



„Schadensmechanismen an Denkmälern aus Beton“

Jeannine Meinhardt

Die Entwicklung unserer modernen Gesellschaftssysteme ist eng verknüpft mit der Weiterentwicklung der Baukultur. An dieser Entwicklung hat das know-how zur Fertigung eines künstlichen, frei formbaren Steines, eines Kunststeines auf der Basis von Beton, einen wichtigen Anteil. Im Gegensatz zu sehr viel älteren Bindemitteln wie Luftkalk oder Gips zeichnen sich hydraulische Bindemittel, wie es der Beton ist, dadurch aus, dass sie durch die Reaktion mit Wasser erhärten. Die Verwendung hydraulischer Bindemittel zur Herstellung von Baustoffen reicht historisch weit zurück. Schwach hydraulische Eigenschaften wurden durch tonige Verunreinigungen im Kalkstein erzeugt, ohne dass dieser Zusammenhang zunächst unbedingt bewusst wahrgenommen wurde. Erst mit der Industrialisierung erfolgt die systematische Erforschung der Eigenschaften hydraulischer Bindemittel. Die Anfänge der Herstellung und Verwendung von hydraulischen Kalken zu Bauzwecken liegen um 1000 v. Ch.. So wurde im Zuge der Errichtung von Zisternen in Jerusalem mit dem Zusatz von Ziegelmehl vermutlich erstmals bewusst ein hydraulischer Stoff zur Herstellung eines wasserresistenten Kalkmörtels verwendet (*Stark & Wicht* 2000). Im 6. Jh. v. Ch. stellten ebenfalls phönizische Baumeister durch die Beimengung von Santorinerde als natürliches Puzzolan zum ersten Mal hydraulischen Kalkmörtel her (*Haegermann et al* 1964). Den Römern, die bis ins 3. Jh. vornehmlich mit Lehm gebaut haben, gelang es im 2. Jh. v. Ch. mit der Entwicklung des opus cementitium eine der bedeutendsten Neuerungen der Baugeschichte (*Haegermann et al* 1964). Dabei handelt es sich um ein Gussmauerwerk - hergestellt aus gebranntem Kalk und Bruchsteinen. Der sogenannte römische Beton kann als Ursprung des modernen Betons angesehen werden. Nach historischen Aufzeichnungen setzen die römischen Baumeister ganz bewusst die Wirkung des Zusatzes künstlicher und natürlicher Puzzolane ein und modifizierten so ihre auf Sumpfkalk basierende Mörtel mit Ziegelmehl und Puzzolanerden aus der Gegend um Neapel. Trasskalk fanden ab dem 16. Jh. in Mitteleuropa Verwendung (*Haegermann et al* 1964). Durch die beginnende Industrialisierung erhöhte sich der Bedarf an hydraulischen Kalken und puzzolanischen Zusatzstoffen für dauerhafte Industriebauten. In dem Zusammenhang kommt dann zunächst der Romanzement auf, der durch eine hohe Frühfestigkeit und eine hohe Dauerhaftigkeit im Außenbereich gekennzeichnet ist. Diese Eigenschaften prädestinieren dieses Material für die Formgestaltung (Stuck). Der Romanzement wird häufig auch als natürlicher Zement bezeichnet, da der Rohstoff bereits die Komponenten Ton und Kalk in einem natürlichen Verhältnis aufweist. Damit steht er im Gegensatz zum Portlandzement, bei dem der Ausgangsstoff durch Mischen von reinem Kalk und Ton, die aus unterschiedlichen Vorkommen stammen, erzeugt wird. 1824 leitete William Aspidin durch Brennen eben dieser künstlichen Mischung von Kalkstein und Ton eine neue Ära der Zementherstellung ein. 1843 gelang es ihm, den ersten wirklichen Portlandzement über der Sintertemperatur (1400 °C) zu brennen (*Locher* 2000). Ab 1850 wurde Portlandzement nach englischem Vorbild in Deutschland hergestellt.

Material

Beton besteht aus Zement, Zuschlagstoffen (Kies, Sand, Splitt in definierter Kornabstufung), Wasser und verschiedenen Zusätzen. Die Betonerhärtung erfolgt als chemische Reaktion zwischen Zement und Wasser. Die überwiegende Anzahl der Reaktionsprodukte daraus sind feinkörnige, schlecht kristallisierte Hydratphasen. Die wesentlichen Phasen sind Calciumsilikathydrat (CSH), Calciumhydroxid (Portlandit) und Calciumaluminatsulfathydrat, das die Hauptmasse des Zementsteins in einem Beton darstellt. Der Portlandit bewirkt zusammen mit den Alkalihydroxiden durch den damit einhergehenden hohen pH-Wert die Passivierung des Stahls, der gegebenenfalls zur Armierung in den Beton eingebracht ist.

Schadensprozesse

Mit der industriellen Herstellung hydraulischer Bindemittel ab dem frühen 19. Jh. wurden künstliche Steine verstärkt als gestalterische Elemente an Fassaden und zur Anfertigung von Skulpturen verwendet. Hauptsächlich anfangs als Natursteinimitation gedacht, entwickelte sich dieses Material sehr schnell zu einem eigenständigen Werkstoff. Im heutigen Sprachgebrauch versteht man unter Kunststein vor allem künstlich hergestellte Steinmassen, die künstlerisch gestaltete Oberflächen besitzen, was durch Verwendung spezieller Materialien (Zuschläge) bzw. eine handwerkliche Bearbeitung erreicht wird. An diesen Objekten laufen, ebenso wie an Denkmälern, die aus Sandsteinen aufgebaut sind auch, vielfältige Verwitterungsprozesse ab, auf die nachfolgend detaillierter eingegangen werden soll. Diese Prozesse ergeben sich entweder aus der Zusammensetzung des Materials oder werden primär durch Umwelteinflüsse induziert. Die Prozesse reichen von der Karbonatisierung des Betons im Zusammenhang mit der Korrosion der Bewehrung, über die sekundäre Ettringitbildung bis hin zu der Alkali-Kieselsäure-Reaktion. Hinzu kommen rein physikalische Schadensmechanismen, wie beispielsweise Frostverwitterung, Rostsprengung oder die Salzverwitterung. Alle Schadensprozesse sind von Wasser abhängig.

Karbonatisierung des Betons

Dabei handelt es sich um eine natürliche Veränderung des Materials, allerdings geht sie perspektivisch mit einer Absenkung des pH-Wertes einher, wodurch der Korrosionsschutz des Bewehrungsstahls aufgehoben wird. Das bei der Erhärtung des Zementes auskristallisierende Calciumhydroxid ist im Porenwasser stets zu einem gewissen Teil gelöst und bewirkt einen sehr hohen pH-Wert von 13,5, was eine permanente Passivierung der Bewehrung zur Folge hat. Dringt jedoch CO_2 über das kapillare Porensystem ein, wird aus Calciumhydroxid \rightarrow Calciumkarbonat. Am Anfang wird verbrauchtes Calciumhydroxid in der Porenlösung ersetzt, in dem im Zement eingelagerte Kalkhydratkristalle in Lösung gehen. Dadurch bleibt der pH-Wert weiterhin hoch. Ist das Calciumhydroxid verbraucht, wird der pH-Wert der Porenlösung gesenkt (< 9). Je nach Qualität des Betons kann dieser Prozess unterschiedlich lange andauern. Diese Reaktionsfront wandert allmählich von der Oberfläche in das Innere. Erreicht sie den Bewehrungsstahl, wird der Korrosionsschutz aufgehoben. Es kommt zur Rostbildung und in dem Zusammenhang zur Volumenzunahme der Stähle, was wiederum zu Rissen und Absprengungen führen kann. In den beiden abgebildeten Beispielen kann der Effekt dieses Prozesses bei dünner Überdeckung durch zementhaltigen Putz (siehe Abb. 1, links) und innerhalb eines Kunststeinelementes nachvollzogen werden (siehe Abb. 1, rechts).



Eine weitere Form der Bewehrungskorrosion kann durch einzelne freie Chloridionen (Cl-) auf der Oberfläche der Bewehrung ausgelöst werden. An dieser Stelle findet eine Auflösung des Stahls mit hoher Materialabtragungsrate statt. Da diese Prozesse zumeist von außen nicht unbedingt erkennbar sind, so können sie plötzlich durchaus zu statisch relevanten Schäden führen. Neben Chloridionen aus Edukten der Betonherstellung kommen als Quelle vor allem die Streusalzbeaufschlagung und das Salzspray in küstennahen Zonen für entsprechende Bereiche in Frage.

Abbildung 1: Bewehrungskorrosion -

links: Wandbild Dorothea Erleben, Halle-Neustadt, Treff 3;

rechts: Kunststeinelemente Gertraudenfriedhof Halle/Saale

Schädigende Ettringitbildung

Bei der schädigenden (sekundären) Ettringitbildung kommt es zu einer Rekristallisation von Ettringit im bereits erhärteten Betongefüge. Dabei reagieren Aluminatverbindungen des Zementsteins mit Sulfat (Gips) und viel Wasser zu Ettringit. Infolge des Einbaus von extrem viel Wasser in das Kristallgitter und die Ausbildung stengeliger Kristalle kommt es zu einer enormen Volumenvergrößerung (8fach). Diese kann wiederum zu Schädigungen des Gefüges führen.

Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR)

Die Ausgangssubstanz für diese Treibreaktion sind Alkalien (Na-K-Hydroxid), die vorwiegend aus hydratisierten Portlandzementklinkermineralen stammen oder auch erst später über Tausalze zugeführt werden. Diese reagieren mit alkaliempfindlichen Zuschlägen (reaktionsfähige Kieselsäure) zu einem Alkalisilikat-Gel. Bei Feuchtigkeitzufuhr quillt dieses Gel und der entstehende Quelldruck kann zur Gefügezerstörung führen. Diese Reaktion findet entsprechend auch an Autobahnen statt. Ein Beispiel für die Auswirkungen dieser Reaktion an Denkmalobjekten sind die Skulpturen Kuh und Pferd an der Giebichensteinbrücke in Halle/Saale. Sie wurden 1928



nach den Entwürfen von Gerhard Marks als Stampfbetonfiguren geschaffen. Als alkaliempfindlicher Zuschlag liegt in diesem Falle feinkörniger Porphyrt vor. Als Resultat kann an den Objekten eine intensive Rissbildung beobachtet werden, die durch Frostverwitterung noch verstärkt wird (siehe Abb. 2). An den Rissen treten Sinterfahnen aus, die neben Calciumkarbonat auch AKR-Nadeln aufweisen. Das Ziel der aktuell laufenden Restaurierungs-

Abbildung 2: Stampfbetonskulptur (Pferd) an der Giebichensteinbrücke in Halle/Saale,

rechts: Detail der Rissbildung an der Nordseite der Skulptur

arbeiten an den Skulpturen ist nach einer längeren Trocknungsperiode der Verschluss der Risse, um die Feuchtigkeit - als wesentlichen Reaktionspartner - von den Reaktionsflächen im Inneren der Skulpturen abzuhalten und somit den Reaktionsprozess zu verlangsamen.

Feuchteschäden und Frostschäden

Aufgrund der Dichteanomalie vergrößert Wasser sein Volumen um 9%, wenn es zu Eis gefriert. Wird das Eis in seiner Ausdehnung behindert, kommt es zu Kristallisationsdrücken, die im Material Spannungen hervorrufen und letztlich Risse verursachen können. Ist nur ein Teil des Porenraums mit Wasser gefüllt, kann der Eisdruck ausgeglichen werden, da flüssiges Wasser in freie Porenräume ausweichen kann. Diese Gegebenheiten liegen zumeist an Bauwerken vor, an denen der Abkühlungsprozess nicht gleichmäßig verläuft, sondern von außen nach innen. An einer Skulptur kann es aufgrund kleinerer Formate problematischer sein. Entsprechendes gilt für Ecken und Kanten von Objekten. Insbesondere horizontale Flächen, von denen das Schmelzwasser nicht abfließen kann, sind gefährdet. Tausalze verstärken das Problem, da durch deren Hygroskopie perspektivisch zusätzlich Feuchtigkeit im Material gebunden wird, wodurch das Austrocknen behindert ist.

Maßnahmen

Die Möglichkeiten der Restaurierung von geschädigten Denkmalen aus Beton und Kunststein sind nur beschränkt, da die chemischen Prozesse, die in den meisten Fällen zu den Schäden führen, nicht umkehrbar sind. Eine Grundvoraussetzung für eine dauerhafte Instandsetzung bzw. für die Verminderung des Schadensprozesses ist das Fernhalten von Feuchtigkeit. Nach einer eventuell erforderlichen gewissen Trocknung der Denkmalobjekte, der Ausbesserung bzw. Repassivierung schadhafter Armierungen und der Antragung verloren gegangener Teile ist ein zuverlässiger Verschluss der Risse anzustreben. Darüber hinaus sind auch Festigungen des Betongefüges (z.B. mit Kieselsäureestern) möglich. Die verwendeten Materialien müssen unbedingt an die jeweilige Objektsituation und das Restaurierungsziel angepasst werden. Insbesondere für die Rezeptur der Ergänzungen ist es von entscheidender Bedeutung, Voruntersuchungen am Originalmaterial bezüglich feuchtetechnischer Kennwerte und der Festigkeits- und Verformungseigenschaften durchzuführen, um eine optimale Anpassung der physikalischen Parameter der Ergänzungsmaterialien zu erreichen. Nur so kann eine Nachhaltigkeit der Maßnahmen und eine Vermeidung von Folgeschäden erzielt werden. In Einzelfällen, in denen die chemischen Verwitterungsprozesse im Inneren von Skulpturen soweit fortgeschritten sind, wird auch die Schaffung von Kopien bzw. die Verbringung in den Innenraum zu erwägen sein.

Kontakt:

Schlauer Fuchs



Dr. Jeannine Meinhardt
Institut für Diagnostik und Konservierung an
Denkmälern in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V.
Domplatz 3
06108 Halle/Saale
Tel.: +49 (0)345 472257-22
Fax: +49 (0)345 472257-29
E-Mail: meinhardt@idk-info.de

Unsere Schlaue-Fuchs-Frage zu
diesem Beitrag lautete:

Ab wann wurden künstliche
Steine verstärkt als gestalterische
Elemente an Fassaden und zur
Anfertigung von Skulpturen
verwendet?



<http://www.idk-info.de/>