

3-D-Visualisierung und statistische Analyse von Rissen in mit Computer-Tomographie untersuchten Betonproben

Olaf PAETSCH*, Daniel BAUM*, David BREßLER*, Karsten EHRIG**, Dietmar MEINEL**, Steffen PROHASKA*

* Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik Berlin (ZIB)

** BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
(Kontakt: paetsch@zib.de)

Kurzfassung. Mit automatischer 3-D-Risserkennung gefundene Risse in Betonproben werden geeignet statistisch analysiert und in ZIBAmira visualisiert. Mögliche Visualisierungsmethoden zur direkten Anzeige der Risse oder daraus abgeleiteter Daten haben verschiedene Eigenschaften, die bei der Wahl des besten Verfahrens anwendungsorientiert berücksichtigt werden.

Einführung

Die zerstörungsfreie Prüfung von Betonproben mit Mikro-Computertomographie (μ -CT) erzeugt Datensätze mit einer Größe von bis zu 2000^3 Voxel, welche mit innovativen Methoden zur automatischen 3-D-Risserkennung untersucht werden. An der BAM wurden hierzu μ -CT Untersuchungen an Betonbohrkernen mit einem Durchmesser von 7 cm mit 210 kV, 1mm Cu Vorfilter, 2400 Winkelprojektionen über 360° und einer Voxelgröße von 39 μ m durchgeführt, welche unter definierter Belastung Frost- und Frost-Tausalzwecheln ausgesetzt waren, um Schädigungsprozesse durch Rissbildung im Beton zu untersuchen [6]. Um das binäre Ergebnis (Riss / Nicht-Riss) zu untersuchen, ist sowohl eine quantitative als auch visuelle Analyse notwendig. Neben der direkten Visualisierung der Risse, ist es ebenfalls interessant, daraus abgeleitete Größen darzustellen. Abgeleitete Größen sind z.B. die räumliche Orientierung der Risse und ihre Verteilung im Datensatz. Weitere Rissuntersuchungen betreffen die Rissgrößen, -weiten und Rissflächen. Die Berechnung dieser Größen erfolgt auf Basis der als Riss gekennzeichneten Voxel, aber auch anhand von daraus abgeleiteten Punktwolken und Mittelflächen. Da sich die Bewertung von Schadensentwicklungen in den Betonproben aufgrund der Risserkennung im Wesentlichen auf quantitative Angaben stützt, werden tabellarische Darstellungen, 1-D- und 2-D-Plots sowie 3-D-Visualisierungen eng miteinander verknüpft. Für die 3-D-Visualisierung von Rissen stehen verschiedene Methoden zur Verfügung: Isoflächen, Volume-Rendering, sowie die Darstellung als Punktwolken und Mittelflächen. Achsenparallele Schnitte durch den Rissdatensatz sind als 2-D-Visualisierung weit verbreitet und können am besten mit dem dazugehörigen CT-Datensatz überlagert werden, um die Qualität der Risserkennung zu beurteilen. Es wird diskutiert, welche der Visualisierungsmethoden unter welchen Rahmenbedingungen die geeignetste ist und welche Probleme es dabei zu lösen gilt. Eine optisch ansprechendere Darstellung kann z.B. durch Glättung der Daten erreicht werden.



Damit verbundene Unsicherheiten in der Ergebnisdarstellung werden, ebenso wie Unsicherheiten bei der automatischen Risserkennung, erörtert. Desweiteren werden andere Repräsentationen für Risse vorgestellt und deren Vor- und Nachteile diskutiert. So kann ein Riss z.B. durch seine Bounding-Box dargestellt werden, die entlang der Riss-Hauptachsen ausgerichtet ist. Dadurch kann oft eine größere Übersichtlichkeit erreicht werden.

1. Verwandte Arbeiten

Die im Folgenden diskutierten Visualisierungsmethoden sind in vielen Anwendungsgebieten häufig genutzte Standardmethoden und nicht speziell für die Rissauswertung entwickelt worden. In den mit 3-D-Rissauswertung befassten Veröffentlichungen [5, 6] werden im Wesentlichen 2-D-Schnitte durch Datenvolumen angewandt, die eine sehr gute Rissdarstellung in der gewählten Ebene ermöglichen. Dimensionelles Messen ist auf solchen Schnitten ebenfalls möglich, eine Rückführung auf bekannte Rissbreiten zur Bestimmung der Messunsicherheit ist aufgrund des heterogenen Materials schwierig und daher bislang nicht erfolgt. Eine 3-D-Darstellung automatisch erkannter Risse [4] zeigt deren Verteilung und Form in der Betonprobe. Statistische Auswertungen z.B. der Rissorientierung wie in [5] dienen der Beurteilung der Material abhängigen Rissbildung.

2. Daten

Die Probekörper und deren CT-Messdaten als Grundlage aller nachfolgenden Visualisierungen wurden mit freundlicher Genehmigung der CAE (F) und der BAM (D) zur Verfügung gestellt. Die Probekörper wurden für als Laborproben für Testzwecke hergestellt und mit Risse induziert. Die Datenaufnahmen erfolgten an der BAM- μ -CT-Anlage mit folgenden Parametern:

1. Mortar Torus (verwendet in Abb. 3, 5 rechts)
 - 215 kV
 - Vorfilter: 0,5 mm Cu und 0,75 mm Ag
 - 2400 Winkelprojektionen über 360°
 - Aufnahmedauer: 13h 22m
 - 89 μ m
2. CARBOCO (Carboxide Cement) (verwendet in allen übrigen Abbildungen)
 - 205 kV
 - Vorfilter: 0,5 mm Cu und 0,5 mm Ag
 - 2400 Winkelprojektionen über 360°
 - Aufnahmedauer: 5h 20m
 - Voxelgröße 18 μ m

Die automatische Risserkennung des Datensatzes 2 wurde auf gebinnnten Daten in halber Auflösung (Voxelgröße 39 μ m) durchgeführt.

3. Visualisierungsmethoden

Die Visualisierung automatisch gefundener Risse in Betonproben [1, 2] dient einerseits der Überprüfung von Risserkennungsparametern durch den Anwender als auch zur Beurteilung

von Rissformen und -verteilung in 3-D. Zur Anwendung kommen Standard-Visualisierungsverfahren wie Schnittbilder, Isoflächen oder auch Volume-Rendering. Daneben bietet auch die Visualisierung aus den Rissen abgeleiteter Größen oft einen besseren Überblick als herkömmliche Methoden zur direkten Rissdarstellung.

3.1 Orthogonale Schnitte (*Orthoslices*)

Auf orthogonalen bzw. achsenparallelen Schnitten lassen sich mit einfacher Bildbetrachtungs-Software Risse in der Betonprobe erkennen und manuell beurteilen, wie gut er durch ein automatisches Verfahren erkannt wurde. Ebenso lassen sich darauf Messungen wie z.B. Risslänge oder -breite durchführen. Risse, die nicht im rechten Winkel durch den Schnitt verlaufen, erscheinen dabei breiter, sodass eine 2-D-Ansicht der Risse allein nicht ausreichend ist (siehe Abb. 1 rechts).

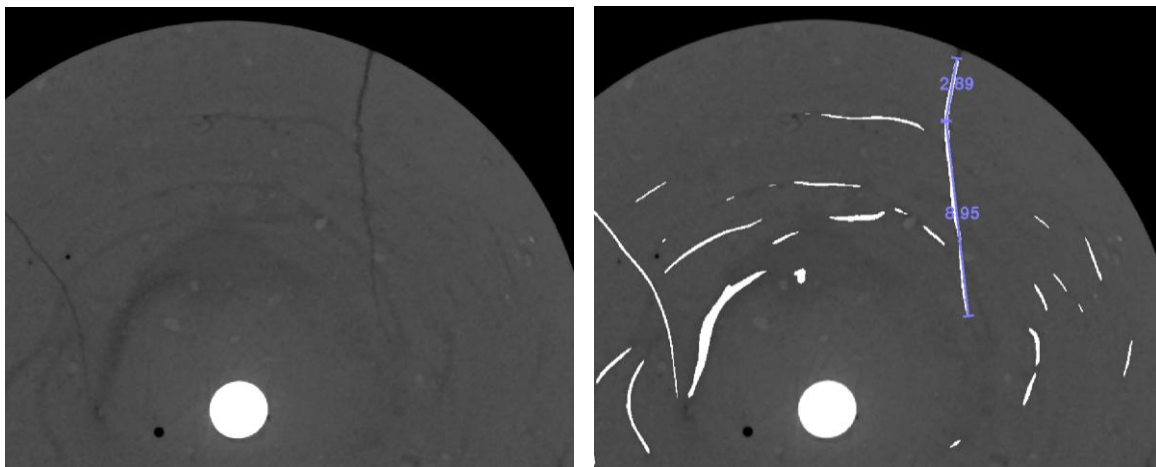


Abbildung 1. Orthogonaler Schnitt durch die CT-Aufnahme einer Betonprobe. Links: nur der Schnitt. Rechts: Schnitt mit überlagertem Darstellung der Risse und mit Messung der Risslänge auf dem Schnitt.

3.2 Isoflächen (*Isosurfaces*)

Isoflächen verbinden Punkte mit dem gleichen skalaren Wert im Raum. Im Falle der Risserkennung werden alle Punkte mit einem Wert von 0,5 (entspricht ISO50-Schwellwert) verbunden. Diese Punkte werden auf dem zugrunde liegenden uniformen Voxelgitter interpoliert für dessen skalare Werte gilt: 0 = kein Riss, 1 = Riss (Abb. 2 links). Isoflächen-ähnliche Darstellungen lassen sich durch Darstellung aller Rissvoxel mittels eines Würfels entsprechend der Voxelgröße darstellen (Abb. 3 rechts).

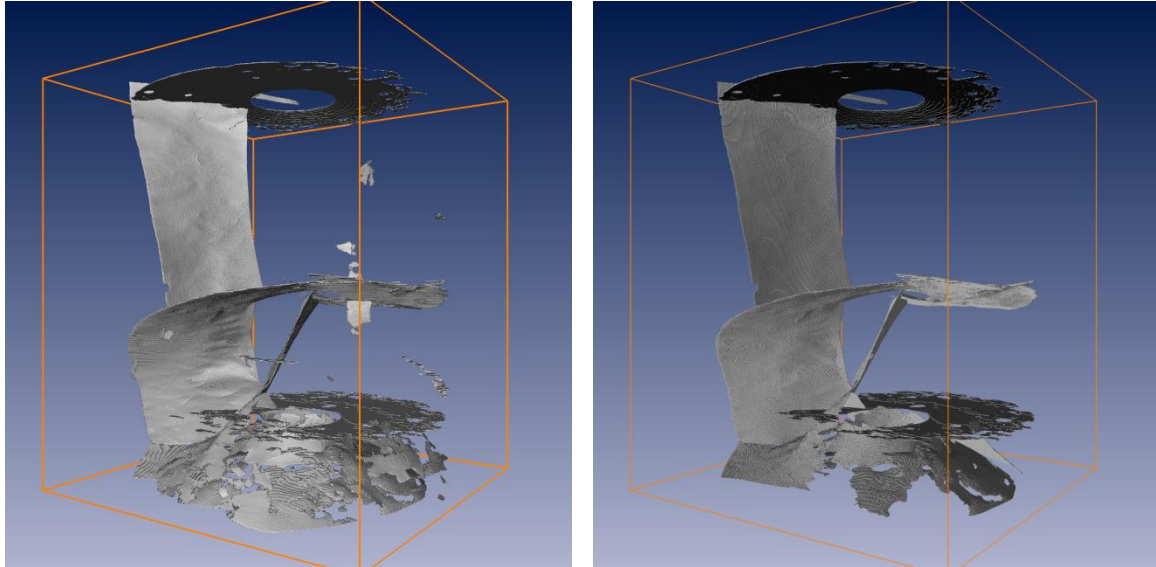


Abbildung 2. 3-D-Rissvisualisierung. Links: alle Risse als Isoflächen. Rechts: Die 4 größten Risse in einer Darstellung aller verbundenen Rissvoxel (*Connected Components*).

3.3 Volume-Rendering

Je nach gewählten Rendering-Parametern und der verwendeten Farbtabelle lassen sich mit Volume-Rendering sowohl mit Isoflächen-Darstellungen vergleichbare Visualisierungen erzeugen als auch eher unscharfe transparente Wolken. Letztere lassen sich gut einsetzen, um Berechnungsunschärfen (*Uncertainty*) zu visualisieren. Bei der Risserkennung mit Hilfe des Template-Matchings [1, 2] wird der Korrelationswert über einen Schwellwert binarisiert (Riss / Nicht-Riss). Ein kleinerer Schwellwert ergibt mehr als Riss erkannte Voxel, wobei die Auswirkung auf die Rissgeometrie Daten abhängig ist und keine generelle Aussage zulässt. In Abb. 3 wird ein um 20% niedrigerer Schwellwert als Volume-Rendering visualisiert.

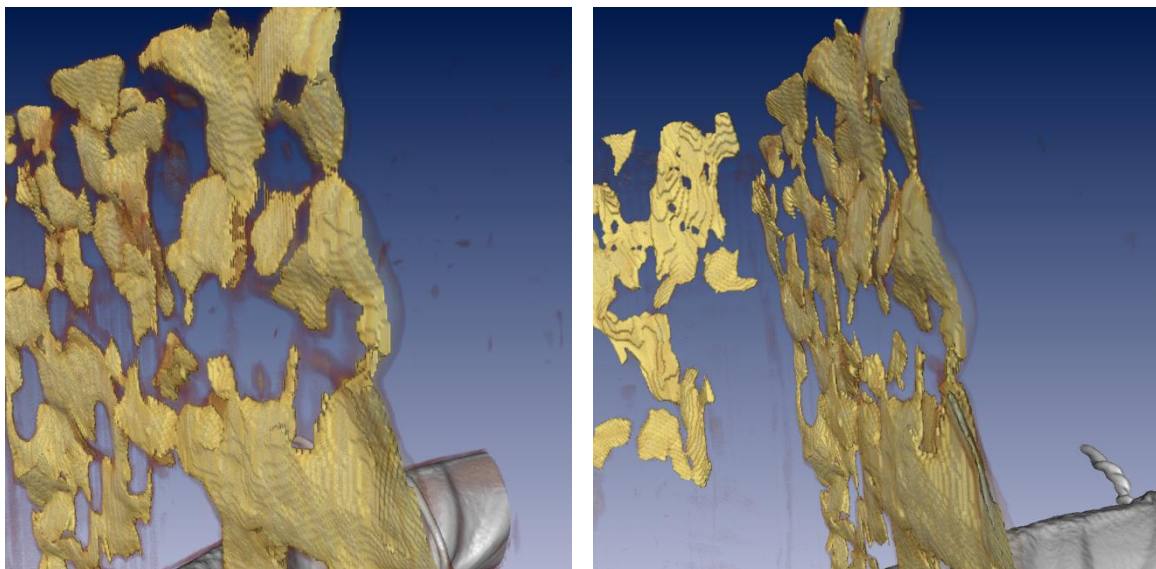


Abbildung 3. 3-D-Rissvisualisierung mit Isoflächen und Volume-Rendering (Grau: Teile eines Armierungseisens). Die Risse sind als Isoflächen in gelb dargestellt mit der Unsicherheit des Binarisierungsschwellwertes als volumen-gerenderte transparente Wolke. Ansicht rechts um ca. 90° gedreht gegenüber links: erkennbar ist, dass die Risse auch bei kleinerem Schwellwert in der Rissfläche sich nur wenig vergrößern würden (links), während sie aber deutlich dicker wären¹ (rechts).

¹ Diese Aussage ist Daten abhängig und gilt nur für den hier betrachteten Datenausschnitt

3.4 Punktwolken (Point-Clouds)

Eine sehr übersichtliche Rissdarstellung ist das Anzeigen des Risschwerpunktes durch einen Punkt resp. eine Kugel im Raum. Kugeln können dabei gemäß einem skalaren Wert, z.B. dem Volumen, skaliert oder eingefärbt werden. Diese Visualisierungsart bietet auch eine sehr gute Darstellung der Rissverteilung im Raum. Abb. 4 rechts zeigt deutlich, dass sich viele kleine Risse im unteren Teil der Betonprobe in der Nähe der Gewindestange befinden und nur wenige große Risse vorhanden sind. Die Abb. 4 links zeigt dieselbe Visualisierung in perspektivischer Ansicht zusammen mit der transparenten Oberfläche der Betonprobe. Darin ist die Rissverteilung nicht so deutlich erkennbar, zumal an der Probenoberfläche runde Fehlstellen die Interpretation erschweren.

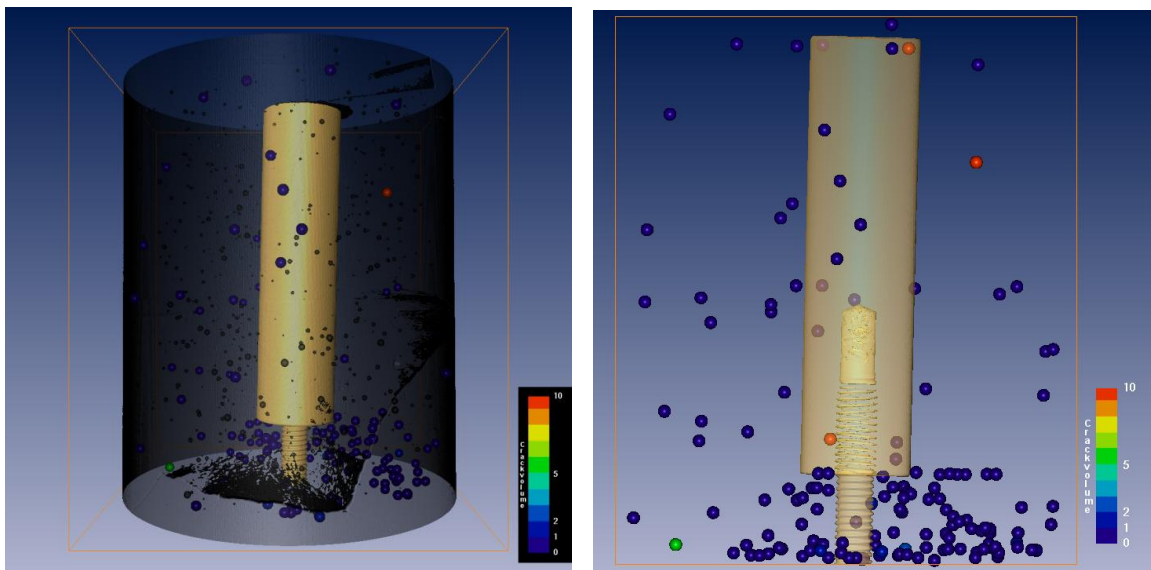


Abbildung 4. Risschwerpunkte als Punktwolke. Die Punkte sind entsprechend ihrem Volumen gefärbt. Links: perspektivische Darstellung zusammen mit Probenoberfläche und innerem Armierungseisen. Rechts: orthogonale Darstellung ohne Probenoberfläche.

Auch die Risse selbst können als Punktwolke visualisiert werden (siehe Abb. 5 links), in dem jeder als zu einem Riss gehörige Voxel als 3-D-Punkt oder -Kugel dargestellt wird. Die Punkte werden dabei aus dem Voxelgitter gelöst und können anhand der Helligkeitsverteilung rechtwinklig zum Riss zur Rissmitte verschoben werden. Aus diesen Punktwolken kann mit geeigneten Algorithmen [1, 2] eine Mittelfläche berechnet werden.

3.5 Bounding-Boxes und Glyphen

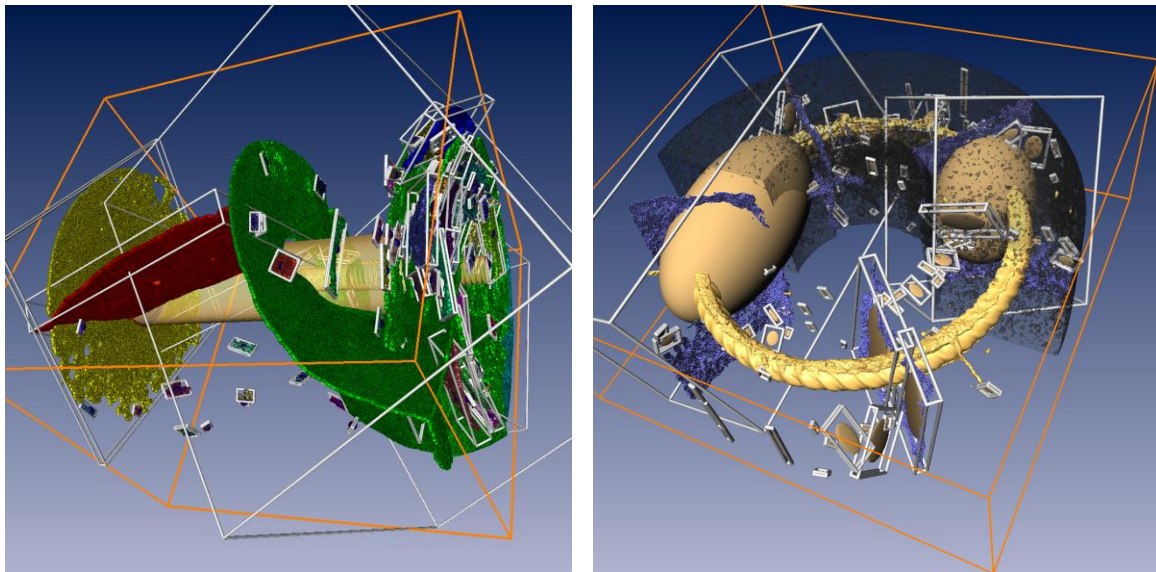


Abbildung 5. Links: Risse als Punktwolke und hauptachsen-ausgerichtete Bounding-Box für jeden einzelnen Riss. Die Farbe separiert die Risse voneinander. Rechts: Darstellung der Risse als volumenskalierte Ellipsoide innerhalb ihrer jeweiligen Bounding-Box.

3.6 Brushing and Linking

Unter dem Begriff *Brushing and Linking* werden Techniken zur interaktiven Datenanalyse zusammen gefasst bei denen in verschiedenen Ansichten der Daten Bereiche selektiert werden, die in den jeweils anderen Ansichten visualisiert werden. Z.B. durch Selektion eines Riss auf einem Schnitt wird dieser Riss in einer zweiten Ansicht in 3-D visualisiert (siehe Abb. 6) und in einer dazu gehörigen Risstabelle hervorgehoben, um weitere statistische Rissparameter anzuzeigen. Ebenso zeigt die Selektion eines Risses in einer Tabelle (Abb. 7 rechts oben) die Orientierung desselben als Histogramm und Scatterplot an (Abb. 7 rechts unten).

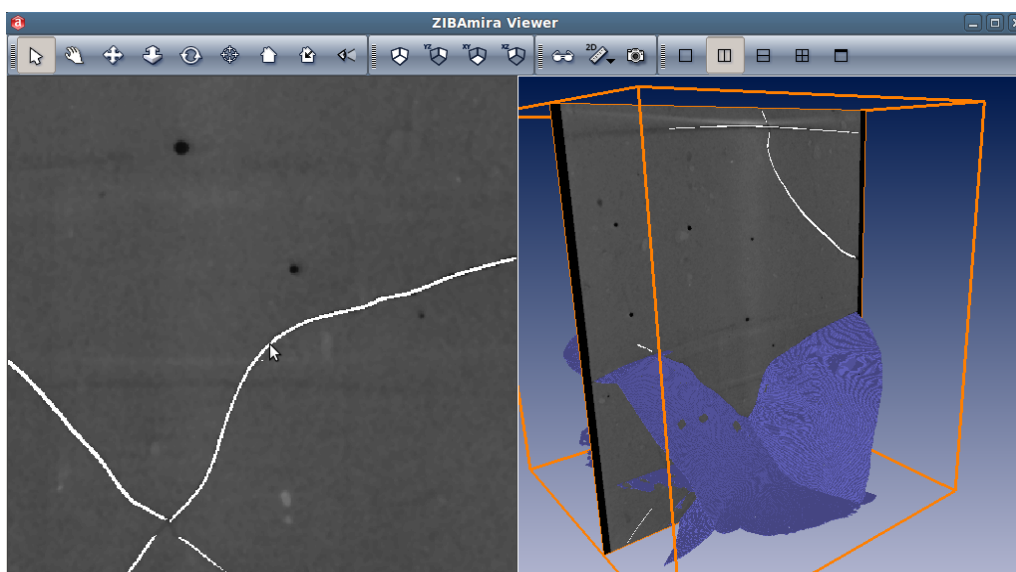


Abbildung 6. Brushing and Linking: Links Selektion eines Risses auf einem Schnitt. Rechts: 3-D-Visualisierung des selektierten Risses.

4. Quantitative Auswertungen

Erst durch eine gute Kombination von Visualisierungen und quantitativen Auswertungen lassen sich Aussagen bzgl. der gefundenen Risse in einer bestimmten Betonprobe treffen. Ebenso sind quantitative Auswertungen der bei der Risserkennung verwendeten Parameter oder der nachträglichen Rissbearbeitungen zur Verfahrensbeurteilung wichtig.

4.1 Formanalyse

Neben einfachen statistischen Werten wie Zahl der Rissvoxel insgesamt oder Rissanzahl und Rissgrößen (Volumen bzw. Anzahl der Voxel/Riss), können auch weitere Rissparameter mit Hilfe einer Formanalyse berechnet werden. Insbesondere aus den sich bei der Berechnung der Hauptachsen ergebenden Eigenwerten kann die Flachheit eines Risses berechnet werden. Bei einem im Vergleich zu anderen Rissen sehr flachen Riss könnte es sich um ein Streustrahlenartefakt handeln und in der gleichzeitigen Anwendung verschiedener Visualisierungsmethoden identifiziert werden. Artefakte zeigen im Orientierungsplot typische Muster (siehe Abb. 7 rechts unten), die dabei helfen.

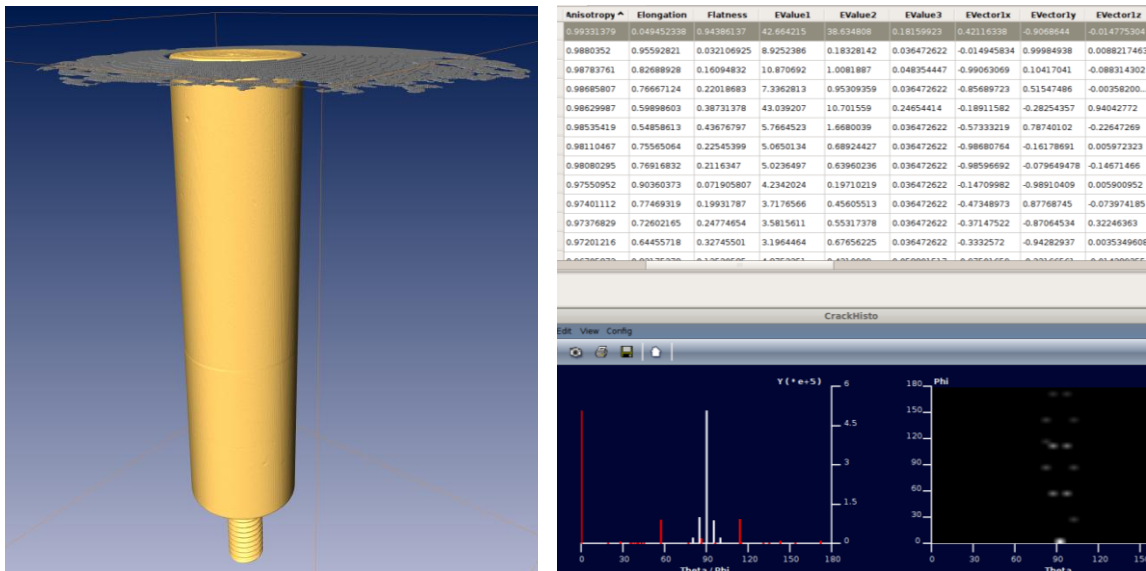


Abbildung 7. Fälschlicherweise als Riss erkanntes Streustrahlenartefakt. Derartige Artefakte zeigen häufig ein bestimmtes Orientierungsmuster (siehe Orientierungsplot rechts unten) und sind flacher (siehe Spalte *Flatness* im Tabellenausschnitt rechts oben) als echte Risse.

4.2 Rissglättung

Visualisierungen von Ergebnissen automatischer Risserkennungen zeigen häufig eine nicht glatte Oberfläche. Um visuell ansprechendere Bilder zu erhalten, könnte diese Daten geglättet werden. Rissglättungen auf Voxelbasis mit Gauß-ähnlicher Filterung zeigen auf einem 2-D-Schnitt keine gravierenden Änderungen und der in Abb. 8 rechts gezeigte, am stärksten geglättete Riss sieht glatter und damit etwas ansprechender aus. In einer 3-D-Isoflächendarstellung aller Risse (siehe Abb. 9) in der Probe wird aber deutlich, dass Risse in Teilen ganz verschwinden können und somit das Ergebnis einer Risserkennung stark verfälscht werden kann. Um welche Größen es sich dabei handeln kann, zeigt die Auswertung von Rissanzahl und -größen in Tabelle 1.

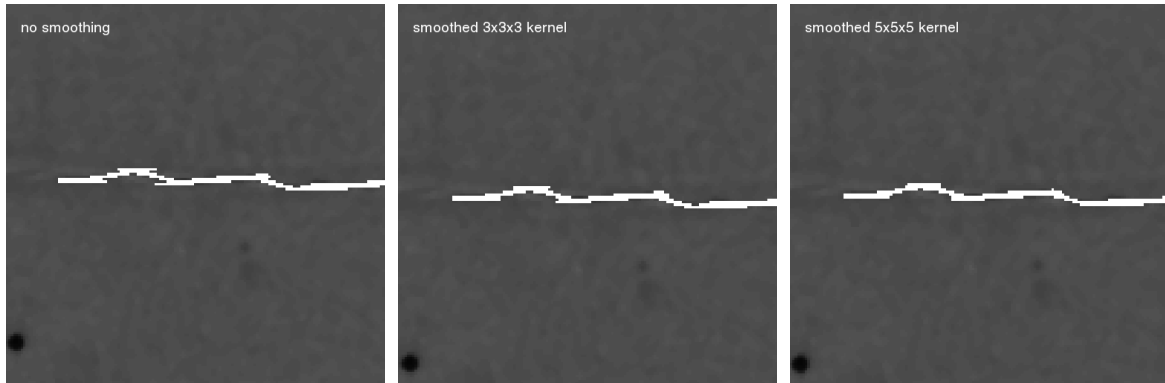


Abbildung 8. Ungeglätteter und geglätteter Riss im 2-D-Schnitt. Links: Ungeglätteter Riss. Mitte: Riss geglättet mit einem 3^3 -Kernel. Rechts: Riss geglättet mit einem 5^3 -Kernel.

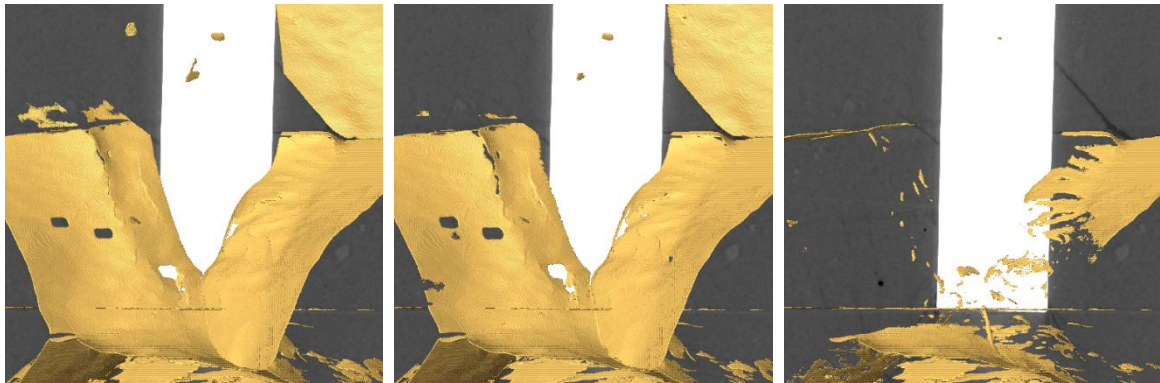


Abbildung 9. Ergebnisse von Rissglättungen: Links: Isoflächendarstellung ungeglätteter Risse. Mitte: Risse geglättet mit einem 3^3 -Kernel. Rechts: Risse geglättet mit einem 5^3 -Kernel.

Tabelle 1: Quantitative Ergebnisse von Gauß-ähnlichen Rissglättungen mit verschiedenen Filterkerneln.

	ungeglättet	geglättet mit 3^3 -Kernel	geglättet mit 5^3 -Kernel
Anzahl der Risse (verbundene Komponenten)	141	279 (+ 97,9%)	378 (+168%)
Anzahl Rissvoxel	5069214	4719099 (-7,1%)	3041605 (-40%)

Wesentlich besser lässt sich mit der Kombination der morphologischen Operatoren Dilatation und Erosion (Closing) eine ansprechende Glättung erzielen (Abb. 10), die die ursprünglich detektierten Rissysteme nicht zerstört. Die Zahl der Risse und Rissvoxel verändert sich dabei nur unwesentlich (Tabelle 2).

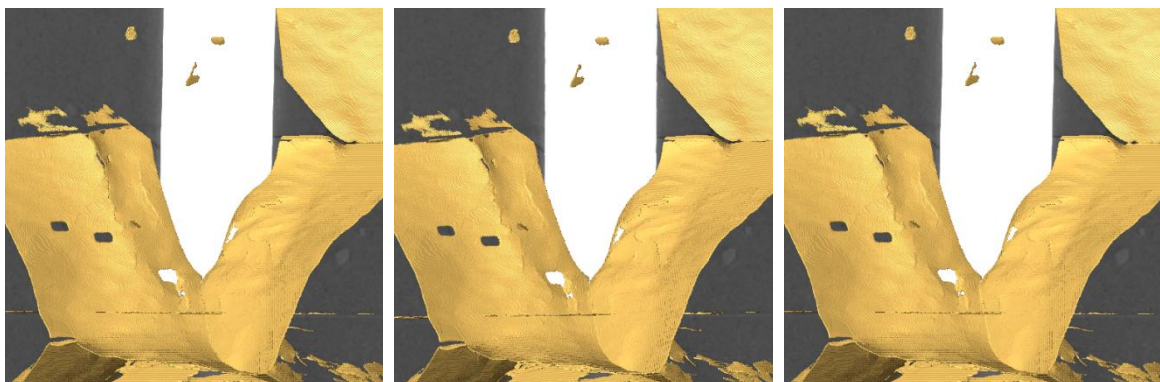


Abbildung 10. Ergebnisse von Rissglättungen: Links: Isoflächendarstellung ungeglätteter Risse. Mitte: Risse geglättet mit Closing-Operator. Rechts: Risse geglättet zweifach angewandten Closing-Operator.

Tabelle 2: Quantitative Ergebnisse von Rissglättungen mit morphologischen Operationen.

	ungeglättet	1x Dilatation-Erosion	2x Dilatation-Erosion
Anzahl der Risse (verbundene Komponenten)	141	140	138
Anzahl Rissvoxel	5069214	5076431 (+0,14%)	5088266 (+0,38%)

5. Ergebnisse und Ausblick

Es hat sich gezeigt, dass 2-D-Schnitte durch Volumen als sehr häufig eingesetztes Visualisierungsverfahren eine gute Beurteilung der Risserkennung zulassen; eine 3-D-Visualisierung aber erst die räumliche Verteilung der Risse und deren Formen zeigt. Ein Problem dabei ist die gegenseitige Verdeckung der Risse, sodass z.B. ihre Größen nicht richtig erkannt werden können. Durch Visualisierung einfacher Repräsentationen der Risse kann die Übersichtlichkeit deutlich erhöht werden. Darüber hinaus ist eine Kombination mit quantitativen Darstellungen wichtig, da Beurteilungen über die Güte eines Materials aus rein qualitativen Visualisierungen kaum möglich sind. Nachträgliche Bearbeitungen automatisch erkannter Risse aus Gründen der besseren Optik sind, wenn überhaupt, nur mit großer Vorsicht durchzuführen, da sie Ergebnisse stark verfälschen können.

Die Kombination verschiedener Visualisierungsmethoden auch zusammen mit quantitativen Darstellungen verbessert die Datenexploration stark. Im weiteren Verlauf des Projektes resp. in anschließenden Projekten soll diese Möglichkeit ausgebaut werden. Gerade auch im Zusammenhang mit der zeitlichen Verfolgung von Schädigungsprozessen wird dieses wichtiger werden. Hierbei werden auch Visualisierungen von Graphen, die zeitliche Veränderungen repräsentieren, Anwendung finden.

Referenzen

- [1] O. Paetsch, D. Baum, D. Breßler, K. Ehrig, S. Prohaska: Vergleich automatischer 3-D-Risserkennungsmethoden für die quantitative Analyse der Schadensentwicklung in Betonproben mit Computer Tomographie. In *Proceedings DACH-Tagung Graz 2012*.
- [2] O. Paetsch, D. Baum, K. Ehrig, D. Meinel, S. Prohaska: Automated 3D Crack Detection for Analyzing Damage Processes in Concrete with Computed Tomography. In *Proceedings of ICT Conference 2012*.
- [3] K. Ehrig, J. Goebels, D. Meinel, O. Paetsch, S. Prohaska, V. Zobel: Comparison of Crack Detection Methods for Analyzing Damage Processes in Concrete with Computed Tomography. In *Proceedings of DIR-2011, 2011*.
- [4] M. Voorn, A. Rath, U. Exner: μ CT on narrowly fractured natural rock samples from a hydrocarbon reservoir. In *Proceedings of ICT Conference 2012*.
- [5] R. Stoessel, O. Wirjadi, M. Godehardt, A. Schlachtner, A. Liebscher: Analysis of inner fracture in CFRP based on μ -CT image data. In *Proceedings of ICT Conference 2012*.
- [6] Weise, F.; Maier, B.; Ehrig, K.: Analyse der durch Frost- und Frost-Tausalz-Wechsel induzierten Schädigungsprozesse in Beton, in: Beton- und Stahlbetonbau, Heft 12, Dezember 2012, S. 816-823, Ernst&Sohn (Wiley Comp.), 2012