

Zusammenfassung zur Promotionsschrift

# **Analytical Modeling of Self-Healing and Super Healing in Cementitious Materials**

## **DISSERTATION**

Zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

an der Fakultät Bauingenieurwesen der

Bauhaus-Universität Weimar

vorgelegt von

**Chahmi Oucif**

aus Oran, Algerien

(interner Doktorand)

Mentor

Prof. Dr.-Ing. Timon Rabczuk

Weimar, Juli 2019

## **Problemstellung und Zielsetzung**

1. Zementhaltige Materialien wie Beton unterliegen aufgrund von Umwelt- und mechanischen Bedingungen natürlichen und künstlichen Degradierungen, welche sich durch die Initiierung und Ausbreitung von Mikrorissen manifestieren. Daher ist es unverzichtbar, Schäden zu reparieren und die Steifigkeit und Festigkeit der zementhaltigen Materialien zu verbessern.
2. Selbstheilende Materialien sind in letzter Zeit aufgrund ihrer Fähigkeit zur Selbstreparatur der Risse und ihrer geringen Kosten für die Reparatur von Strukturen populärer geworden.
3. Das Konzept der Selbstheilung gibt dem Material die Möglichkeit, Schäden automatisch – ohne menschlichen Eingriff – zu reparieren. Die Heilung ist ein Ergebnis chemischer Reaktionen, die im Material stattfinden.
4. Ein anderes Konzept, das auftritt, nachdem das Material vollständig geheilt (repariert) wurde, wird als „Superheilung“ bezeichnet. Mit diesem Konzept kann sich das Material nicht nur automatisch selbst heilen, sondern auch automatisch selbst stärken. Es wird davon ausgegangen, dass die Selbstheilung und die Superheilung durch die gleichen Materialien erzeugt werden.
5. Die numerische Modellierung selbstheilender Materialien steckt noch im Anfangsstadium. In der Literatur wurden mehrere experimentelle Untersuchungen durchgeführt, um das Selbstheilungsverhalten zementhaltiger Materialien zu beschreiben. Es gibt deutlich weniger numerische Untersuchungen zu diesem Thema. Um das Verhalten selbstheilender Materialien besser verstehen zu können, sind mechanische und analytische Modelle unabdingbar.
6. Das Ziel dieser Arbeit liegt darin, ein mechanisches Modell selbstheilender und superheilender Materialien zu entwickeln. Folgende Aspekte sind hierbei zu berücksichtigen:
  - Entwicklung eines Schadensheilungsmodells für Beton und Beschreibung des Verhaltens verschiedener Selbstheilungsmechanismen unter verschiedenen Belastungsbedingungen.
  - Entwicklung einer neuen Theorie der Stärkung der Materialien, basierend auf der Superheilungstheorie und deren Anwendung auf isotrope und anisotrope Materialien.
  - Anwendung nichtlinearer Selbstheilungs- und Superheilungstheorien und Vergleich mit den linearen Selbstheilungs- und Superheilungstheorien.

## **Stand der Wissenschaft**

7. Die Selbstheilungstheorie wurde 1836 an der Französischen Akademie der Wissenschaften entdeckt. Dabei wurde festgestellt, dass das aus dem hydratisierten Zement strömende Calciumhydroxid bei Kontakt mit der Atmosphäre in Calciumcarbonat umgewandelt wird. Es gibt zwei Kategorien von Selbstheilungsmechanismen:
  - die autogene Selbstheilung, die auf die laufende Hydratation von Klinkermineralien oder Karbonisierung von Calciumhydroxid zurückzuführen ist,

- die autonome Selbstheilung, die auf Einbettungskapseln oder Hohlfasern in der Materialmischung basiert. Die Kapseln oder die Hohlfasern enthalten geeignete flüssige Heilmittel, die die Risse füllen und heilen können.
8. Aufgrund der Komplexität des Modellierungsansatzes, welche heterogenen Materialien zugeschrieben wird, wurden nur wenige mechanische/numerische Modelle zur Selbstheilung entwickelt und auf zementhaltige Materialien angewendet. Dementsprechend stellt die physikalische Modellierung der Selbstheilung in heterogenen Materialien eine große Herausforderung dar. Dennoch gibt es verschiedene analytische und numerische Modelle, die das Verhalten der selbstheilenden Materialien analysieren.
  9. In der Literatur basieren die mechanischen/numerischen Modelle entweder auf der Bruchmechanik oder der Kontinuumsschädigungsheilungsmechanik (CDHM). CDHM ist die Erweiterung der Kontinuumsschädigungsmechanik (CDM) unter Berücksichtigung der Heilungsvariablen in den Konstitutivgleichungen. Die gebräuchlichsten Selbstheilungsmodelle, die auf der Bruchmechanik basieren, sind die Modelle von Schapery (1989), Little et al. (2007) und Bhasin et al. (2008). CDHM erschien erstmals bei Barbero et al. (2005), die die Heilungsvariable in die Kontinuumsschädigungsmechanik einführten. Mehrere zusätzliche Untersuchungen wurden von Abu Al-Rub et al. (2010), Voyiadjis et al. (2011) und Darabi et al. (2012) durchgeführt. Trotzdem werden diese Untersuchungen unter Verwendung vieler Materialparameter formuliert, die experimentell schwer zu identifizieren sind. Des Weiteren beschränken sich die Untersuchungen auf die lineare Selbstheilungstheorie. Zusätzlich wurde keine detaillierte Formulierung der Superheilungstheorie präsentiert.

## **Methodik**

10. Ein einfaches Schadensheilungsmodell wird vorgeschlagen und auf Betonmaterial angewendet. Das Modell betrachtet den Beton auf der Makroebene als isotropen Werkstoff. In der vorliegenden Arbeit bezeichnen wir „gekoppelte Selbstheilung“ für einen autonomen Heilungsmechanismus und „ungekoppelte Selbstheilung“ für einen autogenen Heilungsmechanismus.
11. Bei der gekoppelten Heilung wird davon ausgegangen, dass die Heilung gleichzeitig mit der Schädigungsentwicklung erfolgt, während bei der ungekoppelten Heilung zugrunde gelegt wird, dass das Material während einer Ruheperiode geheilt wird, wenn die Schädigung konstant ist. Um sowohl gekoppelte als auch ungekoppelte Heilungsmechanismen zu beschreiben, wird ein eindimensionales Modell unter verschiedenen Belastungsbedingungen entwickelt.
12. Es wird eine Herleitung der nichtlinearen Selbstheilungstheorie gegeben und ein Vergleich von linearen und nichtlinearen Schadensheilungsmodellen durchgeführt. Die nichtlineare Heilungstheorie umfasst verallgemeinerte nichtlineare und quadratische Heilungsmodelle. Die Heilungseffizienz wird untersucht, indem die Werte der Ruheperiode und der Parameter, der die Materialeigenschaften beschreibt, variiert werden.

13. In Anlehnung an das CDHM-Modell wird eine neue Formulierung der Selbstheilung definiert, die auf elastischen Konstanten bei isotropen und anisotropen Materialien basiert. Zusätzlich werden die Komponenten des Heilungstensors im Fall der isotropen Elastizitätstheorie, des ebenen Spannungszustands und des ebenen Dehnungszustands ermittelt.
14. Eine neue Theorie für Superheilungsmaterialien wird für isotrope und anisotrope Werkstoffe unter Verwendung mathematischer und mechanischer Prinzipien definiert, die in den linearen und nichtlinearen Superheilungstheorien angewendet werden. Basierend auf dem CDHM-Gerüst wird auch eine neue Superheilungsmatrix für den ebenen Dehnungszustand vorgeschlagen.
15. Um die Effizienz der Superheilung in linearen und nichtlinearen Theorien zu beschreiben, wird das Verhältnis der effektiven Spannung zur nominalen Spannung unter Verwendung der Hypothesen der elastischen Dehnungsäquivalenz und der elastischen Energieäquivalenz bestimmt.

## **Ergebnisse**

16. Ein qualitativer Vergleich der numerischen Ergebnisse mit experimentellen Untersuchungen zeigt, dass das vorgeschlagene Schadensheilungsmodell in der Lage ist, die Steifigkeitserholung und die Versagenseigenschaften sowohl bei gekoppelten als auch bei ungekoppelten Selbstheilungsmechanismen mit unterschiedlichen Belastungsbedingungen zu beschreiben.
17. Die verallgemeinerten nichtlinearen und quadratischen Heilungsmodelle unterschätzen die Heilungseffizienz im Vergleich zum linearen Heilungsmodell. Die wesentlichsten Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:
  - Das Verhalten des ungekoppelten linearen Heilungsmodells mit einer Ruheperiode von 2000 s ähnelt dem Verhalten des ungekoppelten quadratischen Heilungsmodells mit einer Ruheperiode von 5000 s. Beide Modelle sagen eine 17,14%ige Steifigkeitserholung voraus.
  - Eine vollständige Steifigkeitserholung wird unter Verwendung des gekoppelten linearen Heilungsmodells mit einem  $\gamma$ -Wert von 0.02 erhalten, während eine 75%ige Steifigkeitserholung unter Verwendung des gekoppelten verallgemeinerten nichtlinearen Heilungsmodells gewonnen wird.
18. Unter Verwendung der Hypothese der elastischen Energieäquivalenz wurde festgestellt, dass die Heilungsvariable, basierend auf der Berechnung der elastischen Steifigkeit, größer ist als die Heilungsvariable, basierend auf der Berechnung des Querschnitts.
19. Die anisotropen Beispiele für Superheilungsmaterialien stimmen mit der isotropen Formulierung überein. Zusätzlich zeigen die Ergebnisse, dass das verallgemeinerte nichtlineare Superheilungsmodell am besten geeignet ist, den Superheilungsprozess zu beschreiben.
20. Das verallgemeinerte nichtlineare Superheilungsmodell ergibt eine hohe Stärkung der elastischen Steifigkeit im Vergleich zum quadratischen Superheilungsmodell bei beiden Hypothesen der elastischen Dehnungsäquivalenz und der elastischen Energieäquivalenz.