

MATERIALFORSCHUNG

# Biegsamer Beton

Beton ist spröde und bricht schon bei relativ geringen Zug- oder Scherspannungen. Das schränkt seine Verwendung als Baumaterial erheblich ein. Ingenieuren ist es jedoch gelungen, ihn mit Kunststofffasern verformbar zu machen.

Von Victor C. Li

Seit der Erfindung des Portlandzements durch den britischen Maurer Joseph Aspdin im Jahr 1824 hat sich Beton zum wichtigsten Baustoff entwickelt. Sowohl das höchste Gebäude der Welt, der Burj Khalifa in Dubai, als auch die längste Brücke, die 165 Kilometer lange Danyang-Kunshan Grand Bridge in China, sind größtenteils daraus gefertigt. Im Jahr 2012 wurden schätzungsweise zwölf Milliarden Tonnen Beton für Bauwerke verbraucht; das entspricht zwei Tonnen pro Erdbewohner. Das Material ist inzwischen aber nicht nur Grundstoff für Häuser, Straßen und Staudämme, sondern auch Bestandteil der gesamten zivilen Infrastruktur – von Kanalisationsrohren bis Blumenkübeln.

Die Herstellung von Beton ist ein mehrstufiger, energieintensiver Prozess. Der meist als Bindemittel verwendete

Portlandzement wird durch das pulverfeine Zermahlen von Kalkstein (wegen des Kalziumgehalts) und Ton (wegen des enthaltenen Siliziums) und anschließendes Erhitzen der Mischung in einem Ofen auf mehr als 1450 Grad Celsius erzeugt. Bei derart hohen Temperaturen diffundieren die Moleküle der verschiedenen Materialien ineinander – Fachleute sprechen von Sintern.

Die resultierenden festen Brocken, Klinker genannt, werden dann erneut zusammen mit anderen Spurenstoffen gemahlen. Ein besonderes Charakteristikum von Portlandzement ist, dass er zwei Arten von Kalzium-Silizium-Verbindungen enthält: Alit und Belit. Alit verleiht ihm zu Beginn des Aushärtens Festigkeit, während Belit für die langfristige Beständigkeit sorgt.





Zur Herstellung von Beton wird Zement mit Zuschlagstoffen wie Kies oder Sand gemischt und mit Wasser versetzt. Durch chemische Reaktionen mit dem Wasser – die so genannte Hydratation – härtet das Material aus. Dabei spielt es keine Rolle, ob die Umgebung feucht ist.

Zum Konstruktionsmaterial wurde Beton, als der Franzose Joseph Monier 1867 auf die Idee kam, ihn mit Stahlstäben zu verstärken (»armieren«). Seither gab es viele weitere Verbesserungen wie die Erhöhung der Druckfestigkeit oder die Einführung von selbstverdichtendem Beton, den man nach dem Gießen nicht rütteln muss, um ihn zu komprimieren und Lufteinschlüsse zu entfernen. Neuerdings werden im Interesse der Umweltfreundlichkeit gerne industrielle Abfallprodukte wie Flugasche aus Kohlekraftwerken oder Schlacken aus Hochöfen als Zuschlagstoffe verwendet.

Während seiner langen Geschichte wurde Beton immer wieder an neue industrielle und gesellschaftliche Anforderungen angepasst. Dabei zeigten sich allerdings auch seine Grenzen. Hohem Druck widersteht Beton sehr gut, doch beim Ziehen oder Biegen bricht er wegen seiner Sprödigkeit relativ leicht. Dabei breitet sich ein Riss von einer bereits vorhandenen Fehlstelle aus, typischerweise entlang einer Grenzfläche zwischen Zuschlagstoffen und Bindemittel. Obwohl Beton gewöhnlich nicht darauf ausgelegt ist, größere Zugbelastungen aufzunehmen, muss er solche Kräfte in gewissem Ausmaß verkraften, um in großen Bauteilen einsetzbar zu sein. Beispielsweise entstehen Zugspannungen, wenn er beim Trocknen schrumpft. Die Stahlarmierung ist eine Möglichkeit, die Zugfestigkeit zu erhöhen. Außerdem können in

Normalerweise bricht Beton bei Überlastung – wie etwa beim Erdbeben in Kalifornien 1989 (rechts). Mit speziellen Zusätzen wird er jedoch verformbar (links). Dabei bilden sich zahlreiche Mikrorisse, die sich aber nicht weiter öffnen. Verantwortlich dafür sind Kunststofffasern geeigneter Dicke mit besonderen Oberflächeneigenschaften. Aus diesem Grund heißt das Material Engineered Cementitious Composite (gezielt entworfenes zementhaltiges Komposit) oder kurz ECC.

#### AUF EINEN BLICK

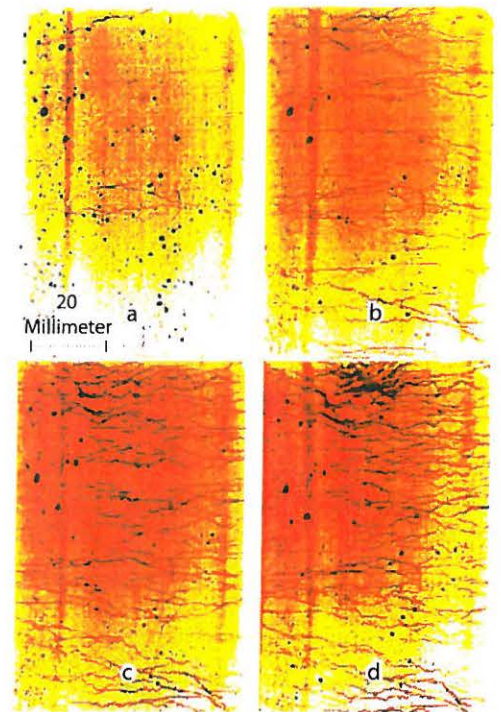
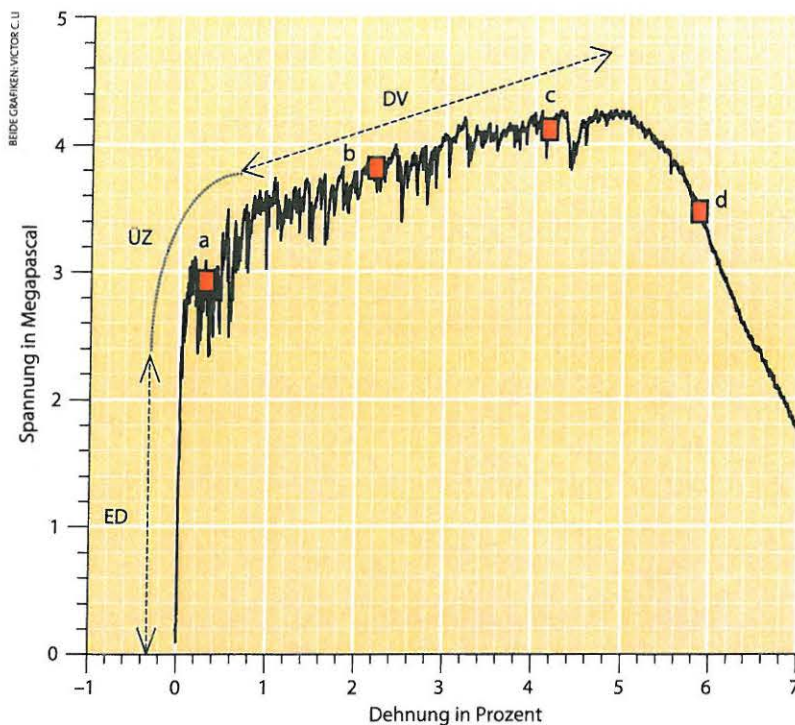
#### ALTER BAUSTOFF MIT NEUER FLEXIBILITÄT

**1** Ohne Beton wären moderne Gebäude undenkbar. Doch seine **geringe Zugfestigkeit** birgt Gefahren. Weil er so spröde ist, kommt es bei Überlastung zu plötzlichem katastrophalen Versagen.

**2** Durch Zusatz von maßgeschneiderten **Kunststofffasern** gelang die Entwicklung eines Betons, der sich bei hoher Belastung allmählich verformt, statt zu brechen. Die **Dehnung** kann bis zu fünf Prozent betragen, und die Zugfestigkeit nimmt dabei weiter zu.

**3** Der Grund ist die Bildung zahlreicher **Mikrorisse**, die sich nur begrenzt öffnen. Das liegt daran, dass die Fasern anfangs ein Stück weit aus der **Zementmatrix** herausgezogen und dabei abgeschabt werden. Weil der Abrieb die Reibung erhöht, bleiben sie schließlich stecken.





Die Spannungs-Dehnungs-Kurve von biegsamem Beton (links) zerfällt in vier Abschnitte. Zunächst verformt sich das Material elastisch, allerdings nur minimal (ED). Folglich verläuft die Kurve fast senkrecht. In der anschließenden Übergangszone (ÜZ) beginnt die Steifigkeit nachzulassen. Entsprechend krümmt sich die Kurve, bevor sie im Bereich der Dehnungs-

verfestigung (DV) wieder linear verläuft. Dort verformt sich der Beton proportional zur steigenden Belastung. Sobald die Dehnungsgrenze erreicht ist, bricht das Material, und die Spannungs-Dehnungs-Kurve fällt steil ab. Eingefärbte Aufnahmen (rechts) zeigen für einzelne Punkte der Kurve die zugehörigen Rissmuster im Beton.

Betonplatten »Sehnen« aus Spanngliedern eingefügt werden. Das Ergebnis ist so genannter Spannbeton.

Trotz dieser Maßnahmen kommt es unter extremer Belastung immer wieder zu katastrophalem Versagen. So sind bei einem schweren Erdbeben in der chinesischen Provinz Sichuan im Jahr 2008 viele Stahlbetonkonstruktionen eingestürzt; mehr als 69.000 Menschen starben. Und bei dem starken Tohoku-Erdbeben mit nachfolgendem Tsunami in Japan gelangte 2011 durch eine 20 Zentimeter lange Betonbruchstelle am Kernkraftwerk Fukushima Nr. 2 unkontrolliert radioaktives Wasser ins Meer.

### Fehlender Mechanismus zur Energieabfuhr

Ein Beton, der nicht mehr spröde ist, wäre wesentlich sicherer. Zudem hätte er wegen seiner größeren Lebensdauer auch in wirtschaftlicher, sozialer und ökologischer Hinsicht Vorteile. Derzeit verfallen Betonkonstruktionen mit der Zeit, weil sich Risse bilden und Stücke von der Oberfläche abplatzen. Sie müssen deshalb immer wieder repariert werden, was erhebliche Kosten verursacht und auch dem Klima schadet; denn bei der Herstellung von Portlandzement gelangt durch den hohen Energieverbrauch viel Kohlendioxid in die Luft.

In jedem Material, das unter Spannung steht, neigen vorhandene Defekte oder Fehlstellen dazu, sich auszuweiten.

Das lässt sich nur verhindern, wenn die Spannungsenergie auf andere Weise abgebaut werden kann. Beim Beton gibt es praktisch keine Mechanismen dafür. Deshalb führen Risse zum Bruch und zum raschen Verlust der Tragfähigkeit.

Defekte im Beton können vielerlei Ursachen haben. So ist der Zusammenhalt zwischen dem mineralischen Zuschlagstoff und dem Zementbinder relativ schwach; denn an dieser Grenzfläche befinden sich besonders viele Poren und Kalziumhydroxidkristalle geringer Festigkeit. Auch Luftblasen und Schrumpfrisse bilden Fehlstellen, die von Anfang an existieren. Im Zement widersetzt sich das Kalziumsilikathydrat, ein Produkt der Hydratisierungsreaktion, zwar dem Eindringen eines Risses. Das gelförmige Material aufzusprengen erfordert aber nicht allzu viel Energie. Ein von einer Fehlstelle ausgehender Riss stößt deshalb auf relativ wenig Widerstand und kann sich leicht zu einem Bruch ausweiten. Dadurch ist Beton genauso spröde wie Glas.

Stahl dagegen kann durch Umarrangieren von Bindungen zwischen seinen Atomen Energie abbauen. Dadurch setzt er der Rissausbreitung einen um mehrere Größenordnungen höheren Widerstand entgegen.

In den vergangenen Jahrzehnten wurden erhebliche Anstrengungen unternommen, die Zahl der Fehlstellen im Beton zu senken, um seine Sprödigkeit zu verringern. Zum Bei-



spiel lassen sich Defekte an der Grenzfläche zum Zuschlagstoff unterdrücken, wenn man dessen Korngröße gering hält. Eine andere Methode, diese schwache, poröse Übergangszone zu verdichten und zu festigen, besteht in der Zugabe von »Mikrosilica«-Teilchen zur Betonmischung. Sie sind 100-mal kleiner als Portlandzementpartikel. Durch diverse Maßnahmen lässt sich außerdem die Anzahl der Poren und Luftblasen klein halten. Und die Zugabe von Teilchen, die einer lokalen Spannungskonzentration entgegenwirken, senkt die Gefahr, dass von einer solchen Stelle ein Riss ausgeht.

Zwar steigern Methoden, die das Entstehen eines katastrophalen Bruchs verzögern, die Zug- und vor allem Druckfestigkeit. Dennoch bleibt das Material spröde oder wird sogar noch spröder; denn man muss mehr elastische Energie zuführen, bis sich ein Riss bildet. Dadurch breitet er sich aber auch schneller aus, sobald er entstanden ist. Die Beseitigung von Fehlstellen führt also zwar zu einem festeren Beton; doch dieser bricht bei zu hoher Belastung noch schneller.

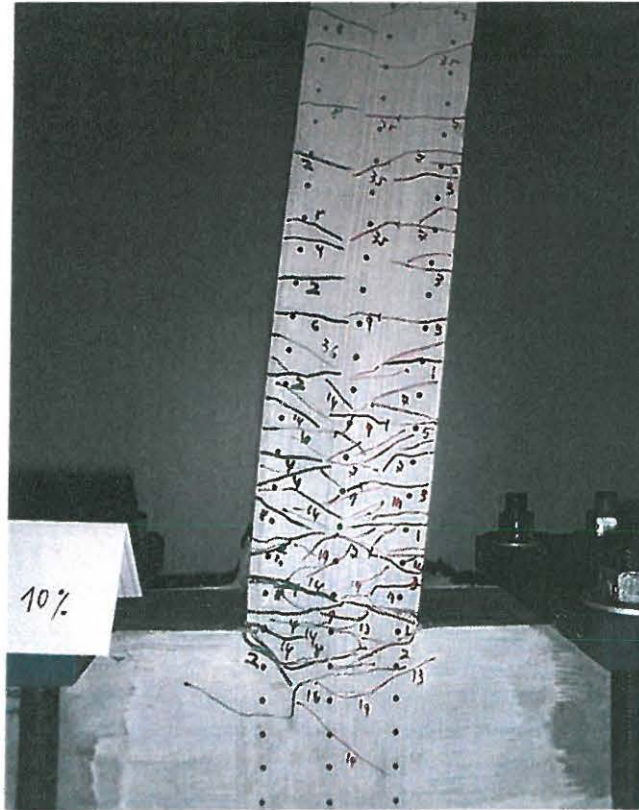
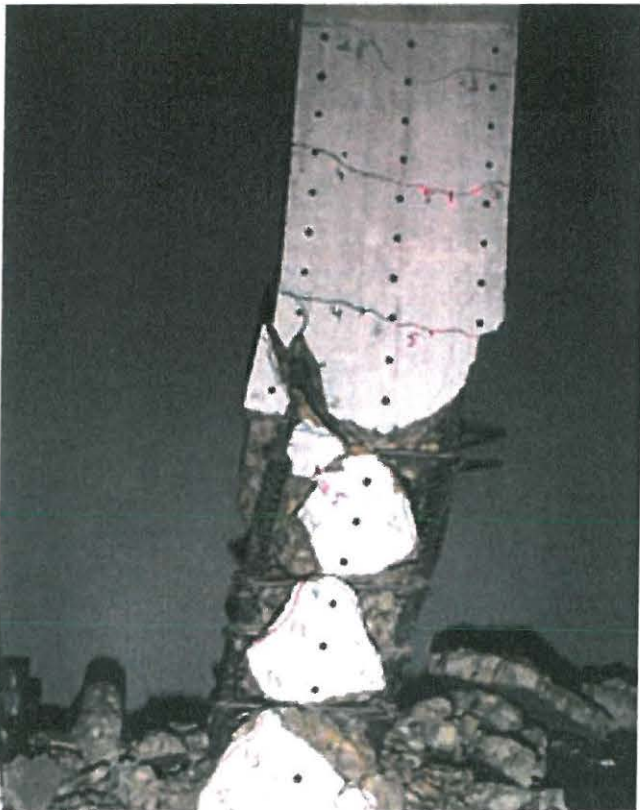
Faserverstärkter Beton enthält ein Netzwerk von kurzen Strängen, die üblicherweise aus Stahl, Glas oder Kunststoff bestehen. Deren Zusatz kann die Bruchzähigkeit – den Widerstand gegen die Ausbreitung eines Risses – deutlich erhöhen. Allerdings beschränkt sich ihre Wirkung auf einen kleinen Bereich um die Risspitze. Das Ergebnis ist eine modifizierte Form des Versagens, bei der ein Bruch nicht plötzlich,

sondern schrittweise auftritt. Die Faserverstärkung verringert also die Sprödigkeit von Beton, beseitigt sie aber nicht.

Lange Zeit galt verformbarer (»duktiler«) Beton als Widerspruch in sich. Doch das hat sich geändert. Sicher: Beton ist kein Gummi und sollte es auch nicht werden, weil er dann genau jene Eigenschaften verlieren würde, die ihn als Baustoff auszeichnen. Duktiler Beton muss bei normalem Einsatz ebenso steif sein wie das herkömmliche Material. Aber unter extremen Bedingungen sollte er ohne Verlust der Tragfähigkeit nachgeben und sich verformen. In den vergangenen zwei Jahrzehnten hat meine Arbeitsgruppe an der University of Michigan in Ann Arbor einen solchen Beton entwickelt, der die offizielle Bezeichnung Engineered Cementitious Composite (ECC, gezielt entworfenes zementhaltiges Verbundmaterial) trägt. Seine ungewöhnlichen Eigenschaften verdankt er dem Zusatz von speziellen Kunststofffasern.

### Material mit verblüffenden Eigenschaften

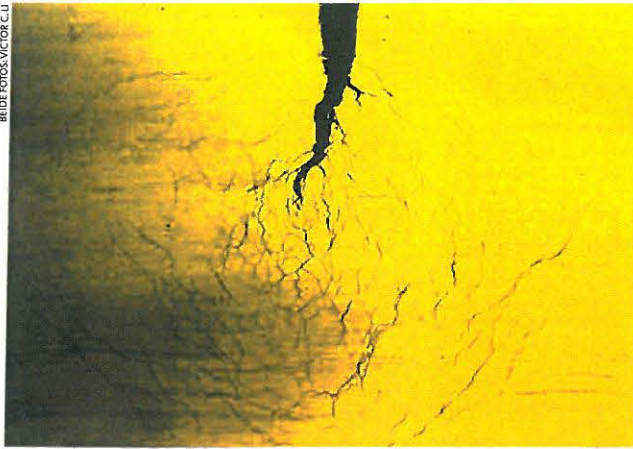
Alle Werkstoffe haben eine Grenze für Belastungen, die sie ohne irreversible Schäden verkraften. Wird sie überschritten, verformen sich duktile Stoffe dauerhaft, brechen aber nicht. Dasselbe gilt für Beschädigungen etwa durch eine Kerbe. Die Spannung verteilt sich dabei auf das umgebende Material, was ein Totalversagen durch einen sich ausbreitenden Riss verhindert. Um die Duktilität eines Werkstoffs zu prüfen,



BEIDE FOTOS: VICTOR C. LI

Bei einem herkömmlichen Stahlbetonpfeiler (links) platzt der Beton, wenn er – etwa bei einem Erdbeben – rasch hin- und herbewegt wird, von der Bewehrung aus Stahl ab. In seinem Gegenstück aus biegsamem Beton (rechts) treten zwar Mikrorisse auf (rot und grün markierte Linien), aber der Pfeiler bleibt sogar ohne Verstärkung mit Stahlstäben intakt.





**Biegsamer Beton verträgt auch Kerben, ohne zu zerspringen.** Wie diese eingefärbten Aufnahmen zeigen, bildet sich rund um die Kerbspitze ein Hof von Mikrorissen. Diese verteilen die Spannung weiträumig. So verhindern sie, dass sich von der Kerbe aus ein breiter Riss quer durch das Material ausbreitet.

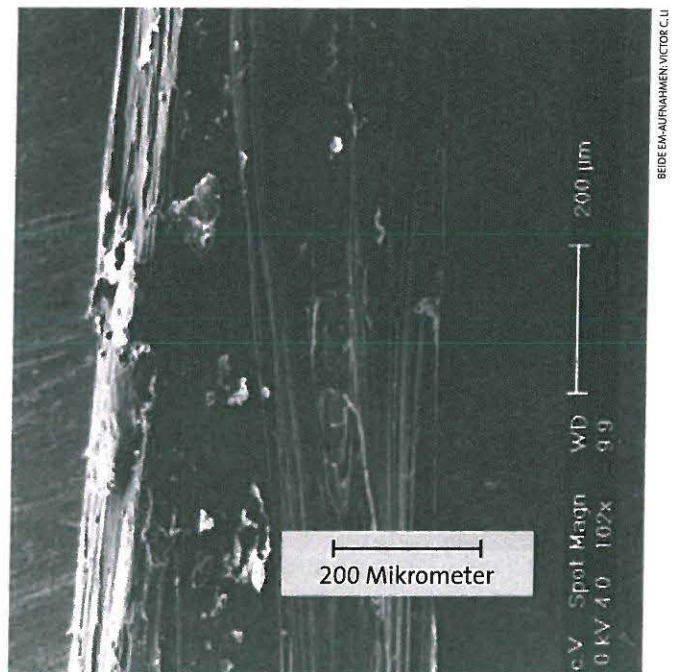


Kunststofffasern in biegsamem Beton hindern die entstehenden Mikrorisse daran, sich zu verbreitern (links; der abgebildete Bereich ist etwa fünf Millimeter breit). Sie haben einen gleitfördernden Überzug, so dass sie sich zunächst ein Stück aus der Zementmatrix herausziehen lassen. Dabei wird jedoch die Gleitschicht abgeschabt (rechts). Der Abrieb sorgt dann zusammen mit dem gut haftenden Inneren dafür, dass die Fasern verkanten und stecken bleiben.

misst man seine Dehnung unter wachsender Zugspannung, bis er seine Tragfähigkeit verliert. Als Maß der Verformbarkeit dient der maximale Dehnungswert, auch Dehnungskapazität genannt. In der Praxis spannt man einen rechteckigen Probekörper an beiden Enden hydraulisch ein, zieht ihn auseinander und misst seine Dehnung in Abhängigkeit von der angelegten Zugspannung. Die resultierende Spannungs-Dehnungs-Kurve beschreibt das mechanische Verhalten des Materials unter Zugbelastung. Für spröde Stoffe ist diese Kurve eine fast senkrechte Linie, die beim Bruch des Probekörpers endet. Die Dehnungskapazität von Normalbeton beträgt nur etwa 0,01 Prozent.

Die Spannungs-Dehnungs-Kurve von ECC sieht völlig anders aus (Grafik S. 86 oben). Sie setzt sich aus vier Abschnitten zusammen. Da ist zunächst der Bereich der linearen elastischen Verformung, in dem die Kurve wie bei herkömmlichem Beton fast senkrecht verläuft. Hier nimmt das Material wieder seine frühere Form an, sobald es entlastet wird. Nach dem Erreichen der Elastizitätsgrenze folgt eine Übergangszone, in der sich die Kurve zu krümmen beginnt. Dabei nimmt die »effektive Steifigkeit« des Betons allmählich ab. Der dritte Abschnitt kennzeichnet den Bereich der fast linearen »inelastischen Dehnungsverfestigung«. Hier verläuft die Kurve erneut geradlinig, aber mit einer deutlich geringeren Steigung. Beim Überschreiten der Dehnungskapazität kommt es schließlich zum Versagen, und der vierte Abschnitt der Spannungs-Dehnungs-Kurve beginnt, in dem sie steil abfällt.

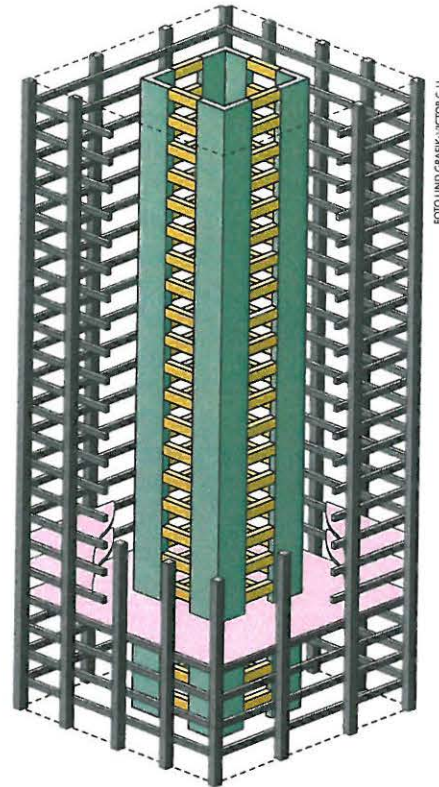
Der Bereich der elastischen Verformung geht bis zu einem Dehnungswert von etwa 0,01 Prozent, wie er auch bei normalem Beton unmittelbar vor dem Versagen gemessen wird. Die Übergangszone der Kurve erstreckt sich über den Dehnungsbereich von 0,01 bis etwa 1 Prozent. Dabei geben zunächst größere, bereits bestehende Fehlstellen nach, bevor







Im 2007 fertig gestellten, 41-stöckigen Nabeaura Yokohama Residential Tower (links) in Tokio verbinden auf jeder Etage vier Träger aus biegsamem Beton (Skizze rechts, gelb) die Ecken der Kernstruktur (grün). Sie sollen Scherspannungen, die bei Erdbeben auftreten, durch Verformung auffangen.



Mikrorisse entstehen, die mit zunehmender Spannung von immer kleineren Defekten ausgehen. Dieses Verhalten lässt auf eine statistische Größenverteilung der Fehlstellen schließen. Wären alle gleich groß, gäbe es keine Übergangzone. Dann würde die Spannungs-Dehnungs-Kurve am Ende des elastischen Abschnitts einfach abknicken und direkt in den Bereich der inelastischen Dehnungsverfestigung übergehen.

Dort treten schließlich viele weitere, fast parallele Mikrorisse senkrecht zur Richtung der Zugspannung auf. Anders als Risse in herkömmlichem oder faserverstärktem Beton tragen sie aber weiterhin einen Anteil der Last, der sogar zunimmt, bevor das Material schließlich versagt. Das passiert, abhängig von der speziellen Version des Werkstoffs, bei einer Streckung von etwa zwei bis fünf Prozent. Damit liegt die Dehnungskapazität von ECC zwei Größenordnungen über der von herkömmlichem Beton.

Es ist die kontrollierte Öffnung der Mikrorisse, die dem Material seine Duktilität verleiht. Risse sind also nicht nur unvermeidlich, sondern sogar notwendig; denn sie nehmen die wachsende Spannungsenergie auf, bevor sich eine Fehlstelle zu einem Bruch entwickeln kann. Damit wirken sie ähnlich wie die Knautschzone eines Autos bei einem Unfall – nur dass es dabei um eine Stauchung geht.

Wie Aufnahmen gestreckter Proben zeigen, verbreitern sich die Mikrorisse zunächst fast linear mit der Dehnung. Sobald diese etwa ein Prozent erreicht hat, nimmt die Rissbreite trotz weiter ansteigender Spannung aber nicht mehr zu, sondern bleibt typischerweise unter einem Wert 100 Mikrometern. Bei einem von uns entwickelten ECC geht sie sogar nicht über etwa 20 Mikrometer hinaus. Der Grund dafür sind die schon erwähnten Kunststofffasern, die sich teils quer zum Mikroriss erstrecken und diesen daran hindern, sich weiter zu öffnen. Auf diesen entscheidenden Aspekt gehe ich weiter unten detaillierter ein.

#### Warum Fehlstellen günstig sind

Auch eine Kerbung verkräftet das ECC problemlos. Insbesondere bildet sich an der Spitze des Einschnitts kein sich rasch ausbreitender Riss wie bei normalem oder faserverstärktem Beton. Vielmehr entsteht eine zwiebelartige Schadenszone mit zahlreichen gekrümmt verlaufenden Mikrorissen (Bilder links oben). Diese Zone erstreckte sich bei unseren Versuchen teils bis zum gegenüberliegenden Rand des Probekörpers – selbst wenn dieser 300 Millimeter breit und 61 Millimeter dick war. Die großräumige Verteilung der Belastung um eine Kerbe ist das Kennzeichen eines wirklich duktilen Materials.

Bei einem kerbunempfindlichen Werkstoff nimmt die Festigkeit normalerweise linear mit der Kerbtiefe ab, während sie bei gewöhnlichem Beton noch viel schneller zurückgeht. In unseren Tests an ECC-Probekörpern mit zwei Kerben an gegenüberliegenden Seiten sank die Belastbarkeit aber sogar weniger stark, als bei linearer Abnahme zu erwarten war. Das lässt sich erklären, wenn man annimmt, dass die Zugfes-



tigkeit durch die schwächste Schicht bestimmt wird, die als erste aufreißt. Dabei handelt es sich höchstwahrscheinlich um diejenige mit der geringsten Menge an überbrückenden Fasern (wenn diese uneinheitlich verteilt sind). In der Regel wird die schwächste Schicht aber nicht ausgerechnet in der Engstelle zwischen den beiden Kerben liegen, wo der Bruch erfolgt, weil die Probe hier am dünnsten ist.

Da sich die inelastische Verformung biegsamen Betons aus der Bildung von Mikrorissen ergibt und diese von bereits vorhandenen Fehlern im Material ausgehen, kommt es entscheidend darauf an, die Fehlstellenzahl und -größe im ECC zu steuern. Insbesondere müssen an den vorhandenen Defekten neue Mikrorisse entstehen können, bevor die schon existierenden ihre Belastungsgrenze erreicht haben. Deshalb sind nicht nur genügend viele Fehlstellen nötig, sie dürfen auch nicht zu klein sein. Wenn sich erst bei sehr hohen Belastungen ein Riss bildet, besteht die Gefahr eines großen lokalen Bruchs. All das steht in krassem Widerspruch zum Konzept des hochfesten Betons, wo versucht wird, die Fehl-

stellen durch eine enge Partikelpackung und andere Maßnahmen möglichst klein zu halten oder völlig zu beseitigen.

Dagegen hat meine Arbeitsgruppe bewiesen, dass es sogar günstig ist, Defekte künstlich einzuführen. Als Paradebeispiel dafür kann eine ECC-Version gelten, die sich für schnelle Reparaturen eignet, weil sie früh im Aushärtungsprozess eine hohe Festigkeit entwickelt. Hier geben wir dem Zement kleine Polystyrolpartikel mit bis zu vier Millimeter Durchmesser bei, die sich nicht gut mit Zement verbinden und deshalb Schwachpunkte sind, an denen Mikrorisse auftreten können.

Die Fehlstellen dürfen aber auch nicht zu groß sein; sonst bilden sich die Mikrorisse zu leicht und werden zu ausgehend. Außerdem leidet die Druckfestigkeit. Es gibt also einen optimalen Größenbereich für die Defekte, der dafür sorgt, dass sich bei steigender Zugbelastung allmählich immer neue Mikrorisse entwickeln. Die statistische Verteilung der Defektgröße regelt somit die Geschwindigkeit, mit der die effektive Steifigkeit schrittweise ab- und die inelastische Verformung zunimmt. Insofern bestimmt sie den Verlauf der Zugspannungs-Dehnungs-Kurve eines ECC, vor allem im Übergangs- und Dehnungsverfestigungsbereich.

### Die Bedeutung der Kunststofffasern

Eine ganz wesentliche Rolle spielen aber auch die zugesetzten Polymerfasern. Sie entscheiden über die Tragfähigkeit der Mikrorissebenen, die pro Quadratzentimeter im Mittel mehr als 1000 von ihnen enthalten. Bei unseren ECCs verwenden wir üblicherweise Fasern aus Polyvinylalkohol (PVA) mit einem Durchmesser von 39 Mikrometern.

Wenn sich ein Mikroriss öffnet, steigt zunächst die auf die Fasern ausgeübte Kraft. Die Energie, die sie auffangen müssen, bleibt allerdings begrenzt, weil sich der Spalt nicht über einen gewissen Wert hinaus verbreitert. Deshalb besteht auch keine Gefahr, dass sie reißen oder komplett aus der Matrix herausgezogen werden, während sich der Mikroriss verlängert. Man spricht von flacher Rissausbreitung. Normalerweise wird ein Spalt mit zunehmender Länge dagegen immer breiter.

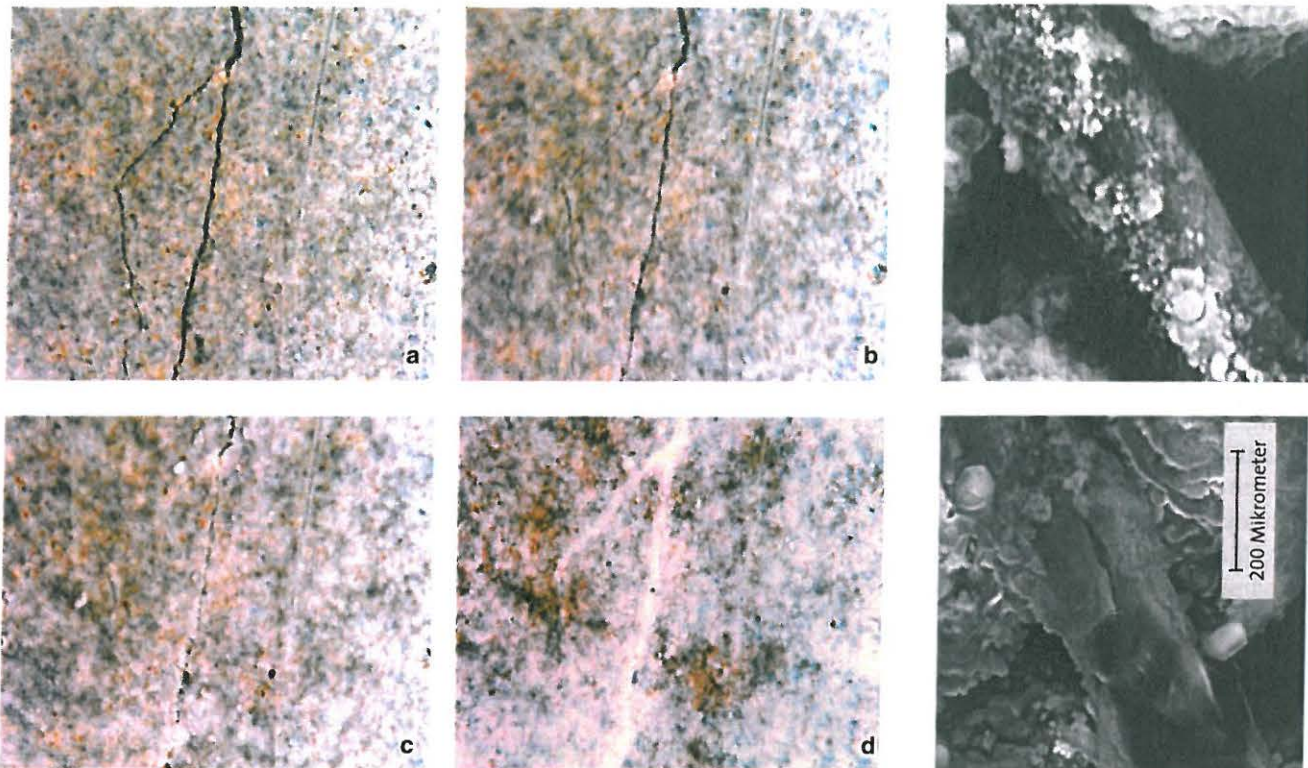
Sobald solch ein flacher Mikroriss entstanden ist und die ihn überbrückenden Fasern einen Teil der Spannung aufgenommen haben, bewirkt jede zusätzliche Belastung, dass sich an anderen Fehlstellen weitere Mikrorisse bilden. Dadurch erhöht sich die Tragfähigkeit des Betons, während er sich weiter dehnt.

Im Verlauf der vielfachen Rissbildung hängt die Zugbelastbarkeit der vorhandenen Mikrorisse davon ab, welche Spannung die sie überbrückenden Fasern verkraften. Da diese innerhalb des Komposits nicht völlig gleichmäßig verteilt sind, variiert der betreffende Wert von einer Rissebene zur anderen. Das ECC hat seine endgültige Zugfestigkeit erreicht, sobald die Belastbarkeit der Faserüberbrückung an einem der Mikrorisse voll ausgeschöpft ist. Menge, Durchmesser und Festigkeit der Fasern spielen also eine entscheidende Rolle. Zusammen mit der anfänglichen Verteilung der Fehlstellen bestimmen sie die Zugduktilität des Komposits.



Ein 2005 gegossenes Stück Fahrbahn aus biegsamem Beton auf einer Brücke im Südosten Michigans (oben) schließt sich nahtlos an den Asphalt links und rechts an. Die ECC-Platte übernimmt die Funktion einer herkömmlichen Dehnungsfuge. Während diese Fugen sonst schnell verschleißen, erfüllt sie bis heute ohne jede Reparatur ihre Aufgabe (unten).





AUFNAHME: VICTOR C. LI

Die Wechselwirkung zwischen Mikrorissen und Fasern ist komplex. Das gilt insbesondere dann, wenn beide sich unter einem schrägen Winkel kreuzen. Das aber dürfte bei den meisten Fasern der Fall sein, da sie innerhalb der Mörtelmatrix zufällig orientiert sind. Wichtig ist, dass sie während der Öffnung der Risse ein wenig verrutschen. Anderenfalls würden sie brechen. Sie dürfen aber nicht zu stark rutschen; sonst ginge die Verbundwirkung verloren, und der Mikroriss würde seine flache Form verlieren und sich in einen makroskopischen Bruch verwandeln.

In einem ECC ist der Schlupf kein einfacher Reibungsprozess, sondern beinhaltet eine Härtingsreaktion, so dass der Gleitwiderstand der Grenzfläche zwischen der Faser und dem umgebenden Mörtel während des Verrutschens zunimmt. Dieser Vorgang muss sorgfältig gesteuert sein, weil von ihm die Beziehung zwischen Spannung und Rissöffnung abhängt.

Die hochgradig nichtlineare Schlupfhärtung ergibt sich aus einer bewusst vorgesehenen Beschädigung der Faser beim Rutschen: Ihre Oberfläche wird dabei vom umgebenden rauen Zement – vor allem am hinteren Ende – zunehmend abgeschabt. Der sich ansammelnde Abrieb bewirkt, dass sich die Faser im Matrixtunnel, durch den sie rutscht, verkantet. Deshalb sind zum weiteren Herausziehen größere Kräfte nötig, und der Schlupf kommt zum Stillstand.

Die Steuerung des Vorgangs erfordert, die Oberflächenchemie der Faser systematisch abzustimmen. In meinem Arbeitskreis verwenden wir deshalb hydrophile – Wasser liebende – PVA-Fasern. Die meisten anderen Kunststofffasern stoßen Wasser ab, sind also hydrophob, und lassen sich mit wenig Widerstand aus Beton herausziehen. Die PVA-Fasern dagegen haften wegen ihrer hydrophilen Oberfläche sogar ei-

Biogamer Beton ist auch selbstheilend. Die Aufnahmeserie (a bis d) dokumentiert, wie sich ein verzweigter Riss durch mehrfaches Befeuchten und Trockenlassen wieder schließt. Die beiden mikroskopischen Bilder (rechts), die direkt nach der Beschädigung (oben) und 36 Stunden später (unten) entstanden, lassen erkennen, dass sich bei der Selbstheilung innerhalb des Risses und auf den Fasern, die ihn überbrücken, neues Material abscheidet.

gentlich zu stark an der Zementmatrix, weil sie mit Metallhydroxiden komplexe Cluster bilden. Sie neigen folglich dazu, beim Herausziehen zu brechen. Um das zu verhindern, überziehen wir sie mit einer 10 bis 100 Nanometer dicken Schicht eines hydrophoben Materials. Durch diesen Überzug ist das Haftvermögen zunächst nicht allzu hoch. Wenn er abgeschabt wird, sorgt neben dem Abrieb auch der freigelegte hydrophile Kern für eine festere Haftung an der Zementmatrix.

### Bewährung in der Praxis

Unsere ECCs haben bereits großtechnische Anwendungen gefunden – etwa für vorgefertigte Träger im Innern einiger japanischer Hochhäuser zur Verbesserung der Erdbebensicherheit. Eines davon ist der 2007 fertig gestellte, 41-geschossige Nabeaure Yokohama Residential Tower in Tokio (siehe Foto S. 89). Vier ECC-Träger auf jeder Etage verbinden hier die Ecken der Kernstruktur. Bei einem Erdbeben sind diese Verbindungsbalken großen Scherkräften ausgesetzt. Durch Verformung führen sie die einwirkende seismische Energie ab. Da die Festigkeit unter der Deformation nicht leidet, kommt es nicht zum Kollaps des Hochhauses.



Biegsamer Beton kann auch die Lebensdauer einer technischen Konstruktion erhöhen, indem er Frostschäden, die Korrosion des Bewehrungsstahls durch eindringendes Chlorid (etwa von Streusalz) und das Auftreten von Ermüdungsrissen verzögert oder minimiert. So dient eine Verbindungsplatte aus ECC auf einer Brücke im Südosten Michigans als Dehnfuge (Bild S. 90). Herkömmliche Dehnfugen aus Beton müssen häufig repariert werden, bei stark befahrenen Brücken manchmal sogar jährlich.

Die ECC-Platte ist über Bewehrungsstäbe mit den benachbarten Deckplatten und mit den Stahlträgern der Betonbrücke verbunden. Sie streckt sich dank ihrer Fähigkeit zur inelastischen Zugverformung, wenn sich die Brückenträger bei einem Temperaturanstieg ausdehnen, und zieht sich im umgekehrten Fall wieder zusammen. Anders als herkömmliche Dehnungsfugen verkantet sie aber nicht und lässt auch kein chloridhaltiges Wasser eindringen. Tatsächlich befindet sie sich immer noch im gleichen einwandfreien Zustand wie bei ihrem Einbau 2005 – bisher war keine Reparatur nötig.

### Selbsteilung und Selbstüberwachung

Biegsamer Beton hat noch zwei weitere wertvolle Eigenschaften: die Fähigkeit zur Selbsteilung und zum Selbstmonitoring. Ein ECC-Bauteil könnte in künftigen Konstruktionen also Schäden von sich aus reparieren. Dank des Selbstmonitorings würde es zudem eigenständig Informationen über seinen Zustand an Kontrollstationen liefern und so eine einfache Überwachung aus der Ferne ermöglichen. Beide Funktionen beruhen auf der Schadenstoleranz des ECC und werden derzeit von uns genauer erforscht.

Die Fähigkeit zur Selbsteilung konnten wir an Proben nachweisen, die wir zuvor in einer Apparatur stark belastet und dabei beschädigt hatten. Wenn wir die Werkstücke anschließend mehrfach hintereinander befeuchteten und trocknen ließen, schlossen sich die Mikrorisse von selbst wieder.

Wie der Heilungsprozess abläuft, zeigen rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen (Bilder S. 91 rechts). Darauf ist zu sehen, dass sich auf den überbrückenden Fasern innerhalb des Risses und auf der Rissoberfläche selbst neue chemische Verbindungen anlagern. Dabei handelt es sich, wie wir herausfanden, um eine Mischung aus Kalziumsilikathydrat und Kalziumhydrogenkarbonat. Sie bilden sich, wenn Wasser und kohlendioxidhaltige Luft in die Mikrorisse eindringen und mit ausgewaschenen Kalziumionen des ECC reagieren. Nach einiger Zeit hatten sie die Mikrorisse vollständig versiegelt.

Die beiden Substanzen formen ein festes Mikrokomposit, durch das der beschädigte Beton seine früheren mechanischen Eigenschaften zurückgewinnt. Das bewiesen erneute Belastungstests mit der geheilten Probe: Sie hatte ihre ursprüngliche Steifheit, Festigkeit und Duktilität komplett wiedererlangt.

Zum Selbstmonitoring dienen Leitfähigkeitsmessungen. Legt man zwischen zwei Punkten einer ECC-Probe mittels zwei Elektroden eine elektrische Spannung an, fließt ein Strom, weil sich die Ionen in den untereinander verbunde-

nen Kapillarporen des Zements jeweils zum entgegengesetzt geladenen Pol hin bewegen. Wenn sich Mikrorisse bilden, versperren sie diesen Ionen teilweise den Weg, was den lokalen Widerstand des Materials deutlich erhöhen kann. Mit weiteren Elektroden lässt sich die Potenzialverteilung rund um einen beschädigten Bereich ermitteln und daraus über eine so genannte Inversion eine Leitfähigkeitskarte des Mediums innerhalb der Schadzone erstellen.

Mit dieser auf der elektrischen Impedanztomografie (EIT) basierenden Bildgebung befasst sich die Arbeitsgruppe von Jerome Lynch in dem von ihm geleiteten Laboratory for Intelligent Structural Technology an der University of Michigan. Auf den dort erstellten vorläufigen EIT-Karten eines ECC fallen, wie erwartet, die Linien erhöhten spezifischen Widerstands – oder verringerter Leitfähigkeit – recht genau mit den sichtbaren Mikrorissen zusammen. In weiterentwickelter Form dürfte dieses Verfahren eine kostengünstige Möglichkeit bieten, nur mit Elektroden und ohne zusätzliche Sensoren den Zustand des Betons zu überwachen und genau festzustellen, wann irgendwo ein gefährlicher Defekt auftritt.

Eines nicht allzu fernen Tages könnte ein ECC-Material somit, ähnlich unserer Haut, von sich aus feststellen, wo es beschädigt wurde und daraufhin nicht nur eine Selbsteilung einleiten, sondern den Reparaturvorgang zugleich autonom überwachen. Beton wird dann nicht nur biegsam sein, sondern auch intelligent und auf diese Weise Konstruktionen ermöglichen, die das Leben in städtischen Ballungsräumen noch angenehmer und sicherer zugleich machen. ~

### DER AUTOR



**Victor C. Li** ist Professor für Bauingenieurwesen und Umwelttechnik sowie für Materialwissenschaften und Ingenieurwesen an der University of Michigan in Ann Arbor. Er hat 1981 an der Brown University in Providence (Rhode Island) in Festkörper- und Strukturmechanik promoviert und hält neun US-Patente.

### QUELLEN

- Lepech, M.D., Li, V.C.:** Large-scale Processing of Engineered Cementitious Composites. In: *ACI Materials Journal* 105, S. 358–366, 2008
- Li, V.C.:** On Engineered Cementitious Composites (ECC): A Review of the Material and its Applications. In: *Journal of Advanced Concrete Technology* 1, S. 215–230, 2003
- Li, V.C.:** Tailoring ECC for Special Attributes: A Review. In: *International Journal of Concrete Structures and Materials* 6, S. 135–144, 2012
- Li, V.C., Herbert, E.:** Robust Selfhealing Concrete for Sustainable Infrastructure. In: *Journal of Advanced Concrete Technology* 10, S. 207–218, 2012
- Li, V.C., Sahmaran, M.:** Engineered Cementitious Composites: Can Composites Be Accepted as a Crack-free Concrete? In: *Transportation Research Record* 2164, S. 1–8, 2010

### WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1199284](http://www.spektrum.de/artikel/1199284)

© American Scientist