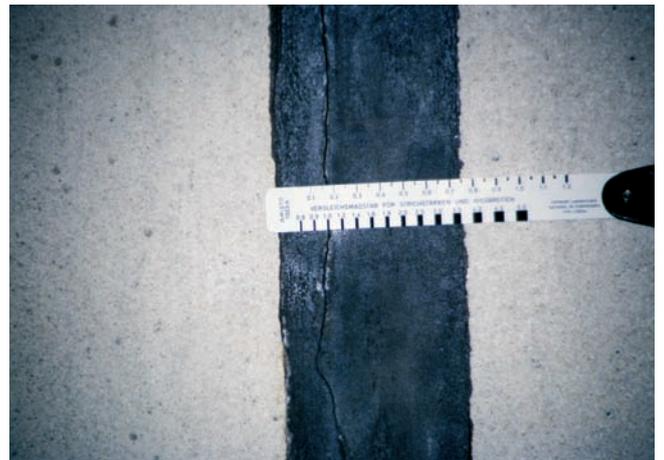
### Druckfestigkeit

Die zerstörungsfreie Ermittlung der Druckfestigkeit am Objekt, erfolgt stichpunktartig mit dem Rückprallhammer nach DIN 1048, sowie deren statistischer Auswertung.



### Fugenbewegung

Fugen sollten vor der Sanierung auf Bewegung überprüft werden, um festzustellen, ob diese dementsprechend starr oder dehnfähig ausgebildet werden müssen. Dies kann durch eine Fugenmessrichtung (quantitative Ermittlung) oder durch Einkleben von Glasplättchen oder Mörtelbrücken (qualitative Ermittlung) überprüft werden.



Starr verschlossene Dehnfuge nach erneuter „Bewegung“

Eine Methode ist die Aufbringung von Mörtelbrücken oder Aufkleben von Glasplättchen (analog Gipsmarken) auf der entsprechenden Fuge. Dabei muss der Behälter alle Lastzustände erfahren. Werden bei der nächsten Entleerung Risse in der Brücke festgestellt, weisen diese auf Bewegungen hin.



### Haftzug- und Oberflächenfestigkeit

Die Ermittlung von Werten zur Haftzugfestigkeit erfolgt nach DIN 1048. Haftzugfestigkeiten sind dort zu prüfen, wo der spätere Aufbau beginnen soll. Über die beim Vorbohren erzielte Nuttiefe kann vorgegeben werden, ob der Verbund zwischen den einzelnen Schichten (Adhäsion) oder die Oberflächenzugfestigkeit innerhalb einer Schicht (Kohäsion) geprüft werden soll.



Bei der Entnahme von Bohrkernen für im Labor durchzuführenden Haftzugprüfungen darf der Verbund zwischen den Schichten bei der Bohrkernentnahme nicht gestört werden. Dies kann vermieden werden, wenn die Nut für die Haftzugprüfung vor der Bohrkernentnahme hergestellt wird.



Bohrkernentnahme für Haftzugprüfung im Labor mit vorgebohrter Nut.

### Rissbreiten-Messung

z.B. mittels Rissbreitenlupe oder Rissbreitenlehre. Ob sich die Risse beim Betrieb (wechselnde Wasserstände) bewegen, wird analog zur Prüfung von Fugenbewegungen festgestellt. Mittels einer Bohrkernentnahme (z.B. DN 50) im Bereich von Rissen ermittelt man deren Verlauf und Tiefe.



Rissbreitenermittlung mit Rissbreitenmesslupe

### Ritzprobe

um mürbe Bereiche festzustellen. Mit Hilfe eines Stahldorns wird an der Oberfläche geritzt, wobei die Ritztiefe einen Hinweis auf den Werkstoffzustand gibt. Mittels Materialproben aus geschädigten und ungeschädigten Bereichen ermittelt das Labor die Ursachen dieser Schädigungen.



Ursachen für diese Schäden können u.a. die hydrolytische Korrosion, die Wirkung werkstoffangreifender Wässer, saurer Reinigungsmitteln und Reaktionen von Bestandteilen des Werkstoffes mit Bestandteilen des anstehenden Wassers sein.

Festigkeitsverluste lassen sich über die durch gleichmäßiges oberflächliches Ritzen entstandene Narbentiefe erkennen.

### Lösender Angriff oder hydrolytische Korrosion?

Durch Besprühung der Ritzprobe mit einem Indikator, z.B. Phenolphthalein, kann festgestellt werden, ob der pH-Wert abgesunken ist. Bei lösendem Angriff (kalklösende Kohlensäure) ist eher ein flächiger Abfall des pH-Wertes zu beobachten, während bei der hydrolytischen Korrosion (Zementsteinabbau) dieser pH-Wertabfall eher lokal begrenzt (inselartig) auftritt. Dieser Versuch gibt aber nur einen Hinweis auf die Schädigung des Werkstoffes. Für die Identifizierung des Schadensmechanismus sind Laboruntersuchungen unabdingbar.

### 2.6 Chemisch-physikalische Laboruntersuchungen

#### 2.6.1 Vorbemerkungen

Für Untersuchungen oder Prüfungen, die nicht vor Ort durchgeführt werden können, sollen entsprechende Proben zur Laboranalyse (z.B. Bohrkern) entnommen werden. Durch den Einsatz von speziellen Untersuchungsmethoden können anhand von Werkstoffproben aus der Wasserkammer im Labor chemische sowie physikalische Kennwerte ermittelt werden.

#### 2.6.2 Probenentnahme

Die Probenentnahme am Bauwerk für die Laboruntersuchungen sollte durch eine fachlich qualifizierte Person erfolgen. Im Vorfeld ist von dieser ein behälterspezifisches Konzept zur Probeentnahme auszuarbeiten. Dazu gehören neben den baustofftechnischen Aspekten auch Aspekte hinsichtlich der Schadstoffbelastung der im Behälter verwendeten Werkstoffe. Dieser Plan muss daher die folgenden Punkte umfassen:

##### Ort der Probenentnahme

Die Entnahme sollte an allen Bauteilgruppen (Decke, Boden, Wänden, Säulen und kleinflächigen Bauteilen) vorgenommen werden.

##### Anzahl und Größe der Bohrkern

Die Zahl der Bohrkern je Bauteilgruppe ist von der Behältergröße und der aufgrund der Voruntersuchungen vorgenommenen Einschätzung der Schädigung (regelmäßig/unregelmäßig) abhängig. Die Bohrkern sollten einen Durchmesser von 70 mm nicht unterschreiten. Der Entnahmeort und die Daten zu den Bohrkern (Orientierung, Länge, Durchmesser und Gewicht) sind zu dokumentieren. Nach der Entnahme der Bohrkern sind diese eindeutig zu kennzeichnen.

##### Probeentnahme im Bereich von Fugen

Bei Fugenabdichtungen ist eine Bohrkernentnahme nicht immer empfehlenswert, da diese ihre abdichtende Wirkung verlieren könnten. Hier kann die maximale Bohrtiefe vorgegeben oder die manuelle Entnahme einer Materialprobe aus der Fuge vorgenommen werden. Die Probe gibt Aufschluss über die Art der Fugenfüllung und der möglichen Schadstoffbelastung.

##### Probenentnahme für die Beurteilung der Schadstoffbelastung

Grundsätzlich sollten Proben des abzutragenden Materials für eine chemische Analyse entnommen werden, um eventuelle Schadstoffbelastungen zu ermitteln. Empfehlenswert ist die Planung der Entsorgung z.B. LAGA M 20 (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall). Für die Untersuchung der Entsorgbarkeit vorhandener Werkstoffe nach LAGA sind mindestens 500 g Probenmaterial erforderlich. Für die Untersuchung einer Beschichtung

auf PCB und Schwermetallen reichen dagegen geringe Mengen an Probenmaterial.

##### Probenentnahme für die mikrobiologische Beurteilung der Werkstoffoberfläche

Bei Verdacht von Kontamination der Bausubstanz mit bioverfügbaren Stoffen sind Probennahmen sinnvoll. Die Probenentnahme sollte durch dafür qualifiziertes Personal entnommen werden.



Biofilm auf Innenwand einer Wasserkammer

##### Referenzproben

Ergänzend zu den bereits erwähnten Bereichen sollten als Referenzproben Bohrkern oberhalb der Wasserlinie entnommen werden. Der Vergleich der Ergebnisse für diese Proben (z.B. Calciumhydroxid-Gehalt) mit den Resultaten für die Bohrkern, die unterhalb der Wasserlinie entnommen wurden, kann Hinweise über die Art des Schadensmechanismus bzw. über dessen zeitlichen Fortschritt liefern.

##### Zahl der Bohrkern für eventuelle Nachprüfungen

Neben den Bohrkern für die vorgesehenen Prüfungen sind auch Bohrkern für eventuelle Nachprüfungen oder weiterführende Untersuchungen zu entnehmen. Die Zahl ist den jeweiligen Gegebenheiten im Behälter „großzügig“ anzupassen.

##### Verpackung, Transport und Lagerung

Die entnommenen Bohrkern sind vor Austrocknen zu schützen. Das kann durch das Verpacken in mit Wasser (aus dem lokalen Versorgungsnetz) gefüllten Behältern (z.B. Weithalsflaschen, Eimer mit Deckel) oder mit geeigneten Probenahmebeutel geschehen. Der Transport muss so erfolgen, dass die chemisch-physikalischen bzw. mechanischen Eigenschaften der Bohrkern nicht maßgeblich verändert werden. Nach der Einlieferung in das Labor ist die Lagerung bis zur Prüfung so vorzunehmen, dass keine, die Untersuchungen beeinträchtigenden Veränderungen an den Proben auftreten können.

### Umfang der Laboranalysen

Die Untersuchungen sind oft mit einem erheblichen zeitlichen und finanziellen Aufwand verbunden. Allerdings sind die Ergebnisse solcher Untersuchungen die Voraussetzung für ein ingenieurmäßiges Vorgehen bei der Instandsetzung. Um die Anzahl der notwendigen Untersuchungen auf ein Minimum beschränken zu können, wird empfohlen durch Vor-Ort-Analysen die in Frage kommenden Schadensmechanismen und Werte einzuschränken.

### Fragen bei der Vor-Ort-Analyse:

- Wie ist der konstruktive Aufbau des Behälters?
- Liegt eine Schädigung der Beschichtung bzw. des Konstruktionsbetons durch hydrolytische Korrosion vor?
- Sind die eingesetzten Werkstoffe durch Bestandteile des gelagerten Wassers (z.B. kalklösende Kohlensäure, Sulfat) chemisch angegriffen worden?
- Liegen chemisch oder physikalisch bedingte Gefügeveränderungen am Werkstoff vor?
- Welche mechanischen Kennwerte (z.B. Druckfestigkeit, E-Modul) weisen die verwendeten Werkstoffe auf?
- Wie ist der Verbund zwischen Konstruktionsbeton und den darauf applizierten Schichten (z.B. Estrich, Putz, zementgebundene Beschichtungen, Polymerbeschichtungen) zu beurteilen?
- Gibt es mikrobiologische Veränderungen am Werkstoff, welche die hygienische Lagerung des Wassers gefährden?
- Welche Anforderungen hinsichtlich der Entsorgung der bei der Instandsetzung anfallenden Abfallstoffe sind aufgrund der chemischen Zusammensetzung zu stellen?

Mit den Antworten zu diesen und weiteren Fragen kann der Fachplaner dann gezielt und damit kostenbewusst die für die Instandsetzung des Behälters notwendigen Maßnahmen planen.

## 2.6.3 Chemische Untersuchungen im Labor:

### Bestimmung des Calciumhydroxid-/ Calciumcarbonat-Gehaltes

#### Ausgangssituation

Die Wirkung von weichen Wässern, „kalklösender Kohlensäure“, aber auch das Auftreten der hydrolytischen Korrosion ist mit Veränderungen im Calciumhydroxid- bzw. Calciumcarbonat-Gehalt der zementgebundenen Werkstoffe verbunden.

#### Beschreibung der Verfahren

Für die Bestimmung des Calciumhydroxid- bzw. Calciumcarbonat-Gehaltes können sowohl nasschemische Verfahren als auch thermogravimetrische Methoden eingesetzt werden. Bei den nasschemischen Verfahren wird das Calciumhydroxid im ersten Schritt durch geeignete Chemikalien selektiv aus dem zementgebundenen Werkstoff extrahiert. Die dazu hergestellte Suspension

wird filtriert. Im zweiten Schritt wird der Calciumhydroxidgehalt in der Lösung mittels Titration bestimmt (Franke-Verfahren). Bei der Bestimmung des Calciumcarbonat-Gehalts wird eine definierte Menge der Probe in einem geschlossenen Gefäß mit Säure versetzt. Bei Reaktion der Säure mit Calciumcarbonat wird Kohlendioxid als Gas freigesetzt. Der damit verbundene Druckanstieg ist abhängig von der Calciumcarbonatmenge und kann daher zur Bestimmung des Gehaltes herangezogen werden.

Bei der thermogravimetrischen Methode wird eine geringe Menge der Probe in einen Wägebecher gegeben und das Gewicht durch Wägung bestimmt. Anschließend wird die Probe mit einer konstanten Aufheizrate (z.B. 10 °C/min) bis auf ca. 1000 °C erhitzt. Der mit dem Aufheizen verbundene Gewichtsverlust (z.B. durch das Austreiben des physikalisch gebundenen Wassers) wird durch die im Ofen positionierte Waage registriert. Der bei ca. 450 °C auftretende Gewichtsverlust kann dem Austreiben des Wassers aus dem Calciumhydroxid zugeordnet werden. Bei ca. 900 °C wird das Kohlendioxid aus dem Calciumcarbonat freigesetzt. Auf diese Weise kann der Gehalt an beiden chemischen Verbindungen im Feststoff direkt ermittelt werden.

Es ist zu beachten, dass die Messergebnisse beider Verfahren sich stark unterscheiden können. Bei Vergleichen sollte nur Werte der gleichen Methode herangezogen werden.

### Interpretation der Ergebnisse

Mit den Ergebnissen dieser Untersuchungen lassen sich Rückschlüsse auf die Schadensmechanismen ziehen, die zur Schädigung des zementgebundenen Werkstoffes geführt haben.

Im Fall einer hydrolytischen Korrosion wird man im Vergleich zu den Werten für die Referenzproben (entnommen oberhalb der Wasserlinie) einen stark reduzierten Calciumhydroxidgehalt und einen deutlich erhöhten Calciumcarbonat-Gehalt vorfinden. In den Regionen, in welchen die Beschichtung bereits vollständig aufgeweicht ist, geht der nachweisbare Calciumhydroxidgehalt nahezu gegen Null.

Bei der Auslaugung durch weiches Wasser ist ein deutlich geringerer Calciumhydroxidgehalt nachweisbar. Der Calciumcarbonat-Gehalt hingegen wäre nicht erhöht, sondern eher niedriger als in den Referenzproben. Entsprechendes gilt für bei einem Angriff durch „kalklösende Kohlensäure“.

### Identifikation und chemische Analyse bauwerksschädlicher Salze

#### Ausgangssituation

Bei der Einwirkung bauwerksschädlicher Salze auf zementgebundene Werkstoffe können sich diese direkt mit Bestandteilen des Bindemittels zu Schadmineralien umsetzen und zudem das Bauteil durch Bewehrungskorrosion schädigen. So führt beispielsweise die Einwirkung von sulfathaltigen Wässern zur Bildung von Ettringit bzw. Thaumasit. Als treibend wirkende chemische Verbindungen führen diese Reaktionsprodukte zur Gefügezerstörung. Chloride wiederum zerstören an der Bewehrungsfläche den schützen-

## Instandsetzung von Trinkwasserbehältern

den Passivfilm und lösen unter bestimmten Randbedingungen Lochfraßkorrosion aus.

### Beschreibung des Verfahrens

Bei der Analyse des Werkstoffes müssen zunächst die Art der Schadmineralien identifiziert werden. Für die Identifikation wird in der Regel die Röntgendiffraktometrie als Methode herangezogen. Für die praktische Durchführung wird die pulverisierte Probe in einen Röntgenstrahl gestellt, der an der Probenoberfläche gebeugt wird. Abhängig von den vorhandenen Schadmineralien ergeben sich charakteristische Beugungswinkel, die in einem sogenannten Diffraktogramm dargestellt werden. Durch Vergleich mit Referenzdaten für die einzelnen Mineralien können auch in einer komplexen Mischung verschiedene Bestandteile sicher identifiziert werden.

Für die Bestimmung der Menge an bauwerksschädlichen Salzen, wird eine definierte Menge der Probe entweder mit deionisiertem Wasser oder Säure versetzt, um diese Verbindungen aus der Baustoffmatrix herauszulösen. Anschließend wird deren Gehalt mit Hilfe analytischer Geräte (z.B. Ionenchromatographie, Ionenselektive Elektrode) quantitativ in der Lösung bestimmt. Das Ergebnis der Analyse wird auf die eingewogene Menge bezogen, so dass man beispielsweise den Chloridgehalt in Massen-% vom Betongewicht berechnen kann.

### Interpretation der Ergebnisse

Die Identifikation der Schadmineralien liefert wichtige Hinweise für die zu planende Instandsetzungsmaßnahme. Die Einwirkung von Sulfaten kann zur Bildung von Ettringit oder bei Vorliegen bestimmter Bedingungen (z.B. niedrige Temperaturen, Wasserhärte) zur Bildung von Thaumasit führen. Während sich die Ettringitbildung durch Einsatz von hochsulfatbeständigen Zementen vermeiden lässt, ist die Thaumasitbildung unaufhaltsam. Um das erneute Auftreten dieser Schadensprozesse zu vermeiden, empfiehlt es sich einen Experten zur Identifizierung heranzuziehen.



Thaumasitgeschädigter Beton in cremiger Konsistenz

Das Risiko für das Bauwerk hängt neben der Art und Menge an bauwerksschädlichen Salzen hauptsächlich von der Zusammensetzung des Werkstoffes ab. Das Auftreten mehrerer verschiedener Salze erhöht das Schadensrisiko dementsprechend deutlich. Eine allgemeine Angabe von Grenzwerten ist daher nur sehr bedingt möglich, vielmehr muss im Einzelfall das Risiko anhand der Analyseergebnisse beurteilt werden.

### 2.6.4 Physikalische Untersuchungen im Labor

- Ermittlung der Oberflächenzugfestigkeit der einzelnen Schichten
- Ermittlung des Verbunds (Haftzugfestigkeit) zwischen den Schichten
- Feststellung der Druckfestigkeit.
- Feststellung des E-Moduls.
- Mikroskopische Untersuchungen
- Ermittlung von Gefügekenndaten (Porosität und Porengrößenverteilung)

Die Bestimmung der Gesamtporosität und der Porengrößenverteilung erfolgt mit der Methode der Quecksilberdruckporosimetrie. Diese wissenschaftlich fundierte Methode ist bereits seit vielen Jahren im Bereich der Materialwissenschaften eingeführt und standardisiert worden. Bei diesem Verfahren werden Werkstoffproben in einen speziellen Versuchsbehälter (Dilatometer) eingewogen. Anschließend wird das Dilatometer in die Versuchsvorrichtung eingebaut und das Dilatometer mit Quecksilber gefüllt. Da Quecksilber im Gegensatz zu Wasser nicht benetzend wirkt, dringt Quecksilber erst unter Druck in den porösen Werkstoff ein. Deshalb wird das Dilatometer stufenweise mit einem immer höheren Druck (bis zu 2500 bar) beaufschlagt und die Menge an Quecksilber bestimmt, die bei der jeweiligen Druckstufe in das Material eingedrungen ist. Mit Hilfe der sogenannten Washburn-Gleichung kann man nun den zu einem bestimmten Druck korrespondierenden Porendurchmesser berechnen und den Anteil dieser Poren an der Gesamtporosität ermitteln. Summiert man am Ende die Ergebnisse für die einzelnen Druckstufen auf, erhält man die Gesamtporosität. Die Ergebnisse werden graphisch als Porengrößenverteilung dargestellt. Die Gesamtporosität gibt man üblicherweise in Volumen-% an.

### 2.6.5 Mikrobiologische Untersuchungen im Labor

Im Rahmen der Trinkwasserverordnung (TVO) sind in regelmäßigen Abständen Untersuchungen zur mikrobiologischen Überwachung der Trinkwasserqualität durch zertifizierte Labore vorgeschrieben. Das Vorhandensein einer geringen Anzahl von Bakterien im Trinkwasser ist als normal anzusehen, da das Wasser keimarm, also nicht steril, sondern frei von pathogenen, krankmachenden Keimen sein muss.

Ebenso ist anzunehmen, dass stets geringe Bakterienzahlen auf Wänden und Böden der Trinkwasserbehälter zu finden sind.

Falls das Trinkwasser nach dem Aufenthalt im Behälter Zellzahlen aufweist, die über von der TVO vorgegebenen Grenzwerten liegen, sollte zunächst geprüft werden, in wie weit Betriebsparameter, die vor dem Zulauf des Behälterwassers liegen, verändert wurden. So können während der Trinkwasseraufbereitung Änderungen im Bereich von Filtersystemen, Installationen oder Desinfektionsmaßnahmen einen starken Einfluss auf die mikrobielle Population im Behälter haben.

Verlaufen diese Prüfungen ohne Befund, kann eine optische Untersuchung der Innenflächen eines Behälters Aufschluss über Kontaminationsquellen im Behälterwasser geben. Stark unregelmäßige Oberflächen oder offensichtliche, makroskopische Schäden wie z.B. Risse, aufgelöstes Beschichtungsmaterial bieten geeignete Lebensbedingungen für Bakterien. Kunststoffmodifizierte Werkstoffe oder organischen Materialien, die z.B. für Dehnungsfugen oder Türdichtungen eingesetzt werden, können als zusätzliche Nährstoffquellen von den Mikroorganismen direkt genutzt, oder in das Behälterwasser eingetragen werden. Alle im Trinkwasserbereich verwendeten Bau- und Hilfsstoffe sollten für den Einsatz im Trinkwasser geeignet sein, da über Diffusionsprozesse potenzielle Nährstoffe auch aus „verdeckten“ Bereichen für ein zusätzliches Wachstum von Mikroorganismen zur Verfügung stehen können.



Biofilm verursacht durch organische Inhaltsstoffe im Konstruktionsbeton (Diffusionsprozesse durch die Beschichtung)

Mikrobiologische Kultivierungsmethoden geben erste Hinweise über mögliche erhöhte Zellzahlen in Trinkwässern und auch auf Behälterbeschichtungen.

Mit diesen Methoden kann lediglich ein geringer Anteil aller im Behälter vorkommenden Bakterienspezies detektiert werden. Darüber hinausgehende molekularbiologische Untersuchungen, die das Erbgut von Mikroorganismen analysieren (PCR - Polymerase Kettenreaktion) oder mikroskopische Methoden (FISH - Fluoreszenz In-Situ Hybridisierung), werden durch ihren hohen technischen Aufwand Forschungslaboratorien vorbehalten bleiben.

## 2.7 Schadenskataster

Aus den unter 2.3 bis 2.5 genannten Untersuchungen wird ein Schadenskataster angelegt, welches Grundlage weiterer Beurteilung ist. Es dient der Eigenüberwachung der Zustandsanalyse, der weiteren Planung und Klärung eventuell später auftretender Fragen.

## 3. Ermittlung der Grundlagen

In diesem Planungsabschnitt (vergleichbar dem Leistungsbild der HOAI - Teil VII - Leistungsphase 1) werden alle Bedingungen zusammengestellt. Danach erfolgt eine Gegenüberstellung und Beschreibung aller notwendigen Schritte zur erfolgreichen Instandsetzung.

### 3.1 Randbedingungen

Überprüfung der Außenabdichtung (DVGW W 300 [1]) mit Wärmedämmung sowie ausreichender Erdüberdeckung (Aufmaß/ Suchschürfung). Undichtigkeiten in der Außenabdichtung können durch trocknen der Wasserkammern und Bewässern von außen überprüft werden.

Hierzu sollten die verschiedenen klimatischen Erfordernisse der einzelnen Bauwerksbereiche berücksichtigt werden.

- Wasserkammern
- Einstiegsbereiche zu den Wasserkammern
- Eingang und Schaltzentrale (elektronische Geräte)
- Rohrkeller

Alle Wasserkammern und deren Einstiegsbereiche müssen ausreichend gedämmt sein, da es sonst zu vermehrter Kondenswasserbildung mit Schädigung der Oberfläche kommt.

Bisher verwendete Reinigungsmittel (Hersteller, Art, Reinigungssubstanz, Konzentration, Reinigungsintervalle) werden ermittelt, um in Zukunft unnötige Schäden durch einen chemischen Angriff zu vermeiden und die Reinigung zu optimieren.

Wenn kein kalklösender Angriff vorliegt, bildet sich im Idealfall eine Schutzschicht (Carbonathaut) auf der Betonoberfläche aus. Außerdem kann sich im grenznahen Bereich des Wassers der pH-Wert erhöhen und für die Oberfläche somit eine passivierende Deckschicht bilden. Dem wirkt jedoch eine hohe Durchströmungsrate der Wasserkammern und häufige Reinigungen unter Zuhilfenahme mechanischer Hilfsmittel entgegen.

## Instandsetzung von Trinkwasserbehältern

Sofern keine großen Ablagerungen aus dem Wasser vorliegen, sollte auf eine mechanische Reinigung verzichtet werden, um die natürliche „Schutzschicht“ der Oberfläche zu erhalten.

Überprüfung auf technische Abtrennungsmöglichkeiten zwischen den Wasserkammern untereinander und zum Vorraum sind zur Aufrechterhaltung der Wasserversorgung während den Reinigungs-, Wartungs- und Instandsetzungsarbeiten erforderlich. Die räumliche Trennung dient außerdem dem Schutz des Vorraums, der Elektrik und den Installationen vor Feuchte und Schmutz.

Überprüfung des Be- und Entlüftungssystems des Behälters auf Betriebssicherheit (ausreichend dimensionierte Belüftung), Sabotageanfälligkeit sowie Schutz gegen Verunreinigungen (Staub, Kleintiere).

Für die Sanierung ist die Verfügbarkeit von Wasser in Trinkwasserqualität, Entsorgungsmöglichkeit von Abwasser und Strom (z.B. 380 V 32 A Eurostecker) erforderlich.

### 3.2 Wasseranalyse

Die Überprüfung der Wasser-Werkstoff-Verträglichkeit ist Grundvoraussetzung für eine belastbare Beurteilung.

Bei Wasseraufbereitungs- und Desinfektionsanlagen sollte die kontinuierliche Funktionalität überprüft werden. Dies geschieht z.B. durch Gegenüberstellung der beurteilungsrelevanten Parameter über einen längeren Zeitraum (mind. 3 Jahre) die den Wasseraanalysen zu entnehmen sind.

Außerdem sind grundsätzlich getrennte Analyse des Zulauf- und Entnahmewasser empfehlenswert. Ein Vergleich dieser Wasseranalysen liefert Hinweise auf die Reaktion des Wassers mit dem Werkstoff im Behälter.

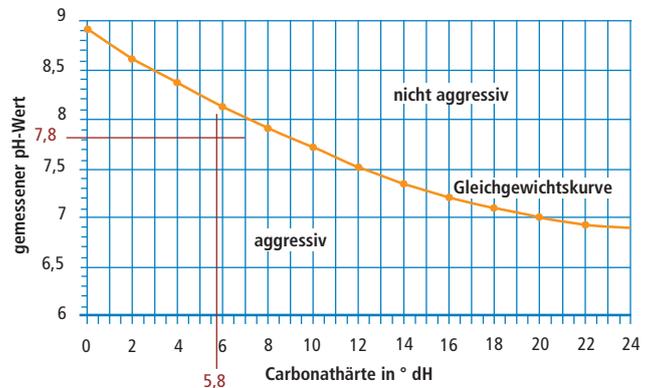
Um sicherzustellen, dass bei einem Ausfall einer Wasseraufbereitung das geplante System vorübergehend beständig ist, sollte die Wasserqualität vor der Aufbereitung ebenfalls berücksichtigt werden.

Bei Ausfall oder Fehlfunktion einer Aufbereitungs- und/oder Desinfektionsanlage können Auskleidungen oder Beschichtungen beschädigt werden.

Für die Beurteilung des Wassers bei zementgebundener Materialien sind die Grenzwerte nach DIN 4030 für die Beurteilung zu Grunde zu legen.

Untersuchung	Angriffsgrad		
	schwach angreifend	stark angreifend	sehr stark angreifend
ph-Wert (-)	6,5 ... 5,5	5,5 ... 4,5	unter 4,5
kalklösende Kohlensäure CO <sub>2</sub> (mg/l)	15 ... 40	40 ... 100	über 100
Ammonium NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/l)	15 ... 30	30 ... 60	über 60
Magnesium Mg <sup>2+</sup> (mg/l)	300 ... 1000	1000 ... 3000	über 3000
Sulfat SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/l)	200 ... 600	600 ... 3000	über 3000

Das **Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht** eines Wassers kann anhand der Carbonathärte und des pH-Wertes über eine Gleichgewichtskurve näherungsweise empirisch ermittelt werden.



Quelle-Diagramm: WTA-Schriftenreihe, Heft 12, 9-24 (1996)

Zementsteinangreifende Wässer können die Dauerhaftigkeit der gesamten Versorgungsanlage beeinträchtigen. In solchen Fällen verlängert eine Aufbereitungsanlage die Nutzungsdauer.

Hierbei sollte deren Funktion stetig überprüft werden, da eine mangelnde Funktion schädigend wirken kann.

Fallbeispiel: Schädigung einer zementgebundenen Beschichtung durch zementsteinangreifendes Wasser im Jahr 2007

In einem Wasserwerk in Norddeutschland wird das Rohwasser durch parallel schaltbare Filter zu Reinwasser aufbereitet. Hierbei wird unter anderem der pH-Wert des Wassers durch die Durch-

strömung von Dolomitgestein heraufgesetzt. Das Reinwasser wird in 2 unterschiedlich großen Saugbehältern (300 m<sup>3</sup> und 1.800 m<sup>3</sup>), die nacheinander durchströmt werden, gespeichert.

Nach 3 Jahren wurde bei der turnusmäßigen Reinigung eine Schädigung der Oberflächen festgestellt, obwohl die Werte der regelmäßigen Wasseranalysen (pH-Wert) keine Auffälligkeiten zeigten.

Laboruntersuchungen ergaben, dass die Schädigung des Zementmörtels auf einen Angriff durch zementsteinangreifendes Wasser zurückzuführen ist. Die Schädigungen in der kleinen WK waren wesentlich stärker als in der großen WK.

Eine genauere Auswertung der Wasseranalysen über die vergangenen 3 Jahre zeigte, dass der pH-Wert und die Carbonathärte schwankten. Durch Einzeichnen der Schnittpunkte der unterschiedlichen pH-Werte und Carbonathärte in die Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichtskurve wurde das Absinken in den „aggressiven Bereich“ deutlich sichtbar. Die Filter wurden häufig zu schnell durchströmt, die Kontaktzeit zwischen Kalkgestein und Wasser war zu gering. Die unterschiedlich starke Ausprägung der Schädigung in den beiden Wasserkammern lag an der ca. 12-fach höheren Durchströmung des kleinen Saugbehälters. Durch die stetig frische Zufuhr zementsteinangreifenden Wassers und der höheren Strömungsgeschwindigkeit, die der Bildung einer natürlichen Schutzschicht entgegenwirkt, wurde der Angriff verstärkt (vergleiche Abschnitt 2.4).

**Fazit:** Es reicht nicht aus, eine Wasseraufbereitungsanlage ohne wiederkehrende Qualitätskontrolle einzurichten und zu betreiben. Eine ausreichende Aufhärtung des Wassers kann nur bei ausreichender Kontaktzeit zwischen Kalkgestein und Wasser erreicht werden. Das Kalkgestein verbraucht sich und muss frühzeitig ergänzt werden. Bei der regelmäßigen mikrobiologischen Wasseranalyse sollte deswegen das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht ermittelt und beachtet werden.

### 3.3 Gegenüberstellung: Ist-Zustand / Soll-Zustand

Die gründliche Information des Fachplaners über den Ist- und Sollzustand soll den Betreiber für die zu ergreifenden Maßnahmen sensibilisieren. Die Qualität dieser Informationen kann das Vertrauensverhältnis zwischen Betreiber und Planer stärken.

#### Ist-Zustand

Die Ursachen der festgestellten Schäden werden aus der Zustandsanalyse ermittelt. Daraus erstellt der Fachplaner eine Prognose für die unter diesen Betriebsbedingungen zu erwartenden Versorgungssicherheit und Nutzungsdauer des Bauwerks.

Sofern tragende Bauteile in Mitleidenschaft gezogen werden, ist die Beurteilung eines Statikers erforderlich.

#### Geforderter Soll-Zustand

Die Anforderungen an den Trinkwasserbehälter nach der Instandsetzung sind mit denen eines neuen Behälters gleichzusetzen. Die Einhaltung der DIN EN 1508 und DVGW W 300 [1] wird überprüft.

Empfehlenswerte Anforderungen sind:

- Keine negative Veränderung des Wassers.
- Porenarme und glatte Oberflächen.
- Kein Einsatz von Werkstoffen, die bioverfügbare Komponenten beinhalten.
- Kontrollierbarkeit der statischen Bausubstanz.
- Wartungsfreundliche dauerhafte Oberflächen.

#### Folgerung:

**Die richtige Maßnahme ergibt sich aus dem Instandsetzungsbedarf des Bauwerks, der Wasser-Werkstoff-Verträglichkeit und den Anforderungen im Betriebszustand.**

### 3.4 Anlegen von Musterflächen

Bei schwer einschätzbaren Untergründen ist für die Auswahl der Instandsetzungsverfahren und die Ermittlung von Kosten das Anlegen von Musterflächen sinnvoll. Dabei werden notwendige Abtrags- und Rautiefen, geeignete Verfahren und Materialien ermittelt. Durch Qualitätskontrollen an den Musterflächen kann das für dieses Objekt optimale Verfahren/Material bereits in der Planungsphase ermittelt werden.

Bei Rissen und Fugen besteht die Möglichkeit über Materialbrücken festzustellen, ob Bauwerksbewegungen vorhanden sind. Dazu müssen die Bauwerke allen möglichen Lastzuständen ausgesetzt werden.



### 3.5 Ziel einer Instandsetzung

Bei Erneuerungsarbeiten an Trinkwasserbehältern muss, soweit ökonomisch und technisch möglich, darauf Wert gelegt werden, dass nach Abschluss dieser Arbeiten die selben Anforderungen wie an einen neuen Behälter erfüllt werden. (DVGW W300 10.1 [1])

Dabei sollte die Versorgungssicherheit im Vordergrund stehen.

### 3.6 Zusammenfassung

Für den Umfang der Sanierung und der Wahl des richtigen Auskleidungssystems ist immer der Ist-Zustand maßgebend.

Je vollständiger dieser durch Zustandsanalysen ermittelt wird, desto konkreter lässt sich das Instandsetzungskonzept formulieren. Nur so kann die wirtschaftlichste Lösung gefunden werden, welche die Hygiene und Versorgungssicherheit dauerhaft garantiert.

## 4. Weitere Informationen

Wir werden weitere Fachinformationen in unserer Tool-Box im Internet zum Download zur Verfügung stellen.

Hier finden Sie Ausschreibungstexte auf der Grundlage gängiger als auch zukünftiger Qualitätsanforderungen sowie Eigenüberwachungsblätter.

Dieser Bereich wird fortlaufend aktualisiert und erweitert.

**Sie finden diese unter: [www.aquazem.de](http://www.aquazem.de)**

## 5. Vorschau

Weitere Veröffentlichungen behandeln u.a. nachstehende Themen:

- Entscheidungshilfen zur Wahl des richtigen Instandsetzungskonzeptes
- Einsatzbereiche und Grenzen von Oberflächenschutzsysteme und Auskleidungen
- Formuliere Qualität in der Leistungsbeschreibung
- Qualitätssicherung und Bauüberwachung während der Ausführung
- Qualitätskontrolle, Abnahmekriterien,
- Betrieb, Wartung

## 6. Literaturhinweise

[1] DVGW Arbeitsblatt W 300 „Planung, Bau, Betrieb und Instandhaltung von Wasserbehältern in der Trinkwasserversorgung“

[2] WTA-Merkblatt 2-04-07/D Beurteilung und Instandsetzung gerissener Putze an Fassaden, Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft e.V. (Hrsg.), Referat 2 Oberflächentechnik, München, 2007

[3] F.W. Locher, W. Rechenberg und S. Sprung, Beton nach 20jähriger Einwirkung von kalklösender Kohlensäure, Beton, 34, 193-198 (1984)

[4] DVGW Arbeitsblatt W 291 „Reinigung und Desinfektion von Wasserverteilungsanlagen“ März 2000

[5] DAfStb-Richtlinie – Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen (Instandsetzungsrichtlinie) Oktober 2001



