

Zeitschrift: Cementbulletin
Herausgeber: Technische Forschung und Beratung für Zement und Beton (TFB AG)
Band: 54-55 (1986-1987)
Heft: 17

Artikel: Beton unter Wasser : Selbstschutz oder Auflösung des Gefüges?
Autor: Koelliker, Emil
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-153708>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 16.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Beton unter Wasser: Selbstschutz oder Auflösung des Gefüges?

Hydratation/Hydrolyse. Aufbau einer Schutzschicht. Diffusionsvorgänge.
Beständigkeit und Versagen des Selbstschutzes.

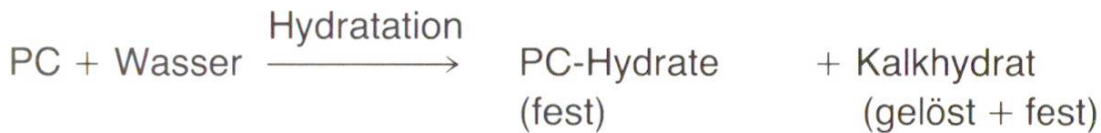
Zement – ein Glücksfall der Technik

Portlandzement – erfunden in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts und heute das weltweit meistverwendete hydraulische Bindemittel – hätte allenfalls Kuriositätenwert, wenn nicht das Glück seine Hand kräftig im Spiel gehabt hätte. Den meisten Lesern wird bekannt sein, dass hydraulische Bindemittel beim Mischen mit Wasser hart werden und unter Wasser auch hart bleiben. Die wenigsten werden aber wissen, dass dieses Hartbleiben nicht so selbstverständlich ist, sondern auf einem Glücksfall beruht. Nachfolgend wird dargelegt, warum dem so ist und wann man mit Ausnahmen zu rechnen hat.

Die chemischen Reaktionen von Zement mit Wasser

Zement reagiert mit Wasser und bildet dabei die festen Hydrate, die wir als Zementstein kennen. Diese Stufe nennt man «Hydratation». Sie ist technisch wertvoll und somit Grundlage der Betontechnologie. Diese Tatsache beruht auf der Eigenart, dass die Reaktionen hier normalerweise zum Stillstand kommen. In Ausnahmefällen folgen dann jedoch Vorgänge, die als «Hydrolyse» bezeichnet werden und zur Zerstörung des harten Zementsteins führen können. Diese Zersetzung durch Wasser ist unter dem Begriff «Auslaugen» wohl

Stufe I: Abbinden und Erhärten



Stufe II: Auflösung des Zementsteins

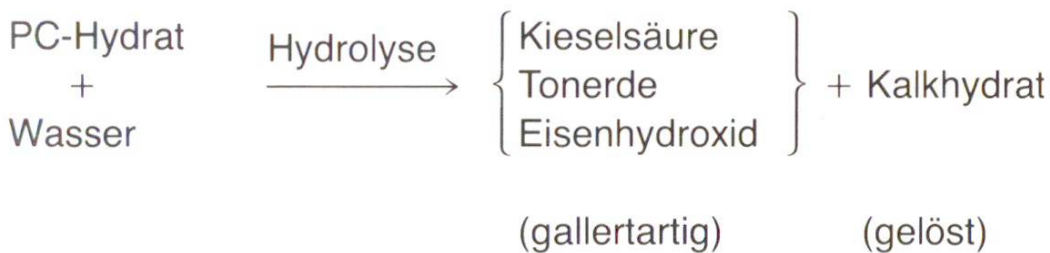


Abb. 1 Reaktionen von Portlandzement mit Wasser (Stufe I) bzw. von Portlandzement-Hydraten mit Wasser (Stufe II).

bekannter. Die hier interessierenden chemischen Reaktionen lassen sich gemäss Abb. 1 darstellen.

Die folgenden Ausführungen befassen sich vor allem mit der Frage, warum die unerwünschte Zerstörung des Betons durch Wasser nur selten eintritt – in der Tat so selten, dass Beton der Werkstoff für Wasserbau par excellence ist.

Beton schützt sich selbst gegen Wasser

Wir wissen wohl sehr viel über die Vorgänge des Abbindens sowie Erhärtens und über die Eigenschaften des Zementsteins. Bis heute gibt es aber kaum zahlenmässige Angaben, wie stark bzw. ob überhaupt der Zementstein von normalem (nicht aggressivem) Wasser angegriffen wird, wie das der Stufe II von Abb. 1 entsprechen würde. Sicher ist dieser Angriff ausserordentlich gering.

Als Beispiel sei ein über 100jähriges Trinkwasserwerk in der Westschweiz erwähnt. Abb. 2 zeigt die Oberfläche der Pumpenkammer, die 1886 mit einem Glattstrich aus Mörtel versehen worden war. Die kürzlich bei der TFB durchgeführten Untersuchungen liessen keinen Angriff erkennen, der auf eine Zersetzung des Zementsteins zurückzuführen wäre.

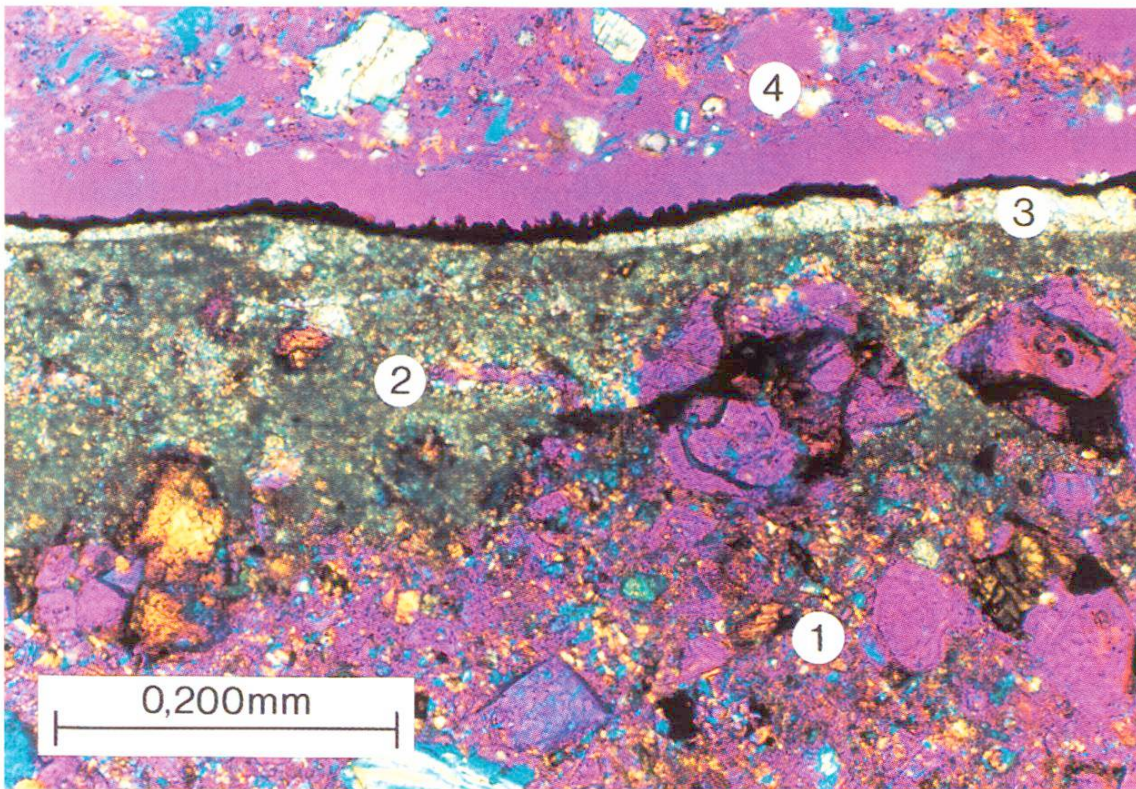


Abb. 2 Dünnschliff durch eine Mörteloberfläche, die während 100 Jahren dem fließenden Wasser ausgesetzt war (mikroskopische Aufnahme). ① Ursprüngliches Mörtelgefüge. ② Calcit-Einlagerung im Mörtelgefüge («sekundäres CaCO_3 »). ③ Calcit-Schutzschicht («primäres CaCO_3 ») mit Ablagerungen. ④ Einbettmasse aus Gips zur Präparierung des Dünnschliffs (an der Stelle des fließenden Wassers).

Dass aber die von der Theorie geforderte Auflösung des Zementsteins (Stufe II in Abb. 1) trotzdem stattfinden kann, erfährt man zum Leidwesen aller Beteiligten manchmal auch. So kann es vorkommen, dass ein Betongefüge vollständig aufgelöst wird und ein Schlamm aus Kalk, Kieselsäure sowie Hydroxiden von Eisen und Aluminium zurückbleibt. Ausserdem können Gewässer durch Trübung und alkalische Reaktion (bei $\text{pH} > 9$) verschmutzt und Kanalisationen verstopft werden. Diese in Abb. 1 dargestellten Vorgänge lassen sich durch chemische Gleichgewichte quantitativ beschreiben. Solche Gleichgewichte zeigen wohl, was man erwarten kann – sie sagen jedoch nichts über die Geschwindigkeit, mit welcher die Vorgänge ablaufen. Es besteht nämlich die Möglichkeit, dass die Reaktionen gebremst oder sogar ganz verhindert werden können. Es gibt Tabellen, um die Wirkung von Wasser auf Beton beurteilen zu können [1]. Wasser mit einem pH-Wert von mehr als 6,5 wird dort als «nicht aggressiv» bezeichnet. Dennoch gibt es immer wieder Fälle, in denen solches Wasser einen Angriff bewirkt. Die Untersuchungen, die von der TFB während der letzten Jahre gemacht wurden, erlauben eine Erklärung des sonst unverständlichen Verhaltens von Beton [2, 3]. So wurde gefunden, dass die ungebremsste Geschwindigkeit der Hydrolyse (Stufe II, Abb. 1) im Gegensatz zu

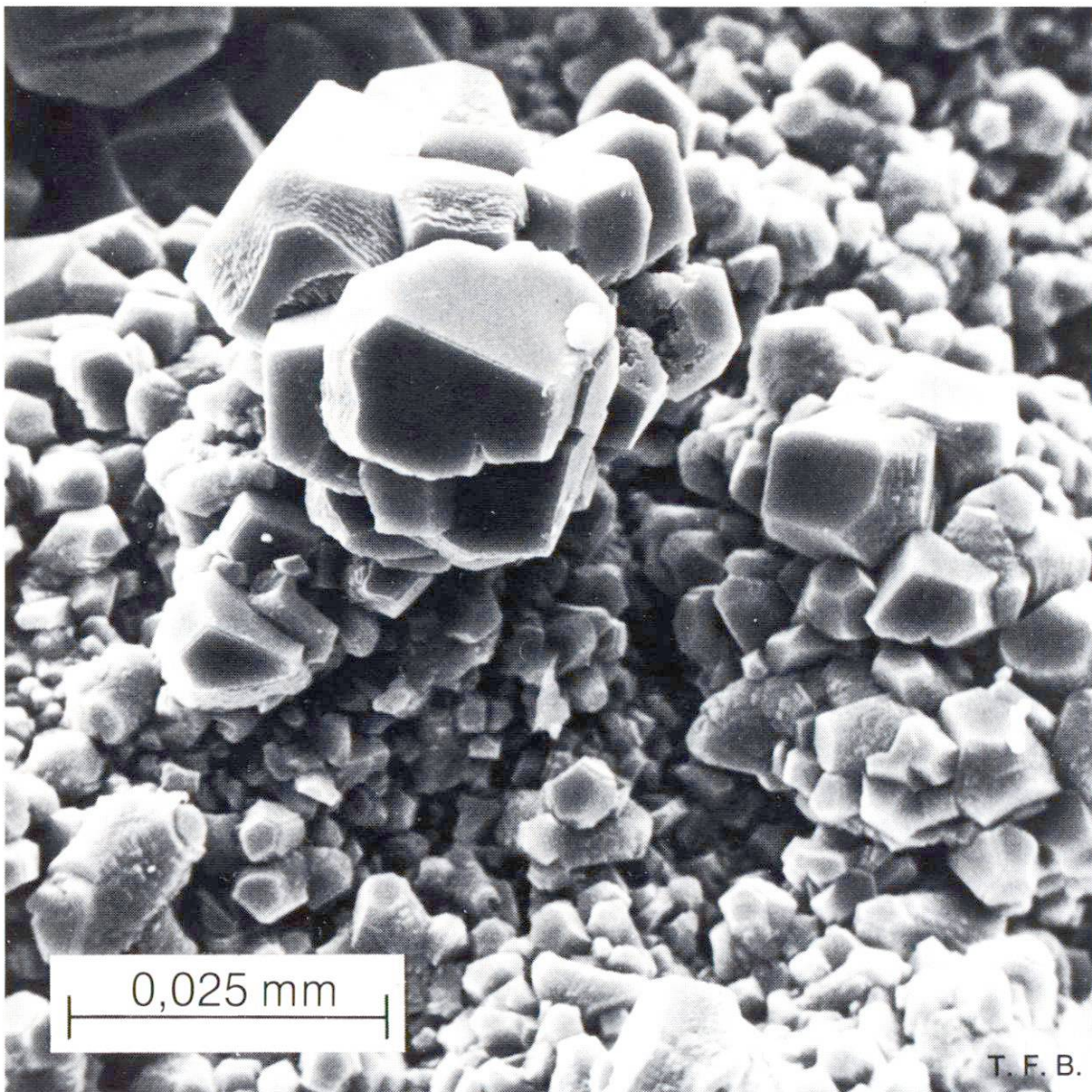
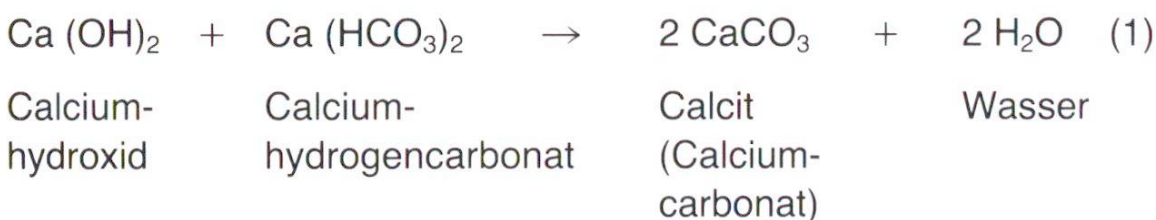


Abb. 3 Calcit-Schutzschicht auf einer Mörtelprobe, die dem fließenden Wasser ausgesetzt ist (REM-Aufnahme).

den Tabellenwerten nur wenig vom pH-Wert abhängt und selbst bei pH 11 noch recht hoch ist.

Es konnte aber auch gezeigt werden, dass die mit der Hydrolyse verbundenen Reaktionen durch «Schutzschichten» wirksam gehemmt werden können. Unter Wasser bilden sich diese Schutzschichten auf einer Betonoberfläche von selbst. Insbesondere ist die Calcitschutzschicht zu erwähnen, vgl. Gleichung (1) und Abb. 3. Ihre Dicke beträgt etwa $10\ \mu\text{m}$.



Diese Vorgänge sind nicht mit der Betonkarbonatisierung zu verwechseln. Die Betonkarbonatisierung verläuft an luftberührten

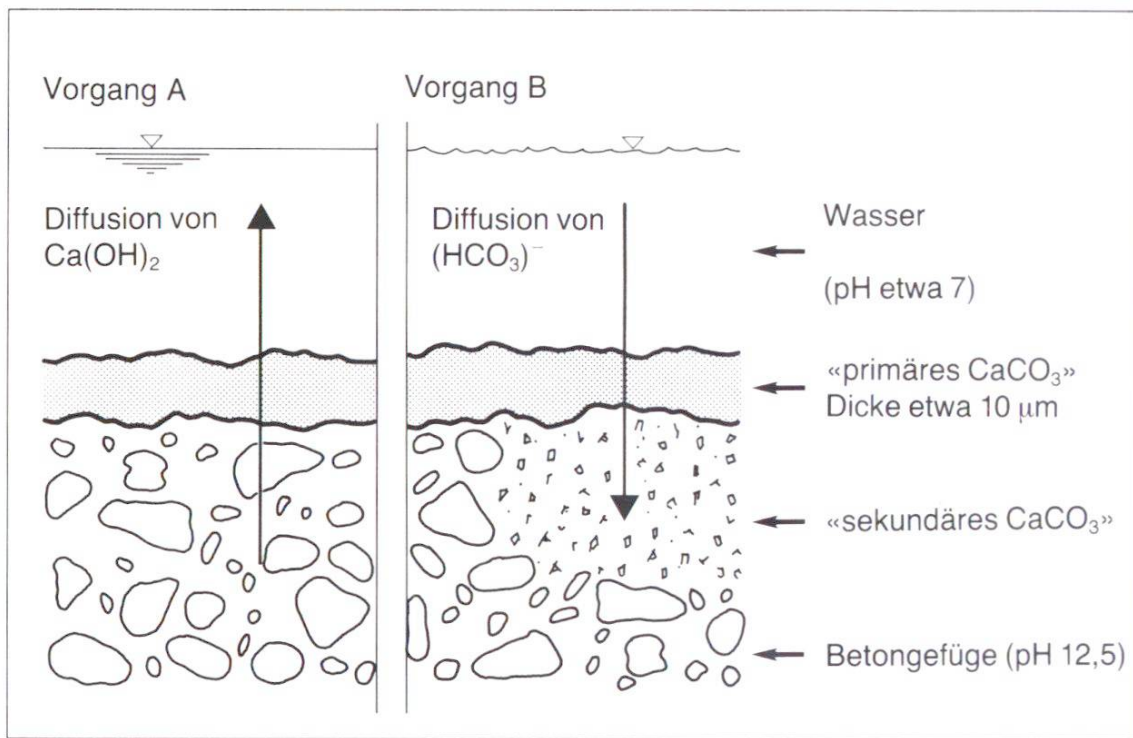


Abb. 4 Diffusionsvorgänge beim Kontakt von Beton mit Wasser. Vorgang A: Im stehenden bzw. reinen Wasser. Vorgang B: Im fließenden Wasser, das Kohlensäure enthält.

Betonoberflächen, indem das Calciumhydroxid mit der Kohlensäure der Luft reagiert.

Die erwähnte Schutzschicht in Wasser ist allerdings nicht dicht; sie enthält Poren, was zum Verstehen des Verhaltens von Beton unter Wasser führt. Generell kann man zwei Diffusionsvorgänge unterscheiden, die in Abb. 4 dargestellt sind.

Unterschiede von stehendem und fließendem Wasser

Im stehenden und im reinen Wasser löst sich Calciumhydroxid aus dem Betongefüge, also ganz ähnlich wie in einer Säure. Wegen der Diffusion von Ca(OH)_2 wird stehendes Wasser allerdings alkalisch, vgl. Vorgang A in Abb. 4. Allmählich erreicht es pH 12,5 (Gleichgewichtswert) und greift deshalb den Beton nicht mehr an. Dieses Wasser kann Kohlensäure (CO_2) aus der Luft binden, was z.B. in Wasserbehältern aus Beton zu Kalkschlamm führt. Ähnlich kann man auch die «Kalkschnäuze» erklären, womit man die hellen, scharf begrenzten Verfärbungen des Betons bezeichnet.

Im fließenden Wasser überwiegt jedoch die Versinterung des Betons, vgl. Vorgang B in Abb. 4. Bei der Auflösung von Kohlensäure (CO_2 , z.B. aus der Luft oder bei Anwesenheit von Kalkhärte) im Wasser bilden sich Hydrogencarbonationen ($\text{HCO}_3\text{)}^-$ und dringen durch die Poren der bestehenden Calcithaut in das Betongefüge. Dort bewirken sie eine Fällung von «sekundärem» Calcit. Das ist gleichbedeutend mit der fortschreitenden Abdichtung der Calcitschicht, bis der Beton vollständig abgeschlossen ist.

6 Beständigkeit des Selbstschutzes

Ist der Beton mit einer Calcitschicht absolut beständig gegen Wasser? – Zur Beantwortung dieser Frage muss man die Löslichkeit von Kalk bzw. Calcit in Wasser betrachten. Wenn sie auch gering ist (etwa 5,6 mg/l), so darf man sie doch nicht vernachlässigen. Normales Trinkwasser enthält allerdings wesentlich mehr Kalk in Form der Kalkhärte, die aus löslichem Calciumhydrogencarbonat besteht. Dessen Anwesenheit ist Voraussetzung für den geschilderten Abdichtungsmechanismus. Die Löslichkeit dieser Kalkverbindung ist abhängig vom CO_2 -Gehalt, weshalb man vom Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht des Wassers spricht. Eine stark überwiegende Mehrzahl der natürlichen Wässer befindet sich praktisch in diesem Gleichgewicht, d.h. sie können keinen zusätzlichen Kalk lösen. Trotz der als Stufe II bezeichneten Reaktionsmöglichkeit (Abb. 1) ist Beton mit der oben beschriebenen Calcithaut gegenüber einem solchen Wasser, soweit wir erkennen können, absolut beständig. Die in Abb. 2 gezeigte 100jährige Probe bestätigt diese Aussage.

Versagen des Selbstschutzes wegen aggressivem Wasser

Enthält das Wasser einen Überschuss an Kohlensäure, so kann es weiteren Kalk aufnehmen: Die Calcit-Schutzschicht löst sich auf, und der Beton wird angegriffen, wie es beim Einwirken von Säure geschieht. In der Wasserchemie kennzeichnet man das Kalklösevermögen des Wassers mit dem «Kalksättigungsindex» [4]. Wasser, das Kalk zu lösen vermag, wirkt aggressiv auf Beton.

Versagen des Selbstschutzes beim Auslaugen

Wenn wir nun die Beständigkeit des Betons gegen Wasser erklären können, so bleibt noch der Mechanismus des Auslaugens zu diskutieren, das – wie eingangs erwähnt – zu einer vollständigen Zerstörung führt. Dieser Prozess kann stattfinden, auch wenn das Wasser nach [1] «nicht betonaggressiv» ist.

Voraussetzung für den oben besprochenen Selbstabdichtungsmechanismus ist die mässige Durchlässigkeit der Calcit-Schutzschicht. Wenn nun das Betongefüge an sich wasserdurchlässig ist und wenn überdies Wasser durchsickert, so kann es nicht mehr zur Abdichtung kommen. Vermutlich erfolgt nämlich die Ausscheidung der Calcitkriställchen nur verzögert und deshalb in diesem Fall erst tiefer im Beton, also nicht mehr direkt unter der Schutzschicht. Der Kalk wird wiederum nach Gleichung (1) durch das stark alkalische Calciumhydroxid in Form von Calcit gefällt, und der pH-Wert des Wassers wird erhöht, vgl. Abb. 5.

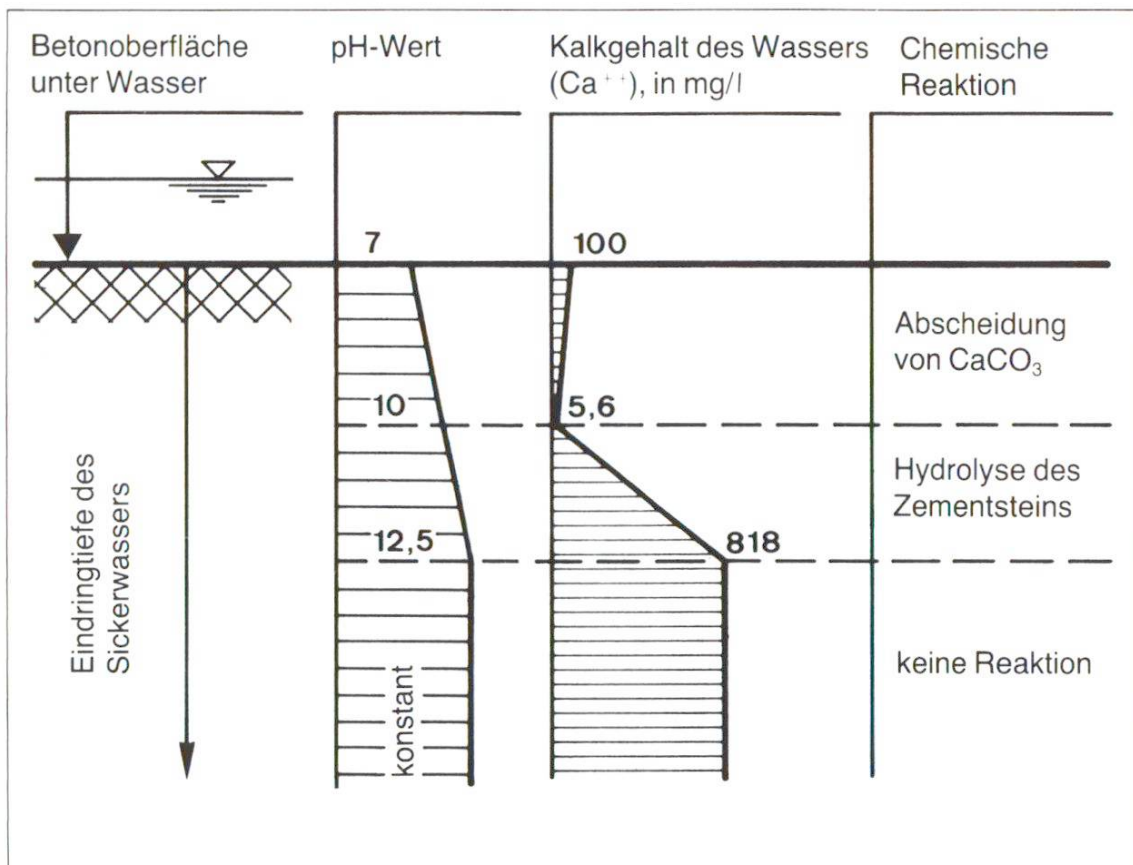


Abb. 5 Versagen des Selbstschutzes beim Auslaugen (schematische Darstellung). Der Kalkgehalt im Porenwasser verändert sich beim Durchsickern durch den Beton. Daraus lassen sich die beiden Zonen «Kalkabscheidung» und «Hydrolyse» ablesen.

Bei pH 10, also bei jenem Wert, der sich einstellt, wenn sich Calciumcarbonat in reinem Wasser löst, ist alles Hydrogencarbonat gebunden. Nimmt das Wasser noch weiteres Calciumhydroxid auf, so erhöht sich wohl der pH-Wert, doch es tritt keine Kalkfällung mehr ein. Aus Abb. 5 ist auch ersichtlich, dass das Lösevermögen des Wassers für Calcium im alkalischen Bereich beträchtlich grösser ist als im neutralen Bereich. Das heisst nichts anderes, als dass ein solches Wasser recht aggressiv auf den Beton wirkt, um so mehr als jetzt keine Carbonat-Schutzschicht mehr gebildet werden kann. Der Löseprozess geht solange weiter, bis der pH-Wert von etwa 12,5 erreicht ist, das heisst jener Wert, der sich in einer Zementwasserschlämme oder im Zementstein einstellt. Bei der weiteren Wanderung des Wassers durch den Beton besteht nun weder eine verstopfende noch eine lösende Wirkung. Es dürfte jedoch klar sein, dass sich die Zonen der Ausfällung von Kalk und jene der Auflösung des Calciumhydroxides und der Zementhydrate immer tiefer in das Innere des Betons erstrecken. Damit einher geht die Zerstörung bis zum Kalk- und Kieselschlamm, vgl. Stufe II in Abb. 1. Voraussetzung für dieses Zerstörungswerk ist – das sei betont – ein poröses, also minderwertiges Betongefüge sowie die Anwesenheit von Druckwasser.

8 Konsequenzen

Die geschilderten Zusammenhänge mögen kompliziert erscheinen. Sie erklären jedoch Schadenfälle infolge Aggressivität von weichem und chloriertem Wasser, Kalkablagerungen von Dachplattenbelägen, Verstopfung von Sickerbetonschichten usw. Die Konsequenz daraus ist, dass Beton bzw. in erster Linie der Zementstein, der mit Wasser in Kontakt steht, stets von hoher (d. h. wasserdichter) Qualität sein muss, wenn von ihm eine gute Dauerhaftigkeit erwartet wird. Dann nämlich wird er einen beständigen Selbstschutz aufbauen, was dem eingangs erwähnten Glücksfall entspricht.

Dr. Emil Koelliker

Literatur

- [1] *Cembureau*: «Emploi du béton en milieux agressifs». Recommandation 1978, Paris
- [2] *Koelliker, E.*: «Zur hydrolytischen Zersetzung von Zementstein und zum Verhalten von Kalkzuschlag bei der Korrosion von Beton durch Wasser». Betonwerk + Fertigteil-Technik, S. 234, 1986
- [3] *Koelliker, E.*: «Skins of Calciumcarbonate and their Significance for the Corrosion of Concrete». 8th International Congress on the Chemistry of Cement, Vol. V, p. 159–164, Rio de Janeiro, 1986
- [4] Schweiz. Lebensmittelbuch, Kap. 27 A, «Trinkwasser». Bern 1985