

Allgemeines

Seit etwa Mitte des letzten Jahrhunderts wird Stahlbeton in zunehmendem Maße als Sichtbeton eingesetzt. In den letzten Jahrzehnten musste man erkennen, dass ungeschützter Sichtbeton nicht ganz unproblematisch ist und sich teilweise erhebliche Oberflächenschäden einstellen. Entsprechend groß ist die Anzahl an Veröffentlichungen, die sich mit diesem Problem befassen. Leider ist die Mehrzahl dieser Veröffentlichungen nicht geeignet, den in der Praxis tätigen Bauingenieur, Bauplaner, Architekt etc. bei der Beseitigung oder Verhinderung derartiger Schäden zu unterstützen.

Das liegt einerseits daran, dass meistens hochwissenschaftlich theoretisiert wird, ohne dass für die beliebten Zahlen- und Formelspiele alle Grundwerte experimentell belegt oder auch nur bekannt sind. Andererseits wird meistens nur der Denkansatz des jeweiligen Fachgebiets des Verfassers wiedergegeben oder ein Verfasser greift auf nicht selbst überprüfte Daten eines anderen Verfassers zurück. Die Folge hiervon war, dass es zu vielen widersprüchlichen Erklärungen und Empfehlungen kam, die den Praktiker eher verwirrten, als ihm bei der Lösung der Probleme behilflich zu sein.

Es soll daher mit dieser Veröffentlichung versucht werden, dem nicht tieferschürfend wissenschaftlich tätigen Baufachmann und interessierten Laien die Probleme und Möglichkeiten mit einfachen verständlichen Worten aufzuzeigen. Der komplexe Chemismus, sowie die Physik der Kristall- und Hydratschichten, sollen dabei bewusst nur oberflächlich gestreift werden, da für den Praktiker die zwar wissenschaftlich hochinteressanten Vorgänge der Hydratbildung, Gefügeverdichtung, Carbonatisierung, Sulfatierung etc. nicht nützlich sind und ihn sicherlich wesentlich mehr das interessiert, was letztlich bei all diesen Vorgängen herauskommt, an Schäden, Schutz- und Sanierungsmöglichkeiten.

Ursachen

Die am Hochbau auftretenden Sichtbetonschäden können entsprechend der Häufigkeit ihres Auftretens in

1. die Korrosion von Bewehrungsstählen mit Absprengen des Deckbetons und
2. das schalenartige Abplatzen dünner Betonschichten ohne Beteiligung von Bewehrungskorrosion unterteilt werden.



Beide Schadenarten haben im Prinzip die gleichen Ursachen. Sie werden hervorgerufen durch Wasser und die in der Luft enthaltenen Schadgase, hauptsächlich Kohlendioxid (CO_2) und Schwefeldioxid (SO_2) aus Verbrennungsprozessen. Zementgebundener Beton enthält nach dem Abbindeprozess (der Hydratation) eine, je nach Zementart wechselnde Menge, Löschkalk (Calciumhydroxid, $\text{Ca}(\text{OH})_2$). Gelangt Wasser in die Poren des Zements, so löst sich ein Teil dieser Löschkalkmenge zu stark alkalischem Kalkwasser mit einem pH-Wert von 9-13. Da Stahl in stark alkalischer Umgebung oberhalb pH 9 passiv wird, das heißt keiner Flächenkorrosion unterliegt, ist im Beton ein natürlicher Korrosionsschutz für die Stahlbewehrung vorhanden.

Ein Produkt der

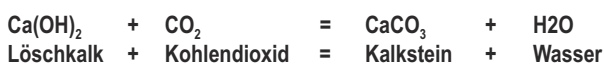
 **HYDRO CHEMIE**
INT GmbH



Dieser natürliche Korrosionsschutz hat jedoch einen Schönheitsfehler. Gelöschter Kalk reagiert in Anwesenheit von Wasser relativ rasch mit der Kohlensäure -genauer gesagt mit dem Kohlendioxid (CO₂)- der Luft zu wasserunlöslicher (und daher nicht mehr alkalischer) Kreide (Calciumcarbonat CaCO₃).

Mit zunehmender Reaktion wird also der natürliche Schutzfaktor Löschkalk im Beton verbraucht. Sobald der Löschkalkvorrat aufgebraucht ist, wird das in den Beton eindringende Wasser nicht mehr alkalisch und der Bewehrungsstahl kann rosten.

Die Kohlendioxidreaktion wird Carbonatisierung genannt.

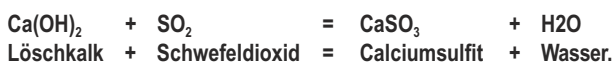


Auf diesem Vorgang beruht auch das Erhärten von Kalkmörteln. Die Carbonatisierungs-Geschwindigkeit von Beton ist von vielen Faktoren abhängig, wesentlich sind der Kohlendioxidgehalt der Luft, die Betonfeuchtigkeit und die Dichte des Betons.

In den Industrieländern oder von diesen beeinflussten Nachbargebieten kommt zu der Carbonatisierung jedoch noch eine weitere wichtige Reaktion des Löschkalks, die Reaktion mit SO₂. Die Reaktion mit SO₂ läuft im Vergleich zur Carbonatisierung vorrangig ab. Das heißt, setzt man gelöschten Kalk einem Gemisch aus CO₂ und SO₂ aus, dann verbindet sich zunächst SO₂ mit dem Kalk. Erst nach vollständigem Verbrauch des SO₂ verbindet sich der restliche Kalk mit CO₂.

Da unsere Luft inzwischen relativ große Mengen SO₂ enthält, reagiert ein Teil des im Beton vorhandenen Löschkalks also mit SO₂. Daher ist die Kalkreaktion im Beton keine reine Carbonatisierung, sondern eine Mischreaktion, die letztlich jedoch ebenfalls zur Betonneutralisierung führt. Auch die in der Luft enthaltenen Stickoxide reagieren mit Wasser sauer und beteiligen sich an der Neutralisation.

Die Reaktion des Löschkalks mit SO₂ darf jedoch bei Sichtbeton nicht unberücksichtigt bleiben, da sie einerseits starke Schäden anrichten, andererseits aber auch durchaus nützlich sein kann. In der ersten Reaktionsphase verbindet sich



Das Calciumsulfit reagiert in der zweiten Phase allmählich mit dem Luftsauerstoff



Der gebildete Gips (Calciumsulfat) bindet -wie bekannt- relativ große Mengen Wasser und erstarrt zu festem Gipshydrat CaSO₄ * 2 H₂O.

Bei diesem Vorgang wird also nicht nur das in der ersten Reaktionsphase gebildete Reaktionswasser, sondern darüber hinaus noch weiteres Umgebungs-Wasser gebunden.

Da sich Gips beim Erstarren um mehr als 1 % ausdehnt,

kommt es innerhalb des Betons zu einer Druckbildung (Hydratationsdruck), die zu schalenartigem Abplatzen der Betonoberfläche führen kann. Andererseits jedoch, wenn weniger Gips entsteht und der Gipsdruck kleiner als die Festigkeit des Betons ist, werden die natürlichen Betonporen verkleinert.

Ein Verkleinern der Betonporen bremst jedoch auch die Diffusion weiterer Schadgasmengen und verzögert so die Neutralisierungszeit des restlichen Löschkalks. Die entstehende Gipsmenge ist selbstverständlich sehr stark von dem Angebot an SO₂ abhängig. Sowohl die Carbonatisierung des Betons, als auch die Sulfatierung sind Reaktionen, die in Anwesenheit von Wasser in flüssiger Form (also nicht als Luftfeuchte) wesentlich schneller ablaufen, als durch Luftfeuchtigkeit.

Das lässt erkennen, dass die Regulierung der Betonfeuchte ein geeignetes Mittel zur Steuerung der Löschkalk-Neutralisierung innerhalb des Betons ist.

Ein weiteres Mittel die Neutralisierungszeit zu verzögern ist die Erhöhung der Diffusionsdichte des Betons gegenüber den erwähnten Schadgasen CO₂ und SO₂.

Das bekannte Absprennen der Deckbetonschicht durch rostenden Bewehrungsstahl ist also darauf zurückzuführen, dass ohne einen bewusst steuernden Eingriff, der im Beton enthaltene natürliche Schutzfaktor Löschkalk, durch eine allmählich immer tiefer in den Beton vordringende Neutralisierungszone, verloren geht.

Sobald die Neutralisierungszone bis zum Stahl vorgedrungen ist, beginnt dieser zu rosten. Hierbei bilden sich Korrosionsprodukte die ein Vielfaches des Volumens von Stahl haben, so dass sich allmählich ein hoher innerer Druck bildet, der bei Überschreitung der Betonfestigkeit den Deckbeton absprengt.

Allerdings ist auch für diesen Vorgang wieder die Zufuhr von Wasser nötig. Zur Stahlkorrosion kommt es also erst wenn die Neutralisierungszone den Stahl erreicht hat und somit dessen Umgebung nicht mehr alkalisch ist. Es ist oft versucht worden, die Geschwindigkeit mit der die Neutralisationszone im Beton vordringt, mathematisch in den Griff zu bekommen, um eine allgemeingültige Voraussage zu ermöglichen, wann mit Schäden zu rechnen ist. Dies ist, wie wir nach über 1100 Versuchen einsehen mussten, nicht möglich, da die Geschwindigkeit, mit der die Neutralisationszone nach innen wandert, von nicht abwägbaren Faktoren wie der Witterung (relative Luftfeuchte, Temperatur, Windstärke, Windrichtung usw.) beeinflusst wird und auch der beim Betonieren vorhandene Wasser Zementwert des jeweiligen Betonkörpers, durch Veränderung des Diffusionswiderstandes des Betons, hieran maßgeblich beteiligt ist. Die Schwierigkeit der mathematischen Erfassung des Problems soll hier nur kurz aufgezeigt werden und kann vom Leser sofort wieder vergessen werden, weil hiermit in der Praxis wirklich nichts anzufangen ist.

Klopper beschreibt in einer Veröffentlichung folgende Gleichung:

$$y = 2Dx$$

In dieser Wurzelbeziehung bedeuten:

y die Neutralisationstiefe
x die Zeit und **D** die in einer bestimmten Zeit festgestellte Neutralisationstiefe.



Klopfer schließt hieraus -mathematisch richtig-, dass die Neutralisationstiefe zunächst rasch ansteigt und allmählich langsamer wird, bei genügender Zeit jedoch eine beliebige Tiefe erreicht. Er folgert weiter, dass nur durch gasdiffusionsdichte Beschichtungen die Neutralisation des Betons gebremst werden kann.

Diese Theorie ist durch die Praxis längst widerlegt. Beim Abbruch bzw. der Untersuchung alter sehr dicker römischer Mauerwerke die mit reinem Kalkmörtel gemauert waren fand man nach rund 2000 Jahren in etwa 85 cm Tiefe noch nicht abgebundenen aktiven Mörtel. Das heißt, trotz des theoretisch sehr niedrigen Diffusionswiderstandes von Kalkmörtel konnte das Kohlendioxid in 2000 Jahren nicht tiefer als 85 cm hinein diffundieren.

Wie ist eine derartige Abweichung von der Theorie möglich?

Die aufgestellte Gleichung ist nicht vollständig, da sie den sehr wichtigen Faktor Betonfeuchtigkeit unberücksichtigt lässt. Dem Denkansatz liegt also eine immer gleichbleibende Betonfeuchte, also gleichbleibendes Wetter zugrunde. Gerade das Wetter unterliegt aber -wie jeder weiß- von Jahr zu Jahr sehr großen Schwankungen.

Unsere Untersuchungen zeigten, dass die oben aufgezeigte Carbonatisierungs-Reaktion auch nicht so glatt abläuft wie dies theoretisch anzunehmen ist. Wie wir bereits zeigten läuft die Carbonatisierung mit der Sulfatierung als Mischreaktion ab.

Der wichtigste Nachweis der uns bei den Untersuchungen gelang ist jedoch, dass sich bei langsamer Neutralisierungs-Reaktion ein wesentlich feinkristallineres Neutralisations-Produkt (Kreide und Gips) bildet, als bei einer schnellen Neutralisierungs-Reaktion. Je schneller die Reaktion abläuft, desto poröser und damit diffusionsfähiger ist die in den Poren entstehende und aus den Neutralisierungs-Produkten bestehende Masse. Steuert man die Reaktion also durch größtmögliche Verlangsamung, so haben die sehr feinen Kristalle die Möglichkeit in das Gewirr der Betonporen hineinzuwachsen und diese allmählich in einer dicker werdenden Schicht weitgehend auszufüllen, ohne einen schädlichen Berstdruck zu erzeugen. Damit wird die bereits langsame Reaktion noch weiter verlangsamt und kommt schließlich praktisch zum Stillstand. Nach unseren Untersuchungen kann dieser praktische Stillstand in einer Betontiefe von 15-20 mm erreicht werden, so dass tieferliegende Stähle von der Flächenkorrosion bewahrt bleiben.

Präventive Schutzmöglichkeiten:

Präventivmaßnahmen müssen in zwei Kategorien unterteilt werden:

1. Normalbeanspruchung durch Bewitterung und
2. Schwerbelastung, z.B. wenn Sichtbetonflächen dem direkten Auswurf niedriger Abgaskamine ausgesetzt sind.

Sofern eine normale Beanspruchung vorliegt, bietet eine tiefeindringende hydrophobierende Imprägnierung wie Lotupor eine geeignete Steuerungsmöglichkeit bei der Neutralisations-Reaktion.

Der Steuerungseffekt beruht darauf, dass eine etwa 8-10 mm tiefe Betonschicht hydrophobiert wird, also für Wasser in flüssiger Form praktisch undurchdringbar ist und der Beton somit trocken gehalten wird.

Messungen an nicht hydrophobiertem Beton ergaben, dass die Neutralisations-Geschwindigkeit bei einer relativen Luftfeuchte von 70 % am höchsten ist, bis etwa 30 % kontinuierlich abnimmt und unterhalb 30 % vernachlässigbar klein wird.

Hiergegen zeigten Untersuchungen an den gleichen Proben, jedoch an der 8-10 mm tief hydrophobierten Fläche eine Neutralisationsgeschwindigkeit die um 1-2 Zehnerpotenzen niedriger lag. An dieser Stelle muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass ein wichtiger Faktor dieses Erfolgs die sehr tiefe Hydrophobierung ist. An den gleichen Objekten vorgenommene Untersuchungen von Flächen, die mit einem Produkt hydrophobiert wurden, welches eine Eindringtiefe von 3mm brachte, wurde die Neutralisations-Geschwindigkeit im Mittel nur um 28 % reduziert.

Dieser Vorgang konnte experimentell folgendermaßen aufgeklärt werden:

Da Wasser in flüssiger Form bereits an der Betonoberfläche abperlt, ist es für die Neutralisations-Reaktion im Betoninneren verloren. Wenn hier von Wasser gesprochen wird, dann handelt es sich strenggenommen nicht um Wasser, sondern um (stark verdünnte) Säure (saurer Regen), denn CO_2 und SO_2 sind sehr gut wasserlöslich und bilden mit dem Wasser Säuren.

Der kapillare Wassertransport in den Beton läuft etwa 80 mal schneller ab, als der Transport feuchter Luft in die Reaktionszone. Außerdem ist die Säuremenge in einem eindringenden Wassertropfen um ein Vielfaches höher als in der in gleicher Zeit eindiffundierenden Luft.

Die Reaktion ist also auf Wasser angewiesen welches dampfförmig also als sog. Luftfeuchte in die Poren hineingelangen kann. Im Beton wird dieses Wasser jedoch erst dann wirksam, wenn es durch Taupunktunterschreitung aus der Luft austaut und somit wieder in flüssiger Form zur Verfügung steht. Erst in flüssiger Form reagiert es mit den Schadgasen zu den entsprechenden Säuren, die die Schadreaktionen hervorrufen. Dieser Vorgang bedingt einerseits große Temperaturschwankungen die zum Inneren des Betons kleiner werden, eine hohe relative Feuchte der Umgebungsluft und einen Luftaustausch zwischen dem hydrophobierten und dem tieferliegenden Porenraum. Nur dann gelangt das benötigte Wasser in Form hoher Luftfeuchte in die nun tiefer im Beton liegende Reaktionszone. Der Luftaustausch in Richtung des Beton-Inneren ist aufgrund der sehr großen Porenlänge (im Verhältnis zu ihrem Durchmesser) sehr gering.

Als positiver Nebeneffekt ergibt sich, dass auch die Diffusion der Schadgase CO und SO_2 stark behindert wird. Die Diffusionsrate nimmt unter diesen Bedingungen derart ab, dass experimentell das Fortschreiten der Neutralisierungszone nicht mehr nachweisbar ist.





Die auf theoretischen Erwägungen basierenden Aussagen vieler Veröffentlichungen, ein wirkungsvolles Bremsen der Neutralisations-Geschwindigkeit sei nur mit dicken gas-dichten Deckschichten zu erzielen, konnte also experimentell als falsch bewiesen werden.

Maßnahmen bei Beginn der Schäden

Ist es bereits zu Betonschäden durch Rostsprengung gekommen, dann ist dies ein sicheres Zeichen dafür, dass die Betonneutralisierung bereits einige oberflächennahe Bewehrungsstähle erreicht hat. Weitere Schäden im Bereich etwas tiefer liegender Bewehrungsstähle sind nur eine Frage der Zeit, wenn keine Gegenmaßnahmen getroffen werden.

Spätestens jetzt ist es höchste Zeit, die Neutralisations-Reaktion durch eine Lotupor-Hydrophobierung zu bremsen, um weitere Schäden zu minimieren.

Nach der Lotupor-Behandlung sollte mit der Sanierung der bereits vorhandenen Betonschäden 8-10 Monate

gewartet werden. Es ist damit zu rechnen, dass außer den bereits sichtbaren Abplatzungen noch Korrosionsstellen vorhanden sind, an denen der Berstdruck fast erreicht ist und deshalb möglicherweise noch einige Abplatzungen hinzukommen. Die Schadreaktionen laufen auch nach der Lotupor-Hydrophobierung (durch vorhandene Restfeuchte) allmählich langsamer werdend weiter, bis sie nach ca. 6 Monaten praktisch zum Stillstand kommen bzw. auf ihr Minimum reduziert sind.

Sanierungsmaßnahmen

Die Sanierung der Oberflächenschäden kann mittels



Betonsanierung an Block-Kühltürmen, unten fertig, oben in Arbeit

Zementmörtel oder den handelsüblichen Reparaturmörteln erfolgen. Es muss jedoch immer ein Haftmittel vorgestrichen werden, um den neuen Mörtel mit dem Altbeton zu verkleben. Handelsübliche Haftemulsionen sind verwendbar. Einen optimalen, da kraftschlüssigen Verbund zwischen Altbeton und Reparaturmörtel garantiert unser zweikomponentiges Haftharz PlastaPox UH, welches eine Haftfestigkeit erzeugt, die über der Festigkeit des Betons bzw. Reparaturmörtels liegt (s. PlastaPox-Info 1). Falls nach der Reparatur ein Anstrich des Betons vorgesehen ist, bedenken Sie, dass auch eine hochwertige, hydrophobierende Fassadenfarbe (z.B. Silikonharz-Fassadenfarbe) allein, aufgrund ihrer dünnen Schichtstärke, nie den gleichen Schutz gegen das Fortschreiten der Neutralisierung bietet, wie das tief in den Beton eindringende Lotupor.

Die Lotupor-Hydrophobierung ist jedoch eine hervorragende Grundierung für alle Dispersions-Fassadenfarben.

Das heißt, dass man den Beton mit Lotupor schützen und nachträglich Fassadenfarben auftragen kann.