

2000 Jahre alte Betonmischungen verblüffen Ingenieure

Das Geheimrezept des Römerbetons

Beton aus der Römerzeit ist extrem beständig. Endlich sind Forscher der Zusammensetzung des Opus caementitium auf die Spur gekommen

von Hartmut Netz

Beton hat das Antlitz der Welt verändert. Rund 7,5 Milliarden Kubikmeter des Materials, das sich in fast jede Form gießen lässt, werden weltweit pro Jahr verbaut. Doch was als Baustoff der Moderne gilt, hat bereits die Antike auf festen Grund gestellt. Opus caementitium, die antike Form des Betons, bildete das Fundament, auf dem die Römer ihr Weltreich errichteten. Fernstraßen, Brücken, Aquädukte, Zisternen, Hafenanlagen und andere Großbauwerke – all das, was die römische Expansion erst ermöglichte, wurde aus dem Römerbeton errichtet. Viele dieser Monumente haben

2000 Jahre und länger überdauert – im Gegensatz zu heutigen Betonbauten, von denen manche bereits nach 20 Jahren zu bröckeln beginnen.

Umweltfreundlich und druckfest

Die hohe Beständigkeit des Römerbetons gegen Wind und Wetter fasziniert Wissenschaftler seit geraumer Zeit. Von dem Rezept des antiken Werkstoffs erhoffen sie sich neue Impulse für die heutige Bauwirtschaft. Denn die Kenntnisse der antiken Baumeister könnten helfen, zeitgenössische Baumaterialien technisch und auch finanziell zu optimieren: Opus caementitium, das „Werk aus Bruchstein“, ließ sich weit umweltfreundlicher und kostengünstiger herstellen als moderner Beton.

Der Römerbeton trat seinen Siegeszug im 2. Jahrhundert v. Chr. an. Das Gemisch besteht aus gebranntem und gemahlenem Kalk, Vulkanasche, Ziegelmehl und Zuschlagstoffen wie Sand und Kies. Nach der Zugabe von Wasser härtet

es aus und hat eine ähnliche Druckfestigkeit wie moderner Beton.

Antiker und heutiger Beton ähneln sich zwar, doch heutzutage werden andere und deutlich mehr Stoffe beigemischt, etwa chemische Zusätze wie Fließmittel. Daraus entstehen je nach Mischung unterschiedliche Sorten. Im modernen Beton reagiert – allgemein gefasst – Zement, der aus Flugasche, gebranntem Kalk und Ton besteht, mit Wasser und legt sich als Bindemittel um Körner von Sand, Kies oder Splitt.

Schöne Fassade vor grauem Kern
Anfangs gossen die römischen Bauleute mit Opus caementitium nur Fundamente, später errichteten sie ganze Gebäude daraus. Im Hochbau mauerte man dafür zwei Schalungen aus Steinquadern oder Ziegeln auf, in die anschließend das Opus caementitium gegossen wurde. Man verwendete auch Holzschalen, die nach dem „Vergießen“ des Betons abgenommen werden konnten. „Der Begriff Vergießen trifft es aber nicht genau“, sagt Gregor Döhner, Archäologe am Labor für experimentelle Archäologie in Mayen, einer Zweigstelle des Römisch-Germanischen Zentralmuseums. „Opus caementitium wurde lagenweise eingestampft.“ Das geschah vermutlich mit Stampfgeräten aus Metall oder Holz, mit denen der Beton verdichtet wurde. Auch heute gehen Betonarbeiter Schicht für Schicht vor – allerdings greifen sie zu elektrischen

Kaiser Vespasian und Titus ließen das Kolosseum zwischen 72 und 80 n. Chr. für öffentliche Spiele errichten. Im Kern besteht der Bau aus Beton.





Die freitragende Kuppel des Pantheon in Rom ist eine der größten der Welt – ihr Innendurchmesser beträgt 43,30 Meter. Das Dach des 1900 Jahre alten Tempels besteht aus dem antiken Beton Opus caementitium, der aus statischen Gründen zur Öffnung hin immer dünner gegossen worden.

Flaschenrüttlern, um die Luft aus dem Beton entweichen zu lassen.

Nach dem Abbinden des Betons – wenn er fest, aber noch nicht belastbar ist – ließen die römischen Bauleute die Schalenmauern stehen. Das farbenfrohe Ziegelmauerwerk antiker Gebäude ist daher oftmals nur schöner Schein. Denn hinter der Ziegelfassade verbirgt sich der tragende graue Betonkern.

Viele der römischen Monumentalbauten wie das Kolosseum sind zu großen Teilen aus dem antiken Beton errichtet. Der gewaltige Kuppelbau des Pantheon wäre ohne Opus caementitium nicht entstanden. Mit einem Innendurchmesser von 43,3 Metern hielt er lange den Rekord als größte freitragende Kuppel der Welt.

Der Pantheon wurde unter Kaiser Hadrian zwischen 125 und 128 n.Chr. fertiggestellt. Sowohl die Kuppel des

Tempels als auch sein 7,3 Meter breites und 4,6 Meter tiefes Ringfundament, auf dem 45 340 Tonnen lasten, sind aus dem Römerbeton gefertigt. Damit die Kuppel nicht unter ihrem eigenen Gewicht zusammenbricht, ließen die Baumeister das Kuppeldach zum Scheitelpunkt hin immer dünner hochziehen. Am Ansatz misst die Schale 5,9 Meter und an der kreisrunden Öffnung noch 1,6 Meter. Zudem mischte man mit zunehmender Höhe immer leichtere Zuschlagstoffe wie Tuff und Bimsstein ins Opus caementitium.

Wie ein Fels in der Brandung

In seinem Lehrwerk „Zehn Bücher über Architektur“ schrieb der römische Architekt und Ingenieur Vitruv, der im ersten vorchristlichen Jahrhundert unter Cäsar und Augustus lebte: Die Römer können einen Beton herstellen, der so haltbar ist, „dass weder die Wellen noch der Druck

des Wassers ihm schaden können“. Dass Vitruv damit nicht übertrieben hat, zeigen Überreste von römischen Hafenanlagen im gesamten Mittelmeerraum. Sie stehen seit 2000 Jahren wie ein Fels in der Brandung, während moderner Beton trotz ähnlicher Festigkeit bei Kontakt mit Salzwasser innerhalb weniger Jahre zu bröckeln beginnt. Diese Eigenart des

Kompakt

- ▶ Der Beton der Römerzeit ist ein Gemisch aus Vulkanasche, gebranntem Kalk, Bruchstein und Wasser.
- ▶ Antike Betonmauern in Küstenlage sind viel härter und beständiger als moderner Beton.
- ▶ Forscher versuchen mithilfe der antiken Rezepturen umweltfreundliche Betonsorten zu entwickeln.

Alter Beton hält besser



Foto: Aquazem

ANDREAS STAHL ist Mitinhaber der Firma Aquazem in Kißlegg, die sich auf die Auskleidung von Wasserbehältern spezialisiert hat. Dafür setzt das Unternehmen auf historische Baustoffe.

Wie kamen Sie darauf, Wasserbehälter mit Römerbeton instand zu setzen?

Durch Zustandsanalysen von alten Trinkwasserbehältern. Das Ergebnis war jedes Mal das selbe: Alte, teilweise vor über 100 Jahren aufgebraute Auskleidungen waren den modernen an Dauerhaftigkeit überlegen. Eine Sanierung mit heute üblichen Werkstoffen hätte die Situation nur verschlechtert. Für uns stand fest, dass wir zur Instandsetzung auf alte Werkstoffe zurückgreifen müssen. Mithilfe des Karlsruher Instituts für Technologie haben wir mit alten Mörtelmischungen experimentiert.

Entspricht Ihre Rezeptur der antiken?

Das Original kriegt man nicht mehr hin. Das scheitert schon an den Rohstoffen. Aber unser Mörtel hat eine ähnliche Zusammensetzung wie das Opus caementitium. Wir verwenden einen „weichen“ Mörtel, der auf dem Untergrund keinerlei Spannungen erzeugt. Die Randzone ist jedoch besonders hart und dauerhaft. Dabei ist es wichtig, wie der Mörtel aufgebracht wird. Die Methode der Römer ist aber leider noch nicht völlig entschlüsselt.

Welche Methode verwenden Sie?

Durch das Reiben und Glätten des Mörtels gelangt Wasser an die Oberfläche, was für die Widerstandsfähigkeit der Auskleidung nachteilig ist. Daher pudern wir die Oberfläche mit einem zementbasierten Pulver, das während der Aushärtung überschüssiges Wasser bindet. Erst wenn der Mörtel ansteift, wird geglättet. Das ergibt eine spiegelglatte Oberfläche, die sich leicht reinigen lässt.

Warum ist der Mörtel so dauerhaft?

Aufgrund des herstellungsbedingten Aufbaus der Mörtelschicht laugt die Oberfläche deutlich langsamer aus. Dafür ist allerdings das korrekte Auftragen des Mörtels essentiell. Der Maurer muss spüren, wann der richtige Zeitpunkt zum Glätten gekommen ist – da ist handwerkliches Können gefragt.

Opus caementitium hatte um 77 n.Chr. auch der römische Gelehrte Plinius der Ältere in seiner Naturgeschichte beschrieben: Der „Staub“ von den vulkanischen Hügeln um Puteoli habe die besondere Eigenschaft, dass er „den Meeresfluten widersteht und, sobald man ihn unter Wasser taucht, gleich zu einer Steinmasse wird, die für Wellen unüberwindlich ist und sich Tag um Tag mehr verfestigt“.

Als entscheidende Zutat für das Opus caementitium nennt Plinius die Vulkanasche von Puteoli (heute Pozzuoli) nahe den Phlegräischen Feldern bei Neapel. Forschungen von Materialwissenschaftlern um Marie Jackson von der University of Utah bestätigen den antiken Gelehrten: Offenbar reagierte die Vulkanasche im Opus caementitium mit Meerwasser und bildete Kristalle eines Kalzium-Aluminium-Silikats, die den Beton stabilisieren. Dieser Vorgang ist auch als pozzolanische Reaktion bekannt, bei der über Jahre hinweg der Beton nachhärtet.

Die Entdeckung gelang den US-Forschern bei mineralogischen Analysen von Bohrkernen aus vier römischen Hafenanlagen an der Westküste Italiens. Als Jackson und ihre Kollegen das Probenmaterial mithilfe eines Röntgendiffraktometers erneut untersuchten, entdeckten sie überdies das seltene Mineral Aluminium-Tobermorit, das ebenfalls durch eindringendes Salzwasser entstanden war. Die plattenförmigen Kristalle dieses Minerals wirken zusätzlich stabili-

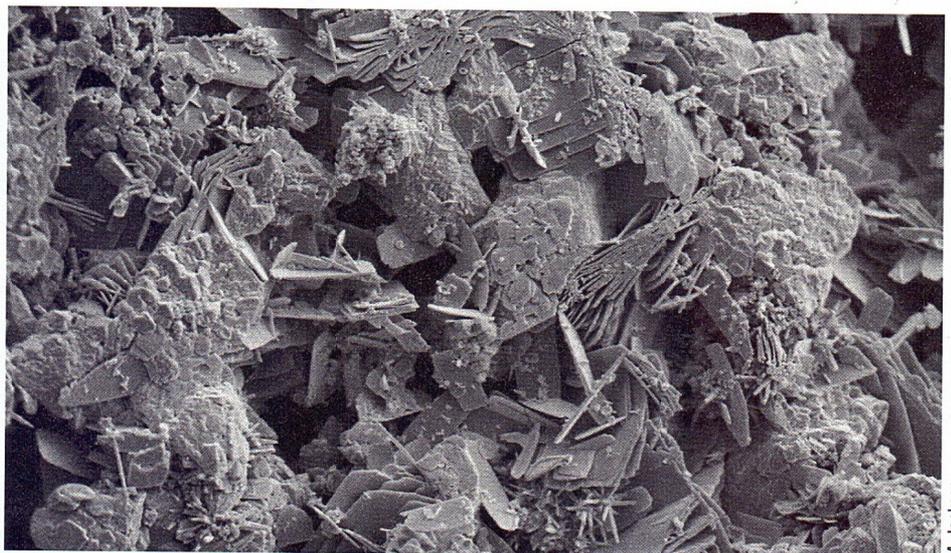
sierend, weil sie die Ausbreitung von Rissen hemmen.

Dass diese Minerale im Römerbeton stecken, überraschte Jackson. Aluminium-Tobermorit bildet sich normalerweise nur bei starker Hitze in Vulkangestein. „Bisher hat noch niemand Tobermorit bei 20 Grad Celsius produziert“, erklärt Marie Jackson. „Nur den Römern ist das gelungen!“ Welche chemischen Prozesse im Detail hinter dieser Nachhärtung stecken, bleibt ein Rätsel. Sicher ist nur: Die Kristalle im Opus caementitium sorgen für eine Dauerhaftigkeit, die diejenige von heutigen Betonsorten übertrifft.

Antike Mittel gegen Betonkrebs

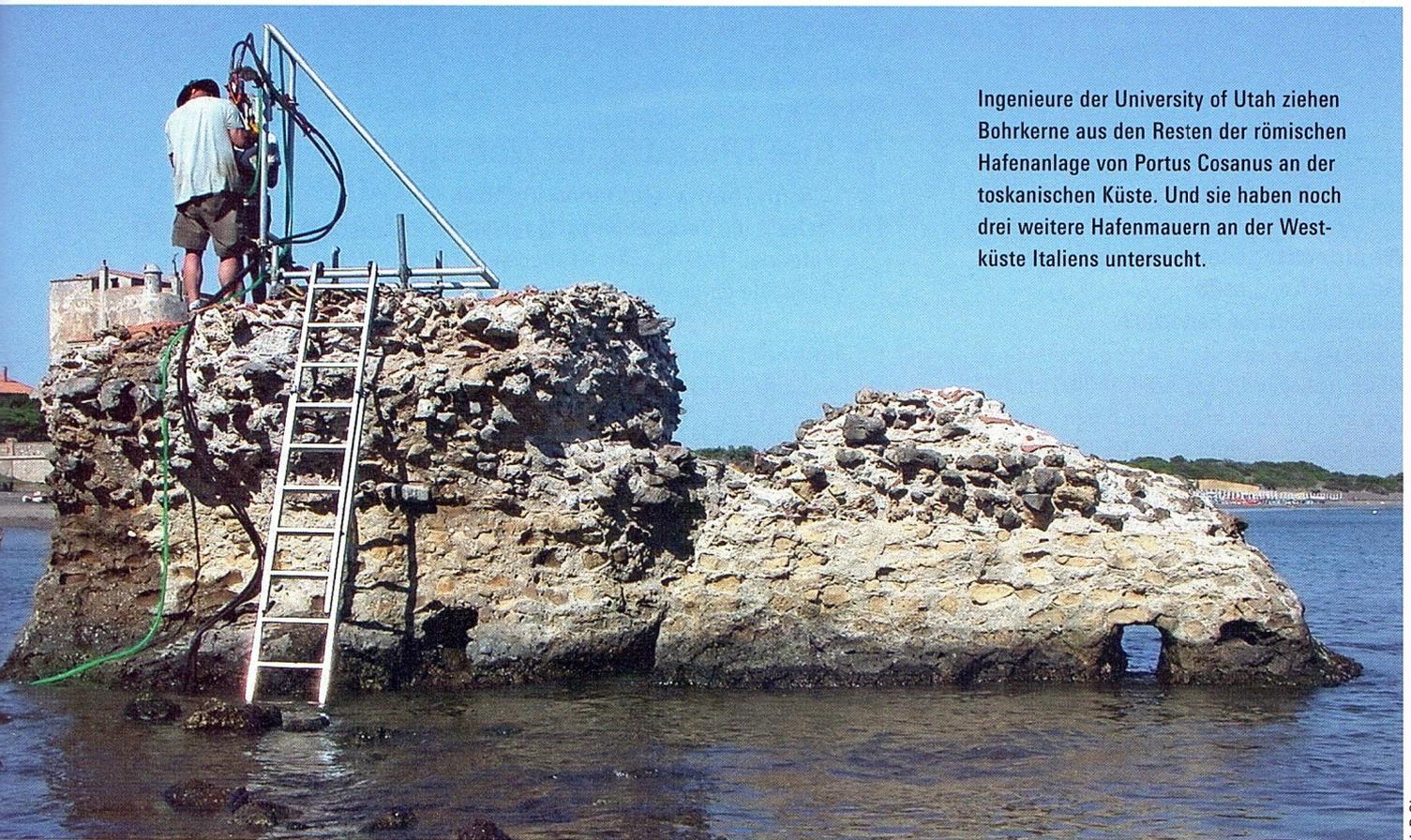
Noch etwas anderes unterscheidet antiken und modernen Beton: die Reaktionsfreudigkeit. Während die Römer Zuschlagstoffe hineinmischten, die – beabsichtigt oder nicht – den Beton über die Jahrhunderte durch Reaktion mit dem Bindemittel zu einer felsartigen Gesteinsmasse aushärten ließen, gilt für heutige Rezepturen das Gegenteil: Die Bestandteile sollen möglichst wenig miteinander wechselwirken.

Zwar härtet auch moderner, auf schnellen Baufortschritt optimierter Beton aufgrund chemischer Reaktionen im Laufe der Zeit weiter aus, doch zusätzlich stabilisierende Verbindungen zwischen Zement und Zuschlagstoffen entstehen dabei nicht. Im Gegenteil: Manchmal bildet sich Alkali-Kieselsäure-Gel, das



M. Jackson

Probe unterm Mikroskop: Die plattenförmigen Kristalle des Aluminium-Tobermorit (Mitte) machen den Beton besonders stabil. Daneben Kristallklumpen aus Kalzium-Aluminium-Silikat.



Ingenieure der University of Utah ziehen Bohrkerne aus den Resten der römischen Hafenanlage von Portus Cosanus an der toskanischen Küste. Und sie haben noch drei weitere Hafenmauern an der Westküste Italiens untersucht.

J. P. Oleson

Wasser aufsaugt, aufquillt und den Beton von innen heraus aufricht. Man spricht dann von Betonkrebs. Diese „Krankheit“ befällt Bauteile, die mit Wasser in Berührung kommen.

Am häufigsten erwischt es Brücken, Fahrbahnen und Eisenbahn-Schwellen. Meist wird der Betonkrebs durch Risse verstärkt, die durch die Belastung mit Autos und Lastern entstehen. In die Risse dringt Wasser ein, das im Winter gefriert und die Bruchstellen vergrößert. Schäden entstehen auch durch Tausalz, das Metallbewehrungen rostet und den Beton abplatzen lässt.

Von den 67 000 kommunalen Straßenbrücken in Deutschland sind über 10 000 so marode, dass sie bis 2030 durch Neubauten ersetzt werden müssten, heißt es in einer Studie des Deutschen Instituts für Urbanistik aus dem Jahre 2013. Und von den rund 40 000 Brücken der Bundesfernstraßen müssen laut Bundesverkehrsministerium etwa 6000 in den nächsten Jahren saniert werden. Die meisten dieser Bauwerke stammen aus den 1960er-, 1970er- und 1980er-Jahren. Sie sind also nicht einmal 50 Jahre alt.

„Eine Autobahnbrücke, die eigentlich 100 Jahre halten soll, aber bereits nach 20 oder 30 Jahren das erste Mal saniert werden muss, sprengt ihre Lebenszyklus-

kosten“, sagt Andreas Gerdes, der am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) den Innovations-Hub „Prävention im Bauwesen“ leitet. Gerdes beschäftigt sich mit der Frage, auf welche Weise Leistungsfähigkeit und Dauerhaftigkeit von Bauwerken der technischen Infrastruktur erhalten und verbessert werden können.

Gerdes ist überzeugt, dass die Forschungen zur Dauerhaftigkeit von Opus caementitium dazu beitragen könnten, die Lebensdauer heutiger Bauwerke zu verlängern, „wenn es gelingt, mit dem Wissen der Römer vorzeitiges Werkstoffversagen zu vermeiden“. Dazu kommt, dass sich Kalkstein, der Leim des Römerbetons, bei Temperaturen um die 900 Grad brennen lässt, während der Zement in modernen Beton- und Mörtel-Rezepturen erst bei 1450 Grad entsteht. Und auf das Konto der modernen Zementherstellung gehen sieben Prozent des weltweiten CO₂-Ausstoßes.

Alt, aber wasserdicht

Andreas Gerdes hat im Mittelmeerraum den Innenputz antiker Zisternen untersucht, von denen einige bis heute in Betrieb sind. Ohne die Regenwasserspeicher wäre die Besiedlung vieler Mittelmeerinseln unmöglich gewesen – so auch von Pantelleria, einer süßwasserarmen

Vulkaninsel 100 Kilometer südöstlich von Sizilien, wo Archäologen auf engstem Raum über 580 Zisternen aus verschiedenen Epochen dokumentiert haben. In den Zisternen aus römischer Zeit untersuchten Gerdes und sein Team den Putz, der aus Opus caementitium als Mörtel und Keramiksplittern als Zuschlagstoff besteht. Die Oberflächenschicht ist zudem sehr dünn und weist eine hohe Dichtigkeit auf.

Auf Basis chemisch-mineralogischer Analysen haben die KIT-Wissenschaftler einen dem Römerputz ähnlichen Mörtel entwickelt, der deutlich langlebiger ist als heute übliche Innenauskleidungen von Trinkwasserbehältern, wie Gerdes versichert: „Moderne Beschichtungssysteme sind schadensanfällig. Manche Auskleidungen halten nur wenige Jahre.“

Dass der Römerputz Jahrtausende überdauert hat, liegt allerdings nicht nur an der Rezeptur, auch die Verarbeitungstechnik spielt eine entscheidende Rolle. Doch dieses Geheimnis müssen die Forscher erst noch lüften.



Technikjournalist HARTMUT NETZ bereut seit der Recherche, dass er früher als Versorgungsingenieur das Betonieren als notwendiges Übel betrachtet hat.