



AUTHOR

Prof. Dr.-Ing. habil. Christian U. Große; Technische Universität München

grosse@tum.de

Studium der Geophysik an der Universität Karlsruhe (jetzt Karlsruher Institut für Technologie, KIT); 1996 Promotion im Fachgebiet Bauingenieurwesen an der Universität Stuttgart; 2005 Habilitation und der Venia Legendi für das Fach Werkstoffprüfung an der Universität Stuttgart; 2005-2006 Auslandsaufenthalt als Visiting Research Scholar an der University of California in Berkeley, USA; Privatdozent und später stellvertretender Direktor der Materialprüfungsanstalt der Universität Stuttgart; 2010 Ruf auf die neuingerichtete Professur für Zerstörungsfreie Prüfung am Centrum Baustoffe und Materialprüfung (cbm) der Technischen Universität München; Mitglied der Ingenieur fakultät Bau-Geo-Umwelt und der Fakultät für Maschinenwesen

Concrete with properties to repair itself

Development and testing

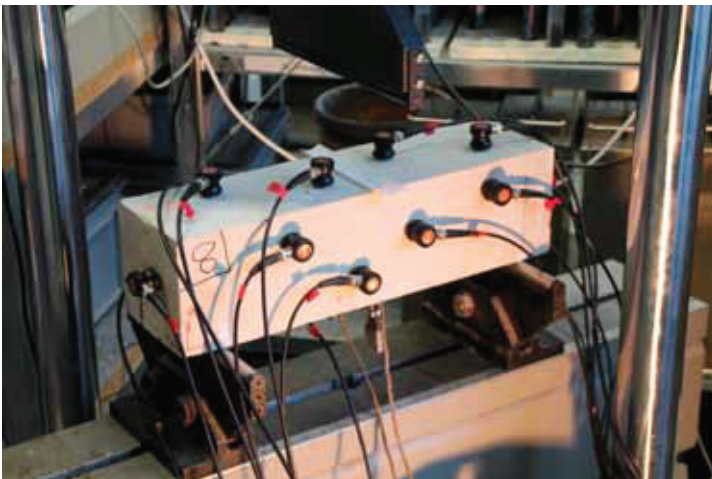
Betone mit Selbstheilungseigenschaften

Entwicklung und Prüfung

The development of cementitious materials exhibiting properties to heal or seal, respectively, cracks is an actual topic, while autogenous healing mechanisms – in regard to fractures with water penetrating through them – were intensively investigated earlier (Yang et al. 2009; Edvardsen 1996; Jooß 1999). Some of the mechanisms are the expansion of the cementitious matrix, post-hydration or carbonization of cement via the formation of calcium carbonate. However, it is known that only small cracks can be healed by these autogenous healing mechanisms and other techniques are required (Van Tittelboom & De Belie 2010) being applied for larger cracks and different crack types. For early age cracks, a non-elastic repair material can be proposed, such as calcium carbonate precipitated by bacteria (Jonkers 2011) or new cement hydrates of which the formation is stimulated by the presence of hydrogels. For moving cracks under dynamic load, an elastic polymeric healing agent (PUR or Epoxy resin) is suggested that is encapsulated in micro-capsules (Van Tittelboom 2011). Under the influence of crack propagation these capsules are broken releasing the polymeric agent that is sealing elastically the crack. The further development of all mentioned techniques is the aim of the Healcon project described in more detail below.

Die Entwicklung von Selbstheilungseigenschaften für zementgebundene Baustoffe ist ein aktuelles Forschungsthema. Die autogene Heilung, bei der wasserdurchströmte Trennrisse sich selbst abdichten, ist seit langem bekannt und wurde eingehend untersucht (Yang et al. 2009; Edvardsen 1996; Jooß 1999). Die Ursachen für diesen Vorgang können ein Quellen des Zementsteins, eine Nachhydratisierung oder eine Carbonatisierung durch Bildung von Calciumcarbonat sein. Durch diese Heilungsmechanismen lassen sich allerdings nur kleine Risse schließen. Deswegen wird seit einigen Jahren (Van Tittelboom & De Belie 2010) mit anderen Techniken experimentiert, die jeweils für unterschiedliche Rissarten geeignet sind. Für Risse im noch jungen Beton werden Mikrobakterien untersucht (Jonkers 2011), die Calciumcarbonat ausscheiden, sowie Zemente mit einem Zusatz an Hydrogelen, die die Füllung von Hohlräumen stimulieren können. Für dynamisch belastete Risse können Mikrokapseln mit elastischen Polymeren (Polyurethan oder Epoxidharze) eingesetzt werden (Van Tittelboom 2011). Bei einem Riss beziehungsweise Rissfortschritt zerbrechen diese Kapseln und geben das Polymer frei, das die Risse elastisch verschließt. Die genannten Heilungsmechanismen sind Gegenstand von Untersuchungen im Rahmen des unten beschriebenen Projektes Healcon.

Für baupraktische Anwendungen der Selbstheilung ist unbedingt der Heilungserfolg sicherzustellen und nachzuweisen. Allerdings ist die zerstörungsfreie Untersuchung des Heilungserfolges und der Heilungseffizienz sowohl für Labor- als auch für Bauwerksanwendungen schwierig. Die meisten in der Literatur erwähnten Verfahren konzentrieren sich auf die Bestimmung der Wiedererlangung der Druckfestigkeit und dabei werden in der Regel zerstörende Verfahren eingesetzt. Zu den offensichtlichen Nachteilen im baupraktischen Einsatz zählt für Laboranwendungen auch, dass das Prüfobjekt nach dem Experiment nicht mehr für weitere Analysen zur Verfügung steht. Deswegen sind zerstörungsfreie Prüfverfahren vorzuziehen.



→ 1 Acoustic emission measurements during a crack width controlled three-point bending experiment at TU Munich to test self-healing efficiency

Dreipunktbiege-Experimente mit 16 Kanälen (rissöffnungsgesteuert durch Dehnungsaufnehmer) zur Aufzeichnung der Schallemissionen bei Beton mit Selbstheilungscharakter



AUTHOR

Fabian Malm, M.Sc.; Technische Universität München

fabian.malm@tum.de

2006 bis 2012 Studium des Bauingenieurwesens an der Technischen Universität München; Masterarbeit „Schallemissionsanalyse am humanen Femur“ am Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung (Prof. Christian U. Große); seit 2013 wissenschaftlicher Mitarbeiter am genannten Lehrstuhl; Lehrtätigkeiten und Betreuung des Projektes Healcon (Self-healing concrete to create durable and sustainable concrete structures), das im 7. Rahmenprogramm von der Europäischen Kommission gefördert wird



For in-situ applications a validation of the healing efficiency is essential what should be done by means of non-destructive testing and structural health monitoring techniques. However, it is always challenging to determine the degree of healing and the healing efficiency in laboratory or field experiments. Most techniques reported in literature are focusing on the evaluation of the regain in strength by means of destructive load tests. Nevertheless, this method – although being straight forward and simple to be applied – doesn't seem to be appropriate for a healing issue and does certainly not reflect the state of the art in non-destructive evaluation (NDE) techniques.

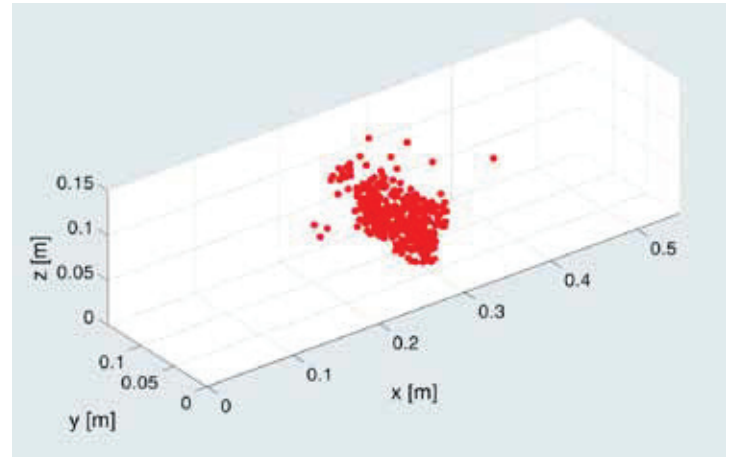
Non-destructive testing techniques

Non-destructive testing has the potential to evaluate fractures in concrete but also monitor the release of healing agents or the loss and regain of properties including gas or water tightness. Moreover, NDE methods can support the selection and right composition of suitable healing agents for individual applications. The methods that are candidates to be used for monitoring of self-healing (either at the laboratory or field scale) are ultrasound (in through-transmission and reflection, e. g. In et al. 2013), acoustic emission (Granger et al. 2007), infrared thermography (passive or active), microwave and RADAR techniques, resonance frequency and modal analysis measurements and several other techniques like CT scanning (for lab tests only), fiber optical or displacement field mapping techniques. Measurements of e.g. strain, crack opening, temperature, humidity, electric impedance for salt and moisture determination can be integrated in small wireless sensor networks for long-term monitoring of large structures.

Project Healcon

In an EU project called Healcon (Self-healing concrete to create durable and sustainable concrete structures, <http://www.healcon.eu/>) different healing agents and encapsulation techniques are tested and scaled up. Self-healing efficiency is evaluated in lab-scale tests using purposefully adapted monitoring techniques, and optimized with the help of suitable computer models. Finally the efficiency is validated in a large scale lab test and implemented in an actual concrete structure. Life-cycle cost analysis will show the impact of the self-healing technologies on economy, society and environment compared to traditional construction methods.

The best candidates among the non-destructive testing methods are investigated to be applied in small and large laboratory experiments as well as at real structures in-situ. Besides NDT structural health monitoring is investigated being used for example to monitor the healing effects on a long term basis and to assess the condition of the structure, where self-healing techniques are applied.



→ 2 Acoustic emission activity recorded after healing of the specimen shown in Fig. 1

Schallemissionsaktivität im Prüfkörper aus Abb. 1 aufgezeichnet nach Selbstheilung

Zerstörungsfreie Prüfung

Die Zerstörungsfreie Prüfung (ZFP) kann beispielsweise eingesetzt werden, um die Entstehung oder das Fortschreiten von Rissen zu beobachten. Auch die Freisetzung der Heilungsmittel sowie die Veränderung der Materialeigenschaften (Permeabilität von Gasen und Flüssigkeiten) kann untersucht werden. Die Bestimmung der Wirkungsweise von Heilungsmitteln kann danach bei der Wahl der effizientesten Heilungstechnik und zur Optimierung der Rezeptur beitragen. Geeignete zerstörungsfreie Prüfverfahren für diese Aufgabenstellung sind unter anderem die Ultraschalltechnik (in Durchschallung und Reflexion, z. B. In et al. 2013), die Schallemissionsanalyse SEA (Granger et al. 2007), die aktive oder passive Infrarot-Thermographie, Mikrowellen- und RADAR-Techniken, Schwingungs- und Modalanalyse sowie die Computer-Tomographie (für Laboruntersuchungen), Faser-optische Methoden oder das „Displacement Field Mapping“. Bei Dauerüberwachungstechniken können in drahtlose Sensorknoten zudem Sensoren für die Messung von Dehnung, Rissöffnung, Temperatur, Feuchte und elektrische Impedanz integriert werden.

EU-Projekt Healcon

In einem Projekt mit der Abkürzung Healcon (Self-healing concrete to create durable and sustainable concrete structures, <http://www.healcon.eu/>), gefördert von der Europäischen Kommission, werden autonome Heilungstechniken entwickelt beziehungsweise weiterentwickelt. Dabei wird die Effizienz der Selbstheilung in Laborexperimenten mit geeigneten zerstörungsfreien Überwachungstechniken beobachtet und anschließend in Verbindung mit Simulationstechniken optimiert. Im Anschluss wird in großen Bauteilexperimenten

First NDT results to validate self-healing

In a previous study experiments at the University of Stuttgart using acoustic emission (AE) techniques were conducted by Van Tittelboom et al. (2012). Acoustic emissions being released during a three-point bending experiment at concrete beams with polymer capsules as healing agents have been recorded by an 8-channel transient recorder and acoustic emission broadband transducers. Following these experiments new data have been obtained in the frame of the Healcon project by a 16-channel transient recorder (Fig. 1). The crack formation before and after healing has been recorded continuously during loading and unloading of the specimens and the events were localized in 3D (Fig. 2). The signals (AE events) have been divided in arbitrarily chosen classes based on the AE events energy. It was supposed that AE events belonging to the highest classes were caused by capsule breakages. However, further research is needed to confirm this and eventually define more correct energy classes belonging to crack formation in the cementitious matrix, capsule breakage, reopening of previously healed cracks and so on. Optimization of the captured frequency range should also allow proving crack healing irrespective the type of used healing agent and the sample's size.

AE techniques alone will certainly not be sufficient. The range of applications from small to larger lab scale tests and up to real constructions requires different NDT approaches making the selection and combination of techniques more difficult. There are generally two ways NDT techniques can contribute. One is the observation of healing mechanisms and successes during mechanical loading. This will be done in small lab-scale, large lab or in field tests. The other is to assess the condition of the structure, where self-healing is studied. This is important for tests at a larger scale, while for smaller lab tests this is of minor interest since the composition and condition of the specimen is well controlled. In particular this is of interest also to offer real data about material properties for the numerical simulation.

The characterization of the specimens or structural components at each scale in regard to their mechanical properties can be done by ultrasound, microwave/Radar and vibration measurements. These methods will deliver information about the elastic moduli, the wave velocities, permittivity and about other material properties necessary to be determined for numerical simulations. Some of these fundamental values are in addition essential to be determined prior to NDT applications.

Ultrasonic and vibration (modal) analysis methods can further on be applied to characterize the material properties in a more global way. Ultrasound transmission and reflection methods will help to evaluate the healing efficiency by the observation of changes of the velocity (compressional and shear), amplitude and frequency. They can characterize the healing efficiency by investigating changes of e.g. Young's modulus.

Infrared thermography, microwave/RADAR and in particular acoustic emission techniques can deliver detailed data about the healing process. AE techniques can basically be applied in small and larger lab tests to study the occurrence and distribution of micro-fractures during the experiments. Using 3D localization techniques enables for a spatial and time resolution observation of fracture processes. If possible, more sophisticated AE methods can be applied including moment tensor inversion techniques to distinguish between opening and shear fractures (Grosse and Ohtsu 2008). Data about the fracture type can help to separate cracks in the cement matrix from fractures of the tubes. However, AE tech-

und an Realbauwerken diese Technik implementiert, gefolgt von einer Lebenszyklusanalyse. Im Rahmen dieser Analyse müssen die ökonomischen, gesellschaftlichen und umweltrelevanten Aspekte im Vergleich zu den traditionellen Bauweisen ausgelotet werden.

Die am besten geeigneten Verfahren der Zerstörungsfreien Prüfung werden ausgewählt, um unter Labor- und Feldbedingungen (Klein- und Großbauteiltests) getestet zu werden. Neben ZfP-Verfahren werden Dauerüberwachungsverfahren (Structural Health Monitoring) untersucht, die eine langfristige Überwachung der Heilungseffizienz und der Materialeigenschaften ermöglichen.

Erste ZfP-Untersuchungen zur Überprüfung des Heilungserfolgs

In einer ersten Untersuchung wurden an der Universität Stuttgart Schallemissionsexperimente durchgeführt (Van Tittelboom et al. 2012). Die Schallemissionen entstanden während eines Dreipunktbiegeversuchs in Betonbalken, die mit Polymerkapseln ausgestattet waren. Die Daten wurden durch einen 8-Kanal-Transientenrekorder mit ebenso vielen Breitbandsensoren aufgezeichnet. In der Folge wurden im Rahmen des Healcon-Projektes weitere Experimente durchgeführt, bei denen eine 16-Kanal-Apparatur verwendet wurde (Abb. 1). Die Schallemissionsentwicklung konnte vor und nach der Heilung kontinuierlich beobachtet werden und lässt sich als dreidimensionale Darstellung der Mikrorisse abbilden (Abb. 2). Diese Signale können aufgrund ihrer Amplitudenwerte (Signalenergie) unterschieden werden, wobei wahrscheinlich die größeren Amplituden dem Brechen der Mikrokapseln zuzuordnen sind. Diese These muss allerdings noch in der laufenden Versuchsserie verifiziert werden und es ist zu erwarten, dass die Signalenergien eine Diskriminierung gegenüber Rissfortschritten oder dem erneuten Öffnen von Rissen erlauben. Eine genauere Analyse sollte beispielsweise auch die Untersuchung des Frequenzgehalts der aufgezeichneten Signale ermöglichen.

Dabei kann die SEA sicherlich nicht alle Fragen klären. Die Bandbreite der Untersuchungen, von kleinskaligen Laborexperimenten zu großskaligen und Feldexperimenten, erfordert die Anwendung verschiedener ZfP-Verfahren im Hinblick auf Verfahrenskombinationen. Generell können ZfP-Verfahren in zweifacher Weise zu den geplanten Untersuchungen beitragen. Zum einen wird die Wirkungsweise der Heilungsmechanismen in klein- und großskaligen Experimenten beobachtet. Zum anderen kann eine Analyse der Materialeigenschaften der Bauteile mit Selbstheilungscharakter unter Realbedingungen durchgeführt werden. Das ist für die erstgenannten Experimente weniger wichtig, da bei den Laborexperimenten diese Eigenschaften weitgehend bekannt sind. Gemessene Daten sind insbesondere für den Abgleich mit der numerischen Simulation notwendig.

Für die Untersuchung auf unterschiedlichen Skalen lassen sich Verfahren wie die Ultraschalltechnik, Mikrowellen oder RADAR und Eigenschwingungstechniken anwenden. Dabei werden Informationen zum E-Modul, den Wellengeschwindigkeiten, der Permittivität und anderen Materialeigenschaften gewonnen, die für die Simulation benötigt werden. Zudem helfen diese Informationen im Hinblick auf eine effizientere Anwendung der ZfP-Verfahren.

Für eine integrale Untersuchung der Materialeigenschaften eignen sich Ultraschall- und Eigenschwingungsmethoden. Insbesondere eignen sich Ultraschallverfahren in Durchschallung und Reflexion zur Beobachtung der Wellengeschwindigkeit (Kompressions- und Scherwellen), der Amplitude und Frequenz in Abhängigkeit vom Heilungserfolg. Ein wesentlicher Materialparameter, der aus diesen physikalischen Messgrößen abgeleitet werden kann, ist der Elastizitätsmodul.

Verfahren auf Basis von elektromagnetischen Wellen wie die Infrarot-Thermographie, Mikrowellen/RADAR liefern zu elastischen

niques have limits being applied in the field. Infrared thermography can be used in an active lock-in way to observe the healing efficiency by detecting the release of resin. Microwave and RADAR techniques are as well sensitive to fluids and are able to detect released resin in a shallow (microwave) or deeper (RADAR) area underneath the surface of a structure.

For a continuous monitoring, AE and vibration analysis techniques are qualified. Some physical quantities (e.g. moisture content, temperature, and strain or crack width) that are related to self-healing investigations can be monitored by sensor nodes measuring more or less continuously (Grosse et al. 2010). Using such a device usually several different sensors are combined and data processing is done directly in the node.

Conclusions

Non-destructive testing methods have the potential being employed to find out whether self-healing approaches are able to show repeated healing actions. Possibly several non-destructive techniques have to be combined to increase the reliability. Reliability can be further enhanced by the application of verification techniques, among them are radiographic CT scans. However, this is true only for experiments on the laboratory level and probably not for micro-bacteria based healing techniques. Other NDT techniques are certainly needed in particular for in-situ applications. In the Healcon project it will be investigated which potential each of the described techniques has to check the efficiency of healing.

Acknowledgements

The European Commission, DG Research & Innovation, partly supports the described work in the frame of the collaborative project Healcon via grant number 309451. The authors are thankful for the support by the Healcon partners and by their colleagues at the Center for Building Materials of the Technical University of Munich.

REFERENCES · LITERATUR

- [1] Edvardsen, C.: Wasserdurchlässigkeit und Selbstheilung von Trennrissen in Beton, DAFStb, Heft 455, Berlin, 1996.
- [2] Granger, S., Loukili, A., Pijaudier-Cabot, G., Chanvillard, G.: Experimental characterization of the self-healing of cracks in an ultra high performance cementitious material: Mechanical tests and acoustic emission analysis. *Cement and Concrete Research* 37 (4), 2007, S. 519-527.
- [3] Grosse, C. U., Ohtsu, M. (Hrsg.): *Acoustic Emission Testing in Engineering – Basics and Applications*. Springer publ., Heidelberg, 2008.
- [4] Grosse, C. U., Glaser, S. D., Krüger M.: Initial development of wireless acoustic emission sensor nodes for civil infrastructure state monitoring, in: *J. of Smart Structures & Systems* 6, 2010, Nr. 3, S. 197-209.
- [5] In, C.-W.; Holland, R. B.; Kim, J.-K.; Kurtis K. E.; Kahn, L. F.; Jacobs, L. J.: Monitoring and evaluation of self-healing in concrete using diffuse ultrasound, in: *NDT&E Int.* 57, 2013, S. 36-44.
- [6] Jooß, M.: Selbstheilung von Beton unter Temperatureinfluss, in: Christian Große (Hrsg.): *Werkstoffe und Werkstoffprüfung im Bauwesen – Festschrift zum 60. Geburtstag von H.-W. Reinhardt*, Libri Books on Demand, S. 149-160.
- [7] Jonkers, H. M.: Bacteria-based self-healing concrete, in: *Heron* 56 (1/2), 2011, S. 1-12.
- [8] Van Tittelboom, K.; De Belie, N.: Self-healing concrete: suitability of different healing agents. *International Journal of 3R's* 1 (1), 2010, S. 12-21.
- [9] Van Tittelboom, K.; De Belie, N.; Van Loo, D.; Jacobs, P.: Self-healing efficiency of cementitious materials containing tubular capsules filled with healing agent. *Cement and Concrete Composites* 33 (4), 2011, S. 497-505.
- [10] Van Tittelboom, K.; De Belie, N.; Lehmann, F.; Grosse, C. U.: Acoustic emission analysis for the quantification of autonomous crack healing in concrete. *Construction and Building Materials* 28 (1), 2012, S. 333-341.
- [11] Yang, Y.; Lepech, M. D.; Yang, E.-H.; Li, V. C.: Autogenous healing of engineered cementitious composites under wet-dry cycles. *Cement and Concr. Res.* 39 (5), 2009, S. 382-390.a

Wellenverfahren wie der Schallemissionsanalyse kompletere Daten. Die Schallemissionsanalyse (SEA) liefert eine Abbild der Mikrorissentwicklung in raumzeitlichen Darstellungen (4D) während der Belastung beispielsweise in Laborexperimenten. Darüber hinaus können komplexere Inversionsverfahren der SEA wie die Momententensoranalyse auch helfen, Öffnungs- von Scherbrüchen zu unterscheiden (Grosse und Ohtsu 2008). Das wiederum kann zukünftig helfen, die Schallemissionen der Mikrokapselbrüche von denen der Betonmatrix zu unterscheiden. Allerdings ist noch unklar, wieweit sich diese Technik an Realbauteilen einsetzen lässt. Wird die Infrarot-Thermographie in aktiver Form als Lockin-Technik angewendet, so kann darüber unter Umständen die Durchdringung der Risse mit polymerischen Heilmitteln beobachtet werden. Dies kann durch die Anwendung von Mikrowellen- und RADAR-Techniken unterstützt werden, wobei sich damit unterschiedlich dicke Strukturen untersuchen lassen.

Im Hinblick auf eine Dauerüberwachung eignet sich neben der SEA auch die Eigenschwingungs- und Modalanalyse. Modale Parameter sind beispielsweise sensitiv für physikalische Materialparameter wie Feuchte, Temperatur, Dehnung und Mikrorisse. Diese Größen können durch die Anwendung modernster drahtloser Messtechnik (Sensorknoten, Sensornetze) auch kontinuierlich an Realbauteilen beobachtet werden (Grosse et al. 2010). Die drahtlosen Sensorknoten eines Sensornetzes lassen sich dabei jeweils mit verschiedenen Sensoren (Sensorkombinationen) ausrüsten, wobei eine Datenvorverarbeitung in den Sensorknoten oder einem Cluster von Sensorknoten erfolgt.

Zusammenfassung

Zerstörungsfreie Prüfmethoden haben das Potenzial, bei der Analyse des Heilungserfolges von Betonen mit Selbstheilungseigenschaften eingesetzt zu werden. Es ist wichtig, den Heilungserfolg dadurch überprüfen zu können, um dem Anwender dieser Technik Vertrauen in die neuen Baustoffeigenschaften zu geben. Es erscheint notwendig, eine Kombination von unterschiedlichen Messverfahren einzusetzen, zu denen auf Seite von Laborexperimenten auch radiografische CT-Scan-Techniken gehören können. Für mikrobakterielle Heilungstechniken ist dieses Verfahren jedoch problematisch und es lässt sich auch nicht an Realbauteilen einsetzen. Weitere Verfahren sind notwendig, die im Projekt Healcon (gefördert von der Europäischen Kommission) entwickelt und im Artikel beschrieben werden.

Danksagung

Die Europäische Kommission, DG Research & Innovation, fördert einen Teil der Arbeiten im Rahmen des Gemeinschaftsprojektes Healcon unter der Projektnummer 309451. Weiterhin danken die Autoren den Projektpartnern für die enge Zusammenarbeit, sowie den Kolleginnen und Kollegen am Centrum Baustoffe und Materialprüfung der Technischen Universität München für die Unterstützung bei der Vorbereitung und Durchführung der Versuche.