

Zusammenfassung zur Promotionsschrift

# **Computational Modeling of Fracture in Encapsulation-Based Self-Healing Concrete Using Cohesive Elements**

## **DISSERTATION**

Zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)  
an der Fakultät Bauingenieurwesen  
der Bauhaus Universität Weimar

vorgelegt von

**Luthfi Muhammad Mauludin**

aus

Bandung, Indonesia

(interner Doktorand)

Mentor:

**Prof. Dr.-Ing. Timon Rabczuk**

**Weimar, November 2020**

## **Problemstellungen und Forschungsziele**

1. Beton ist das am häufigsten verwendete Material im Bauwesen. Das Auftreten von Rissen kann zur Verschlechterung des Betons führen und dessen mechanische Eigenschaften verringern.
2. Wenn die Risse nicht sichtbar und zugänglich sind, werden die Reparaturarbeiten schwierig und erfordern sehr hohe Kosten. Daher wäre es äußerst vorteilhaft, selbstheilenden Beton ohne menschliches Eingreifen für die Instandhaltung herzustellen.
3. In kapselbasiertem selbstheilenden Beton werden sog. Mikrokapseln mit Heilmitteln in den Beton eingebettet. Risse treffen auf die Kapsel, brechen die Kapselwand und setzen die heilende Substanz frei, welche den Riss ‚heilt‘.
4. Die Anwendung von kapselbasiertem Selbstheilungsbeton steht immer noch vor gewissen Herausforderungen, u.a.:
  - Die Heilungskapazität: wie viele Kapseln werden für eine effiziente Heilung benötigt und welchen Einfluß haben Parameter wie die Kapselgeometrie, ihre Wandstärke, etc.?
  - Das Design der Kapselmaterialien und ihre Auswirkung auf die mechanischen Eigenschaften: Beispielsweise sollte das Einbetten von Kapselmaterialien in Beton die mechanischen Eigenschaften des Originalbetons nicht beeinträchtigen. Es ist noch unklar, wie die optimale Dosierung von Kapseln, die in den Beton eingebettet werden sollen, verteilt und bestimmt werden.
  - Die Heterogenität von Mikrostrukturen und ihre Auswirkungen auf das Bruchverhalten: Die meisten bisherigen Studien konzentrieren sich auf Kontinuumsmodelle, in denen der Beton als homogenisiertes Material betrachtet wird.
5. Das Ziel dieser Dissertation besteht darin, die Faktoren zu identifizieren, die das Bruchverhalten von kapselbasiertem selbstheilendem Beton beeinflussen.
6. Die spezifischen Ziele der Studie können wie folgt festgelegt werden:
  - Bewertung der Auswirkungen des Volumenanteils von Kapseln auf die Belastbarkeit, die Bruchenergie und die Wahrscheinlichkeit eines Kapselbruchs.
  - Ermittlung des Verhältnisses der Grenzflächenfestigkeit der Kapsel zur Kapseldicke bei der Rissausbreitung.
  - Erstellen von Bruchkriterien basierend auf der Kombination der elastischen und Brucheigenschaften der Kapsel.
  - Vergleich der Zuverlässigkeit von 2D- und 3D-Bruchmodellen.

## **Stand der Technik**

7. In selbstheilendem Beton unterscheidet man zwei Arten von Heilungsmechanismen, z.B. autogene und autonome Methoden.
8. Bei der autogenen Methode wird der Heilungsprozess durch das Vorhandensein von nicht hydratisiertem Zement in der Mörtelmatrix erreicht, während bei der autonomen Methode ein zusätzliches Additiv erforderlich ist, um mit Zement zu reagieren.
9. Der auf Einkapselung basierende selbstheilende Beton, eine der vielversprechendsten Techniken, gehört zur autonomen Methode unter Verwendung von in Kapseln enthaltenen Heilmitteln.
10. In einem auf Kapseln basierenden Heilungsmodell werden die Heilmittel in Kapseln platziert, die in Substratmaterialien eingebettet sind. Diese Methode ermöglicht eine frühzeitige und rechtzeitige Reparatur der Risse mit besseren Heilfähigkeiten.
11. Die meisten früheren Studien betrachteten Beton als homogenisierte Materialien und vernachlässigten seine tatsächliche Heterogenität im numerischen Modell. Die Eigenschaften von Kapselmaterialien (Dicke, Dosierung, Festigkeit) und ihre globalen Reaktionen auf die mechanischen Eigenschaften und die Rissausbreitung bleiben weiterhin unklar.

## **Methodik**

12. Es wurden unterschiedliche zufällig-generierte 2D-Modelle von heterogenem selbstheilendem Beton auf mesoskaliger Ebene entwickelt. Das Rissverhalten wurde mit sog. Kohäsiven Elementen modelliert, welche die kommerzielle Software Abaqus bereitstellt. Die automatische Generierung der 2D-Mikrostrukturen wurde durch einen eigens entwickelten Python-Code realisiert, welcher mit ABAQUS gekoppelt wurde. Letzterer beinhaltet folgende Schritte:
  - Aggregatverteilung: Die Fuller-Kurve wird verwendet, um die Verteilung der Zuschlagskörner innerhalb der Mörtelmatrix zu bestimmen. Die Siebgröße von 2,36 mm wird als Grenzgröße für grobe Aggregate angenommen.
  - Kapselerzeugung: Es wird vorausgesetzt, dass die Kapseln aus Poly-Methylmethacrylat (PMMA) bestehen. Das Modell basiert auf kreisförmigen Kapseln mit einem Durchmesser von 2,0 mm. Es wurde ein Algorithmus für die Kapselgenerierung in der Zementmatrix entwickelt, welcher unphysikalische Überschneidungen vermeidet.
  - Einfügen der Kohäsiv-Elemente in der ABAQUS Diskretisierung: Kohäsive 4-Knoten-Kohäsivelemente (CIE) werden in die von ABAQUS

- erzeugten Elementnetze (Mörtelmatrix, Aggregate, Kapseln und deren Grenzflächen) automatisch -mit Hilfe eines Skriptes- eingefügt.
- Belastung: Im Rahmen dieser Untersuchungen wurde ausschließlich eine einachsige Belastung in Erwägung gezogen.
13. Es wurden umfangreichen 2D-Simulationen des Bruchverhaltens von Kapseln unter Verwendung verschiedener Kombinationen von elastischen und Brucheigenschaften zwischen der Kapsel und ihrer umgebenden Mörtelmatrix durchgeführt.
  14. Das Modell und der dazugehörige Algorithmus (in Python) wurde zu einem heterogenen 3D-Modell erweitert. Die Anzahl komplexer 3D-Proben wird zufällig generiert und analysiert. Die Ergebnisse dieser numerischen Modelle wurden dann mit experimentellen Arbeiten und den 2D-Simulationen verglichen.

### **Signifikante Ergebnisse**

15. Die Ergebnisse zeigten, dass die Erhöhung des Volumenanteils der Kapseln von 1,57% bis 9,42% die Festigkeit um 6,97% verringert.
16. Wenn der Volumenanteil der Kapseln von 1,57% bis 9,42% erhöht wird, erhöht sich die erhaltene Dissipationsenergie um 13,66%.
17. Die Erhöhung des Volumenanteils der Kapseln von 1,57% bis 9,42% führte zu einer Erhöhung des Prozentsatzes der gebrochenen Kapseln von 13,5% bis 92,3% (Verhältnis 15: 1), 9,8% bis 72,3% (Verhältnis 10: 1), 1,5% bis 16,9 % (Verhältnis 5: 1) und 0% bis 2,9% (Verhältnis 1: 1).
18. Der Volumenanteil der Kapseln im Bereich von 0 - 2% hat keinen signifikanten Einfluss auf das makroskopische Verhalten von selbstheilendem Beton.
19. Die zunehmende Festigkeit von selbstheilendem Beton bleibt linear, wenn die Grenzflächenfestigkeit der Kapsel zwischen 0% und 50% der Festigkeit der Mörtelmatrix liegt.
20. Das Bruchverhalten der Kapsel wird durch weichere Kapseln (z. B.  $E_c / E_m = 1/7$ ) begünstigt, verglichen mit der steiferen Kapseln (z. B.  $E_c / E_m = 2$ ).
21. Die Ergebnisse der 2D und 3D Simulationen unterscheiden sich teilweise deutlich. Beispielsweise erhöht sich die mittlere Endspannung und die Dissipationsenergie des 3D Modells um 27,3% bzw. 38,6% (im Vergleich zum 2D-Modell).