

Erstellung von Building Information Models von Trümmerfeldern basierend auf 3D-Punktwolken

Amar Rahimi, Norbert Gebbeken, Institut für Mechanik und Statik, Fakultät für Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg, E-Mail: amar.rahimi@unibw.de

Kurzfassung

Nach einem unvorhergesehenen Einsturz eines Gebäudes, z. B. infolge eines schweren Erdbebens, müssen unverzüglich Such- und Rettungsmaßnahmen durchgeführt werden, um Überlebende unter den Trümmern zu finden. Die vorhandenen Informationen über das eingestürzte Tragwerk spielen dabei für die Gestaltung einer sicheren und gezielten Einsatzplanung eine wesentliche Rolle. Auf struktureller Ebene kann die Building Information Modeling (BIM)-Technologie genutzt werden, um gesammelte Daten eines Trümmerfeldes in einem dreidimensionalen Informationsmodell digital zu verwalten. Nach dem Kenntnisstand der Autoren existiert bislang kein modellunabhängiger Ansatz zur Erstellung von Building Information Models (BIMs) von vollständig oder teilweise eingestürzten Gebäuden nach Katastrophenereignissen. Dies ist vor allem auf die topologische Komplexität eines kollabierten Tragwerkes und die Schwierigkeit, den Arbeitsablauf zu automatisieren, zurückzuführen. In diesem Beitrag wird der Zwischenstand einer Methode zur Erstellung von BIMs von Trümmerfeldern basierend auf 3D-Punktwolken vorgestellt. Die Methode umfasst die bauteilorientierte Segmentierung der Punktdaten, die Modellbildung der sichtbaren und verdeckten Trümmerteile und schließlich die Übertragung des digitalen 3D-Modells in den BIM-Prozess. Die Leistungsfähigkeit des entwickelten Ansatzes wird anhand eines Fallbeispiels geprüft.

1 Einleitung

Der vollständige oder teilweise Einsturz eines Gebäudes wird in den meisten Fällen weltweit durch schwere Naturkatastrophen wie Erdbeben, Tsunamis oder Tornados verursacht [1]. Das jüngste Erdbeben in Haiti im August 2021, forderte insgesamt 2248 Todesopfer und brachte mehr als 650.000 Einwohner in eine humanitäre Notlage [2]. Die häufigste Ursache für erdbebenbedingte Todesfälle ist der Einsturz von Gebäuden [3]. Umfangreiche Such- und Rettungsmaßnahmen der Ersthelfer folgen unmittelbar. Die Suche nach Überlebenden unter den Trümmern stellt jedoch angesichts der ungewissen Trümmerstabilität und des Zeitdrucks eine große Herausforderung für die Einsatzkräfte dar. Ein weiterer Einsturz könnte z. B. durch die Entfernung eines statisch-relevanten Trümmerteils ausgelöst werden, wodurch das Leben der Versütteten und der Rettungskräfte gefährdet wäre. Während sich viele Beiträge wie [4], [5] und [6] auf die Risikobewertung und den Schutz baulicher Infrastrukturen vor natürlichen Bedrohungen konzentrieren, müssen auch Entscheidungsfindungsprozesse nach Gebäudeeinstürzen mit Hilfe von modernen Methoden verbessert werden. In Deutschland ist eine Standsicherheitsbeurteilung nach Gebäudeeinstürzen durch einen Baufachberater gemäß den Richtlinien [7] und [8] vorgeschrieben. Diese Richtlinien beruhen primär auf dem Wissen erfahrener Einsatzkräfte, die einen Hintergrund als Bauingenieur haben. Die Bestimmung von Abmessungen oder Volumina von Trümmerteilen werden daher mit Hilfe von Faustformeln oder Erfahrungswerten geschätzt oder zeitaufwändig mit Messgeräten (z.B. Theodolit) manuell ermittelt. Durch den Einsatz moderner Sensoren und digitaler Methoden kann der Prozess der Bestandsaufnahme objektiv, genau und automatisiert erfolgen. Mit Hilfe einer Fernerkundungsmethode wie Laserscanning

oder Photogrammetrie kann ein eingestürztes Gebäude aus sicherer Entfernung in Form einer dreidimensionalen Punktwolke präzise digitalisiert werden. Die Umwandlung der Punktwolke in ein 3D-Modell kann unter anderem dazu genutzt werden, das Volumen und die Position möglicher Hohlräume im nicht sichtbaren Bereich des Trümmerfeldes objektiv abzuschätzen.

Für die digitale Verwaltung eines Trümmerfeldes eignet sich die Building Information Modeling (BIM)-Technologie. BIM ist eine State-of-the-Art-Methode im Bereich des Bauwesens und wird üblicherweise für die kosten- und leistungseffiziente Planung und Ausführung von Neubauten eingesetzt. Die BIM-Methode kann den Baufachberater aufgrund ihrer Merkmale wie folgt unterstützen:

- Eindeutige Kennzeichnung von Bauteilen.
- Ableitung von 2D-Plänen aus 3D-Modellen.
- Kontinuierliche Anpassung der Daten.
- Einheitlicher Informationsaustausch durch offene Standards.

In diesem Beitrag wird der Zwischenstand eines Ansatzes für die Erstellung von BIM-Modellen von Trümmerfeldern vorgestellt, das im Rahmen des Forschungsprojektes „Sensor-Systeme zur Lokalisierung von verschütteten Personen in eingestürzten Gebäuden“ (SORTIE) entwickelt wird [9].

2 Verwandte Forschungsarbeiten

Die Erstellung eines BIM-Modells auf der Grundlage von Laserscans wird als Scan-to-BIM-Methode bezeichnet. Scan-to-BIM wird beispielsweise für die Übertragung von historischen Bauwerken mit komplexen Geometrien in den BIM-Prozess eingesetzt. Die Ergebnisse von Tommasi et

al. [10] zeigen, dass Scan-to-BIM aufgrund der größtenteils manuellen Arbeitsweise einen erheblichen Zeitaufwand erfordert und keine verfügbare BIM-Software als einziges Lösungswerkzeug angesehen werden kann. Bei zerstörten Gebäuden wird die Schwierigkeit, arbiträre Trümmerstrukturen zu modellieren, noch dadurch verstärkt, dass verdeckte Gebäudekomponenten unterhalb der Trümmerhülle berücksichtigt werden müssen. Darüber hinaus müssen die Arbeitsabläufe im Rahmen einer Katastrophensituation so weit wie möglich automatisiert werden, um den Entscheidungsfindungsprozess schnell und objektiv zu unterstützen.

Der Einsatz von BIM ist im Bereich der Katastrophenvorsorge eine neuartige Methode, die bislang für Such- und Rettungsanwendungen nur geringfügig untersucht wurde [11]. Zeibek et al. [12] entwickelten erstmals einen Ansatz zur automatisierten Generierung von sogenannten as-damaged BIM-Modellen für seismisch beschädigte Stahlbetonrahmentragwerke mit Mauerwerksausfachung. Die Autoren verfolgen einen neuartigen Modellierungsansatz, bei dem das vorhandene BIM-Modell des intakten Zustands mit Hilfe einer Punktwolke des beschädigten Tragwerkes an die Stützen- und Trägerverformungen infolge seismischer Belastung angepasst wird. Das Vorhandensein des BIM-Modells ist daher eine notwendige Voraussetzung für die Umsetzung des Verfahrens. Da jedoch für die meisten Gebäude auf der Welt keine BIM-Modelle existieren, ist die Anwendung dieser Methode mit starken Einschränkungen verbunden. Nach unserem Kenntnisstand existiert neben dem Vorschlag von Zeibek et al. [12] bisher kein weiterer Ansatz zur Erstellung von BIM-Modellen von stark beschädigten Gebäuden nach Katastrophenereignissen. Ziel dieser Arbeit ist es daher, einen modellunabhängigen Ansatz zur Erstellung von BIMs von vollständig oder teilweise eingestürzten Gebäuden zu entwickeln.

3 Methodik

Im Folgenden wird der aktuelle Arbeitsablauf des modellunabhängigen Ansatzes zur Erstellung von BIMs von Trümmerfeldern vorgestellt. **Bild 1** zeigt die betrachteten Arbeitsschritte in einem Flussdiagramm.

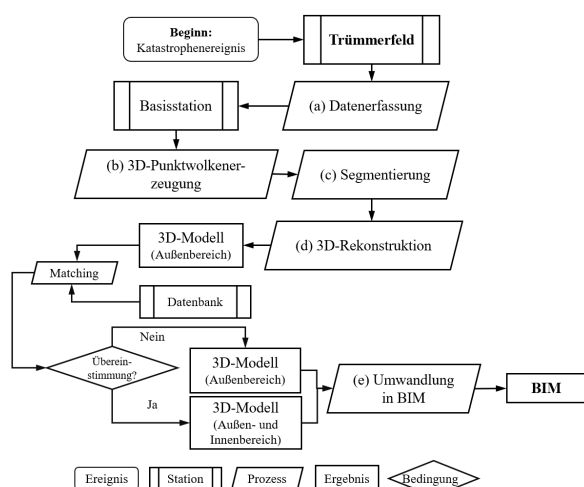


Bild 1 Flussdiagramm des modellunabhängigen BIM-Erzeugungsprozesses.

Nachfolgend werden die Arbeitsprozesse (a) bis (e) aus **Bild 1** näher erläutert.

3.1 Datenerfassung und Punktwolkengenerierung

Der Arbeitsablauf beginnt mit der digitalen Erfassung des Katastrophenschauplatzes (**Bild 1a**). Im Rahmen von SORTIE wird eine unbemannte Drohne, die mit einem LiDAR-Sensor (engl. Light Detection And Ranging, LiDAR) ausgestattet ist, für die Kartierung der Szene eingesetzt (**Bild 2**). Die gesammelten Daten werden an die Basisstation gesendet und in nahezu Echtzeit als 3D-Punktwolke verarbeitet (**Bild 1b**). Eine aus Laserscans gewonnene Punktwolke besteht dabei aus einer Sammlung von XYZ-Rohdaten. Mit Hilfe von Kamerabildern wird die LiDAR-Punktwolke zusätzlich mit RGB-Daten angereichert, was die visuelle Objekterkennung vereinfacht.



Bild 2 SORTIE-Drohne ohne Hardwareintegration (links) und LiDAR-Sensor (rechts).

Die Punktwolke wird anschließend mit geeigneten Algorithmen aus der vordefinierten Python-Bibliothek Open3D [13] von Ausreißern und Rauscheffekten bereinigt.

3.2 Segmentierung der Eingabedaten

Nach der Bereinigung der Eingabepunktwolke erfolgt die Segmentierung der Punktwolke mit Hilfe des implementierten Random-Consensus-Sampling (RANSAC)-Algorithmus in Open3D (**Bild 1c**). Der RANSAC-Algorithmus bestimmt die größte Punktebene aus einer Eingabepunktwolke als Einreißer (engl. inlier) und deklariert die verbleibenden Punkte auf der Grundlage einer Ebenengleichung als Ausreißer (engl. outlier). Dabei werden die Einreißer aus der Punktwolke segmentiert. In [14] sind die mathematischen Details des Algorithmus ausführlich beschrieben. Mit dieser Methode können plattenförmige Bauteile, wie z. B. beschädigte Decken oder Wände, die das größte Volumen in Massivbauten ausmachen, automatisch segmentiert werden.

Um alle Punktebenen aus einer Punktwolke automatisiert zu segmentieren, wurde der RANSAC-Algorithmus von Open3D geringfügig modifiziert. Die modifizierte Variante führt den Algorithmus innerhalb einer *while*-Schleife so lange aus, bis die identifizierten Einreißer eine festgelegte Mindestanzahl n an Punkten unterschreiten. Nach jeder Schleifeniteration werden die segmentierten Punktdaten automatisch beschriftet, unterschiedlich gefärbt und im PLY-Format [15] gespeichert. **Bild 3** zeigt beispielhaft, wie das Ergebnis einer solchen RANSAC-Segmentierung aussehen kann.

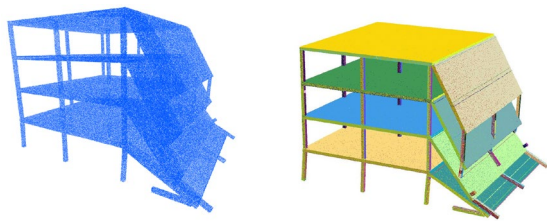


Bild 3 Eingabepunktwolke (links) und Ergebnisse der RANSAC-Segmentierung mit Open3D (rechts). Die Farben (rechts) kennzeichnen ein eigenständiges Segment.

3.3 3D-Rekonstruktion

3.3.1 Sichtbare Trümmerteile

Im nächsten Schritt werden die segmentierten Punktdaten, die beschädigte Decken- und Wandbauteile darstellen, mit Hilfe einer halbautomatischen Rekonstruktionsmethode einzeln zu Körpern verarbeitet (**Bild 1d**). Diese Methode basiert auf der geometrischen Extrusion von Oberflächen in dreidimensionale Körper. Mit Extrusion ist hier die Dimensionserhöhung von Objekten durch Parallelverschiebung im Raum gemeint. Dementsprechend entsteht durch die Extrusion einer Fläche ein Körper. Dabei stellt die Tiefe der Extrusion die Dicke des Bauteils dar. Derzeit bietet die Python-Bibliothek Trimesh [16] eine vordefinierte Funktion für die Extrusion von Flächen.

Der prinzipielle Ablauf einer Flächenextrusion in Trimesh wird in **Bild 4** beschrieben. Entsprechend der Abbildung ist Trimesh nur in der Lage, 2D-Polygonflächen zu extrudieren. Hierfür werden die Eckpunkte P_n in der Dimension (n,2) und die Flächen F_n in der Dimension (n,3) als Eingabedaten benötigt, welche die Polygonfläche definieren. Die Eckpunkte der ursprünglichen 2D-Polygonfläche werden nach der Extrusion mit der Z-Dimension erweitert (\triangleq n,3) und auf $(X_n, Y_n, Z_n=0)$ gesetzt. Analog ergibt die Parallelverschiebung der Eckpunkte die neuen Koordinaten $(X_n, Y_n, Z_n=t)$, wobei t der manuell festgelegte Verschiebungsparameter ist.

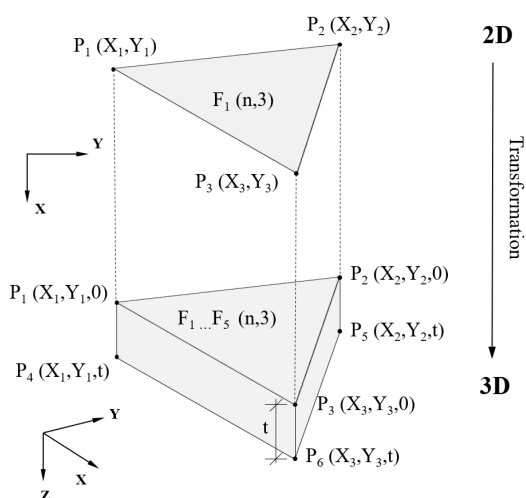


Bild 4 Prinzipskizze zur Beschreibung der Flächenextrusion in Trimesh am Beispiel einer zweidimensionalen Dreiecksfläche.

Angesichts der Tatsache, dass die vordefinierte Funktion in Trimesh nur an 2D-Polygonflächen, bestehend aus Eckpunkten (engl. vertices) und Flächen (engl. faces), angewendet werden kann, sind zwei vorhergehende Schritte erforderlich:

- Übertragung der 3D-Punktdaten in die XY-Ebene: Rotation der RANSAC-Punktdaten, so dass alle Z-Werte annähernd gleich sind.
- Erzeugung einer konkaven 2D-Polygonfläche basierend auf der ausgerichteten Punktmenge aus (i).

Die Ausrichtung der RANSAC-Punktdaten gemäß (i) wird mit der Python-Implementation der Rodrigues'schen Rotationsformel [17] durchgeführt. Mit dieser Formel lässt sich die Rotationsmatrix für die Drehung der Punktdaten in der XY-Koordinatenebene ermitteln.

Für die Erzeugung der 2D-Polygonfläche nach (ii) wird eine α -shape-Implementierung in Wolfram Mathematica [18] eingesetzt. Die Implementierung der α -shape-Funktion in Mathematica liest die XY-Punktdaten, generiert eine Oberfläche gemäß der Delaunay-Triangulation [19] und exportiert sie im OBJ-Format [20]. Dabei kann die Feinheit der Triangulation durch einen numerischen Parameter j zwischen $0 < j \leq 1$ definiert werden, wobei $j = 1$ eine konvexe Triangulation und $j < 1$ eine konkave Approximation definiert. Es ist wichtig zu beachten, dass die konkave Annäherung auch Öffnungen in der Oberfläche berücksichtigen kann. Schließlich kann die mit Wolfram Mathematica erzeugte 2D-Polygonfläche des Bauteils mit der Trimesh-Funktion extrudiert werden. Die digitale Rekonstruktion aller segmentierten Bauteilen ergibt das 3D-Modell der Trümmerhülle.

3.3.2 Verdeckte Trümmerteile

Für die digitale Rekonstruktion der verdeckten Trümmerteile kann die Eingabepunktwolke nicht verwendet werden, da sie nur Punktdaten der sichtbaren Objekte darstellt. Ein BIM des sichtbaren Trümmerkegels allein bietet keine Grundlage für die Lokalisierung von möglichen Hohlräumen. Es müssen daher realistische Annahmen über die Trümmerbildung innerhalb der verdeckten Bereiche getroffen werden. Um dieses Defizit zu überbrücken, wird die Nutzung einer Datenbank vorgeschlagen, welches die Trümmerbildung von kollabierten Gebäuden infolge Erdbeben im OBJ-Format enthält. Die darin enthaltenen Trümmerbildungen werden mittels numerischer Kollapssimulation gemäß dem Ansatz von Zheng et al. [21] gewonnen. Zheng et al. [21] schlagen vor, die Simulation mit der nichtlinearen Finite-Elemente-Methode (FEM) bis zum Beginn des Einsturzes auszuführen und anschließend die Simulation mit einer Physics-Engine fortzusetzen. Dieser Ansatz wurde im Rahmen dieser Arbeit mit SOFiSTiK [22] als FEM-Software und der in Blender integrierten Bullet-Physics-Engine [23] implementiert. Das Bullet-Constraint-Builder (BCB)-Add-On [24] für Blender wird dabei für die automatisierte Generierung von Zwangsbedingungen (engl. constraints) zwischen den Elementen verwendet. **Bild 5** zeigt exemplarisch das Ergebnis einer Kollapssimulation eines Stahlbetonrahmentragwerkes unter dem

El-Centro-Erdbebenzeitverlauf mit dem beschriebenen Ansatz. In diesem Fall wurde die Stockwerksverschiebung (engl. inter-story-drift) größer als 4% gemäß der FEMA-356-Richtlinie [25] als Kriterium für den Beginn des Einsturzes ausgewählt. Das Gebäude aus **Bild 5** erreichte das Einsturzkriterium zum Zeitpunkt $t = 3,2$ s. Anschließend wurde aus dem verformten FE-Modell ein äquivalentes Starrkörpermodell mit der Programmierschnittstelle von Blender erstellt. Mit dem BCB wurde die Simulation unter Berücksichtigung der entsprechenden Materialkennwerten bis zum vollständigen Einsturz fortgeführt.

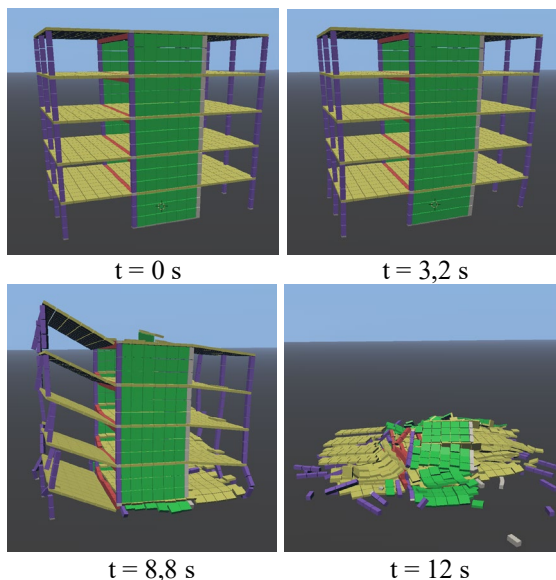


Bild 5 Simulation des progressiven Einsturzes eines vierstöckigen Stahlbetonrahmens unter dem El-Centro-Erdbebenzeitverlauf von 1940.

Der nächste Schritt ist, das rekonstruierte 3D-Modell der sichtbaren Bauteile mit den Ergebnissen der Kollapssimulationen aus der Datenbank zu überlagern und bei hoher geometrischer Übereinstimmung die verdeckten Bauteile zu ergänzen. Da sich dieser Auswertungsprozess noch in Entwicklung befindet, wird nachfolgend nicht näher darauf eingegangen.

3.4 Umwandlung in den BIM-Format

Im letzten Schritt des Arbeitsablaufes wird das generierte 3D-Modell in den BIM-Prozess überführt (**Bild 1e**). Als Schnittstelle zu BIM wird das Industry Foundation Classes (IFC)-Format gewählt. IFC ist ein international standardisiertes und offenes Datenaustauschformat für die BIM-Anwendung im Bauwesen, das von buildingSMART International [26] entwickelt wurde. Ein IFC-Bauteil kann neben relevanten Daten über die Geometrie auch Daten über den Bauteiltyp, das Material, die strukturellen Eigenschaften und benutzerdefinierte Attribute enthalten.

Um die rekonstruierten Körper vom OBJ- ins IFC-Format zu konvertieren, wird das BlenderBIM-Add-On [27] verwendet. Nach dem Datenimport muss zunächst ein BIM-Projekt-Setup mit dem Task *Building Information Modeling* im Arbeitsbereich *Szeneneigenschaften* (engl. Scene Properties) initiiert werden. BlenderBIM generiert

auf diese Weise einen vordefinierten IFC-Baum nach der Vorgabe von buildingSMART. Mit der IFC-Klassenzuweisung in der Kategorie *Objekteigenschaften* (engl. Object Properties) werden die OBJ-Dateien in das IFC-Schema übertragen. Anschließend können relevante Daten und Attribute in die 3D-Bauteile hinterlegt werden. Das fertige BIM-Modell kann in den Formaten IFC, IFCZIP oder IFCJSON exportiert werden.

4 Fallbeispiel

Im Rahmen eines Feldtests wurden Daten eines Trümmerfeldes auf dem THW-Übungsgelände in Wesel gesammelt (**Bild 6**). Bei der Szene handelt es sich im Wesentlichen um stark beschädigte Außenwände aus Mauerstein und einer Trapezblechdecke. Um die Wände herum befinden sich mehrere Mauersteinanhäufungen, die kleine Trümmerkegel simulieren. Die Abmessungen des Trümmerfeldes betragen 25 x 10 m in Länge und Breite und rund 2,0 m in der Höhe.



Bild 6 Trümmerfeld auf dem THW-Übungsgelände in Wesel, Deutschland: Vorderansicht (links) und Rückansicht (rechts).

Da zum Zeitpunkt des Feldversuches die SORTIE-Drohne nicht einsatzbereit war, wird nachfolgend der Aspekt der drohnenbasierten Datenerfassung nicht behandelt.

4.1 Punktwolkenerzeugung

Die 3D-Punktwolke wurde mittels der Structure-from-Motion (SfM)-Photogrammetrie in der Open-Source-Software VisualSfM [28] erzeugt. Dafür wurden insgesamt 101 Bilder mit einer seitlichen Überlappung von mehr als 50 % des Trümmerfeldes aufgenommen, darunter 95 terrestrische Bilder und 6 Drohnenbilder. Die Drohnenbilder sind Schrägaufnahmen, die mit einer DJI-Mini aufgezeichnet wurden. Die Generierung der dichten Punktwolke mit 1.420.114 Punktdaten dauerte 12 Minuten (**Bild 7**). Der verwendete Computer hat die folgenden technischen Spezifikationen: AMD Ryzen 7 4800H CPU 2.9GHz, 16 GB RAM, NVIDIA GeForce RTX 2060 GPU.



Bild 7 Photogrammetrische Punktwolke des Trümmerfeldes auf dem THW-Übungsgelände Wesel.

Alle nicht relevanten Bereiche wurden manuell aus der Punktwolke herausgeschnitten und mit Open3D von Ausreißern befreit.

4.2 Segmentierung der Eingabedaten

Die RANSAC-Implementierung von Open3D war im Stande, die Platten und Wände der photogrammetrischen Punktwolke mit einer angemessenen Genauigkeit zu segmentieren (**Bild 8**).



Bild 8 Segmentierung der Eingabepunktwolke mit dem RANSAC-Algorithmus von Open3D: Jede Farbe kennzeichnet ein eigenständiges Segment.

Die semi-automatische Segmentierung, einschließlich der Speicherung der 25 Segmente im PLY-Format, dauerte nur 16 Sekunden. Von den 25 erzeugten RANSAC-Segmenten wurden 12 für die Modellerstellung gewählt. Diese mussten zur Vorbereitung der 3D-Rekonstruktion manuell von Ausreißern und unbrauchbaren Segmentierungen befreit werden, was zusätzliche 10 Minuten in Anspruch nahm. Insbesondere die Bereiche mit Trümmerschutt führten aufgrund ihrer Unebenheiten zu vielen unbrauchbaren Ergebnissen.

4.3 3D-Rekonstruktion

Die RANSAC-Segmente wurden einzeln als Eingabe für den in Abschnitt 3.3 beschriebenen 3D-Rekonstruktionsprozess verwendet. Das erhaltene Gesamtmodell des Trümmerfeldes ist in **Bild 9** zu sehen. Dabei ist zu beachten, dass die erwähnte Datenbank aus Abschnitt 3.3.2 für die Berücksichtigung der verdeckten Trümmerteile noch nicht genutzt werden konnte.

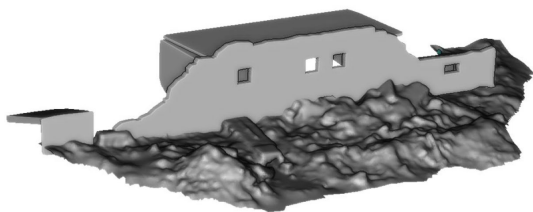


Bild 9 Ergebnis der 3D-Rekonstruktionsprozesses: 3D-Modell des Außenbereiches im OBJ-Format.

Aus den Ergebnissen ist ersichtlich, dass die Form der Bauteile mit hoher Genauigkeit rekonstruiert werden konnte. Der Arbeitsablauf wurde zum größten Teil mit Python automatisiert ausgeführt. Für die Oberflächengenerierung in Wolfram Mathematica müssen die α -Formparameter manuell an die RANSAC-Segmente angepasst werden, z.B. bei konkaven Flächen mit Öffnungen. Daher dauerte der gesamte Rekonstruktionsprozess etwa 16 Minuten.

4.4 Umwandlung in den BIM-Format

Die Konvertierung der OBJ-Dateien des 3D-Modells in das IFC-Format wurde erfolgreich mit BlenderBIM durchgeführt (**Bild 10**). In diesem Fall wurden nur die IFC-Klassen *IfcSlab* für die Decken und *IfcWall* für die Außenwände verwendet und über benutzerdefinierte Attribute näher beschrieben. Um zu überprüfen, ob die Konvertierung erfolgreich war, wurde die erstellte IFC-Datei in den kostenlosen BIM-Viewer usBIM.viewer+ importiert. In diesem Viewer konnten alle Objekte der IFC-Datei inklusive der zugeordneten Klassen und Eigenschaften ohne Datenverlust angezeigt werden.

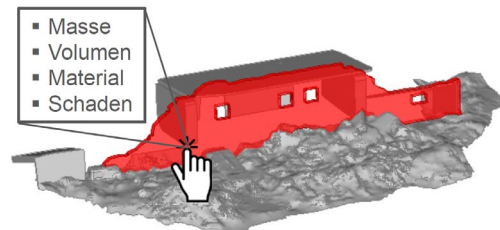


Bild 10 Digitales Modell des Trümmerfeldes im IFC-Format.

5 Diskussion und Ausblick

In der aktuellen Projektphase bietet die vorgestellte Rekonstruktionsmethode einen vielversprechenden Ansatz, um das Trümmerbild eines eingestürzten Gebäudes basierend auf seiner 3D-Punktwolke zu generieren. Im Allgemeinen kann mit der RANSAC-Implementierung von Open3D eine angemessene Segmentierung durchgeführt werden, sofern die Eingabepunktwolke gut definierte Punktebenen enthält, wie z.B. bei Decken und Wänden. Die Segmentierung eines chaotischen Trümmerkegels ist daher mit dem RANSAC-Algorithmus nicht zielführend. Eine semantische Segmentierung der Punktwolke mit einem geeigneten Netzwerk kann die bauteilorientierte Segmentierung stark verbessern. Das Fehlen von Trainingsdaten für Trümmerfelder lässt jedoch derzeit keine konkrete Anwendung zu. Um den Rekonstruktionsprozess vollautomatisch durchführen zu können, ist eine lückenlose Eingabepunktwolke und eine fehlerfreie Segmentierung der Daten auf Bauteilebene erforderlich. Beide Bedingungen können derzeit noch nicht erfüllt werden, weshalb eine manuelle Unterstützung des Prozesses erforderlich ist.

Die Verwendung des IFC-Formats wird als sinnvoller Ansatz angesehen, um die rekonstruierten 3D-Objekte in den BIM-Prozess zu übertragen. Mit den vordefinierten IFC-Standards von buildingSMART können die 3D-Objekte bauteilspezifisch beschrieben werden. Dennoch ist eine sinnvolle Festlegung von benutzerdefinierten IFC-Attributen für den hier betrachteten Sonderfall erforderlich. Dies kann benutzerfreundlich mit BlenderBIM eingestellt werden.

Künftige Arbeiten können die Genauigkeit der vorgeschlagenen Methode unter Verwendung von Gebäuden mit unterschiedlichen Zerstörungsgraden untersuchen, um die Anwendungsgrenzen besser zu definieren.

Die Datenbank der Kollapssimulationen wird in weiteren Projektphasen mit ausgewählten Gebäuden und ihrer Einsturzform erstellt. Das dazugehörige Auswertungsverfahren zum Vergleich des rekonstruierten 3D-Modells der äußeren Struktur mit den Ergebnissen der Datenbank muss noch entwickelt werden.

Danksagung

Die Autoren dieser Arbeit bedanken sich beim Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) für die finanzielle Unterstützung des Forschungsprojektes (Förderkennzeichen: 13N15193).

6 Literatur

- [1] Landsberg, L.; Braun, A.; Mudimu, O. A.; Büttgen, K.-D.: Considering end user needs when developing new technologies - a new plug and play sensor technology for locating trapped victims. In: Proceedings of the 18th ISCRAM Conference. Blacksburg, VA, USA, May 2021.
- [2] WEB, Relief. Haiti: Earthquake Situation Report No. 4 (7 September 2021). 2021.
- [3] Alexander D.: What can we do about earthquakes? Towards a systematic approach to seismic risk mitigation. Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, 2012, 45:49–60.
- [4] Gebbeken, N.; Videkhina, I.; Pfeiffer, E.; Garsch, M.; Rüdiger, L.: Risikobewertung und Schutz von baulichen Infrastrukturen bei Hochwassergefahr. In: Bau-technik 93, Heft 4. Ernst & Sohn, Berlin, 2016.
- [5] Gebbeken, N.; Krauthammer, T.: Natural Threat – Tornadoes. Bautechnik 93, Heft 4. Ernst & Sohn, Berlin, 2016.
- [6] Gebbeken, N.; Braun, M.; Hachmann, T.; Yilmaz, H.: Earthquake engineering–reconnaissance and assessment of existing buildings. International Journal of Protective Structures, 2012, 3(4), 375–388.
- [7] Vfdb-Richtlinie 03/01: Hinweise für Maßnahmen der Feuerwehr und anderer Hilfskräfte nach Gebäudeeinstürzen, 2002.
- [8] Hohage, H.: THW-Weiterbildung zum Baufachberater - Einsatztaktik bei Gebäudeschäden, 2008.
- [9] RISK Forschungszentrum, Universität der Bundeswehr München: SORTIE - Sensor-Systeme zur Lokalisierung von verschütteten Personen in eingestürzten Gebäuden – Strukturanalyse des Trümmerfeldes, 2020. URL: <https://www.unibw.de/risk/projekte/sortie> (zuletzt aufgerufen: 03/22).
- [10] Tommasi, C.; Achille C.; Fassi F.: From point cloud to BIM: a modelling challenge in the cultural heritage field. 429–436, 2016.
- [11] Khanmohammadi, S.; Arashpoura, M.; Baia, Y.: Applications of Building Information Modeling (BIM) in Disaster Resilience: Present Status and Future Trends. Automation in Construction 13, 2020, S. 6–35.
- [12] Zeibak-Shini, R.; Sacks, R.; Ma, L.; Filin, S.: Towards generation of as-damaged BIM models using laser-scanning and as-built BIM: First estimate of as-damaged locations of reinforced concrete frame members in masonry infill structures. Advanced Engineering Informatics, 30(3), 312–326, 2016.
- [13] Zhou, Q. Y.; Park, J.; Koltun, V.: Open3D: A modern library for 3D data processing. 2018. arXiv preprint arXiv:1801.09847.
- [14] Fischler, M. A.; Bolles, R. C.: Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. Communications of the ACM 24, 1981, Nr. 6, S. 381–395.
- [15] Greg Turk: The PLY Polygon File Format. 1994. - URL: <https://web.archive.org/web/20161204152348/http://www.dcs.ed.ac.uk/teacing/cs4/www/graphics/Web/ply.html>
- [16] Dawson-Haggerty et al.: trimesh (version 3.2.0). 2019. URL: <https://trimsh.org/>
- [17] Rodrigues O., Journal de Mathematiques 5, 380, 1840.
- [18] Wolfram Research Inc.: Mathematica 12.0, 2019. RL: <http://www.wolfram.com>
- [19] Weisstein, E. W.: "Delaunay Triangulation." From MathWorld--A Wolfram Web Resource. <https://mathworld.wolfram.com/DelaunayTriangulation.html>
- [20] Murray, J.D.; VanRyper, W.: Graphics File Formats. In: Encyclopedia of Graphics File Formats, 2nd ed.; O'Reilly: Sebastopol, CA, USA, 1996; pp. 946–952.
- [21] Zheng, Z.; Tian, Y.; Yang, Z.; Lu, X.: Hybrid framework for simulating building collapse and ruin scenarios using finite element method and physics engine. Applied Sciences, 2020, 10(12), 4408.
- [22] SOFiSTiK, Ver2018: Version 2018. SOFiSTiK AG - URL: <https://www.sofistik.de/>
- [23] Coumans, E. ; Bai, Y.: PyBullet, a Python module for physics simulation for games, robotics and machine learning. <http://pybullet.org> 2016–2021.
- [24] LUAS: Bullet Constraint Builder. 2021. – URL: <https://github.com/KaiKostack/bullet-constraints-builder>
- [25] Federal Emergency Management Agency. Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings (FEMA 356); Federal Emergency Management Agency: Washington, DC, USA, 2000.
- [26] buildingSMART: buildingSMART Documentation for IFC4. 2020. URL: https://standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC4/ADD2_TC1/HTML/
- [27] BlenderBIM (2021): BlenderBIM Documentation. URL: <https://blenderbim.org/docs/blenderbim/scene.html>.
- [28] Wu, C.: Towards Linear-time Incremental Structure From Motion. 3DV, 2013.