

# LOKI

## Luftgestützte Observation Kritischer Infrastrukturen

### SCHLUSSBERICHT



UNIVERSITÄT  
HEIDELBERG  
ZUKUNFT  
SEIT 1386



<b>Zuwendungsempfängerin</b> Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg	<b>Förderkennzeichen</b> FKZ 03G0890
<b>Vorhabensbezeichnung</b> LOKI – Luftgestützte Observation Kritischer Infrastrukturen	
<b>Laufzeit des Vorhabens</b> 01.01.2020 – 31.03.2023	
<b>Projektleitung</b> Prof. Dr. Bernhard Höfle Geographisches Institut, Abteilung Geoinformatik Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg E-Mail: hoefle@uni-heidelberg.de Telefon: +49 6221 54-5594	
<b>Projektkoordinator*innen</b> Dr. Katharina Glock (FZI Forschungszentrum Informatik) Heiko Mey (Aeromey GmbH) Dr. Danijel Schorlemmer (GeoForschungsZentrum Potsdam) Prof. Dr.-Ing. Lothar Stempniewski/Prof. Dr.-Ing. Alexander Stark (Karlsruher Institut für Technologie) Prof. Dr. Alexander Zipf (Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg)	

**Autor:innen:** Vivien Zahs, Julia Kohns, Fabian Meyer, Danijel Schorlemmer, Katharina Anders, Carolin Klonner, Heiko Mey, Laurens Oostwegel, Tara Evaz Zadeh, Bernhard Höfle.

**Zitation:** Zahs, V., Kohns, J., Meyer, F., Schorlemmer, D., Anders, K., Klonner, C., Mey, H., Oostwegel, L., Zadeh, T. & Höfle, B. (2023): LOKI – Luftgestützte Observation Kritischer Infrastrukturen. Schlussbericht. Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, 120 S.

**Inhaltsverzeichnis**

1 Kurzdarstellung des Vorhabens.....	5
1.1 Aufgabenstellung .....	5
1.2 Voraussetzungen .....	5
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens.....	6
1.4 Ausgehender wissenschaftlicher und technischer Stand.....	7
1.4.1 UAV Plattform und Sensorik (Aeromey GmbH) .....	8
1.4.2 Automatisierte Missionsplanung zur überblicksartigen und detaillierten Lageerfassung (FZI).....	9
1.4.3 Gebäudegenaue Exposure-Modellierung (GFZ).....	9
1.4.4 Erdbebeningenieurwesen zur Schadensklassifizierung (KIT) .....	10
1.4.5 Crowdsourcing und nutzergenerierte Geoinformation (UHD-GIScience) .....	10
1.4.6 Automatische Schadensbestimmung (UHD-3DGeo) .....	11
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	12
1.5.1 Zusammenarbeit mit Anwender:innen aus dem Katastrophenschutz.....	12
1.5.2 Zusammenarbeit mit im Projektantrag genannten Partner:innen .....	12
1.5.3 Kooperationen mit weiteren Forschungsgruppen, Firmen, Stiftungen und lokalen Akteuren.....	13
2 Ergebnisse .....	13
2.1 AP 1 – Konzeption des Gesamtsystems (Gesamtverbund).....	13
2.1.1 Gesamtsystem und Gesamtarchitektur .....	13
2.1.2 Schnittstellendefinition .....	17
2.1.2 Spezifikation der Anwendungsfälle .....	18
2.2 AP 2 – UAV Plattform und Sensorik (Aeromey GmbH) .....	20
2.2.1 Beschaffung Fluggeräte.....	20
2.2.2 Beschaffung Sensorsysteme .....	25
2.2.3 Flugtests.....	27
2.3 AP 3 – Automatisierte Missionsplanung und Schwarmsteuerung (FZI) .....	28
2.3.1 Flugplanungsdienste .....	29
2.3.2 Evaluation der Flugplanungsalgorithmen.....	33
2.3.3 Front-End für Anwender:innen.....	34
2.4 AP 4 – Exposure-Modellierung (GFZ) .....	37
2.4.1 Dynamische globale Exposure-Modellierung .....	38
2.4.2 Initiale Schadensabschätzung .....	49
2.4.3 Visualisierung aktueller Lageinformation .....	50
2.5 AP 5 – Schadensklassifikation (KIT) .....	51
2.5.1 Schadenskatalog zur Klassifizierung von Erdbebenschäden an Gebäuden.....	51

2.5.2 Ermittlung von Fragilitätskurven auf Basis von nichtlinearer Analyse von Gebäudeklassen .....	57
2.6 AP 6 – Crowdsourcing (UHD-GIScience) .....	65
2.6.1 Crowdsourcing für die Exposure-Modellierung .....	66
2.6.2 Crowdsourcing zur Schadensklassifizierung .....	69
2.6.3 Integration in die Crowdmap-App .....	75
2.7 AP 7 – Automatische Schadensbestimmung (UHD-3DGeo) .....	76
2.7.1 Ansatz zur änderungsbasierten Schadensbestimmung .....	77
2.8 AP 8 – Fusion, Systemintegration, Pilotierung und Evaluation des Gesamtsystems (Gesamtverbund) .....	89
2.8.1 Fusion und Integration .....	89
2.8.2 Pilotierung .....	89
2.8.3 Demonstration und Evaluation .....	92
2.9 AP 9 – Verbreitung und Verwertung (Gesamtverbund) .....	95
2.9.1 Workshops mit potenziellen Anwender:innen des LOKI-Systems .....	95
2.9.2 Wissenschaftliche und technische Verbreitung und Verwertung .....	98
3 Bewertung der Ergebnisse .....	100
3.1 Bewertung der wissenschaftlichen Ergebnisse .....	100
3.1.1 Exposure-Modellierung (GFZ) .....	100
3.1.2 Automatisierte Missionsplanung (FZI) .....	100
3.1.3 Schadensklassifikation – Schadenskatalog und Fragilitätskurven (KIT) .....	101
3.1.4 Crowdsourcing und nutzergenerierte Geoinformation (UHD-GIScience) .....	101
3.1.5 Automatische Schadensbestimmung (UHD-3DGeo) .....	102
3.2 Positionen des zahlenmäßigen Zwischennachweises .....	102
3.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit .....	102
3.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses .....	103
3.4.1 Wissenschaftliche Verwertung .....	103
3.4.2 Technische Verwertung .....	103
3.4.3 Wirtschaftliche Verwertung .....	104
4 Fortschritt seitens Dritter .....	104
4.1 Exposure-Modellierung (GFZ) .....	105
4.2 Automatisierte Missionsplanung (FZI) .....	105
4.3 Schadensklassifikation (KIT) .....	106
4.4 Crowdsourcing und nutzergenerierte Geoinformation (UHD-GIScience) .....	106
4.5 Automatische Schadensbestimmung (UHD-3DGeo) .....	106
5 Veröffentlichungen .....	106
5.1 Zeitschriftenartikel .....	106

5.2 Konferenzbeiträge.....	107
5.3 Preprints .....	109
5.4 Abschlussarbeiten.....	109
5.5 Datenpublikationen .....	110
5.6 Quellcode und Web-Services .....	110
5.7 Öffentlichkeitsarbeit.....	113
6 Literatur .....	113
Anlagen .....	120

## 1 Kurzdarstellung des Vorhabens

### 1.1 Aufgabenstellung

Ziel des Projektes LOKI war es, ein interdisziplinäres Gesamtsystem und dessen Komponenten zu entwickeln, um im Falle eines Erdbebens eine schnelle und zuverlässige luftgestützte Lageerfassung und eine objektive Bewertung der Erdbebenschäden an Infrastrukturen zu ermöglichen. Die Anwendung des Systems in der Praxis dient dem Katastrophenmanagement nach einem Erdbeben, indem möglichst schnell aktuelle Lageinformationen erfasst werden, mit denen entsprechende Maßnahmen informiert eingeleitet werden, und vorhandene sowohl personelle als auch materielle Ressourcen effektiv genutzt werden können. Der besondere Fokus liegt dabei auf der zeitnahen Übersicht der Gesamtschäden und einer detaillierten Erfassung der Schäden an kritischen Infrastrukturen. Die Ziele werden durch die innovative Nutzung und Kombination von neuartigen Technologien und Konzepten, wie dem Maschinellen Lernen, Crowdsourcing, Uncrewed Aerial Vehicles (UAVs, für den Zivilgebrauch verfügbare Flug-UAVs) und 3D-Monitoring, in Verbindung mit reichhaltigem Expertenwissen der Erdbebenforschung, erreicht.

Nach Eintritt des Erdbebens wird eine erste initiale Schadensberechnung auf Basis eines Exposure-Modells mit enthaltenen Gebäudeinformationen und den Erdbebenparametern erstellt. Diese dient als Basis für die Planung der Übersichtsflüge der UAVs, um Bilddaten flächig aufzunehmen. Die aufgenommenen Daten dienen als Grundlage für die Schadensdetektion, bei welcher Ansätze basierend auf Maschinellen Lernen und Crowdsourcing binär zwischen Schaden und keinem Schaden unterscheiden. Für Infrastrukturen, die eine genauere Untersuchung benötigen, wird eine Missionsplanung für Detailflüge durchgeführt und detaillierte Daten mithilfe der UAVs aufgenommen. Diese Bilddaten und 3D-Punktwolken dienen zur Klassifizierung des Schadens in differenzierte Schadensgrade. Dabei kommen wiederum Ansätze des Maschinellen Lernens sowie des Crowdsourcings zum Einsatz, sodass schnelle Algorithmen mit der visuellen Fähigkeit des Menschen kombiniert werden und die jeweiligen Vorteile genutzt werden können. Die aufgenommenen Daten und die Ergebnisse der initialen Schadensberechnung, der Schadensdetektion und der Schadensklassifikation werden der Einsatzleitung jeweils zeitnah zur Verfügung gestellt und visualisiert, sodass die Rettungsmaßnahmen effektiv geplant und unterstützt werden können. Außerdem können die kritischen und wichtigen Bereiche bzw. Gebäude durch die Einsatzleitung priorisiert bzw. vorgegeben und in der Missionsplanung berücksichtigt werden. Das Exposure-Modell wird durch die mithilfe der UAV-Daten und deren Auswertung gewonnenen Informationen und durch Mapathons, die zusätzliche Gebäudeattribute erfassen, dynamisch angepasst und erweitert. Alle Informationen aus den Modulen werden in einer Schadensdatenbank zusammengeführt und zur Verfügung gestellt.

### 1.2 Voraussetzungen

Das LOKI-Projekt führte die bisherigen Technologien, Projekte und Kenntnisse der einzelnen Projektpartner synergetisch zusammen. Der folgende Abschnitt skizziert in alphabetischer Reihenfolge die vor Projektstart vorhandenen Kenntnisse aller Partner, die im Rahmen des LOKI-Projekts genutzt wurden. Der Industriepartner Aeromey GmbH konnte auf eine langjährige Erfahrung in der Entwicklung und Nutzung von UAV-Systemen zurückgreifen. Das Arbeitsgebiet der Aeromey GmbH umfasst Inspektionsaufgaben für die Bauindustrie und Anwendungen für den landwirtschaftlichen Bereich. Das FZI Forschungszentrum Informatik nutzte seine Expertise in der Offline-Missionsplanung und die Erfahrung aus vorangegangenen Industrie-

jekten, um exakte und heuristische Verfahren zur Routenplanung in Echtzeit unter Berücksichtigung von raum- und zeitbezogenen Daten zu entwickeln. Die Sektion „Erdbebengefährdung und dynamische Risiken“ des GeoForschungsZentrum Potsdam (GFZ) griff auf ihr bisheriges Expertenwissen zu gebäudebezogenen Exposure-Modellen zurück und erstellte die OpenBuildingMap (OpenBuildingMap 2023), die als Hauptinputquelle für das Exposure-Modell dient. Zu den Fachgebieten gehören Schadensberechnungen mit aggregierten und gebäudegenauen Exposure-Modellen, Erdbebenrisikoanalysen und die Arbeit mit großen räumlichen Datensätzen. Die Sektion hatte bereits kleinere gebäudegenaue Exposure-Modelle erstellt, die als Inspiration für das globale und dynamische gebäudegenaue Exposure-Modell dienten. Die Vorarbeiten des Instituts für Massivbau und Baustofftechnologie, Abteilung Massivbau (IMB) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) umfassten Risikoanalysen in früheren Projekten, z. B. in Deutschland und Istanbul. Die Abteilung besaß bereits vor Start des Vorhabens Expertise in der analytischen Bewertung der Erdbeben Tragfähigkeit von Gebäuden und Ingenieurbauwerken und hatte Erfahrung mit komplexen Verstärkungssystemen für Tragwerke im Falle eines Erdbebens. Die 3DGeo-Arbeitsgruppe der Universität Heidelberg (UHD-3DGeo) nutzte ihre langjährige Erfahrung in der Entwicklung von Algorithmen für automatische 3D-Änderungsanalysen in großen multitemporalen Datensätzen und in der Entwicklung von Simulationssoftware für 3D-Punktwolken, um einen neuartigen Ansatz zur änderungsbasierten Analyse von Erdbebenschäden zu entwickeln. Die GIScience-Arbeitsgruppe der Universität Heidelberg (UHD-GIScience) konnte auf die langjährige Erfahrung im Bereich der Qualitäts- und Datenanalyse und im Umgang mit OpenStreetMap (OSM) und anderer nutzergenerierter Geoinformation zurückgreifen, um Crowdsourcing-basierte Ansätze zur Schadensbestimmung zu entwickeln und die Verknüpfung und Anreicherung verschiedener nutzergenerierter Geoinformation herzustellen. Bereits vor dem Vorhaben entwickelte Anwendungen (z. B. MapSwipe Analytics) und Erkenntnisse aus vorangegangenen Projekten (z. B. 3D-MAPP, Herfort et al. 2017) stellten eine wichtige Grundlage für die Entwicklung des Tools zur Vollständigkeitsbewertung von OSM-Daten sowie der Micro-Mapping-Anwendung zur Schadensbestimmung und die Integration beider Tools in einer gemeinsamen Web-Anwendung dar. Die enge Zusammenarbeit mit dem Heidelberg Institute for Geoinformation Technology (HeiGIT) ermöglichte den schnellen Aufbau von Kontakten zu Hilfsorganisationen, wie z. B. dem Deutschen Roten Kreuz als potenzielle Anwender:innen des LOKI-Systems. Dies war für die Entwicklung und Evaluation des Systems von großer Bedeutung und unterstützt die Verwertung der Projektergebnisse.

### **1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens**

LOKI liegt eine detaillierte Arbeitspaketplanung (Abb. 1) mit zugewiesenen Verantwortlichkeiten und Zuständigkeiten zugrunde. Das Projekt ist in überschaubare, zeitliche Abschnitte mit klaren Zielen und messbaren Ergebnissen untergliedert. Das Gesamtsystem ist in Einzelkomponenten unterteilt, wodurch der zeitliche Verzug oder Ausfall einer Komponente bzw. eines Verbundpartners lediglich die Einzelkomponente und die jeweiligen Schnittstellen betreffen würden und durch komplementäre Expertisen der Verbundpartner teilweise kompensiert werden können.

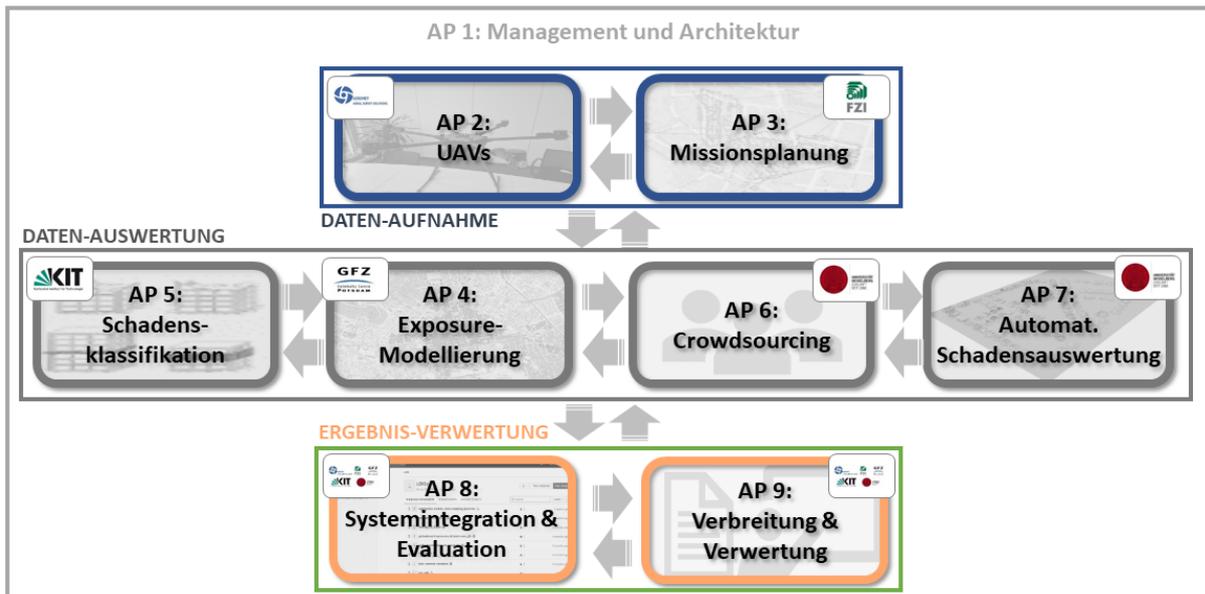


Abbildung 1: Übersicht zu den Abhängigkeiten und Interaktionen der definierten Arbeitspakete (AP) und Unterarbeitspakete.

Im Zuge des verzögerten Projektstarts und der pandemiebedingten Verzögerungen, wurde eine kostenneutrale Verlängerung der Laufzeit um drei Monate bewilligt und der ursprüngliche Arbeitsplan entsprechend angepasst (Abb. 2):

AP	Titel	2020				2021				2022				2023	Gesamt PM
		Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	
1	Management und Architektur														32
2	UAV Plattform und Sensorik														30
3	Automatisierte Missionsplanung und Schwarmsteuerung														28
4	Exposure-Modellierung														43
5	Schadensklassifikation														25
6	Crowdsourcing														37
7	Automatisierte Schadensdetektion														32
8	Fusion, Systemintegration, Pilotierung und Evaluation														41
9	Verbreitung und Verwertung														20
	Meilensteine			1				2				3		4	

Abbildung 2: Arbeitsplan inklusive der vier Meilensteine und Personenmonate (PM) als Gantt-Chart dargestellt.

Folgende Meilensteine wurden basierend auf den einzelnen Arbeitszielen festgelegt:

- MS 1: (Monat 6): Anforderungen, Gesamtarchitektur und Schnittstellen sind definiert. Daten sind beschafft und evaluiert.
- MS 2: (Monat 16): Integration der Einzelkomponenten zu grundlegenden Prototypen. Koordination mit Anwendern für potenzielle Einsätze.
- MS 3: (Monat 25): Gesamtprototyp ist vorhanden und Einzelkomponenten sind integriert. Grundlegende Arbeiten an den Einzelkomponenten sind weitgehend abgeschlossen.
- MS 4: (Monat 34): Integrierter und evaluierter Prototyp für den Einsatz.

### 1.4 Ausgehender wissenschaftlicher und technischer Stand

Nach dem Eintritt eines Erdbebens werden einerseits schnell erste Informationen zur Lagefeststellung und andererseits im weiteren Verlauf detaillierte Informationen zu allen beschädigten Infrastrukturen benötigt. Vor Projektbeginn war der Standard der Lagefeststellung über

das Rapid-Mapping-Programm von Copernicus gegeben. Dies strebt eine erste, satellitengestützte Lageübersicht ab ca. 9-12 Stunden nach Eintritt des Schadensereignisses an. Ansätze, um eine In-situ-Lagefeststellung über UAV sicherzustellen, sind derzeit in den Anfängen. Hierbei werden jedoch nur Schäden nach dem Ereignis untersucht und die Ansätze der Bildaufnahme durch UAV fokussieren sich auf eine maximale Abdeckung und keine Details.

Die Klassifizierung der Schäden an den einzelnen Gebäuden und Infrastrukturen erfolgte bisher durch Expert:innen vor Ort, welche die Straßen abgehen und Schäden manuell beurteilen. Dies erfordert einen hohen Personaleinsatz und die Klassifikation kann erst Wochen bis Monate nach dem Erdbeben abgeschlossen werden. Der Einsatz von Bildaufnahmen und 3D-Punktwolken zur Klassifikation von Gebäudeschäden ist bereits in mehreren Studien betrachtet worden. Die Schadensdetektion auf Gebäude- und Bauwerkselementebene bleibt jedoch eine Herausforderung.

Im Gegensatz zur aktuellen Einsatzplanung und Lagefeststellung bietet LOKI Vorteile im Bereich der In-situ-Lagefeststellung, der Geschwindigkeit und Genauigkeit der Lagefeststellung, und hinsichtlich des Detailgrads der Informationen. Eine adaptive Missionsplanung wird verwendet, um sowohl Übersichts- als auch Detailflüge durchzuführen und auf aktuelle Änderungen reagieren zu können. Im LOKI-Projekt wird die Verknüpfung zwischen automatischen Verfahren, Crowdsourcing-Ansätzen und Sensorik (multitemporale und multimodale UAV-Aufnahme) entwickelt, um genauere, objektivere und schnellere Ergebnisse erzielen zu können. Bislang werden Exposure-Modelle und Risikoabschätzungen in der Regel nur auf Grundlage von nicht frei verfügbaren Informationen (Katasterdaten, Experteneinschätzungen kommerzieller Anbieter, etc.) erstellt. Dahingegen basiert das Exposure-Modell des GFZ auf offenen Daten. Seit einigen Jahren hat sich die Erhebung von Crowdsourcing-Informationen zur Unterstützung des Katastrophenmanagements verstärkt etabliert. Beispielsweise kartierten 2015 nach den Erdbeben in Nepal mehrere tausend Freiwillige Gebäude, Straßen und weitere relevante Infrastrukturen auf Basis von Satellitenbildern. Diese stellen komplementäre Informationen dar, welche die offiziellen Datensätze ergänzen, erfordern jedoch eine umfassende Qualitätsbewertung. Die angeleitete, objektive Bewertung auf Basis von UAV-Aufnahmen und die Kombination mit automatischen Verfahren zur Lagebeurteilung sind nicht eingesetzt worden. Ebenso existieren bisher keine Ansätze zur verlässlichen automatischen Schadensbestimmung, die sich auf unterschiedliche Daten und geographische Regionen übertragen lassen. Innovativ ist ebenfalls die Integration dieser verschiedenen Komponenten in ein Gesamtsystem zur schnellen, reaktiven und bedarfsgerechten Lagebeurteilung. Bisherige Komponenten wurden dabei nur einzeln untersucht und nur innerhalb einzelner Forschungsdomänen. Die inter- und transdisziplinäre Betrachtung stellt daher einen erheblichen Mehrwert dar.

#### **1.4.1 UAV Plattform und Sensorik (Aeromey GmbH)**

Obwohl UAVs immer mehr an Bedeutung gewinnen und sich bereits einige Firmen auf den Einsatz von UAVs im Rettungswesen spezialisiert haben, kommen häufig nur kleine Standard-UAVs (z. B. DJI Matrice 300 oder Mavic-Serie) zum Einsatz, die üblicherweise nur für die lokale Erfassung, nicht aber für die Aufnahme ganzer Städte oder ländlicher Regionen, eingesetzt werden. Häufig sind diese UAVs mit einer Wärmebildkamera ausgestattet, um bei der Suche nach Wärmequellen (vermisste Personen oder Glutnester) zu unterstützen. Im Gegensatz hierzu sieht der Ansatz von LOKI den Einsatz von UAVs sowohl zur großmaßstäblichen, überblicksartigen Aufnahme größerer Gebiete, als auch zur detaillierten Erfassung einzelner Bauwerke im Falle eines Erdbebenereignisses vor. Dabei werden verschiedene Sensoren mit unterschiedlichen Trägerplattformen kombiniert werden, um die Anforderungen beider Aufnahmeszenarien zu erfüllen.

### 1.4.2 Automatisierte Missionsplanung zur überblicksartigen und detaillierten Lageerfassung (FZI)

UAV-Flotten bieten ein großes Potential für eine effiziente Lageerfassung nach Naturkatastrophen. Sie sind flexibel einsetzbar, kostengünstig und stellen ein geringes Verletzungsrisiko für die Rettungskräfte (Petrides et al. 2017, Xu et al. 2014, Wada et al. 2013, Adams & Friedland 2011) dar. Die Effizienz der Lageerfassung richtet sich dabei nach dem zeitlichen Aufwand für die Erfassung, welche durch eine strukturierte Planung der Befliegungen deutlich verbessert werden kann. Der überwiegende Teil wissenschaftlicher Veröffentlichungen vor Projektbeginn befasste sich jedoch lediglich nachrangig mit der Missionsplanung für einen Einsatz der UAVs. Meist wurde davon ausgegangen, dass der Einsatz beziehungsweise die Steuerung der UAVs manuell durchgeführt wird, was letztlich mit hohem Aufwand und verringerter Effizienz einhergeht. Bestehende Automatisierungsverfahren für Missionsplanungen beschränken sich auf die vollständige Erfassung eines vordefinierten Gebiets durch ein regelmäßiges Streifenmuster und sind damit sehr unflexibel. Entsprechende Missionsplanungsverfahren sind in die meisten Bodenstationen und Autopiloten für UAV-Plattformen integriert (z. B. QGroundControl; Dronecode 2023). Für den LOKI-Anwendungsfall sind diese Verfahren jedoch nicht geeignet, da sie weder die Koordination mehrerer UAVs berücksichtigen, noch in der Lage sind, automatisiert und situationsabhängig eine geeignete Auswahl an Zielpunkten vorzunehmen, wie es im Falle von Großschadensereignissen erforderlich ist.

Allgemein wird der Einsatz mobiler Sensorik in der Forschungsliteratur weit adressiert: Die Erfassung von Gebieten wird durch sogenannte „Exploration and Mapping“-Verfahren erforscht. Ziel dieser Verfahren ist eine vollständige Erfassung und Kartographierung eines zuvor unbekanntes Gebiets, meist durch autonome Bodenfahrzeuge (Tovey et al. 2005, Zlot et al. 2002). In diesem Umfeld hatten sich zu Projektbeginn dezentrale Agenten-basierte Steuermechanismen durchgesetzt, welche auch im Falle einer eingeschränkten Kommunikationsverbindung konsequent auf das Missionsziel hinarbeiten können (Atay & Bayazit 2007).

Mittlerweile kann aufgrund des technischen Fortschritts stets eine funktionierende Kommunikationsverbindung angenommen werden, wodurch zentrale Missionsplanungen mehr an Bedeutung gewinnen. Des Weiteren berücksichtigen diese Verfahren nicht den Energieverbrauch und somit die maximale Einsatzdauer bis eine Aufladung oder ein Wechsel der Batterie notwendig wird. Die Berücksichtigung beider Restriktionen ist jedoch essentiell für die Lageerfassung von Großschadenslagen und liefert weitere Freiheitsgrade zur Steigerung der Effizienz der Lageerfassung.

### 1.4.3 Gebäudegenaue Exposure-Modellierung (GFZ)

Die klassischen in der Erdbebenrisikoanalyse verwendeten Exposure-Modelle sind in der Regel aggregiert. Diese Modelle enthalten die Anzahl von Gebäuden pro Gebäudetyp oder eine Beschreibung der Taxonomie mit Informationen über die Gebäudestruktur (z. B. das Baumaterial, die Anzahl der Stockwerke) und Informationen über die Anzahl an Personen in den Gebäuden und die Wiederbeschaffungskosten. Aggregierte Modelle stellen diese Angaben für einzelne Verwaltungsbezirke zur Verfügung, wobei weder die genaue räumliche Verteilung noch die einzelnen Gebäude bekannt sind. Informationen über die Gebäudestruktur folgen einer definierten Gebäudetaxonomie (Brzev et al. 2013), die von *Global Earthquake Model* (GEM) entwickelt wurde, der *GEM Building Taxonomy*. Ein solcher Ansatz birgt verschiedene Probleme: Erstens ist die Auflösung der aggregierten Modelle, die im Maßstab stark variieren können, oft zu gering, um die räumliche Variabilität der Auswirkungen einer Naturgefahr effektiv zu berücksichtigen. Zweitens wird von einer gleichmäßigen Verteilung von Gebäuden und Gebäudetypen über ein bebautes Gebiet ausgegangen. In Wirklichkeit sind die Gebäude nicht

nur in dichten und dünnen bzw. städtischen und ländlichen Gebieten angeordnet, sondern die Gebäudetypen sind auch mit der Art der bebauten Umgebung korreliert: Einfamilienhäuser findet man in Vororten, gemischte Bebauung in Stadtzentren und Hochhäuser in den Außenbezirken einer Stadt. Dies muss bei genauen und präzisen Schadensschätzungen und somit bei der Exposure-Modellierung berücksichtigt werden. Im in LOKI entwickelten Exposure-Modell verlagert sich das Interesse daher von den Bereichen mit aggregierten Informationen über Gebäude auf die Gebäude selbst mit dem Ziel einer probabilistischen Beschreibung der möglichen Gebäudetypen und deren Wahrscheinlichkeit für jedes Gebäude.

#### **1.4.4 Erdbebeningenieurwesen zur Schadensklassifizierung (KIT)**

Zur Ermittlung der Schadensmuster und der Fragilitätskurven müssen Informationen über die betrachteten Gebäude vorliegen bzw. diese kategorisiert werden. Bekannte Modelle zur Klassifikation von Gebäudetypen bieten die EMS-Skala (Grünthal 1998) und das Global Earthquake Model (GEM). Letzteres veröffentlichte im Jahre 2013 die zweite Version der *GEM Building Taxonomy*, in welcher Gebäude hinsichtlich ihrer Attribute kodiert werden (Brzev et al. 2013). Diese Attribute können genutzt werden, um passende Vulnerabilitäts- und Fragilitätsfunktionen zu wählen, um damit Aussagen über eine Schadenswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit der Intensität und der Gebäudeattribute treffen zu können. Vulnerabilitäts- oder Fragilitätsfunktionen beschreiben den Schaden in Abhängigkeit von Gebäudeeigenschaften und Intensitätsmaßstab. Je nach Gebäudetyp und Intensität des Erdbebens nehmen die Fragilitätskurven unterschiedliche Verläufe für die Schadenswahrscheinlichkeit an. In den GEM Guidelines for Analytical Vulnerability (D'Ayala et al. 2014) ist ein umfangreicher State-of-the-Art der möglichen nichtlinearen Berechnungsmethoden gegeben.

Geiß et al. (2015) verwenden zur Beurteilung des seismischen Verhaltens von Gebäuden Satellitenbilder. Die Grenzen dieser Vorgehensweise sind die beschränkte Verfügbarkeit aktueller Aufnahmen und die händische Interpretation dieser. Die Auswertung liefert nur eine grobe Übersicht über Gebäude, die bereits extrem geschädigt sind. Effekte wie z. B. Pancake-Effekt, Soft-storey-Versagen oder ein Fassadenkollaps können aus dieser Perspektive nicht detektiert werden. Zur Beurteilung des inneren Schadenszustands oder sogar der Standsicherheit liegen keine ausreichenden Informationen vor. Diese Methode eignet sich eher für große Übersichtsbilder schwer zugänglicher Gebiete. Die aufgenommenen Schäden sollen mithilfe der unterschiedlichen Methoden klassifiziert werden. Neben der EMS-Skala (Grünthal 1998) gibt es weitere Schadensskalen zur Klassifikation der Schäden in Abhängigkeit des Materials in unterschiedlich viele Schadensgrade.

Die vorhandenen Schadensskalen sind allerdings nicht auf die Anwendung von UAV-Daten und die konkrete Abgrenzung der Schadensgrade anhand von Grenzwerten ausgelegt. Die anschließende Verarbeitung der Ergebnisse dieses Forschungsschwerpunktes finden durch die Schwerpunkte der Universität Heidelberg statt. An dieser Stelle sei auf den wissenschaftlichen Stand dieser Projektpartner verwiesen.

#### **1.4.5 Crowdsourcing und nutzergenerierte Geoinformation (UHD-GIScience)**

Die Detektion zerstörter Gebäude basierend auf Luft- und Satellitenbildern ist ein weit verbreiteter Crowdsourcing-Task (Westrope et al. 2014, Kerle & Hoffman 2013, Barrington et al. 2011). So wurden OSM-Daten bereits mehrfach nach Naturkatastrophen von tausenden Freiwilligen erhoben und für das Katastrophenmanagement eingesetzt (Dittus et al. 2016, Poiani et al. 2016). Jedoch ist der Umgang mit der Heterogenität nutzergenerierter Geodaten hinsichtlich Qualität und Detailgrad eine Herausforderung. Die Anforderung an die Datenqualität ist abhängig von deren Nutzung und muss anwendungsspezifisch evaluiert werden (Mocnik et

al. 2018). Obwohl es Ansätze zur intrinsischen Qualitätsbewertung gibt (Sehra et al. 2017, Anderson et al. 2016, Barron et al. 2014), sind diese noch nicht für den Einsatz in einem realen Katastrophen-Szenario umfassend erforscht und implementiert. Referenzdatensätze für eine extrinsische Qualitätsanalyse sind insbesondere im Katastrophenfall meist nicht vorhanden. Im Allgemeinen stehen Crowdsourcing-Kampagnen vor drei Herausforderung (Barrington et al. 2011): (1) Wie können Sie die Gesamtaufgabe in einzelne Komponenten („Micro-Tasks“) aufteilen? (2) Wie können Sie eine große Gruppe von Leuten organisieren, um einen Beitrag zu leisten? (3) Wie können Sie die einzelnen Antworten zu einem kohärenten Gesamtergebnis zusammenfassen? Weiterhin besteht die Herausforderung, die Freiwilligen entsprechend zu schulen und unterstützen um komplexere Aufgaben lösen zu können. Wir untersuchen diese Fragestellung im Hinblick auf Crowdsourcing und entwickeln Tools, welche die detaillierte Erfassung von Erdbebenschäden ermöglichen. Die automatische Detektion und Charakterisierung von Objekten werden hierdurch unterstützt und ergänzt.

#### **1.4.6 Automatische Schadensbestimmung (UHD-3DGeo)**

Für die detaillierte Schadensbestimmung an Bauwerken werden traditionelle bild- und rasterbasierte Ansätze zunehmend mit Methoden ergänzt, die Schäden direkt aus 3D-Punktwolken ableiten, da die 3D-Information zur detaillierten Bestimmung struktureller Gebäudeschäden (z. B. an Fassaden) benötigt wird (Kohns & Stempniewski 2021). Zur Erfassung dieser Punktwolken haben sich im Erdbebenkontext neben luftgestütztem Laserscanning zunehmend UAV-gestütztes Laserscanning oder UAV-gestützte Photogrammetrie etabliert, die auch in LOKI zum Einsatz kommen.

Die zunehmende Verfügbarkeit multi-temporalen Punktwolken (vor und nach einem Schadensereignis) ermöglicht dabei die Schadensbestimmung direkt aus den Daten abgeleiteten Änderungsinformationen (de Gélis et al 2021). Folglich müssen keine Annahmen mehr über den Vorab-Zustand eines Bauwerkes getroffen werden, was in bisherigen Ansätzen häufig zu Fehlklassifizierungen geführt hat (Vetrivel et al. 2018). Multi-temporale 3D-Daten erlauben somit die Entwicklung neuer, änderungsbasierter Methoden zur Schadensbestimmung, die in LOKI Anwendung finden.

Eine zentrale Herausforderung bei der Entwicklung von Methoden zur automatischen Schadensbestimmung stellt nach wie vor die Verfügbarkeit geeigneter und in ausreichender Menge vorhandener realer Trainingsdaten für das Training von Machine-Learning-Modellen dar (Munawar et al. 2021, Kerle et al. 2020). Zum einen decken reale Trainingsdaten meist nicht das komplette Spektrum zu erwartender Schadensmuster im zu klassifizierenden Datensatz ab. Zum anderen wird der Transfer trainierter Machine-Learning-Modelle auf neue Inputdaten und andere geographische Regionen durch unzureichend geeignete Trainingsdaten erschwert. Hierbei bietet die Generierung realistischer simulierter 3D-Punktwolken durch Virtuelles Laserscanning neue Möglichkeiten, eine große Anzahl an Trainingsdaten automatisch zu erzeugen (Winiwarter et al. 2022). Gleichzeitig kann Expertenwissen aus dem Erdbebeningenieurwesen in den Prozess der Erstellung von Trainingsdaten integriert werden, um sicherzustellen, dass (1) die zu erwartenden Schadensmuster abgedeckt sind (2) Schadensmerkmale in der Klassifizierung verwendet werden, die sich auch auf andere geographische Regionen übertragen lassen. Die Verwendung solcher simulierter Trainingsdaten kann dabei bereits vor einem Erdbebenereignis erfolgen, sodass die vortrainierten Klassifikatoren im Schadensfall direkt ohne Zeitverlust zur Klassifizierung in realen Datensätzen eingesetzt werden können.

## 1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

### 1.5.1 Zusammenarbeit mit Anwender:innen aus dem Katastrophenschutz

Auf Ebene des Gesamtverbundes bringt die Zusammenarbeit im Projekt mit Dritten (nicht vom Verbund geförderten Institutionen) eine transdisziplinäre Komponente und einen direkten Anwendungsbezug in das Projekt. Es erfolgte deshalb ein Aufbau von Kooperationen und ein kontinuierlicher Austausch mit verschiedenen Stakeholder:innen und potenziellen Anwender:innen des LOKI-Systems, die im Katastrophenschutz tätig sind. In Abb. 3 ist die Integration der Anforderungen von Anwender:innen in das LOKI-System als iterativer Prozess dargestellt, bei dem Anwender:innen durch ihre Erfahrungen und Fachwissen wertvolle Einblicke in die Bedürfnisse von Nutzer:innen geben konnten. Eine frühe Einbeziehung von Anwender:innen in den Entwicklungsprozess des LOKI-Systems ermöglichte es, Bedürfnisse und Anforderungen an das LOKI-System (Abschnitt 2.1) zu verstehen, die Implementierung von Funktionalitäten nach Wichtigkeit zu priorisieren, und Probleme frühzeitig durch Tests und Evaluation des Systems mithilfe von Feedback der Anwender:innen (Abschnitt 2.8) zu erkennen und schließlich die Meilensteine im Projekt zu erreichen (Abschnitt 1.3). Darüber hinaus konnte als Teil der Verbreitung und Verwertung der Projektergebnisse (Abschnitt 2.9) die Bekanntheit des Systems in Netzwerken der Anwender:innen und damit die Chancen auf eine langfristige Nutzung des Systems erhöht werden.



Abbildung 3: Integration der Anforderungen der Anwendergruppen in das LOKI-System als iterativer Prozess.

Zu Beginn des Projektes wurden potenzielle Anwender:innen des LOKI-Systems identifiziert. Hierzu zählten die Branddirektion Karlsruhe, der Arbeiter-Samariter-Bund (ASB) Mannheim, der Ortsverband Heidelberg des Technischen Hilfswerkes (THW), die Berufsfeuerwehr Heidelberg und das Deutsche Rote Kreuz (DRK) International (Berlin). Mit diesen wurden Anwendungsfälle gemeinsam erarbeitet und ihre Anforderungen an das LOKI-System erhoben. Im weiteren Projektverlauf fand ein kontinuierlicher Austausch mit den Anwender:innen in Form von Workshops, Testflügen, Modultests und Feldversuchen statt, um das System, seine Module und deren Schnittstellen zu testen und zu evaluieren (Abschnitt 2.9).

### 1.5.2 Zusammenarbeit mit im Projektantrag genannten Partner:innen

Eine Zusammenarbeit mit den im Projektantrag genannten Partner:innen mit bestehenden Memoranda of Understanding (MoU) und spezifischen Letters of Intent konnte aufgrund der Pandemie und der räumlichen Distanz nicht stattfinden. Daher wurde der Fokus auf den Aufbau langfristiger Kooperationen und eines kontinuierlichen Austauschs mit lokalen Stakeholdern und Anwender:innen im Bereich Katastrophenschutz gelegt und damit die Entwicklung und

Evaluation des LOKI-Systems und die nachhaltige Verwertung der Projektergebnisse sichergestellt. Dadurch war, wie oben beschrieben, ein intensiver Austausch über die gesamte Projektlaufzeit trotz pandemiebedingter Einschränkungen möglich (Abschnitt 2.9).

### **1.5.3 Kooperationen mit weiteren Forschungsgruppen, Firmen, Stiftungen und lokalen Akteuren**

Für die Entwicklung und Evaluation der einzelnen Systemkomponenten war die Datenakquise durch die Kooperation mit Firmen, Stiftungen, Universitäten und anderen lokalen Akteuren von zentraler Bedeutung. Hierzu zählen die Universität Heidelberg, das Amt Vermögen und Bau und die Klaus-Tschira-Stiftung (für das Abrissgebäude INF 288 in Heidelberg), die Unternehmensgruppe Diringer & Scheidel GmbH & Co. Beteiligungs KG (für das Abrissgebäude am ehemaligen Bauhausareal in Heidelberg), die National Cheng Kung Universität (Prof. Rau) in Taiwan (für Punktwolken von durch Erdbeben beschädigten Einzelgebäuden), die Firma CGR S.p.A. (Compagnia Generale Ripresearee) (für die Bereitstellung multitemporaler photogrammetrischer Punktwolken der Stadt L'Aquila in Italien nach einem Erdbeben im Jahre 2009) und das Training Center Retten und Helfen (TCRH) Mosbach (Aufnahme einzelner Übungsgebäude). Zusätzlich konnten geeignete reale Punktwolken-Datensätze zur Entwicklung und Evaluierung der in LOKI entwickelten Methoden zur automatischen Schadensbestimmung durch den Austausch mit der im Bereich der fernerkundungs-basierten Bestimmung von Erdbebenschäden führenden Arbeitsgruppe von Prof. Norman Kerle am Department of Applied Earth Sciences an der University of Twente identifiziert werden. In weiterer Folge entstand der Kontakt zur Firma CGR S.p.A. (Compagnia Generale Ripresearee), welche die entsprechenden Daten bereitstellte.

## **2 Ergebnisse**

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Projektaktivitäten vorgestellt. Dies beinhaltet die Konzeption der Gesamtarchitektur und Schnittstellen des Gesamtsystems (Abschnitt 2.1) und die Ergebnisse, die in den einzelnen Teilprojekten für die Komponenten des Systems erzielt wurden (Abschnitt 2.2-2.7). Darüber hinaus werden die Ergebnisse zur Fusion, Integration, Pilotierung und Evaluation des Gesamtsystems (Abschnitt 2.8) sowie zur Verbreitung und Verwertung (Abschnitt 2.9) vorgestellt. Für den Open-Source-Quellcode der implementierten Module wird auf das öffentlich zugängliche LOKI-Gitlab-Projekt verwiesen (LOKI Gesamtverbund 2023a).

### **2.1 AP 1 – Konzeption des Gesamtsystems (Gesamtverbund)**

Die Anforderungsdokumentation und Spezifikation der Anwendungsfälle stellen Meilenstein 1 (Abschnitt 1.3) des Projektes dar und dienen der systematischen Erfassung und Beschreibung der im Projekt entwickelten Komponenten, ihrer Funktionalitäten und Abhängigkeiten. Zudem wurden arbeitspaketübergreifende Anforderungen an die Komponenten des Systems für einen konkreten Anwendungsfall spezifiziert.

#### **2.1.1 Gesamtsystem und Gesamtarchitektur**

Die Anwendung des Systems in der Praxis dient der Schadensminderung nach einem Erdbeben, indem möglichst schnell und objektiv aktuelle Lageinformationen generiert und bereitgestellt werden, mit denen entsprechende Maßnahmen informiert eingeleitet werden können.

Der Fokus im Projekt lag daher auf der Konzeption und Entwicklung eines Gesamtsystems (Abb. 4), welches flexibel und automatisch auf den Bedarf von Einsatzkräften reagieren kann.

Die einzelnen Komponenten des Systems wurden dabei modular von den Projektpartnern unter der Nutzung offener Schnittstellen und Standards (z. B. für Daten, Kommunikation und Programmierung) zu einem Gesamtsystem integriert. Offene Standards unterstützen die langfristige Nutzung und Erweiterbarkeit des Systems, z. B. durch die Einbindung weiterer Systemkomponenten. Die Systemkomponenten der Projektpartner sind nachfolgend aufgeführt und in (Abb. 5) enthalten:

- **Exposure-Modellierung** (Deutsches Geoforschungszentrum Potsdam, GFZ): Berechnung erdbebenspezifischer Erschütterungsverteilungen (ShakeMaps) und Loss-Szenarien für die Missionsplanung. Aufbau eines dynamischen Exposure-Modells für die Untersuchungsgebiete. Entwicklung einer Datenbank zum Austausch und zur Visualisierung der Schadensinformationen der LOKI-Module.
- **Automatisierte Missionsplanung** (FZI Forschungszentrum Informatik): Entwicklung skalierbarer Koordinationsmechanismen für UAV-Schwärme unter Einbeziehung von Schadensinformationen- und Input von Anwender:innen.
- **UAV-Infrastruktur und Hardware** (Aeromey): Evaluation oder Entwicklung von flexiblen Fluggeräten zum effektiven Einsatz für die verschiedenen Anwendungen in Verbindung mit den unterschiedlichen Sensoren und Kommunikationsschnittstellen und der Infrastruktur, speziell des Energiemanagements.
- **Schadensklassifikation** – Typisierung von Erdbebenschäden und nichtlineare Analyse von Gebäudeklassen (Karlsruher Institut für Technologie, KIT): Kategorisierte Bereitstellung von gebäudespezifischen Schadensmustern und deren Verknüpfung mit Intensitäten und Schadensfunktionen und Erweiterung des Exposure-Modells zur gebäudegenauen (semi-)automatischen Beurteilung von Schäden.
- **Crowdsourcing und nutzergenerierte Geoinformation** (GIScience, Universität Heidelberg): Erhebung, Analyse und Anreicherung von nutzergenerierten Geodaten für die Schadenserkennung und für das zugrundeliegende dynamische Exposure-Modell und Entwicklung von Methoden zur visuellen Schadensklassifizierung auf Basis von UAV-Aufnahmen.
- **Automatische Schadensdetektion und -klassifizierung** (3DGeo, Universität Heidelberg): Effiziente Verarbeitung und Analyse von Bilddaten und 3D-Punktwolken, die aus der Luft und in Objektnähe mittels UAVs erfasst wurden, und Entwicklung neuer Ansätze zur automatischen Analyse von Bauwerksschäden, u. a. auf Basis von Methoden des Maschinellen Lernens.

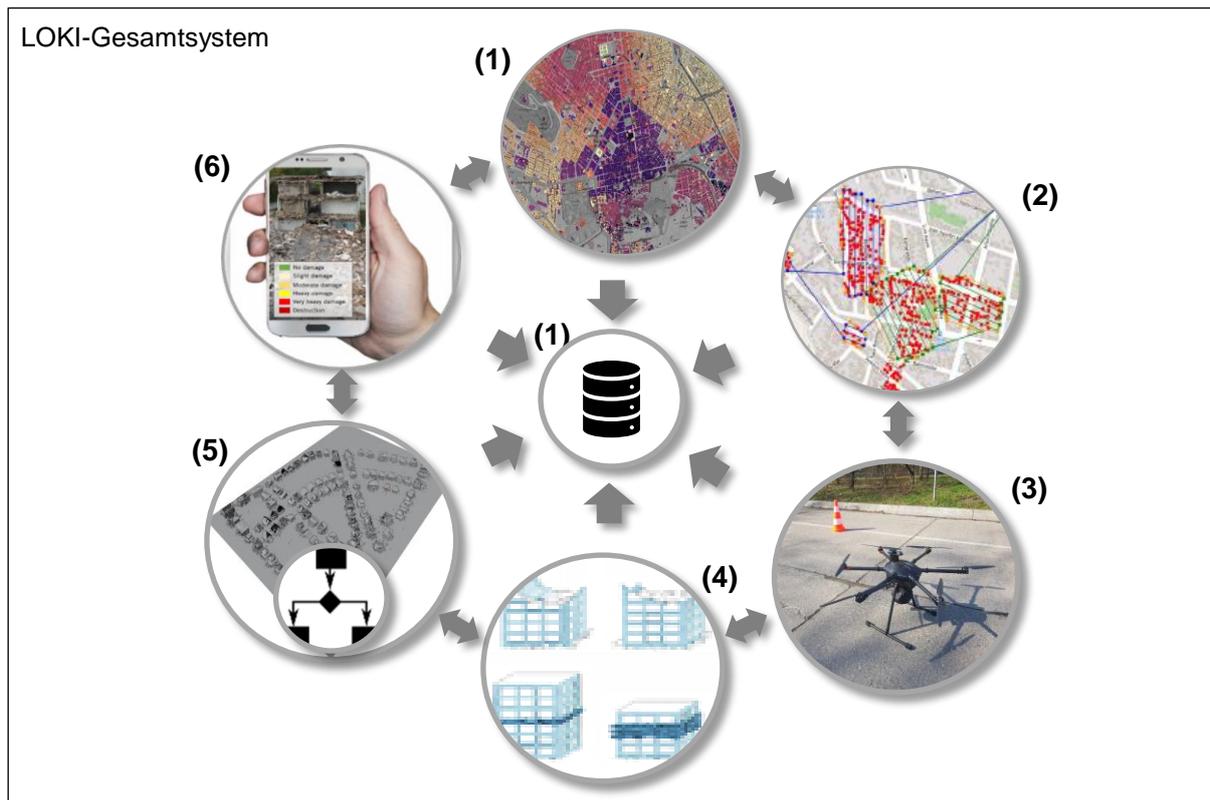


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Systemkomponenten und ihrer Schnittstellen als Teil des LOKI-Gesamtsystems.

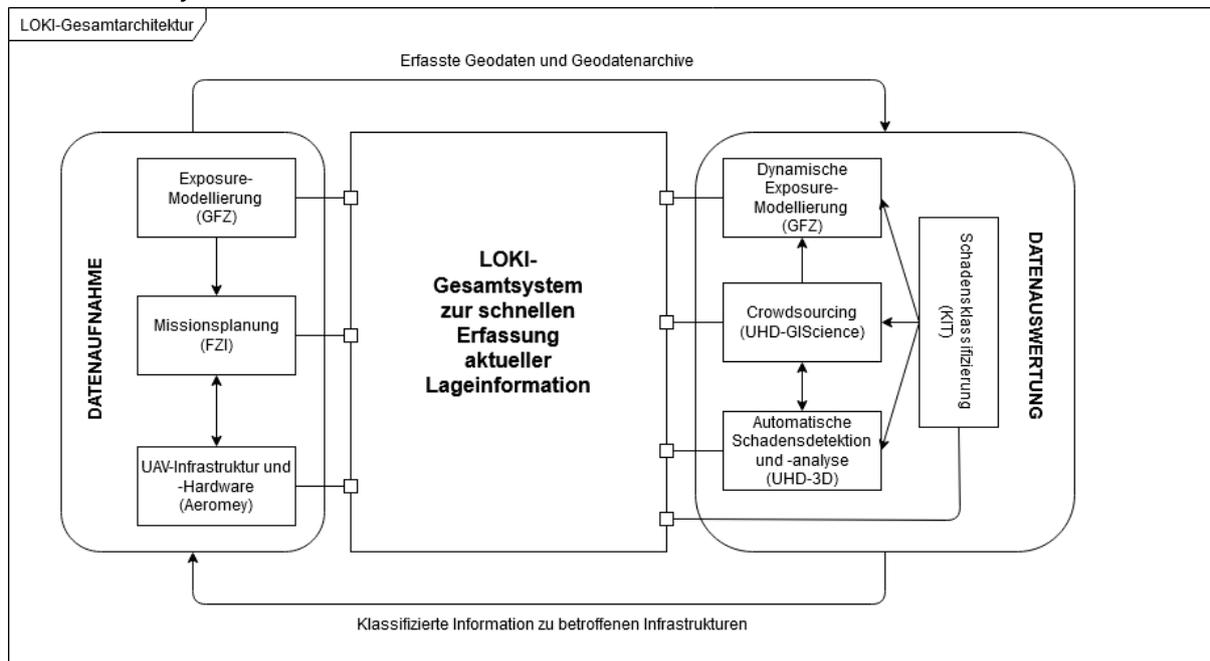


Abbildung 5: Schematische Darstellung der Systemkomponenten und ihrer Schnittstellen in einem Architektur-Diagramm.

Der besondere Fokus in LOKI liegt auf der zeitnahen Übersicht der Gesamtschäden (Abb. 6) und einer detaillierten Erfassung (Abb. 7) der Schäden an kritischen Infrastrukturen wie Life-lines (Brücken und Straßen), Gesundheitseinrichtungen und öffentlichen Einrichtungen (z. B. Schulen) und an Wohngebäuden. Das System soll dabei flexibel und automatisch auf den Bedarf der Einsatzkräfte reagieren können. Dadurch verbessert LOKI die Reaktionszeit und

die Zuverlässigkeit der Lageinformationen im Falle eines Erdbebens und ermöglicht eine verbesserte Nutzung der vorhandenen Ressourcen und Einsatzkräfte. Externe Anwender, die mit dem System interagieren, sind Einsatzleitung, Freiwillige und Erdbebenspezialisten, wie in den Use-Case-Diagrammen (Abb. 6 und 7) nachfolgend dargestellt. Die Anforderungen der Anwender:innen des Systems (Einsatzleitung, Hilfsorganisationen des Katastrophenschutzes) wurden daher bereits zu Beginn des Projektes erfasst. Durch einen kontinuierlichen Austausch in Form von Workshops, Testbefliegungen und Feldexperimenten wurde das System iterativ verbessert und gemeinsam getestet, um die Anwendbarkeit in der Praxis sicherzustellen (Abschnitt 2.9).

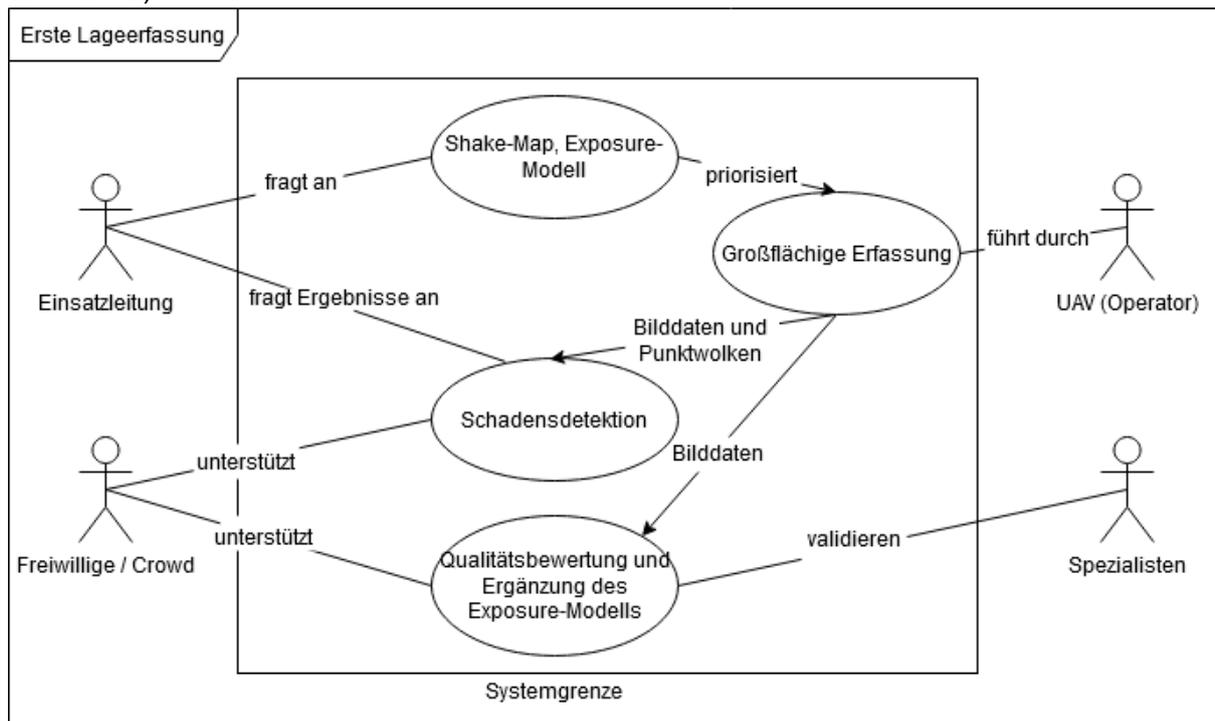


Abbildung 6: Use-Case-Diagramm für die erste überblicksartige Lageerfassung.

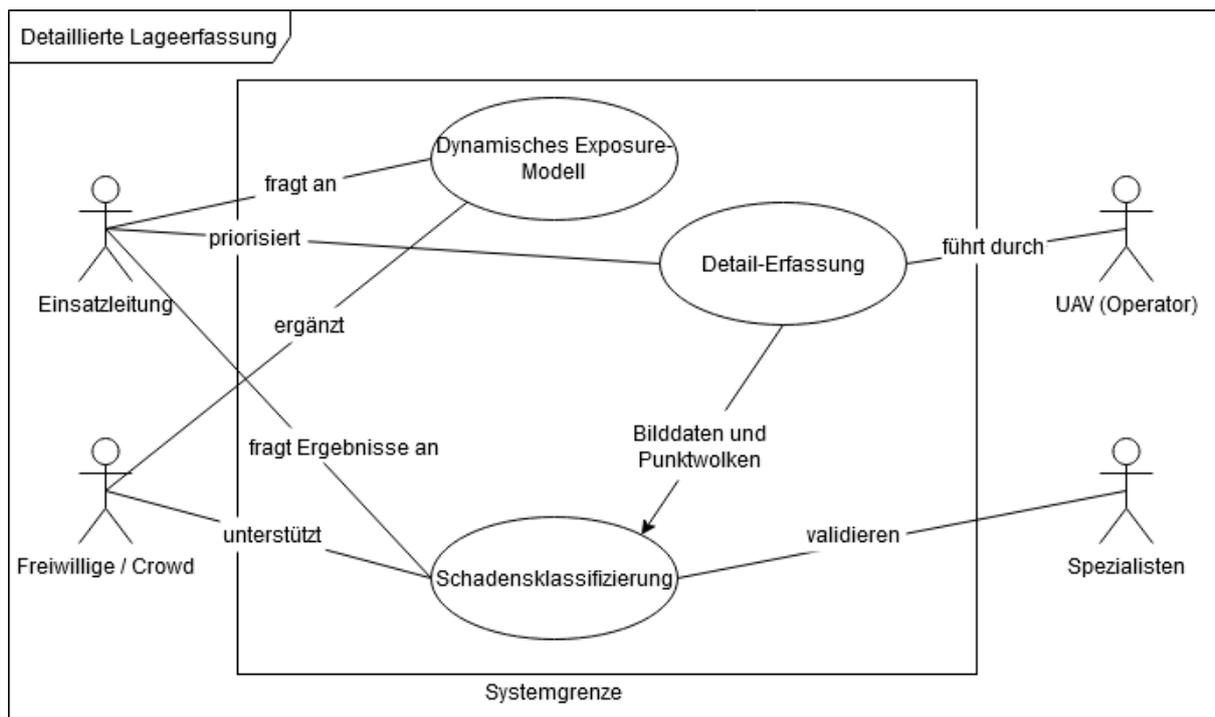


Abbildung 7: Use-Case-Diagramm für eine detaillierte Lageerfassung.

### 2.1.2 Schnittstellendefinition

Die (Software- und Hardware-) Komponenten werden detailliert in einem einheitlichen Schema beschrieben:

- Funktionale Anforderungen
  - Beschreibung der zur Verfügung gestellten Funktionen und Daten
  - Charakterisierung des Verhaltens der Komponenten
    - Anfragen/Auslöser für die einzelnen Dienste
    - Antworten/Lösungen, die an die aufrufende Umgebung zurückgeliefert werden (z. B.: Daten, Entscheidungen)
- Nicht-funktionale Anforderungen
  - Leistungsanforderungen (z. B.: Qualität, Laufzeit, Speicherplatz)
  - Benutzbarkeit/Bedienbarkeit
  - Verfügbarkeiten

Hierfür wurde zunächst eine Beschreibung in natürlicher Sprache verwendet. Datenmodelle und Schnittstellen (Tab. 1) für Software-Komponenten wurden anschließend z. B. über Open-API vollständig definiert und sind im LOKI GitLab-Projekt zu finden (LOKI Gesamtverbund 2023a).

*Tabelle 1: Übersicht der Schnittstellen (S) im LOKI-Gesamtsystem, der beteiligten Projektpartner:innen und Arbeitspakete (AP).*

<b>S1: Missionsplanung (Aeromey, FZI)</b>	
<b>Beschreibung</b>	Missionsplanung für UAV-Befliegungen (AP 2, AP 3).
<b>S2: Initiale Schadensprognose (GFZ, FZI, KIT)</b>	
<b>Beschreibung</b>	Berechnung erdbebenspezifischer Erschütterungsverteilungen (ShakeMaps) und Loss-Szenarien für die initiale Missionsplanung und Priorisierung von Zielen. Schadensprognose erfolgt unter Berücksichtigung von Vulnerabilitäts- und Fragilitätsfunktionen (AP 3, AP 4).
<b>S3a: Missionsanfrage (FZI, KIT, UHD-3DGeo, UHD-GIScience)</b>	
<b>Beschreibung</b>	Anfrage weiterer Missionen bzw. Aufnahmen für einzelne Gebäude und Einbeziehung dieser in die automatisierte Missionsplanung (AP 2, AP 4, AP 6, AP 7).
<b>S3b: Missionsupdates (FZI, Aeromey)</b>	
<b>Beschreibung</b>	Aktualisierung der Statusdaten der UAVs und Aufgaben während der Mission (AP 2, AP 4, AP 6, AP 7).
<b>S4: Übergabe von Befliegungsdaten (Aeromey, UHD-3DGeo, UHD-GIScience)</b>	
<b>Beschreibung</b>	Bereitstellung von aufbereiteten Befliegungsdaten für Schadensklassifizierung (automatisch + Micro-Mapping; AP 2, AP 6, AP 7).
<b>S5: Vollständigkeitsanalyse von OpenStreetMap-Gebäudegrundrissen (GFZ, UHD-GIScience)</b>	
<b>Beschreibung</b>	Vollständigkeitsanalyse von Gebäudegrundrissen in OpenStreetMap (OSM) mithilfe der Anwendung MapSwipe (AP 4, AP 6).
<b>S6: Übergabe von Bauwerksinformation aus der Gebäudedatenbank (GFZ, KIT, UHD-3DGeo, UHD-GIScience)</b>	
<b>Beschreibung</b>	Austausch von Gebäudeinformation mit Relevanz für Schadensklassifizierung (automatisch + Micro-Mapping) und Fragilitäts-/Vulnerabilitätsfunktionen (AP 4, AP 6, AP 7).
<b>S7: Übergabe des Schadenskataloges (KIT, UHD-3DGeo, UHD-GIScience)</b>	
<b>Beschreibung</b>	Kategorisierte Bereitstellung gebäudespezifischer Schadensmuster für bestimmte Schadensgrade als Entscheidungsgrundlage für Schadensklassifizierung (automatisch + Micro-Mapping; AP 5, AP 6, AP 7).

<b>S8: Aktualisierung der Schadensbewertung in der Gebäudedatenbank des GFZ (GFZ, UHD-3DGeo, UHD-GIScience)</b>	
<b>Beschreibung</b>	Dynamische Aktualisierung der Schadensbewertung in der Gebäudedatenbank des GFZ nach jedem Klassifizierungsdurchlauf (AP 4, AP 6, AP 7).
<b>S9: Generierung von Trainingsdaten und Schadensklassifizierung mit Micro-Mapping (UHD-3D, UHD-GIScience)</b>	
<b>Beschreibung</b>	Micro-Mapping wird eingesetzt zur (1) Generierung von Trainingsdaten für die Entwicklung von Methoden zur automatischen Schadensklassifizierung und (2) als zusätzliche oder alternative unabhängige Methode im Rahmen der Schadensklassifizierung (AP 6, AP 7).
<b>S10: Generierung von Trainingsdaten für automatische Schadensklassifizierung mittels virtuellem Laserscanning (UHD-3DGeo, UHD-GIScience, KIT)</b>	
<b>Beschreibung</b>	Erzeugung realistischer 3D-Gebäudemodelle mit bekannten Schadensgraden und anschließende Simulation von Punktwolken mittels virtuellem Laserscanning (AP 4, AP 6, AP 7).
<b>S11: Abfrage von Befliegungsdaten zur Planung von Mapathons für fehlende OSM-Gebäudegrundrisse (Gebäudedaten (Aeromey, UHD-GIScience))</b>	
<b>Beschreibung</b>	Komponente Mapathon für fehlende OSM-Gebäudegrundrisse (AP 2, AP 6).
<b>S12: Gewinnung zusätzlicher Gebäudeinformation und Einpflegung der Daten in OpenStreetMap (Aeromey, GFZ, UHD-GIScience)</b>	
<b>Beschreibung</b>	Gewinnung von zusätzlichen Gebäudedaten und Einpflegung in OpenStreetMap (AP 2, AP 4, AP 6).

### 2.1.2 Spezifikation der Anwendungsfälle

Für die Entwicklung und den Test der Systemkomponenten in LOKI wurde die Stadt Karlsruhe (Baden-Württemberg) als erster beispielhafter Anwendungsfall ausgewählt. Das Ziel des LOKI-Systems in diesem Fall ist die Unterstützung der Gruppen der Katastrophenhilfe zur Rettung verschütteter Personen innerhalb von 72 Stunden nach Auftreten des Erdbebens und Schaffung eines Überblicks über den Zerstörungsgrad der betroffenen kritischen Infrastruktur.

#### 2.1.2.1 Rahmenbedingungen und Annahmen

Für den Anwendungsfall in Karlsruhe wurde ein Testerdbebenszenario mit folgenden Rahmenbedingungen definiert:

- Magnitude 4.2 (Epizentrum nahe dem Stadtzentrum)
- Zeitpunkt des Hauptbebens: Montag, 14:00 Uhr im August
- Betroffene Personen: 313.000
- Fläche: 173,5 km<sup>2</sup> (= 1.800 Personen/km<sup>2</sup>)

Außerdem wurde eine gute Datengrundlage für die einzelnen Module angenommen, die für eine deutsche Stadt realistischerweise vorliegt und den "best-case" für das System abbildet:

- UAV Plattform und Sensorik, Missionsplanung: Fluggenehmigungen für die UAV-Flüge erteilt
- Exposure-Modellierung, Missionsplanung und Schadensklassifizierung: Vollständige Informationen zu den Gebäuden in OSM (Gebäude sind alle kartiert und auch Gebäudeinformationen sind enthalten, oder werden durch Mapathons ergänzt)
- Exposure-Modellierung: Gebäudegenaues Exposure-Modell ist vorhanden mit allen erforderlichen Informationen (auch Gebäudeinformationen)
- Schadensklassifizierung: Schadenskatalog ist für die vorhandenen Bauwerke erstellt und anwendbar

- Automatische Schadensklassifizierung: Ein Modell Maschinellen Lernens ist bereits vorab trainiert und kann zur Bestimmung der auftretenden Schäden eingesetzt werden.

2.1.2.2 Workflow und Abhängigkeiten im LOKI-System

Der für den Anwendungsfall Karlsruhe erarbeitete Workflow (Abb. 8) und die damit zusammenhängenden Anforderungen an die Komponenten des Systems sind nachfolgend dargestellt. Anhand der definierten Anwendungsfälle, Schnittstellen und Abhängigkeiten wurden die einzelnen Module entwickelt und getestet. Die Fusion, Integration, Pilotierung und Evaluation des Gesamtsystems und seiner Module ist in Abschnitt 2.8 beschrieben.

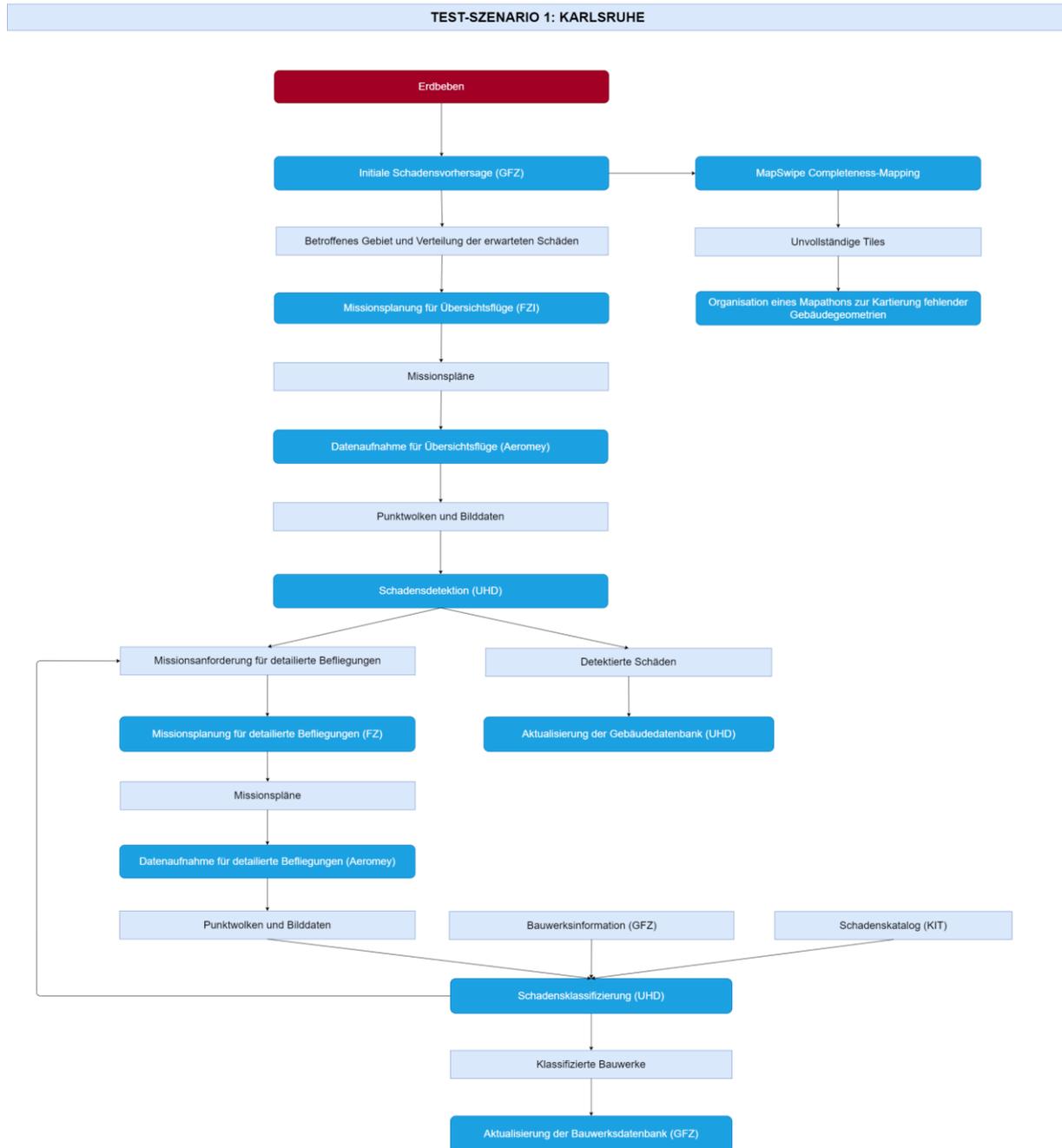


Abbildung 8: Für den Anwendungsfall Karlsruhe erarbeiteter Workflow.

## 2.2 AP 2 – UAV Plattform und Sensorik (Aeromey GmbH)

Ziel des Arbeitspaketes war die Bereitstellung passender UAVs und Sensoren für die Erfassung geeigneter Bild- und 3D-Daten im Rahmen des entwickelten LOKI-Workflows zur schnellen Schadensfeststellung. Zunächst wurde im Rahmen einer Marktrecherche überprüft, ob für LOKI geeignete UAV-Systeme für Übersichts- und Detailflüge am Markt beschafft oder selbst entwickelt werden können (Abschnitt 2.2.1). Hierbei wurde festgestellt, dass es im Hinblick auf eine universelle Einsatzbarkeit, Modifizierbarkeit und Nachhaltigkeit sinnvoll ist, ein eigenes System basierend auf Standardkomponenten des Weltmarktes zu entwickeln, welches, je nach Anwendungsfall, mit verschiedenen Sensoren ausgestattet werden kann. Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde daher ein Hexacopter mit langer Flugzeit und hoher Zuladung entwickelt, der Flugzeiten von knapp einer Stunde erreicht und sowohl für Übersichts- als auch die geplanten Detailflüge bestens geeignet ist (siehe AP 2.3). Parallel dazu wurden Sensorsysteme zur Aufnahme von RGB-Bildern evaluiert (Abschnitt 2.2.2), welche die Anforderungen der Schadensauswertung im Rahmen der in LOKI definierten Anwendungsfälle (Abschnitt 2.1) erfüllen. Hierzu wurden verschiedene Kamerasysteme und Optiken im Rahmen von Testbefliegungen evaluiert und die Bilderergebnisse hinsichtlich der Erkennung von Schäden und Rissen an Gebäuden bewertet. Die Ergebnisse des Arbeitspakets geben eine Empfehlung für die technischen Anforderungen an die Kamerasysteme zur Aufnahme der gewünschten Bildinformationen für die Schadensaufnahme sowie die spezielle Verwendung und Integration der Kameras an den UAV-Systemen und in den LOKI-Workflow zur Schadensbestimmung.

### 2.2.1 Beschaffung Fluggeräte

Der ursprüngliche Projektentwurf sah vor, insgesamt vier verschiedene UAV-Systeme mit verschiedenen Sensoriken zu verwenden, welche für (1) eine überblicksartige Lageerfassung mit hoher räumlicher Abdeckung und (2) eine detaillierte Lageerfassung durch die detaillierte Aufnahme von Einzelobjekten eingesetzt werden können. Diese waren wie folgt definiert:

- (1) **Überblicksartige Lageerfassung:** Es waren zwei Starrflügel-UAVs geplant, die auf lange Flugdauer in größerer Höhe ausgelegt werden. Der Einsatz dieser Trägerplattform kann Einsatzkräfte in der überblicksartigen Lageerfassung unterstützen. Eines dieser UAVs ist ausgestattet mit einer oder mehreren Kameras für die Erzeugung von Orthofotos, eine verzerrungsfreie und maßstabsgetreue Abbildung der Erdoberfläche, die durch photogrammetrische Verfahren aus Luft- oder Satellitenbildern abgeleitet wird. Ergänzt werden diese Daten durch einen Laserscanner (LiDAR) zur Erfassung der Erdoberfläche, der am zweiten Starrflügel-UAV integriert ist. Unter Zuhilfenahme der Laserscan-Technologie kann schnell und mit vergleichsweise wenig Rechenleistung ein digitales Oberflächenmodell erzeugt werden. Bei dem LiDAR-Verfahren handelt es sich um ein aktives Messverfahren, welches den Vorteil bietet, selbst dichte Vegetation zu durchdringen. Basierend darauf kann ein akkurates, digitales Geländemodell abgeleitet werden, welches als Grundlage für weitere Prozessschritte dient. Nach einem Wechsel der Sensorik könnten diese Fluggeräte weitere Daten erfassen und zur Verfügung stellen. Vorstellbar wäre hier beispielsweise der Einsatz einer Wärmebildkamera, um Brandherde zu erkennen und zu klassifizieren oder Sensoren zur Suche von Gaslecks.
- (2) **Detaillierte Lageerfassung:** Multicopter bilden die Basis für die Detailflüge im Nahbereich, je nach Nutzlast („Payload“) in verschiedenen Größen und Ausführungen. Für die schnelle Bilderfassung von Gebäudefassaden können kleinere Multicopter, je nach Kamerasystem oder gewünschtem Detailgrad, zum Einsatz kommen. Sie sollen auch

als kleiner Schwarm im Zielgebiet agieren. Ergänzt werden diese durch größere LiDAR-Multicopter, an denen ein Laserscanner integriert ist. Diese werden etwas höher als die mit Kameras bestückten Multicopter fliegen, da der Scanner eine bessere Abdeckung zur Seite bietet.

Dieser Ansatz wurde im Projekt laufend überprüft und mit den weiteren Projektpartnern hinsichtlich der Zielerreichung von LOKI folgendermaßen angepasst: Der Einsatz von UAVs für die Datenaufnahme wurde entsprechend den Anwendungsfällen des LOKI-Systems (Abschnitt 2.1) zu zwei Befliegungsmustern zusammengefasst, bei denen die Datenerfassung mittels RGB-Kameras erfolgt: Ein Starrflügel-UAV erfasst in einer überblicksartigen Lageerfassung großflächig Daten im Rahmen eines Übersichtsfluges. Nach der Landung werden aus den aufgenommenen RGB-Fotos mittels photogrammetrischer Verfahren generierte 3D-Punktwolken erzeugt. Diese bilden zusammen mit den RGB-Fotos die Grundlage für die nachgelagerten Schadensdetektion mittels Crowdsourcing-basierter Ansätze (Abschnitt 2.6) und automatischer Methoden (Abschnitt 2.7). Basierend auf Ergebnissen der Schadensdetektion und Anfragen von Anwender:innen erfolgt eine detaillierte Erfassung einzelner Infrastrukturen und Gebäude mithilfe eines klassischen Multicopter-UAVs. Dieses System ist mit einer Gimbal-Kamera (neig- und schwenkbar) oder einer Oblique-Kamera (5 Sensoren für eine 180 Grad Erfassung unter dem UAV-System) zur Aufnahme detaillierter RGB-Fotos ausgestattet.

Darauf basierend wurde eine strukturierte, weltweite Marktrecherche durchgeführt. Im Ergebnis sollte entschieden werden, ob (Consumer-)UAVs etablierter Hersteller am Markt die Anforderungen in LOKI erfüllen können, oder ob im Rahmen des Projektes der Prototyp einer eigenen UAV-Plattform entwickelt werden muss. Die generellen, technischen Anforderungen an die LOKI-Flugsysteme wurden durch den Projektverbund wie folgt spezifiziert:

- Marktverfügbarkeit, Anschaffungskosten & keine geopolitische Abhängigkeit eines Herstellers
- Vorhandensein von API/SDK (Application Programming Interface/Software Development Kit) und weiteren Schnittstellen für Missionsplanung und -Steuerung der UAVs
- Optionen für variable Nutzlasten, Integration zusätzlicher Sensoren
- Ersatzteilversorgung, Wartbarkeit/Service und langfristige Einsatzfähigkeit auch nach Ende des Produktlebenszyklus des Herstellers

Im ersten Schritt wurden im Internet weltweit verschiedene Hersteller kommerzieller UAV-Systeme recherchiert. Neben den bereits bekannten Herstellern wie DJI (China), Yuneec (China), AgEagle (Frankreich, vormals senseFly) oder Quantum Systems (Deutschland) wurde eine große Zahl an asiatischen Herstellern und Firmen vorgefunden, die UAVs zur kommerziellen Nutzung anbieten. Bei diesen Unternehmen war auffällig, dass es sich bei der jeweiligen UAV-Plattform des Öfteren um sog. VTOL (vertical take-off and landing) handelte. Darüber hinaus ergab die Recherche, dass es nicht den einen Hersteller einer Flugplattform gab. Jede der kontaktierten Firmen gab zwar an, das System selbst entwickelt zu haben, jedoch fanden sich bei verschiedenen Firmen identische Flugplattformen, die dann mit unterschiedlichen Flugsteuerungen, Antriebssetups oder Farbgebungen vermarktet wurden. Diese Firmen fungierten somit eher als eine Art Integrator für den Vertrieb eines UAVs, welches von einem zentralen, oftmals nicht zu identifizierenden Hersteller übernommen wurde. Positiv aufgefallen ist, dass größtenteils Open-Source Flugsteuerungen („Pixhawk“) verbaut wurden, deren Schnittstellen und Erweiterungsmöglichkeiten sehr gut dokumentiert sind und somit die Integration der UAVs in verschiedene Flugplanungs- und Flugsteuerungssysteme (Groundstation-Software) ermöglichen.

Aufbauend auf den Ergebnissen der Marktrecherche, wurden in Frage kommende Hersteller und Händler kontaktiert, um die für das LOKI-Projekt interessanten Produkte für eine Verwendung im Projekt zu prüfen. Aufgrund der Corona-Pandemie beschränkten sich die Gespräche mit Herstellern oder spezialisierten Händlern im ersten Projektjahr auf Videokonferenzen, E-Mails und Präsentationen. Erst im Jahr 2021 konnten persönliche Gespräche und Treffen auch auf Fachmessen, wie bspw. der InterGeo in Hannover, im kleinen Rahmen durchgeführt werden. Darüber hinaus kündigte der marktführende Hersteller DJI Ende des Jahres 2021 an, das für größere Nutzlasten konzipierte und weit verbreitete Multicopter-UAV-Modell Matrice 600 Pro ab sofort nicht mehr zu produzieren. Aufgrund der Verwendung proprietärer Akkusysteme, konnte nicht mehr von einer langfristigen Wartbarkeit und Ersatzteilversorgung für dieses Modell ausgegangen werden, wodurch es für den Einsatz in LOKI nicht mehr in Frage kam. Geeignete Nachfolgemodelle mit ähnlichen Spezifikationen waren weder durch DJI, noch von anderen Hersteller:innen angekündigt.

Darüber hinaus wurden langjährige Erfahrungen der Firma Aeromey GmbH bei der Vermessung mit UAVs mit verschiedenen UAV-Systemen verschiedener etablierter Hersteller:innen ausgewertet, um für das Projekt LOKI in Frage kommende Systeme weiter einzugrenzen. Für die Firmen DJI und Yuneec zeigte sich dabei, dass diese zuverlässige UAV-Systeme mit leistungsfähigen Gimbal-Kameras auf dem Markt anboten und das Vertrauen von Hobbypiloten und gewerblichen Anwender:innen genießen. Auch im Bereich des Katastrophenschutzes nutzen viele Anwender:innen, wie beispielsweise das THW, Feuerwehren oder der ASB, UAVs der genannten Hersteller. Im Laufe der Jahre, in denen diese UAVs auf dem Markt waren, schritt die technische Entwicklung im UAV-Sektor rapide voran und es kamen stetig neue Modelle auf den Markt, während für andere Modelle der Service eingestellt wurde. Diese Dynamik sorgt bei einer längerfristigen Nutzung zu Problemen im Bereich von Wartbarkeit und der Ersatzteilversorgung. Eine langfristige Nutzung der UAV-Systeme wird darüber hinaus dadurch erschwert, dass Lithium-Polymer-Akkus, die UAVs mit Energie versorgen, bei fast allen kommerziell erhältlichen UAVs mit einem proprietären Steckersystem und zusätzlicher Elektronik, wie zum Beispiel ein Batterie-Management-System, ausgestattet sind. Wenn Hersteller:innen diese Akkus nicht mehr produzieren, ist ein Betrieb des UAVs aufgrund der Degradation solcher Akkusysteme und dem Verschleiß im Einsatz längerfristig nicht mehr möglich, da keine Standard-Akkus Dritter verwendet werden können. Im regulären Betrieb kam es dabei vor, dass nach einem Firmware-Update an einer DJI-UAV die verwendete Flugplanungs- und Steuerungssoftware nicht mehr korrekt funktionierte und zur Sicherstellung des weiteren Betriebs auf die Entwicklung eines Software-Updates durch den Hersteller gewartet werden musste.

Auch die Erweiterung der Systeme mit anderen Sensoren, wie zum Beispiel Spezialkameras oder Gasetektoren, ist abseits des Angebots der Hersteller:innen kaum möglich, da proprietäre, nicht quelloffene Schnittstellen genutzt werden, oder die bestehende Kamera nicht ausgetauscht werden kann. Ähnlich verhält es sich mit den IT-Schnittstellen im Bereich der API/SDK. Besonders DJI bietet hier eine umfangreiche SDK, die für App-Entwickler:innen genutzt werden kann. Bei Firmware-Updates am UAV oder Änderungen an der SDK aufgrund neuer UAV-Modelle am Markt und Funktionen, müsste hier die komplette Schnittstelle aus dem LOKI-System ständig überwacht und ggf. angepasst werden. Um eine langfristige Nutzung sicherzustellen, bedarf es damit eines hohen und dauerhaften Personalaufwandes. Dies widerspricht dem Ziel von LOKI, auch durch Anwender:innen einfach zu erweiternde und langfristige nutzbare Systeme zur Verfügung zu stellen.

Basierend auf den Ergebnissen der Marktrecherche und Erfahrungswerten wurde gemeinsam mit allen Projektpartner:innen entschieden, eine Eigenentwicklung einer universell einsetzbaren Trägerplattform im Rahmen des LOKI-Projektes durchzuführen, die auf weltweit verfügbare Standard-Komponenten zurückgreift und über eine Open-Source-Flugsteuerung (Pixhawk/Arducopter) betrieben wird, deren Community die Firmware tatkräftig weiterentwickelt. Daraus entstand ein umfangreiches Ökosystem an Flugsteuerungen, Sensoren, Kommunikationsprotokollen und weiterer Elektronik, welches einen langfristigen Betrieb der UAV-Systeme, die Zukunftsfähigkeit und die Unabhängigkeit seitens nur eines Herstellers sicherstellt.

Die Hauptmerkmale des entwickelten Systems sind:

- Klappbare Hexacopter-Struktur (6 Ausleger mit 6 Motoren), gefertigt aus Carbonplatten und Carbonrohren; elektrisch klappbares Landegestell
- Verwendung der aktuellsten Industrie-Flugsteuerung Pixhawk Cube Orange
- Verwendung von Lithium-Polymer-Akkus, die es standardmäßig von verschiedenen Herstellern in den unterschiedlichsten Leistungsklassen gibt
- Nutzung von integrierten Antriebssystemen, die auf Carbonrohren mit 28 mm Durchmesser montiert werden können (bekannte Hersteller bspw. T-Motor oder Hobbywing)
- Projektierte Einsatzflugzeit von ca. 60 min pro Akkupack
- Montagepunkte für die Installation/Integration verschiedener Nutzlasten
- Ausreichende Platzverhältnisse für weitere Sensoriken oder Anbauteile, bspw. Fallschirm-Gesamtrettungssystem

Die Entwicklung und Konstruktion wurde Anfang 2021 durch einen zusätzlichen Mitarbeiter unterstützt, der über umfangreiche Kenntnisse im Modellbau, Konstruktion, Elektronik und auch UAVs verfügt.

Als Basis der Entwicklung des Systems diente eine umfangreiche Analyse der Gewichtsverhältnisse, Zuladungen, Antriebssysteme und Akkutechnologie. Mit Hilfe des Online-Services E-Calc (Solutions for All 2023) wurde unter zu Hilfenahme realer Messdaten und Simulationen ein möglichst effizientes Setup der verschiedenen Systemkomponenten analysiert und getestet. Zahlreiche Eingabeparameter, wie beispielsweise Abmessungen und Gewichte, verwendete Motoren, Luftschrauben, Akkus und Nutzlasten, ermöglichen realistische Aussagen über die spätere Performance des zu entwickelnden UAV-Systems. Darauf basierend wurden Zulieferer und Hersteller der benötigten Bauteile ermittelt. Parallel dazu erfolgte die Konstruktion der Hexacopter-UAV-Plattform mit einer CAD-Software. Viele der zum Einbau geplanten Komponenten sind als 3D-Modell bei den Herstellern auf der Webseite zum Download verfügbar, oder können auf Nachfrage bereitgestellt werden. Dies unterstützte die Konstruktion und die spätere Herstellung der Plattform.

Um eine möglichst universell einsetzbare UAV-Plattform für Flughöhen bis 1500 m über dem Meeresspiegel zur Verfügung zu stellen, wurde eine Hexacopter-Plattform konstruiert, die über eine geschlossene Zentraleinheit (Korpus) verfügt, an welcher die sechs Motorausleger über Klappgelenke mit Schnellverschlüssen montiert werden. Der Motorabstand zwischen zwei gegenüberliegenden Motoren beträgt ca. 1200 mm. Dies ermöglicht den Einsatz von langsam drehenden Motoren mit Propellerdurchmessern von 22“ bis 23“. Über eine zentrale Stromverteilungsplatine werden alle Komponenten mit Strom versorgt. Der Korpus besteht aus zwei gefrästen Carbon-Platten, die durch die Auslegergelenke und Abstandshalter zusätzlich versteift werden. An den Auslegergelenken werden die Carbonrohre (Außendurchmesser 28 mm) befestigt. In den Rohren verlaufen die Strom- und Signalkabel für die Antriebssysteme. Die

bürstenlosen Motoren und die Motorregler werden durch passende Klemmhalterungen auf den Carbonrohren verschraubt. Der Abschluss eines jeden Auslegers erfolgt durch ein LED-Beleuchtungsmodul, das in verschiedenen Farben betrieben werden kann. Die konstruierten Bauteile, welche nicht am Markt erhältlich waren, beispielsweise Carbonplatten für die Zentraleinheit oder Abdeckungen/Designelemente, wurden CNC-gefräst oder 3D-gedruckt.



Abbildung 9: Entwickelte Hexacopter-UAV-Plattform in verschiedenen Ansichten. (a) UAV zusammengeklappt mit HereLink, (b) Zentraleinheit des UAV mit Pixhawk Cube Orange, (c) Akkuschacht und Payload-Areas, (d) UAV ohne Top-Cover ausgeklappt.

Eigenschaften des LOKI-UAV (Abb. 9):

- Neueste Version des HereLink 1.1 Funkübertragungssystem mit RC-Groundstation und digitaler/verschlüsselter Übertragung von Video- und RC-Signalen
- Open-Source Flight Controller Pixhawk Cube Orange mit MAVlink and CAN-Support
- Vorbereitete Montagepunkte für verschiedene Sensoren und Nutzlasten unterhalb des UAVs (auch der parallele Betrieb zweier Kamerasysteme ist denkbar (RGB-Zoomkamera und Wärmebildkamera)
- Prognostizierte Flugzeit ohne Nutzlast: 75 min
- Prognostizierte Flugzeit mit RGB-Kamera: 60 min
- Prognostizierte Flugzeit mit Riegl miniVUX-3 & Sony A7R Kamera (4 kg Payload): 36 min

Seitens der Projektpartner:innen und Anwender:innen wurden während der Entwicklungszeit bereits Anforderungen identifiziert, das LOKI-UAV in bestehende Systeme von Einsatzleitfahrzeugen der Feuerwehr, des THW oder des Katastrophenschutzes allgemein zu integrieren. Durch die Verwendung von quelloffenen Übertragungssystemen und standardisierten Schnittstellen ist dies möglich. Mit Ende des Forschungsprojektes wurde ein flugfähiger Prototyp des LOKI-UAVs fertiggestellt, der im Rahmen der wirtschaftlichen Verwertung der Projektergebnisse in Richtung kommerzielle Anwendung und Vermarktung weiterentwickelt wird.

### 2.2.2 Beschaffung Sensorsysteme

Die ursprüngliche Idee von LOKI sah vor, RGB-Kameras und LiDAR-Sensoren auf verschiedenen UAV-Trägerplattformen einzusetzen. Mit beiden Technologien arbeitet die Aeromey GmbH bei ihren Vermessungsprojekten (DJI Matrice 600 Pro Hexacopter mit RIEGL miniVUX-3UAV Laserscanner und Sony A7 R Mark III mit Zeiss 21 mm Objektiv), sodass die hierbei gewonnene langjährige Erfahrung und Übersicht über am Weltmarkt verfügbare Systeme für die Auswahl geeigneter Sensorsysteme im Rahmen des LOKI-Projekts genutzt wurde. Darüber hinaus wurden im Laufe des Projekts neu verfügbare Kamerasysteme auf eine Eignung für die Anforderungen des LOKI-Systems (Abschnitt 2.1) evaluiert.

Um die Eignung, z. B. hinsichtlich geometrischer Auflösung, oder visueller Interpretationsmöglichkeiten, der mit RGB-Kameras und Laserscannern aufgenommenen Bilder und Punktwolken zu prüfen, wurden Befliegungen und Feldexperimente mit LOKI-Projektpartner:innen durchgeführt. Dies beinhaltete beispielsweise eine gemeinsame Testbefliegung mit vorhandenen UAVs der Projektpartner:innen, um die Repräsentation verschiedener Schadensmuster (Abschnitt 2.5), wie z. B. Rissgrößen, in den aufgenommenen Daten zu evaluieren. Auf Basis dieser Tests wurden mit RGB-Kameras aufgenommene Bilder und durch photogrammetrische Verfahren daraus abgeleitete 3D-Punktwolken als geeignet identifiziert, um sowohl höhere Schadensgrade geometrisch in 3D-Punktwolken detektieren zu können, als auch Schadensmuster geringerer Schadensgrade in der Crowdsourcing-basierten visuellen Schadensbestimmung zu bestimmen. Bei einer photogrammetrischen Befliegung werden durch die Kamera am UAV frontal und seitlich überlappende zweidimensionale Fotos entlang vorab definierter Flugrouten aufgenommen. Im Nachgang werden korrespondierende Punkte in überlappenden Fotos mithilfe automatischer Verfahren identifiziert, die relative Position und Orientierung der Bilder zueinander verfeinert und anschließend eine dichte 3D-Punktwolke rekonstruiert. Wichtig für die Erfassung hochwertiger Rohdaten sind ein lichtstarker Kamerasensor, die Auslöse- bzw. Speichergeschwindigkeit der Kamera und die Brennweite und eine hohe Lichtstärke des verwendeten Objektivs. Für eine gute Georeferenzierung (cm-Genauigkeit in Lage und Höhe) der Bilddaten und rekonstruierten 3D-Punktwolken müssen auch die Auslösezeitpunkte der einzelnen Fotos und die Position des UAV durch ein real-time-kinematic (RTK, Echtzeitkinematik) GNSS-Modul aufgezeichnet werden. Im Rahmen der Datenauswertung kann hierdurch

eine Lage- und Höhengenaugigkeit der Bildpositionen und schließlich der 3D-Punktwolken von wenigen Zentimetern erreicht werden, was eine detaillierte und gebäudegenaue Schadensauswertung ermöglicht. Gleichzeitig lassen sich durch diese Methode die benötigte Anzahl physischer Passpunkte am Boden deutlich reduzieren, was im Falle von schwer zugänglichen Gebieten bei Großschadensereignissen praktische Vorteile bietet. Im LOKI-UAV wurde hierfür das RTK GNSS-Modul Emlid Reach M+ als geeignet identifiziert, da dieses voll kompatibel mit dem verwendeten Pixhawk Autopilotensystem ist.

In der nachfolgenden Marktrecherche wurden drei Arten von in Frage kommenden optischen, hochauflösenden RGB-Kamerasystemen identifiziert, die an verschiedene Trägerplattformen montiert und genutzt werden können:

1. NADIR-montierte Kamera: Senkrecht zur Flugrichtung des UAVs starr montiert
2. Gimbal-stabilisierte Kamera: Nahezu Standard an allen Hobby- und Prosumer-UAVs
3. Oblique-Kamera (Schrägbildkameras): Meist fünf identische Kamerasensoren, die um 45° versetzt montiert sind

Alle drei Kamerasysteme wurden während der Projektlaufzeit bei Testbefliegungen im Rahmen des LOKI-Projekts und in kommerziellen Projekten der Firma Aeromey GmbH getestet und evaluiert. Die getesteten Systeme standen teilweise aus anderen Projekten und Kooperationen für Tests des Projektpartners im Rahmen des LOKI-Projekts zur Verfügung und umfassten folgende Modelle:

- Eine auf der Sony A5100 basierende Kamera, die um nicht benötigte Teile reduziert wurde. Daraus ergab sich ein sehr kompaktes quaderförmiges Baumaß und eine erhebliche Gewichtseinsparung, verglichen zum herkömmlichen Produkt. Die Auflösung der Kamera beträgt 24,3 MPixel und sie verfügt über einen E-Mount für zusätzliche Objektive.
- Oblique-Kamera mit fünf RGB-Kamerasensoren aus der Sony A5100. Das Handling und Datenmanagement mit dieser Kamera ist aufwändig, da für jeden Sensor einzeln die Daten der SD-Karte nach der Befliegung ausgelesen werden müssen. Aufgrund angepasster Objektive mit einer festen Brennweite benötigen die verwendeten Sensoren sehr viel Licht für die Aufnahmen. Da die Aufnahme von RAW-Fotos nur ein sehr langes Intervall von über fünf Sekunden zugelassen hätte, muss für photogrammetrische Befliegungen mit dem Datenformat JPG gearbeitet werden. Die Fotos waren dementsprechend dunkel und können, anders als RAW-Aufnahmen, nicht verlustfrei in der Helligkeit angepasst werden. Dies hat in der nachgelagerten Verarbeitung und photogrammetrischen Rekonstruktion der 3D-Punktwolken zur Folge, dass die Bilddaten sehr dunkel und die Ausrichtung der Bilder zueinander nicht optional funktioniert. Damit einhergehend sinkt auch die Qualität der erhobenen Fotos und Punktwolken. Erschwerend kommt hinzu, dass die marktführenden Softwares (Pix4D und Agisoft-Metashape) für die Erstellung von Orthophotos und photogrammetrischen Punktwolken in den zum Testzeitpunkt verwendeten aktuellsten Versionen Aufnahmen von Oblique- und Nadirkameras nicht gemeinsam verarbeiten konnten. Bei der Verwendung von Pix4D musste somit zunächst jeweils eine Punktwolke aus Aufnahmen der einzelnen Sensoren rekonstruiert werden, bevor diese zu einer gesamten Punktwolke zusammengeführt werden konnten. Dieser Workaround ist hardware- und personaltechnisch sehr zeitintensiv. Darüber hinaus werden enorme Mengen an Speicherplatz benötigt, da pro Auslöse-Intervall 5 x 25 MPixel an Fotoinformationen aufgenommen werden. In Agisoft Metashape (Version 1.6.0) war eine Automatisierung des Workflows zur photogrammetrischen Rekonstruktion von 3D-Punktwolken aus Aufnahmen aller fünf Sensoren über ein Python-Skript möglich. Mittlerweile können beide Soft-

wares Aufnahmen von Oblique-Kameras problemlos verarbeiten. Das verwendete Kameramodell zeigte jedoch häufige technische Probleme (Ausfall eines oder mehrerer Sensoren, keine PWM-gesteuerten Auslösungen, SD-Karten-Probleme), weshalb die Oblique-Kamera zum Hersteller zurückgeschickt wurde.

Auf Basis dieser Testergebnisse wurde in Abstimmung mit dem Gesamtverbund entschieden, eine Gimbal-stabilisierte Kamera einzusetzen, welche sich bei zwei Hersteller:innen in der Entwicklung befand. Diese Kamera kann zur überblicksartigen Lageerfassung in eine Nadir-Stellung (90 Grad nach unten zur Flugebene) gebracht werden. Dank der aktiven Stabilisierung auf allen drei Achsen kann die Kamera weitestgehend unabhängig von der Bewegung des UAVs senkrecht zum Boden ausgerichtet werden. Für eine detaillierte Lageerfassung ist es möglich, die Kamera stufenlos in der Neigung zu verstellen. Somit sind Aufnahmen ähnlich derer einer Oblique-Kamera möglich, die Schäden an Einzelobjekten mit hinreichender geometrischer Auflösung in Bildern und 3D-Punktwolken abbilden.

Aufgrund der Corona-Pandemie und damit einhergehenden Schwierigkeiten und teilweisen Zusammenbrüchen weltweiter Lieferketten kam es zu unerwarteten Verzögerungen bei der Produktentwicklung der Hersteller:innen. Erst im Dezember 2022 wurde das marktreife Produkt mit einem 42 MP Sensor durch den Hersteller ATL (Advanced Technology Labs AG) angekündigt. Zum Projektende war das Produkt noch nicht käuflich erwerbbar. Somit wurde im Rahmen des Projektes keine kamerabasierte Sensortechnik beschafft, da diese nicht mehr im Rahmen des LOKI-Projekts aktiv getestet werden konnte. Nachteilig hat sich dieser Sachverhalt nicht auf die künftige wirtschaftliche Verwendung ausgewirkt, da neueste Entwicklungen am UAV-Markt ein großes wirtschaftliches Potential für das LOKI-UAV entwickeln können.

### 2.2.3 Flugtests

Um parallel zur Konstruktion der UAV-Trägerplattform die Arbeitspakete entsprechend der gesetzten Ziele bearbeiten zu können, wurden eigene Testplattformen (Abb. 10) auf Basis vorhandener Flugobjekte aufgebaut und für Testflüge ohne Kamerasysteme vorbereitet. Hierbei handelte es sich um einen kleineren Hexacopter mit 900 mm Motorabstand und einen Nurflügler aus EPP (geschäumter Kunststoff) mit Pusher-Antrieb. Beide Systeme wurden mit bereits vorhandener Elektronik ausgestattet. Um die geplanten Flugtests durchführen zu können, wurden analog zum LOKI-UAV Flugsteuerungen vom Typ Pixhawk und MAVLink-kompatible Fernsteuerungskomponenten eingebaut, die mit der Groundstationsoftware UgCS kompatibel sind.

Während der Projektlaufzeit wurden mit diesen Flugsystemen verschiedene Testflüge zum Test der Missionsplanung durchgeführt. Mit Hilfe weiterer UAVs der anderen Projektpartner wurden zusätzliche Flüge zur Datenerfassung und zum Zwecke der Evaluierung der in LOKI entwickelten Module und zur Ableitung der Eignung der Kamerasensoren durchgeführt. Diese wurden in verschiedenen Szenarien durchgeführt:

- Einzelgebäude auf einem Kieswerkgelände – DJI Matrice 600 Pro mit Riegl miniVUX-3 und Sony A7R Kamera
- Innerstädtische Gebäude – Hexacopter-Testplattform mit Oblique-Kamera
- Beschädigte Gebäude auf einem Testgelände in Mosbach – DJI Phantom 4 & DJI Mavic 2 Pro mit Gimbal-Kamera

Der Prototyp des eigentlichen LOKI-UAVs wurde aufgrund verschiedener Faktoren (Lieferengpässe bei elektronischen Komponenten und der Personalsituation) im Januar 2023 fertiggestellt. Aufgrund der Wettersituation konnten bis Projektende nur ausgewählte Testflüge zur Kalibrierung und PID-Tuning der Flugsteuerung durchgeführt werden. Die Sensorik zur Aufnahme der Gebäudeschäden konnte noch nicht getestet werden. Die Weiterentwicklung des UAVs mit dazugehöriger Flugerprobung und Hinführung zur Marktreife als kommerzielles Produkt soll durch den Projektpartner nach Ablauf des LOKI-Projekts weitergeführt werden. Hier ergeben sich marktseitig große Potentiale für ein herstellerunabhängiges und flexibel einsetzbares und anpassbares UAV-System im Bereich des Katastrophenschutzes, der Vermessung und auch der Forschung.

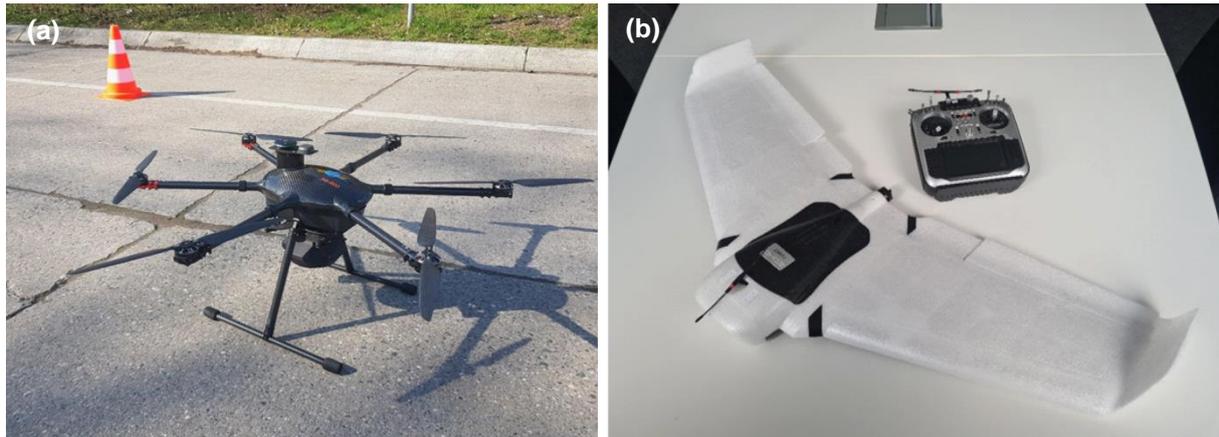


Abbildung 10: (a) Hexacopter-Test-UAV mit Oblique-Kamera. (b) Starrflügler-UAV-Testplattform mit 1 m Spannweite.

### 2.3 AP 3 – Automatisierte Missionsplanung und Schwarmsteuerung (FZI)

Ziel des Arbeitspakets war die Konzeption, Implementierung und Evaluation flexibler und situationssensitiver Verfahren zur Missionsplanung, die die weitgehend automatisierte und schnelle Erfassung des betroffenen Gebietes bzw. der im Gebiet befindlichen Ziele durch eine oder mehrere UAVs unterstützt. Die entwickelten Planungsalgorithmen sind in Meyer & Glock (2021) und Meyer & Glock (2022) detailliert beschrieben.

Zu diesem Zweck wurde zunächst ein Konzept für automatisierte UAV-Missionsplanungen ausgearbeitet, welches zum einen eine schnelle überblicksartige Lageerfassung und zum anderen eine detaillierte Aufnahme von Schäden ermöglicht. Dieses Konzept wurde durch die Unterscheidung zwischen Übersichts- und Detailflügen entsprechend der für das Gesamtsystem definierten Szenarien (Abschnitt 2.1) realisiert. Bei Übersichtsflügen handelt es sich um Flüge in großer Höhe (100 m über Grund) und mit höherer Geschwindigkeit, wodurch sehr schnell große Bereiche des betroffenen Gebiets erfasst und hohe Schadensgrade (Abschnitt 2.5) detektiert werden können. Sollte die Datenqualität, insbesondere die geometrische Auflösung, der aus den Übersichtsflügen gewonnenen Fotos und 3D-Punktwolken nicht ausreichen, um den Schadensgrad einzelner Gebäude detailliert zu bestimmen (Abschnitt 2.6 und 2.7), können Missionen für Detailflüge auf niedrigerer Höhe (30 m über Grund) und mit niedrigerer Geschwindigkeit zu Erfassung von Einzelobjekten geplant werden, sodass eine höhere geometrische Auflösung zur besseren Repräsentation kleinerer Schadensmuster in den aufgenommenen Daten erzielt werden kann. Detailflüge können dabei durch andere LOKI-Module

und von Rettungskräften angefragt werden. Aufgrund des höheren Zeitaufwandes im Vergleich zu Missionen für Übersichtsflüge, liegt der Fokus von Detailflügen auf der Erfassung einzelner Infrastrukturobjekte.

Auf Basis dieses Konzepts wurden im Rahmen des Projekts dedizierte Planungsalgorithmen entwickelt und implementiert, welche für Detail- und Übersichtsflüge jeweils maßgeschneidert sind. Damit potentielle Anwender:innen (Abschnitt 1.5) die entwickelten Algorithmen direkt in Katastrophenfällen einsetzen können, wurde darüber hinaus eine interaktive Benutzeroberfläche im Projekt entwickelt, mit deren Hilfe UAV-Schwärme effektiv koordiniert werden können. Während der Projektlaufzeit stellte sich heraus, dass auch in Krisengebieten störungsfreie Kommunikationsstrecken schnell eingerichtet werden können, sodass die Planungsalgorithmen als zentral agierende Algorithmen entwickelt wurden, welche jederzeit vollständigen Zugang zur aktuellen Datenlage besitzen.

In bisherigen Planungsalgorithmen wird zur Aufnahme von Bildern für die photogrammetrische Rekonstruktion von 3D-Punktwolken eine konstante Fluggeschwindigkeit definiert, welche zusammen mit einer definierten konstanten Auslösezeit der Kamera eine gewünschte Bildüberlappung garantiert. Für die gewünschte Bildüberlappung ist es jedoch ausreichend, eine Menge an örtlichen Wegpunkten zu spezifizieren, an denen jeweils ein Bild aufgezeichnet werden muss. Hierdurch kann ein UAV zwischen einzelnen Wegpunkten die Geschwindigkeit variabel anpassen, um die Gesamtmission in deutlich kürzerer Zeit durchzuführen. Diese adaptive Fluggeschwindigkeit bedarf jedoch der Berücksichtigung der kinematischen Eigenschaften des verwendeten UAVs und damit der Manövrierbarkeit des UAVs. Diese Eigenschaften unterscheiden sich je nach Plattform teils deutlich voneinander. Daher wurden Flugplanungsalgorithmen entwickelt, implementiert und evaluiert, welche die jeweiligen kinematischen Eigenschaften der spezifischen UAV-Modelle berücksichtigen.

Weiterhin wurden umfassende Studien zur Nutzbarkeit der entwickelten Planungssoftware durch potentielle Anwender:innen und zum Einfluss der kinematischen Eigenschaften der unterschiedlichen UAV-Modelle auf die Flugplanung durchgeführt. Demgegenüber wurde die geplante simulationsbasierte Evaluation der Steuerungsmechanismen reduziert.

### **2.3.1 Flugplanungsdienste**

Im Projekt wurden mehrere Algorithmen zur Flugplanung entwickelt und erforscht. Diese sind: (1) Übersichtsflüge, (2) Detailflüge, und (3) eine plattformspezifische Flugplanung. Im Folgenden werden die diesbezüglich erzielten Ergebnisse näher beschrieben.

#### *2.3.1.1 Übersichtsflüge*

Ziel der Übersichtsflüge ist es, eine überblicksartige, jedoch schnelle Erfassung der Schadenslage zu erzielen. Hierzu wurde im Projekt zunächst ein algorithmisches Framework entwickelt, mit dessen Hilfe besonders vom Erdbeben betroffener Gebiete automatisch identifiziert werden (Abb. 11), welche aus Sicht von Anwender:innen eine hohe Priorität für die Ableitung erster Schadensinformationen besitzen. Die Identifizierung solcher Gebiete basiert dabei auf der durch das GFZ bereitgestellten initialen Schadensschätzung (Abschnitt 2.4.2). Zur Berechnung von Missionen für diese Gebiete wurde im Rahmen des Projekts ein kaskadierter Clustering-Algorithmus entwickelt. Dieser berechnet aus der Gesamtheit aller Gebäude in den Gebieten zusammenhängende und für eine Befliegung ausreichend kleine Cluster, deren Durchmesser weniger als 150 m umfasst. Diese Cluster können somit in wenigen Minuten vollständig erfasst werden und dienen als Input für den nachgelagerten und neu entwickelten Algorithmus zur automatisierten Missionsplanung von Übersichtsflügen für UAV-Schwärme. Kernstück der Missionsplanung der Übersichtsflüge ist ein heuristisches Optimierungsverfahren,

welches eine Auswahl aus den erstellten Cluster vornimmt, die ausgewählten Cluster den berücksichtigten UAVs zuweist, sequenziert und letztlich Flugpfade ableitet, welche eine vollständige Erfassung der jeweiligen Cluster garantieren (Abb. 12). Zur Bestimmung der Flugpfade innerhalb eines Clusters wird dabei ein effizientes und optimales Verfahren aus der Literatur verwendet (Vasquez-Gomez et al. 2020). Die im Rahmen des Projekts entwickelte Missionsplanung berücksichtigt dabei sowohl individuelle Sensorparameter, wie Brennweite und Öffnungswinkel, als auch individuelle Start- und Landepositionen der UAVs, die maximal mögliche Geschwindigkeit, und die Reichweite der UAVs. Diese Parameter können zwischen verschiedenen UAV-Modellen variieren. Die Auswahl der in der Missionsplanung zu berücksichtigenden UAV-Modelle und die Einstellung aller weiteren für die Missionsplanung relevanten Parameter, erfolgt über das eigens entwickelte Front-End (Abschnitt 2.3.3).



Abbildung 11: Demonstration der Identifikation besonders betroffener Gebiete.

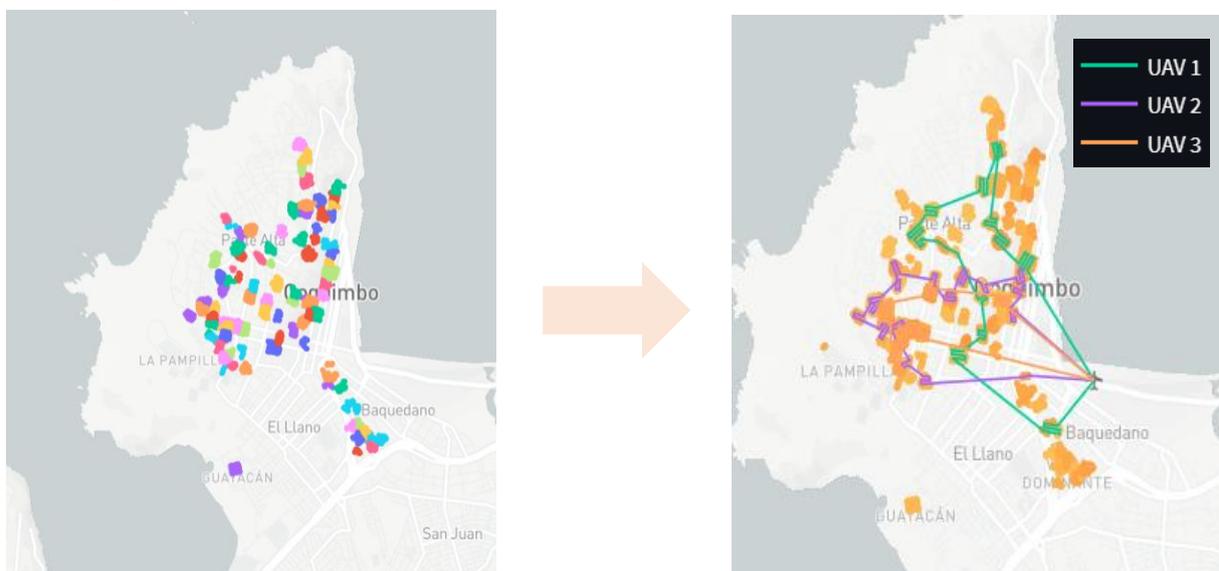


Abbildung 12: Übergang von Clusterung zur priorisierten Pfadplanung durch die Cluster.

Nicht berücksichtigt werden in der Missionsplanung für Übersichtsfüge jedoch tiefergehende kinematische Eigenschaften der jeweiligen UAV-Plattformtypen, welche das maximale Beschleunigungsvermögen und die maximale Flugeschwindigkeit der Systeme widerspiegeln. Dadurch wird zwar ein Teil des Optimierungspotentials der Missionsplanung nicht ausgeschöpft, andererseits ist der Planungsdienst dadurch universeller einsetzbar. Für weitere Informationen hierzu sei auf Abschnitt 2.3.1.3 verwiesen.

### 2.3.1.2 Detailflüge

Ziel der Detailflüge ist eine detaillierte Erfassung einzelner Gebäude, für die eine genauere Schadensbestimmung vorgenommen werden soll. Grundlage der Missionsplanung für Detailflüge sind Anfragen für die Befliegung einzelner Gebäude, welche entweder von dem Modulen der automatischen (Abschnitt 2.7) oder Crowdsourcing-basierten Schadensdetektion (Abschnitt 2.6), oder direkt von Anwender:innen gestellt werden. Der vom FZI entwickelte Optimierungsalgorithmus trifft auf Basis dieser Eingangsinformationen eine prioritätsmaximierende Auswahl der zu befliegenden Einzelgebäude, teilt diese auf die zur Verfügung stehenden UAVs auf und sequenziert sie. Letztlich leitet er daraus Flugpfade ab, welche eine detaillierte Erfassung der zu befliegenden Gebäude ermöglichen (Abb. 13). Äquivalent zu den Übersichtsflügen werden auch bei den Detailflügen individuelle Sensorparameter, wie Brennweite und Öffnungswinkel, individuelle Start- und Landepositionen, die maximal mögliche Geschwindigkeit und die Reichweite der jeweiligen UAV-Modelle berücksichtigt. Um eine universelle Einsetzbarkeit der Missionspläne zu ermöglichen, werden auch in diesem Planungsdienst die tiefergehenden kinematischen Eigenschaften der unterschiedlichen UAV-Plattformtypen nicht berücksichtigt. Für weitere Informationen zur Flugplanung unter Berücksichtigung der kinematischen Eigenschaften sei auf Abschnitt 2.3.1.3 verwiesen.

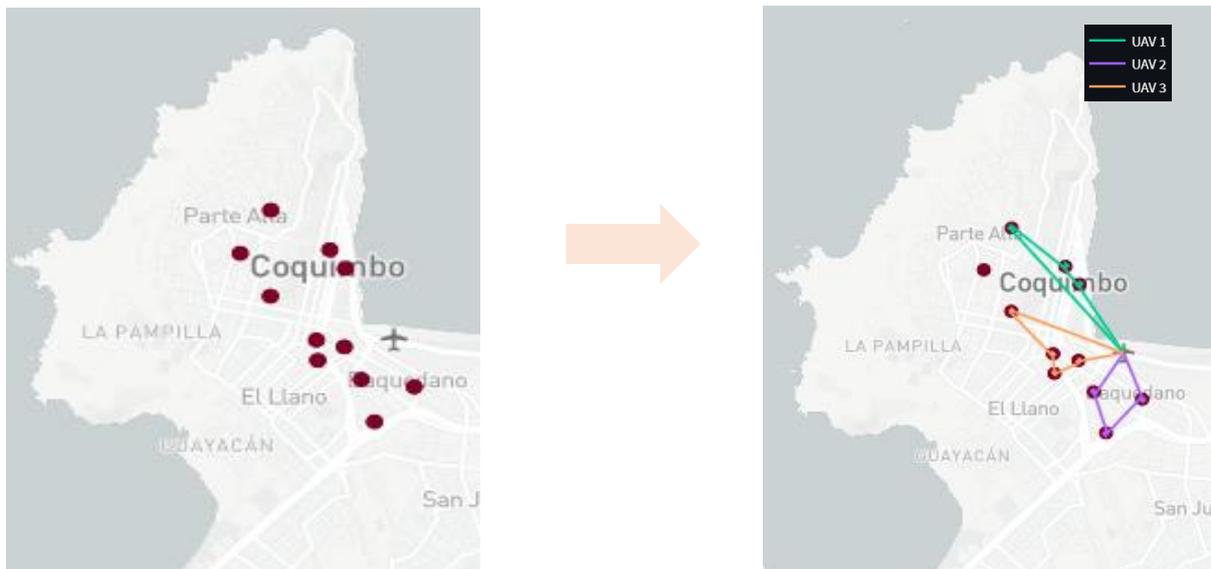


Abbildung 13: Übergang von Datengrundlage der zu befliegenden Detailflug-Anfragen zu den resultierenden Missionsplänen.

### 2.3.1.3 Plattformspezifische Flugplanung

UAV-Plattformen unterscheiden sich im Wesentlichen durch ihre physikalischen Eigenschaften, wie beispielsweise maximale Fluggeschwindigkeit und Beschleunigungsvermögen. Um das Potential der UAVs zur Erfassung betroffener Gebiete, d. h. bezüglich Geschwindigkeit der Missionsdurchführung und Datenqualität, voll auszuschöpfen, müssen die kinematischen Eigenschaften der unterschiedlichen UAV-Plattformen bei der Flugplanung berücksichtigt werden. Dazu wurden im Rahmen des Projektes mehrere Optimierungsalgorithmen für die plattformspezifische Flugplanung entwickelt, welche tiefergehende kinematische Eigenschaften der folgenden, weit verbreiteten und im LOKI-Projekt vorgesehenen UAV-Plattformen berücksichtigen: Starrflügel-UAV und Multicopter-UAV.

### Flugplanung von Starrflügel-UAVs

Die wichtigste physikalische Eigenschaft von Starrflügel-UAVs ist die Einhaltung einer Mindestgeschwindigkeit, um einen Strömungsabriss an den Tragflächen zu vermeiden. Daher wird in der aktuellen Forschungsliteratur meist eine konstante Geschwindigkeit oberhalb der Mindestgeschwindigkeit des UAVs spezifiziert und lediglich Beschleunigungen quer zur Bewegungsrichtung zugelassen. Unter diesen Annahmen kann die zugrundeliegende Kinematik hinreichend präzise durch sogenannte Dubins-Pfade (Dubins 1957) abgebildet werden. Auch die im Rahmen des Projekts vom FZI entwickelte Flugplanung für Starrflügel-UAVs basiert auf diesen Annahmen. Hierbei handelt es sich letztlich um ein heuristisches Optimierungsverfahren nach der adaptiven großen Nachbarschaftssuche, welches unter Berücksichtigung von Sensorparametern, Flughöhe, und maximaler Flugzeit in der Lage ist, eine Auswahl der wichtigsten zu besuchenden Areale vorzunehmen. Darüber hinaus ordnet der entwickelte Optimierungsalgorithmus diese Areale in einer zeitlichen Abfolge an und errechnet die dazu optimierten Flugpfade, welche die kinematische Manövrierbarkeit des UAVs präzise ausnutzen und zugleich eine vollständige sensorische Abdeckung der zu untersuchenden Areale garantieren. Abb. 14 zeigt einen exemplarischen Missionsplan für Starrflügel-UAVs in einem UTM-transformierten Koordinatensystem. Aus spezifischen Kameraparametern und einer Flughöhe von 100 m über Grund resultiert das gelb skizzierte Erfassungsgebiet. Es ist zum einen zu sehen, dass alle zu befliegenden, in schwarz dargestellten Areale vollständig erfasst werden. Darüber hinaus erkennt man in der Abbildung unten rechts Schleifenformen, welche typisch für die Verwendung von Dubins-Pfaden sind und aus der eingeschränkten Manövrierbarkeit von Starrflügel-Systemen resultieren.

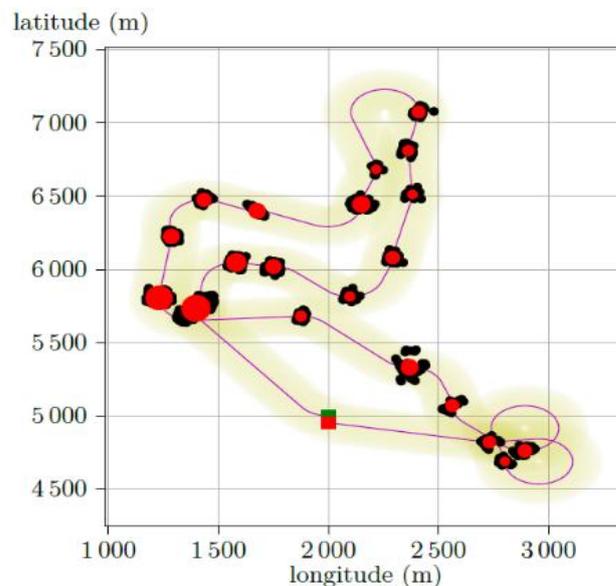


Abbildung 14: Resultierender Flugplan für ein Starrflügel-UAV mit minimalem Wenderadius.

### Flugplanung von Multicopter-UAVs

Im Gegensatz zu den Starrflügel-UAVs sind Multicopter-UAVs nicht an eine Mindestgeschwindigkeit gebunden, sondern können innerhalb gewisser Grenzen jedmögliche Geschwindigkeit realisieren, z. B. auch den Stillstand (Hover-Mode). Für diese auf den ersten Blick einfachere Kinematik gibt es jedoch zum aktuellen Stand der Technik keine Methode zur Bewegungsplanung, welche zugleich hinreichend schnell und allgemeingültig ist und zudem eine hohe kinematische Präzision aufweist. Eine solche Methode garantiert einerseits die Durchführbarkeit der resultierenden Pläne und erlaubt andererseits die Berechnung von effizienten Missions-

plänen. Daher wurde im Rahmen des Projektes eine neuartige Methode zur Generierung zeit-optimaler Bewegungen unter Berücksichtigung der zugrundeliegenden physikalischen Eigenschaften entwickelt, welche alle zuvor beschriebenen Anforderungen abdeckt und deren Implementierung als Open-Source in C++ (Forschungszentrum Informatik 2023a) und Python (Forschungszentrum Informatik 2023b) verfügbar ist. Darauf aufbauend entwickelte das FZI exakte und heuristische Verfahren zur Planung von Flugrouten für Multicopter und konnte damit, verglichen mit bisherigen wissenschaftlichen Benchmarks, bis zu 15 % Flugzeit für die vollständige Befliegung von Wegpunkten gemäß des Traveling-Salesman-Problems einsparen (Meyer & Glock 2021) und bis zu 20 % mehr priorisierte Wegpunkte bei Berücksichtigung einer beschränkten Flugzeit gemäß des Orienteering-Problems befliegen (Abb. 15), wie in Meyer & Glock (2022) detailliert beschrieben.

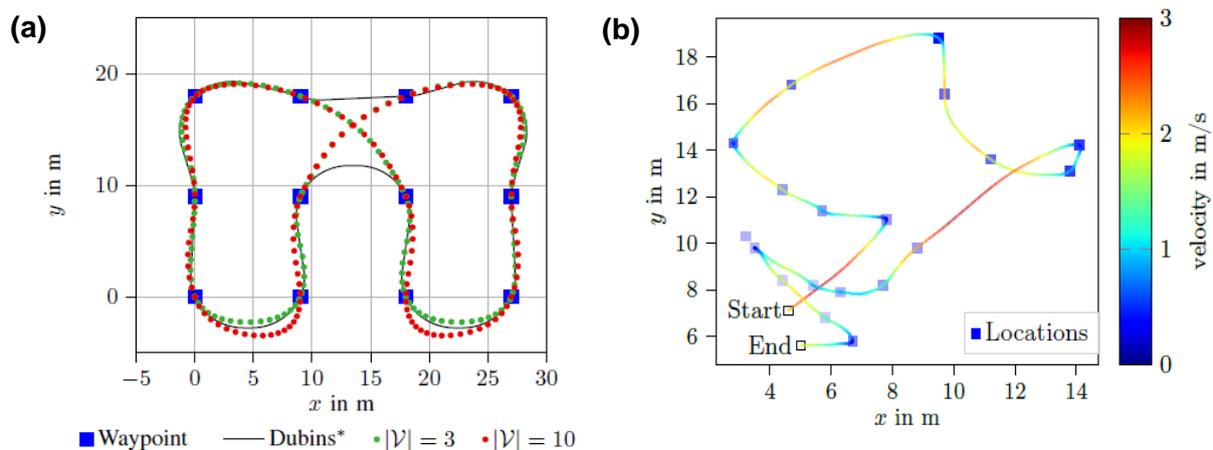


Abbildung 15: Resultierende kinematische Flugplanung für ein Multicopter-UAV. (a) Alle Wegpunkte (blau) müssen abgeflogen werden (Meyer & Glock 2021). (b) Selektion von Wegpunkten, da nicht alle innerhalb der gegebenen maximalen Flugzeit erreichbar sind (Meyer & Glock 2022).

## 2.3.2 Evaluation der Flugplanungsalgorithmen

### 2.3.2.1 Übersichts- und Detailflugplanung

Die einzelnen Verfahren zur Missionsplanung von Übersichts- und Detailflügen wurden ausgiebig auf Basis der initialen Schadensprognose (Abschnitt 2.4) eines realen Erdbebenereignisses in Coquimbo (Chile) aus dem Jahre 2015 mit einer Magnitude von 8.3 evaluiert. Die Evaluation wurde durch das in Abschnitt 2.3.3 beschriebene Nutzer-Interface vorgenommen. Darüber hinaus wurde die Missionsplanung auf Basis der initialen Schadensprognose (Abschnitt 2.4) für ein fiktives Erdbebenereignis im Raum Athen (Griechenland) durchgeführt. In den Evaluationsszenarien für Missionen für Detailflüge wurden unterschiedliche UAV-Modelle, eine unterschiedliche Anzahl an UAVs und Anfragen für Detailflüge und unterschiedliche Einstellungen bezüglich Bildüberlappung untersucht. Das entwickelte Planungstool konnte in jedem Szenario effiziente Missionspläne innerhalb weniger Sekunden berechnen, wodurch dessen Robustheit unterstrichen wird. In den Evaluationsszenarien für Übersichtsflüge wurden ebenfalls unterschiedliche UAV-Modelle und eine unterschiedliche Anzahl an UAVs verwendet. Des Weiteren wurden verschiedene Schwellenwerte einer erwarteten Mindestwahrscheinlichkeit für einen mindestens moderaten Schadens und verschiedene Bildüberlappungsgrade untersucht. Auch hier zeichnete sich das Verfahren durch eine schnelle Antwortzeit von wenigen Sekunden und Robustheit in der Generierung effizienter Flugmissionspläne aus.

### 2.3.2.2 Plattformspezifische Flugplanung

Das FZI konnte durch eine umfassende simulative Evaluation die präzise Umsetzung der berechneten Missionspläne in einem dynamischen Umweltmodell demonstrieren (Abb. 16). Dazu wurde eine resultierende Lösung der kinematischen Flugplanung für Multicopter-UAVs als Referenztrajektorie zugrunde gelegt (grün gestrichelter Verlauf in der linken Grafik) und durch eine Modellprädiktive Regelung (MPC) eines nichtlinearen Systemmodells eines Multicopter-UAV nachverfolgt, welches das Verhalten eines realen UAVs präzise abbildet (kontinuierliche blaue Linie in der linken Grafik). Es ist zu sehen, dass das simulierte UAV der Referenz mit hoher Genauigkeit folgen kann und dabei einen maximalen Abstand zur Referenz von 10 cm aufweist. Der durchschnittliche Abstand beträgt dabei 3,5 cm (siehe rechte obere Grafik und Meyer & Glock 2022). Dabei wird sowohl die vorgegebene Geschwindigkeit präzise eingehalten (siehe mittlere rechte Grafik) als auch die vorgegebenen Geschwindigkeits- und Beschleunigungsgrenzen (rote gestrichelte Linien in der mittleren und unteren rechten Grafik). Lediglich das Beschleunigungsverhalten der simulierten UAVs verletzt an wenigen Zeitpunkten die Beschleunigungsbeschränkung, da diese über das Drehmoment an den einzelnen Rotoren geregelt wird, wodurch die Beschränkung der Beschleunigung des UAVs nicht exakt möglich ist. Die Umsetzbarkeit einer Befliegung auf Basis von Dubins-Pfaden mit Starrflügel- und Multicopter-UAVs wurde beispielsweise von Penicka et al. (2017) und McLain & Beard (2014) gezeigt.

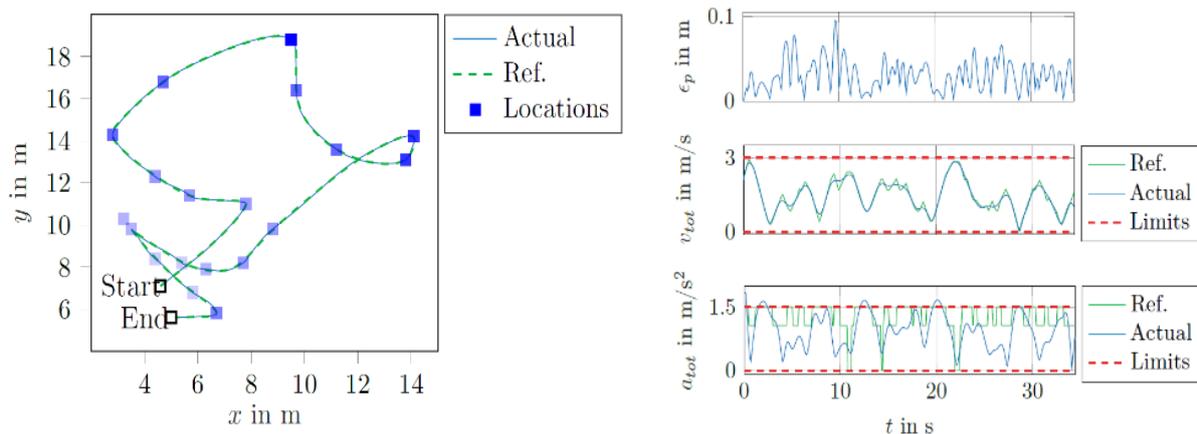


Abbildung 16: Vergleich der berechneten (Ref.) und der tatsächlich (Actual) abgeflogenen Flugmission für Multicopter-UAVs. Die gegebenen kinematischen Grenzen werden hinreichend genau eingehalten (Meyer & Glock 2022).

### 2.3.3 Front-End für Anwender:innen

Im Projekt wurde ein interaktives Front-End entwickelt, welches es potentiellen Anwender:innen ermöglicht, die im Back-End aktiven Planungsdienste anzusprechen. Die Nutzbarkeit des Front-Ends wurde in regelmäßigen Abstimmungen mit Anwender:innen überprüft und optimiert, sodass eine Nutzung der Dienste über das Projektende hinaus ermöglicht wird.

#### 2.3.3.1 UAV-Management

Um eine direkte Nutzung der wichtigsten Planungsservices für potentielle Anwender:innen zu ermöglichen, entwickelte das FZI ein intuitiv bedienbares Frontend. Dieses erlaubt unter anderem die Verwaltung einer heterogenen UAV-Flotte (Abb. 17), z. B. durch Hinzufügen oder Löschen von UAVs eines bestimmten Modells. Für die jeweiligen UAV-Modelle sind die wichtigsten Planungsparameter im Backend des Services hinterlegt, sodass Anwender:innen, ohne sich mit den technischen Parametern der UAV-Plattform auseinandersetzen zu müssen, das entsprechende UAV-Modell auswählen und damit den Fokus direkt auf die Planung der Missi-

onen richten können. Des Weiteren ist es für Anwender:innen möglich, individuelle UAV-Modelle zu definieren, für welche die Missionsplanungs-Komponente Flugmissionen für jedes beliebige UAV-Modell bestimmen kann.

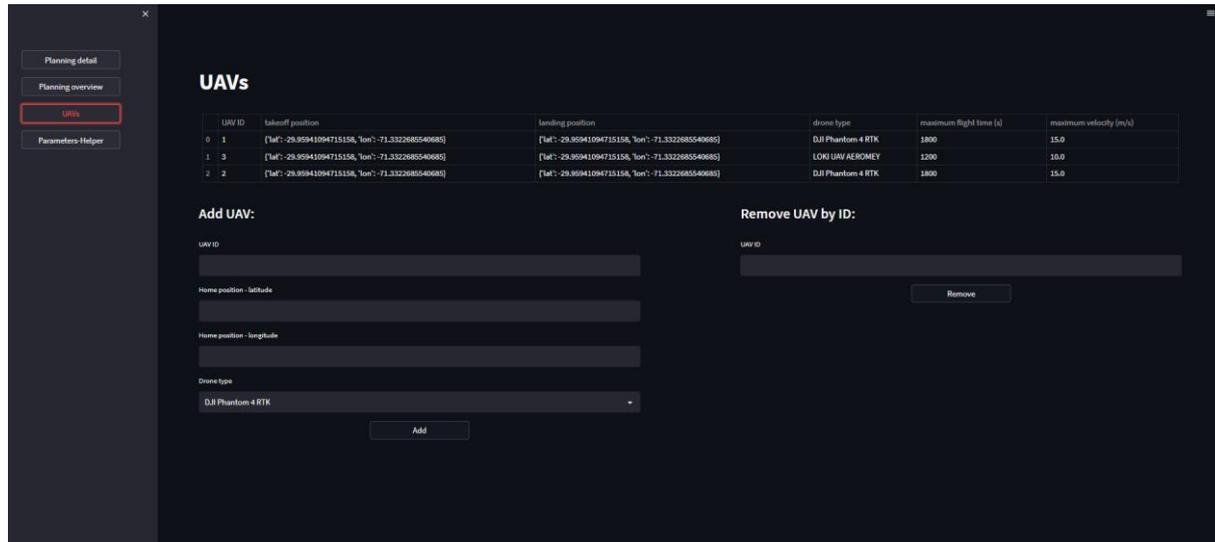


Abbildung 17: Frontend zum UAV-Flotten Management mit Interaktion zum Hinzufügen und Löschen von UAVs für die Missionsplanung.

### 2.3.3.2 Planung der Flugmissionen und Export

Das entwickelte Frontend zur Planung der Übersichtsflüge (Abb. 18) und der Detailflüge (Abb. 19) erreicht man über den linken Reiter im Front-End. Für die Übersichtsflüge können Nutzer:innen den gewünschten lateralen und longitudinalen Image-Overlap einstellen, eine Bounding-Box des zu berücksichtigenden Gebiets definieren, die benötigten UAVs für die Missionsplanung auswählen und einen Schwellwert für den Schadensgrad der zu berücksichtigenden Gebäude angeben. Sind alle Einstellungen wie gewünscht angepasst, lässt sich die Mission planen und die resultierenden Flugpläne in standardisierten Austauschformaten für den Import in gängige Groundstation-Software (z. B. UgCS; Abb. 20) oder DJI Pilot), oder die Verwendung in anderen geodatenbasierten Diensten (Abb. 21) exportieren. Da beim Export als .kml aus technischen Gründen einige Informationen verloren gehen, welche zur Durchführung der Flugmission benötigt werden, bietet das entwickelte Front-End unter der Seite „Parameters-Helper“ die Möglichkeit diese Information nachgelagert zu rekonstruieren und somit für eine manuelle Ergänzung der Missionspläne zugänglich zu machen (Abb. 22). Für die Planung der Detailflüge bietet das Front-End die identischen Funktionen an. Lediglich die Schwellwertfilterung des erwarteten Schadensgrads wird durch einen leichtgewichtigen Interaktionsmechanismus zum direkten Hinzufügen und Löschen neuer Detailflug-Anfragen für Anwender:innen ausgetauscht.



Abbildung 18: Front-End für die Planung von Übersichtsflügen und zahlreichen Adaption- und Einstellungsmöglichkeiten.

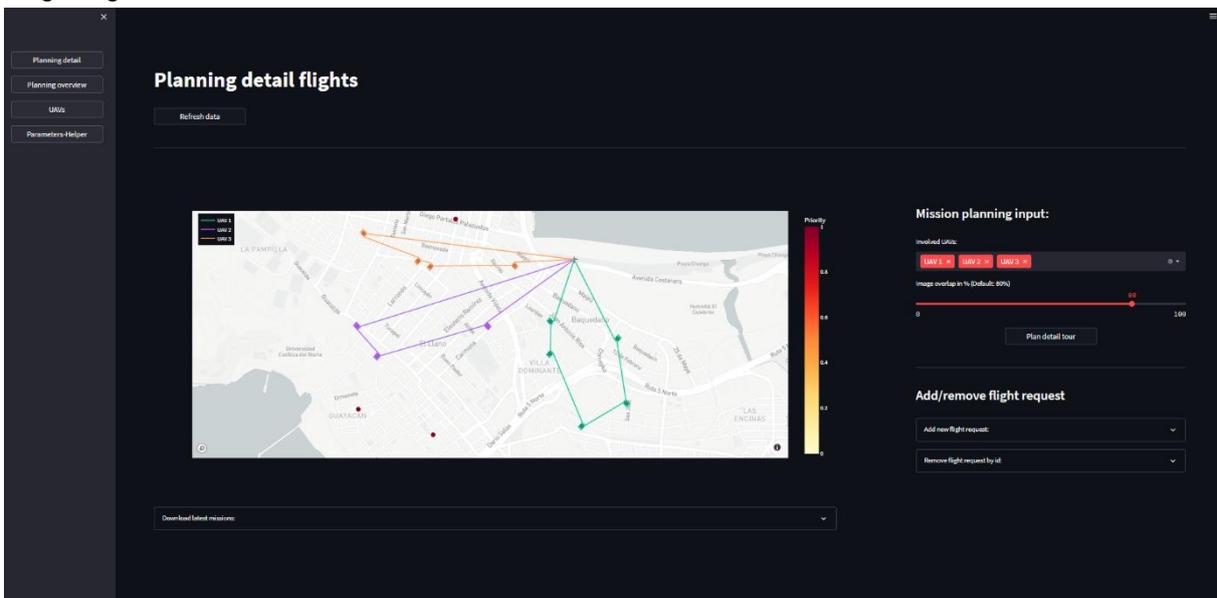


Abbildung 19: Front-End für die Planung von Detailflügen mit zahlreichen Adaption- und Einstellungsmöglichkeiten.

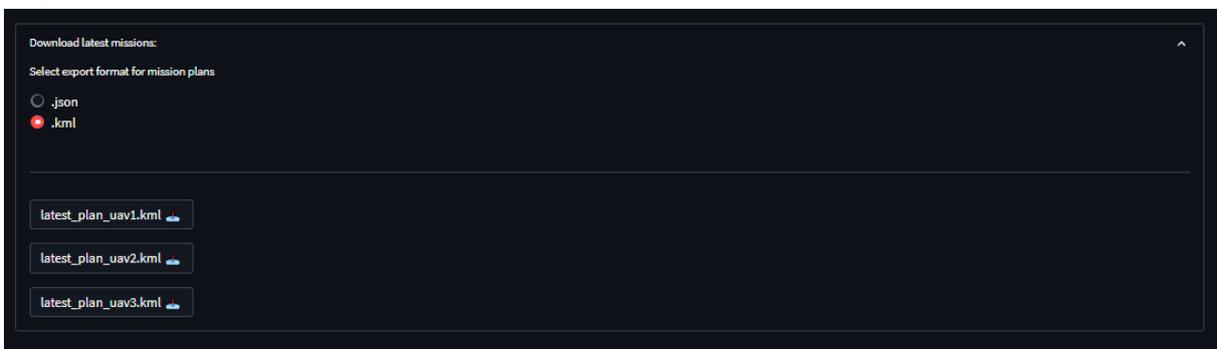


Abbildung 20: Die Front-Ends für Übersichts- und Detailflüge verfügen über ein Interface zum Download der berechneten Missionspläne. Diese können hier entweder als .json für den Import in UgCS oder als .kml für andere geodatenbasierte Dienste exportiert werden.

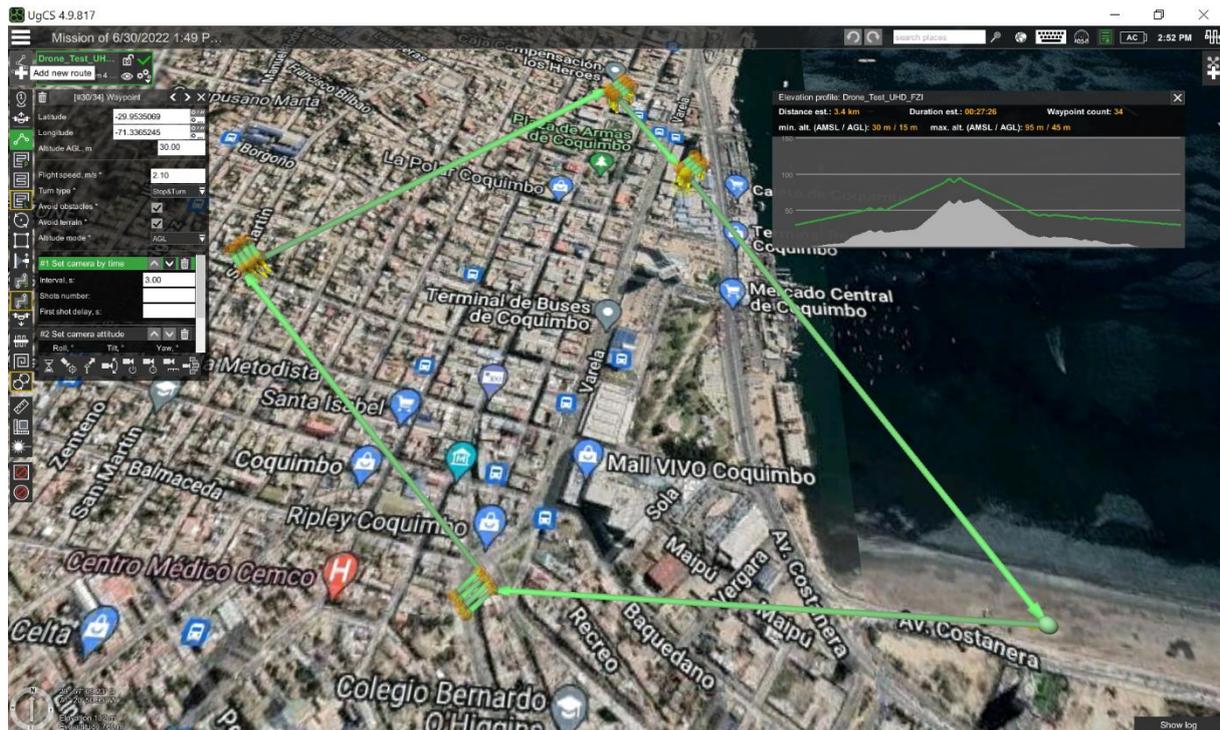


Abbildung 21: In UgCS geladener Missionsplan für Detailflüge.

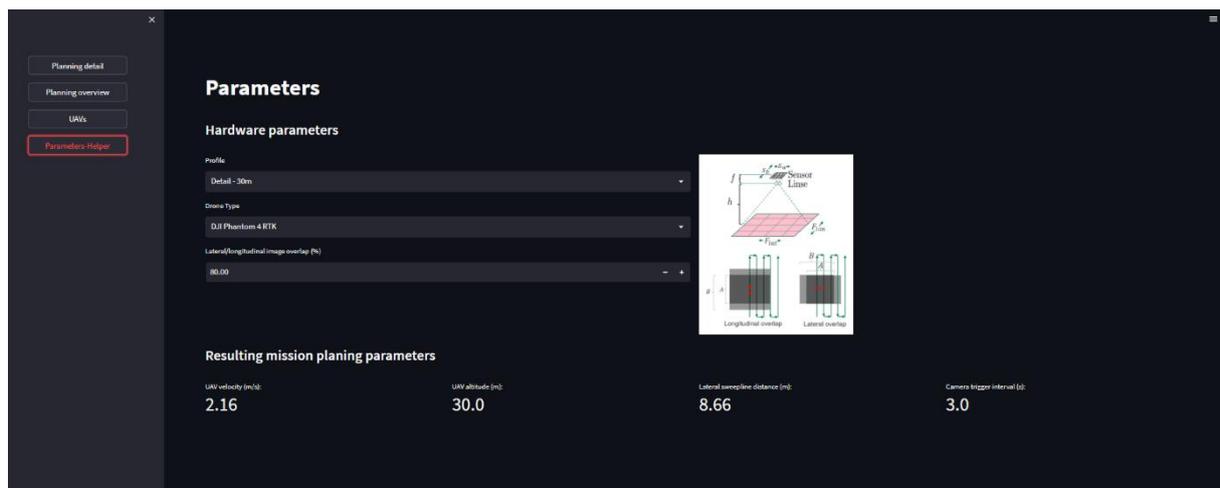


Abbildung 22: Da beim Export als .kml Informationen wie Fluggeschwindigkeit und Kameraauslöseintervalle verloren gehen, bietet das Front-End unter „Parameters-Helper“ die Möglichkeit, diese nachgelagert zu rekonstruieren.

## 2.4 AP 4 – Exposure-Modellierung (GFZ)

Ziel dieses Arbeitspakets war die Entwicklung einer flächendeckenden, gebäudegenauen Exposure-Modellierung für Testregionen des Projekts. Hierfür wurde eine dynamische und hochauflösende Methodik entwickelt, in der in einem Big-Data-Ansatz verschiedene, offen verfügbare Quellen von Geodaten zusammengeführt werden. Die Dynamik des entwickelten Ansatzes erlaubt es, sich aktualisierende Gebäudeinformationen der bezogenen Datenquellen – beispielsweise durch neu gewonnene Daten aus UAV-Überflügen (Abschnitt 2.2) oder Crowdsourcing (Abschnitt 2.6) – in nahezu Echtzeit für eine aktualisierte Exposure-Berechnung zu verwenden. Der Ansatz gewährleistet damit die Aktualität der Berechnung. Darüber hinaus wurde auf Basis der Exposure-Berechnung ein Ansatz zur initialen Schadensprognose im Schadensfall entwickelt, der Anwender:innen erste, flächendeckende Abschätzungen der zu erwartenden Schäden ermöglicht, noch bevor erste UAV-basierte Erfassungen geplant und

durchgeführt werden. Die Schadensprognose (Schorlemmer et al. 2020) dient darüber hinaus als Grundlage für die Planung von Missionen für UAV-Übersichtsflüge (Abschnitt 2.3) zur Erfassung von Schäden im betroffenen Gebiet. Zudem wurde eine Datenbank-Schnittstelle entwickelt, die es potenziellen Anwender:innen des LOKI-Systems ermöglicht, Schadensinformationen der verschiedenen Module des Systems in gängigen Systemen zu visualisieren.

#### 2.4.1 Dynamische globale Exposure-Modellierung

Exposure-Modelle beschreiben die bauliche Struktur einer Region. Ihre Kerndaten umfassen verschiedene Gebäudeklassen, die Anzahl und Verteilung (üblicherweise aggregiert pro administrativer Einheit) und den Wert und die Anzahl an Personen in diesen Gebäuden. Solche Modelle decken unterschiedlich große Gebiete ab und haben unterschiedliche räumliche Auflösungen (Earthquake Engineering Research Institute and International Association for Earthquake Engineering 2023, Crowley et al. 2020, Dabeek et al. 2020, Yepes-Estrada et al., 2017, Jaiswal et al. 2010). Allerdings beschreiben diese Modelle nie einzelne Gebäude, mit Ausnahme von Mikromodellen mit sehr kleinen räumlichen Ausdehnungen. Die aggregierten Daten stammen, je nach Land und Verfügbarkeit, aus Katasterdaten, Satellitenbildern, *volunteered geographic information* (VGI), Ingenieurwissen und verschiedenen anderen Datensätzen. Es handelt sich häufig um Abschätzungen und nicht direkte Messungen bzw. direkte Datenerhebungen. Oft werden sehr kleinräumige manuelle Erhebungen auf die gesamte Ausdehnung eines Modells extrapoliert und mit anderen Daten kalibriert. Dies führt mitunter dazu, dass die Anzahl der Gebäude pro Gebäudeklasse nicht in ganzen Zahlen dargestellt wird. Gebäudeklassen beschreiben die wichtigsten Gebäudecharakteristiken durch eine Gebäudetaxonomie (OpenQuake Platform 2023a), also ein vordefiniertes Klassifikationsschema. In den letzten Jahren hat sich die Gebäudetaxonomie des *Global Earthquake Model* (GEM) durchgesetzt (OpenQuake Platform 2023b). Diese beinhaltet ungefähr 400 Gebäudeklassen (OpenQuake Platform 2023a), welche durch einen sogenannten *taxonomy string* repräsentiert werden. Dieser *taxonomy string* besteht aus unterschiedlichen Attributen, z. B. WWHE/LFM/H:1/RES, wobei W = wood, WHE = heavy wood, LFM = moment frame, H:1 = 1 story, und RES = residential.

Das erste global verfügbare Exposure-Modell wurde im Rahmen des PAGER-Systems (Jaiswal et al. 2010) des United States Geological Survey (USGS) entwickelt. Später wurde im Rahmen von GEM ein weiteres globales Modell, GED4GEM (Gamba et al. 2012), entwickelt, das auf Katasterdaten, Daten von PAGER, und Satellitenbildern basiert und die Gebäude nach Nutzungskategorien (Wohn-, Geschäfts- und Industriegebäude) beschreibt. Leider sind viele Exposure-Modelle nicht als *Open Data* veröffentlicht, da sie auf nicht-offenen Daten basieren.

Bei Naturgefahren spielt der genaue Ort eines Gebäudes sehr häufig eine große Rolle in Bezug auf den zu erwartenden Schaden. Die Intensität der Gefährdung kann, je nach Naturgefahr, von verschiedenen Faktoren abhängen. Während bei Fluten oder Lavaströmen die Wichtigkeit der genauen Lage eines Gebäudes offenkundig ist, gibt es diese Effekte auch bei Erdbeben. Die Stärke der Erschütterung hängt lokal stark von den Untergrundparametern ab. Diese umfassen sowohl die Art des Untergrundes (Sedimente vs. Festgestein) als auch die relative Lage zu Verwerfungen (*hanging wall* vs. *footwall*). Daher sind Gebäudeverteilungen aggregiert pro Bezirk oft zu ungenau, um den genauen Schaden verlässlich abschätzen zu können. Hinzu kommen noch andere Probleme mit aggregierten Gebäudedaten: Die Verteilung von Wohn-, Geschäfts- und Industriegebäuden ist nicht gleichmäßig, weder per aggregiertem Bezirk, noch wenn die genaue Lage von Gebäuden bekannt sein sollten. Daher ist es notwendig, neben der genauen Lage von Gebäuden auch deren Verwendung und Größe genau zu kennen. Ein weiteres Problem der aggregierten Modelle stellt der zeitliche Faktor dar.

Sie beschreiben den Zustand bei Erhebung der Daten, allerdings kann in vielen urbanen Konglomeraten ein starkes Wachstum beobachtet werden. Dies führt dazu, dass mehrere Jahre alte Modelle nur noch unzureichend den Gebäudebestand beschreiben. Diese Probleme wurden durch den im Projekt entwickelten dynamischen und hochauflösenden Ansatz der Exposure-Modellierung gelöst, indem in einem Big-Data-Ansatz verschiedene Datenquellen zusammengeführt wurden. Dazu gehört zunächst der *Global Human Settlement Layer* (Pesaresi & Politis 2022, Schiavina et al. 2022), durch den eine erste grobe geographische Verteilung der Gebäude erzeugt wird. Hierbei wird die Erde in Gitterzellen auf der Grundlage des *Quadtree-Systems* (Finkel & Bentley 1974) eingeteilt. Für diesen Schritt wird, wie bei vielen Onlinekartendiensten, ein hierarchisches, kachelbasiertes System, das *Tile System* (Microsoft Corporation 2023) auf Grundlage der Mercator-Projektion verwendet. Dieses hat trotz der starken Verzerrungen im polaren Bereich zwei wichtige Eigenschaften, die es geeignet für unsere geographische Verteilung machen: Als konforme Projektion enthält sie im Detail die Winkel und Längenverhältnisse. Dadurch behalten kleine Objekte, wie Gebäude, ihre Form bei. Ebenso ist sie eine zylindrische Projektion, wodurch die Himmelsrichtungen immer in die gleiche Richtung zeigen (Nord nach oben usw.). Im Quadtree-Ansatz wird die quadratische Projektion der Erde in mehreren Schritten in jeweils vier Unterquadrate geteilt, wodurch sich die Anzahl der Zellen jeweils um den Faktor vier erhöht. Diese Unterteilungen werden als *zoom level* beschrieben, beginnend mit der ersten Unterteilung als *zoom level 1* usw. Das Exposure-Modell des GFZ basiert auf Zellen des *zoom level 18*.

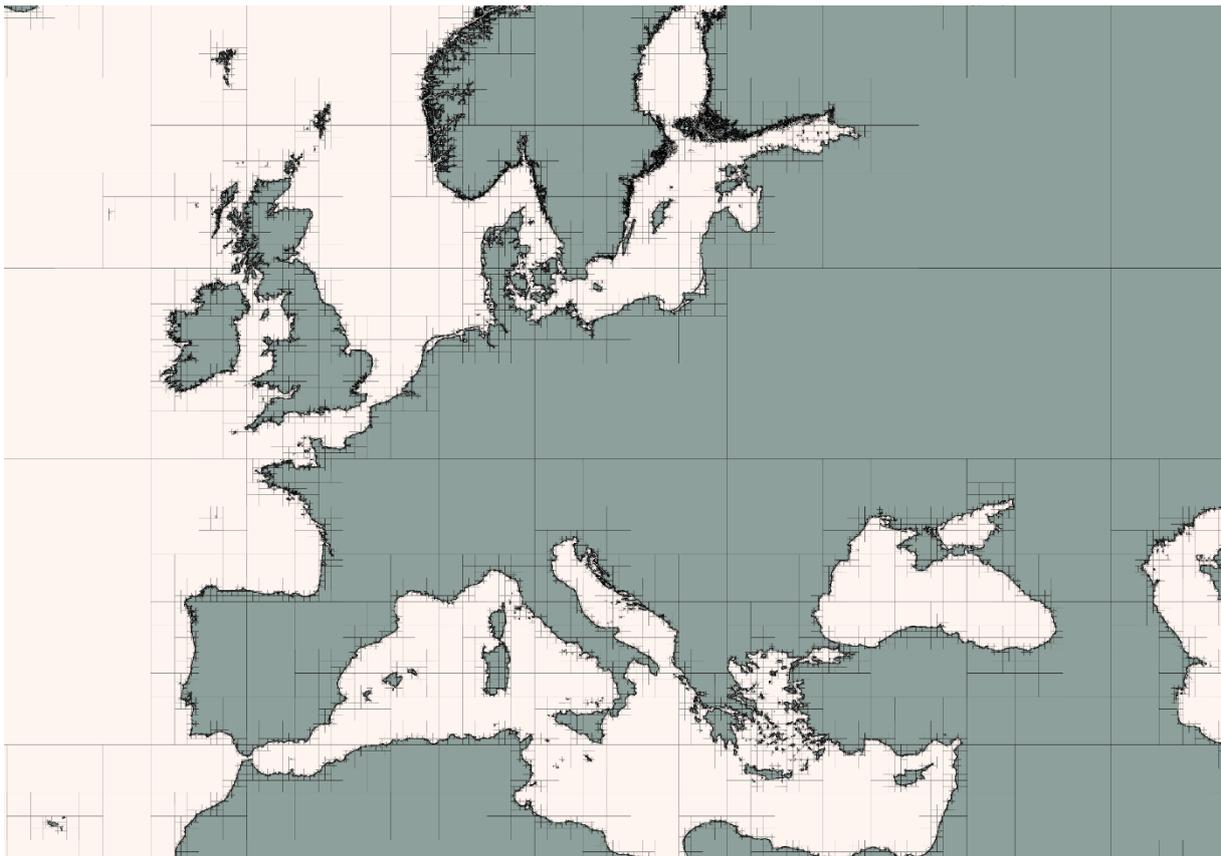


Abbildung 23: Zellgitter mit Mehrfachauflösung und aggregierten Zellen (Land oder Meer). Die kleinsten Zellen entlang der Küstenlinien haben eine Ausdehnung von ca. 100 m (zoom level 18).

Diese Zellen haben in äquatorialen Lagen eine Ausdehnung von ca. 150 m, in Europa ca. 100 m und zu den Polen hin werden sie entsprechend kleiner. Zur vollständigen Abdeckung der Welt mit Zellen des *zoom level 18* werden ca. 68,7 Milliarden Zellen benötigt. Um diese Datenmenge zu reduzieren, werden diese Zellen nur in Gebieten mit Gebäudeabdeckung verwendet. Alle anderen Zellen werden, soweit möglich, zu größeren *Quadtree*-Zellen, also kleinerem *zoom level*, aggregiert, da sie für die Modellierung nicht benötigt werden (Abb. 23).

Um eine erste Verteilung der Gebäude basierend auf dem *Global Human Settlement Layer* (GHSL) in diesen Zellen zu erhalten, wurde der GHSL aus den GeoTIFF-Dateien vektorisiert und die resultierenden Polygone mit den *zoom level 18* Zellen verschnitten. Zusätzlich wurde die anteilige bebaute Fläche pro Zelle berechnet und diese Werte der Zelle zugewiesen. Dadurch wurde eine globale Verteilung der bebauten Flächen pro Zelle erzeugt. Technisch ist es nicht notwendig, die Polygone der bebauten Flächen pro Zelle zu speichern, allerdings erlauben diese Polygone, visuelle Überprüfungen der Genauigkeit und Nützlichkeit des GHSL für die Exposure-Modellierung durchzuführen. Eine zusätzliche Verschneidung der Polygone mit einer zweiten Datenquelle, dem Straßennetzwerk in OpenStreetMap (OSM), wurde durchgeführt, um die Straßenflächen von den bebauten Flächen zu subtrahieren, wodurch eine genauere Abschätzung der bebauten Fläche pro Zelle erzielt wurde (Abb. 24 und 25). Das Straßennetzwerk in OSM kann für viele Teile der Welt, insbesondere in den LOKI-Testgebieten, als komplett angesehen werden.



Abbildung 24: Karte der Gegend um den Bahnhof Yoyogi-uehara im Tokioter Bezirk Shibuya. Das Gitter zeigt die *zoom level 18* Zellen.

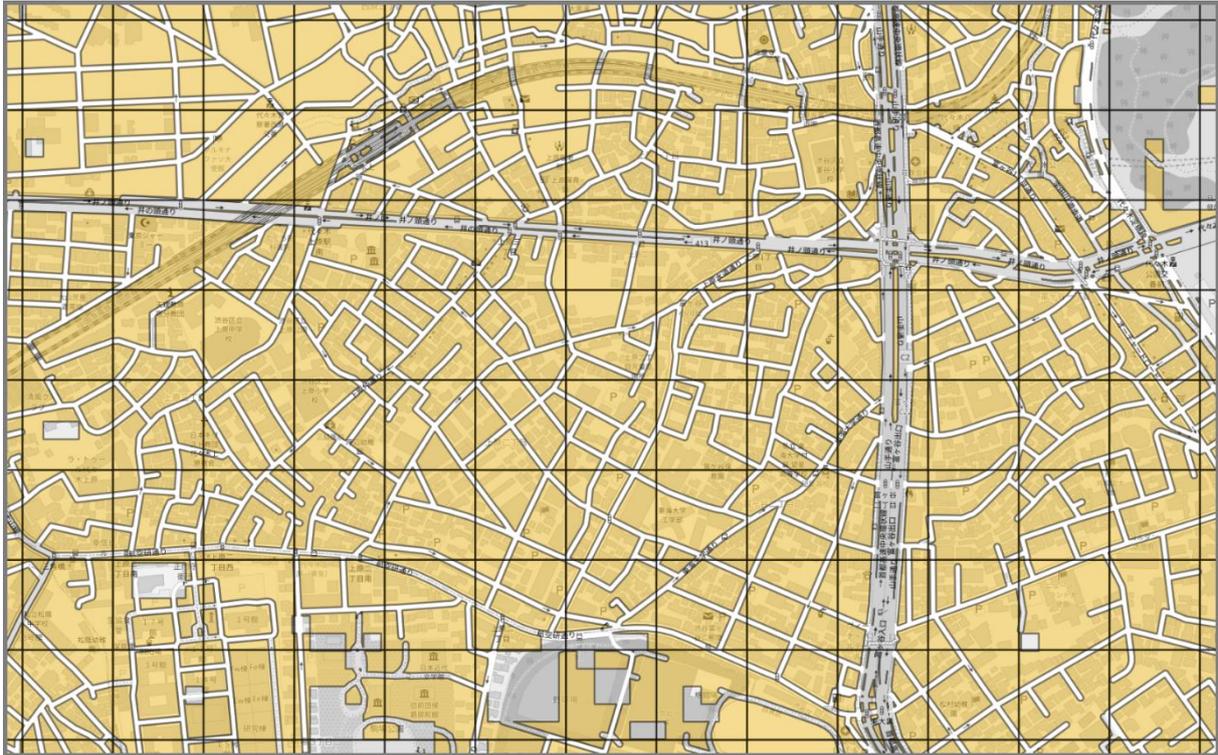


Abbildung 25: Karte wie in Abb. 24 mit den GHSL Polygonen in Gelb dargestellt. Die Straßengeometrien wurden zuvor aus den Polygonen herausgeschnitten.

Die zweite Datenquelle (OSM) wird nicht nur für das Straßennetzwerk, sondern hauptsächlich als Quelle detaillierter Gebäudedaten verwendet. Obwohl OSM global bereits mehr als eine halbe Milliarde Gebäudeumrisse enthält, ist der Bestand bei weitem nicht vollständig. Die Unvollständigkeit verteilt sich erwartungsgemäß recht ungleich über den Globus. Während in einigen europäischen Ländern bereits alle Gebäude erfasst sind (entweder durch den Import von Katasterdaten oder durch eine sehr aktive Mapping-Community), finden sich in vielen anderen Gebieten große Lücken im Gebäudebestand. Die Länder Dänemark, Deutschland, Estland, Frankreich, Island, Luxemburg, Monaco, Niederlande, Österreich, Polen, Schweiz, Slowakei und Tschechien wurden vom GFZ als komplett eingestuft. In allen anderen Ländern kann von einem unvollständigen Gebäudebestand ausgegangen werden. Da bei Unvollständigkeit des Gebäudebestandes dieser über die bebaute Fläche approximiert werden muss, wird die Vollständigkeit auch lokal pro Zelle bestimmt. Dazu wird pro Zelle die gesamte bebaute Fläche, wie von GHSL vorgegeben, mit der Gesamtfläche aller OSM-Gebäudeumrisse in der jeweiligen Zelle verglichen (Abb. 26). Da die bebaute Fläche pro Zelle in GHSL in der Regel deutlich größer ist, als es der Realität entspricht, können die Gebäudeumrisse diese Flächengröße nicht erreichen. Um eine geeignete Entscheidungsfunktion zu finden, wurden alle Zellen in Attika, Griechenland durch Vergleich der Gebäudeumrisse mit Satellitenbildern manuell ausgewertet. Attika war hierfür geeignet, da ein Teil des Athener Stadtgebietes komplett erfasst ist, während die andere Hälfte nur sporadisch Gebäudeumrisse enthält. Durch diesen direkten Vergleich konnte die Entscheidungsfunktion kalibriert und dann für jede weitere Zelle verwendet werden, um aus dem Vergleich der beiden Größen festzustellen, ob alle zu erwartenden Gebäudeumrisse in der jeweiligen Zelle vorhanden sind (Abb. 27). Ist dies der Fall, muss keine Approximation des Gebäudebestandes für die jeweilige Zelle mehr vorgenommen werden.

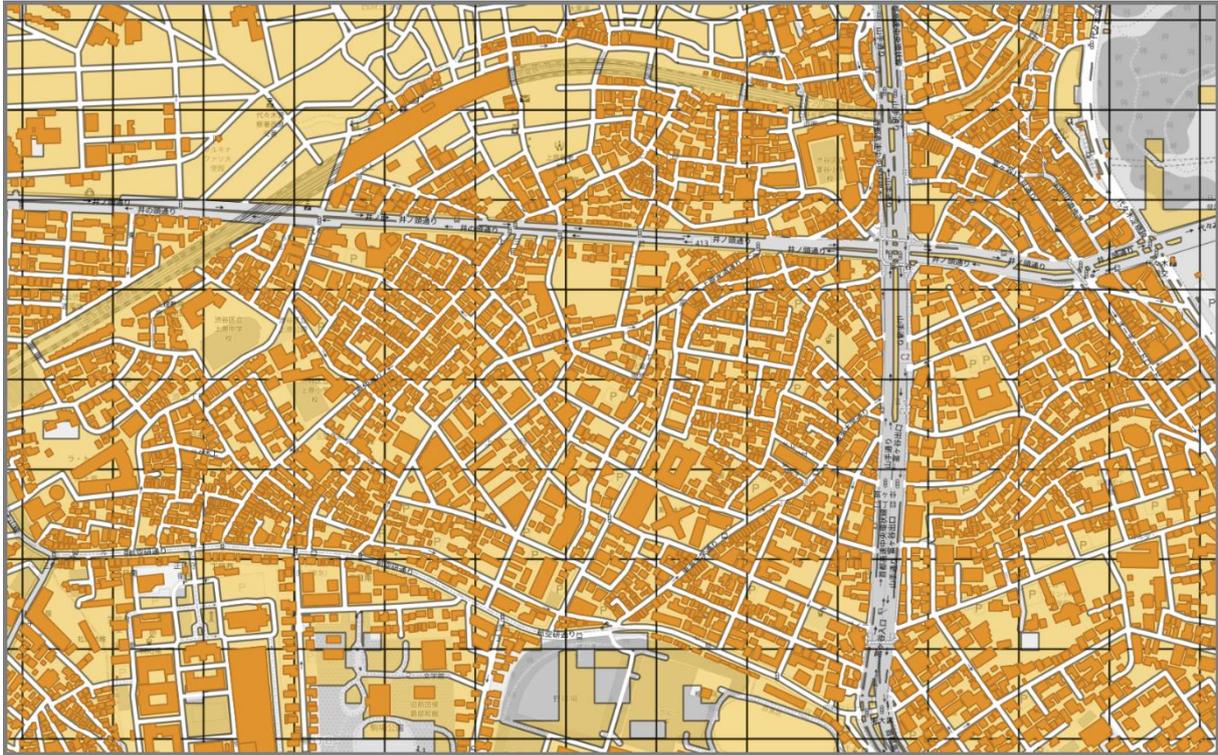


Abbildung 26: Karte wie in Abb. 25 mit zusätzlichen Gebäudepolygonen. Im oberen Teil sind viele bebaute Flächen in Gelb ohne entsprechende Gebäude zu sehen.



Abbildung 27: Karte wie in Abb. 26. Die bebaute Fläche ist je nach Vollständigkeit des Gebäudebestandes in der jeweiligen Zelle eingefärbt. Grüne Zellen sind vollständig, rötliche unvollständig.

Gebäudedaten in OSM beschreiben in der Regel nicht die ingenieurtechnischen Eigenschaften, deren Kenntnis notwendig ist, um eine Gebäudeklassifizierung vornehmen zu können, damit im Falle eines Erdbebens die entsprechende Vulnerabilitätsfunktionen verwendet werden können, um die zu erwartenden Schäden zu berechnen. Daher werden in einem *near-realtime* Prozess alle Gebäude mit Exposure-Indikatoren angereichert, soweit diese aus OSM abgeleitet werden können. Dazu wird eine lokale Kopie der OSM-Datenbank betrieben, die jede Minute mit OSM abgeglichen wird und die Veränderungen in unsere Kopie einspielt. Hierzu wird das open-source Programm *imposm* verwendet, um die lokale Kopie aktuell zu halten. Die OSM-Datenbank nutzt ein optimiertes Format, das nur relevante Informationen aus OSM enthält, wie Landnutzungspolygone, Gebäudeattribute und sogenannte *points of interest*, also Orte mit besonderer Nutzung. Dies können Restaurants, Cafés, Krankenhäuser, Bahnhöfe usw. sein.

Parallel dazu wird eine weitere, minütlich aktualisierte, Kopie der OSM-Daten mit dem Tool *Overpass-API* erzeugt. Diese Kopie wird verwendet, um mit unserem Tool *Spearhead* (GeoForschungsZentrum Potsdam 2023a) geänderte, hinzugefügte oder gelöschte Gebäude sofort und einfach zu identifizieren. Deren IDs leitet *Spearhead* zur weiteren Verarbeitung an unsere *Rabotnik engine* (GeoForschungsZentrum Potsdam 2023b). Diese verwendet das *Advanced Message Queuing Protocol (AMQP)* und basiert auf *RabbitM* und *Celery*. *Rabotnik* ist eine robuste *Engine* zur parallelen Verarbeitung von Daten und wird durch Nachrichten gesteuert. Drei *Rabotnik*-Module wurden implementiert, die an unterschiedlichen Stellen der Prozesskette arbeiten. Das erste *Rabotnik*-Modul (*rabotnik-obm*) interpretiert die Gebäudeparameter und den Kontext, in dem das Gebäude sich befindet, und reichert dieses mit Exposureindikatoren an. Bei dieser Anreicherung wird primär die Nutzung des Gebäudes bestimmt, aber auch weitere Indikatoren, wie die Anzahl der Stockwerke oder die Höhe der Gebäude, aus der sich die Anzahl der Stockwerke ableiten lässt. Die Form des Daches und die geometrischen Parameter des Gebäudeumrisses gehören ebenfalls dazu. Aus der Fläche des Umrisses und der Anzahl der Stockwerke wird die Gesamtnutzfläche abgeleitet und daraus die zu erwartende Anzahl an Personen im Gebäude bestimmt. Ferner wird die Zelle bestimmt, in der sich der Gebäudezentrum befindet. Diese angereicherten Gebäudedaten stehen minütlich genau zur Exposure-Modellierung zur Verfügung. Sobald ein Gebäude prozessiert wurde, detektiert *Spearhead* dies in der entwickelten Gebäudedatenbank und leitet die Zellen-ID an das zweite *Rabotnik*-modul (*rabotnik-tiles*) weiter. Dieses berechnet die Vollständigkeit der Zelle erneut, um auch diesen Parameter kontinuierlich aktuell zu halten.

Um die Gebäudedaten und deren Verteilung zu einem gebäudegenauen Exposure-Modell zu verarbeiten, werden als dritte Datenquelle die aggregierten Exposure-Modelle genutzt, welche die wesentlichen ingenieurtechnischen Informationen enthalten. Diese Modelle beschreiben die Anzahl und Verteilung von definierten Gebäudeklassen pro administrativer Einheit. Deren Größe variiert je nach Modell und reicht von ganzen Staaten bis zu Stadtteilen oder noch kleineren Einheiten. Mit unserem Tool *Initializer* (GeoForschungsZentrum Potsdam 2023c) werden diese Gebäudeklassenbeschreibungen innerhalb einer administrativen Einheit auf alle Zellen, die zu dieser Einheit gehören, verteilt. Dazu werden die Gebäudeklassen anteilig der bebauten Fläche einer Zelle im Vergleich zur gesamten bebauten Fläche der administrativen Einheit dieser Zelle zugeordnet. Durch diesen Schritt wird die geographische Auflösung der aggregierten Exposure-Modelle erhöht, allerdings enthält jede Zelle alle Gebäudeklassen in ihrem durch das Modell vorgegebenen Verhältnis (Abb. 28), womit lediglich die Größe der bebauten Fläche pro Zelle den Verteilungsschlüssel darstellt.

Die gebäudegenaue Verteilung wird im folgenden Schritt realisiert, in dem die Gebäude in unserer Datenbank mit den jeweiligen Zellen verbunden werden. Dazu werden pro Zelle alle Gebäude in der Datenbank selektiert, die in dieser Zelle liegen. Pro Gebäude werden die möglichen Gebäudeklassen, die in der jeweiligen Zelle nach dem aggregierten Exposure-Modell vorhanden sein können, verglichen und diejenigen ausgewählt, die kompatibel sind mit den bekannten Eigenschaften des Gebäudes. Beispielsweise werden bei einem Wohngebäude mit fünf Stockwerken alle Gebäudeklassen ignoriert, die entweder keine Wohngebäude beschreiben (also die Klassen, die Geschäfts- und Industriegebäude beschreiben), oder eine andere Stockwerkanzahl betreffen. Die übrig gebliebenen Klassen und deren relative Verteilung in der jeweiligen Zelle, werden zu 1 normalisiert, um genau ein Gebäude zu beschreiben und dessen Wahrscheinlichkeiten einer bestimmten kompatiblen Gebäudeklasse zuzuweisen (Abb. 29). Gleichzeitig wird die Anzahl der verschiedenen Gebäudeklassen in dieser Zelle anteilig um dieses eine Gebäude verringert. Am Ende dieses Prozesses besteht jede Zelle aus allen ihr zugeordneten Gebäuden (mitsamt der Beschreibung der möglichen Gebäudeklassen und ihrer Wahrscheinlichkeiten) und den „Restgebäuden“, die nach der initialen Zuordnung auf Basis des aggregierten Modells übriggeblieben sind. Falls die Zelle als komplett angesehen werden kann, wird dieser Rest gelöscht, da die Zelle bereits alle Gebäude enthält und diese detailliert beschrieben sind. Im Falle, dass die Zelle nicht komplett ist, wird der Rest beibehalten, da davon auszugehen ist, dass nicht alle Gebäude einzeln erfasst sind. Sollte der Rest allerdings negativ sein, weil mehr Gebäude in dieser Zelle sind, als durch das aggregierte Modell angenommen werden konnte, wird dieser Rest ebenfalls gelöscht.

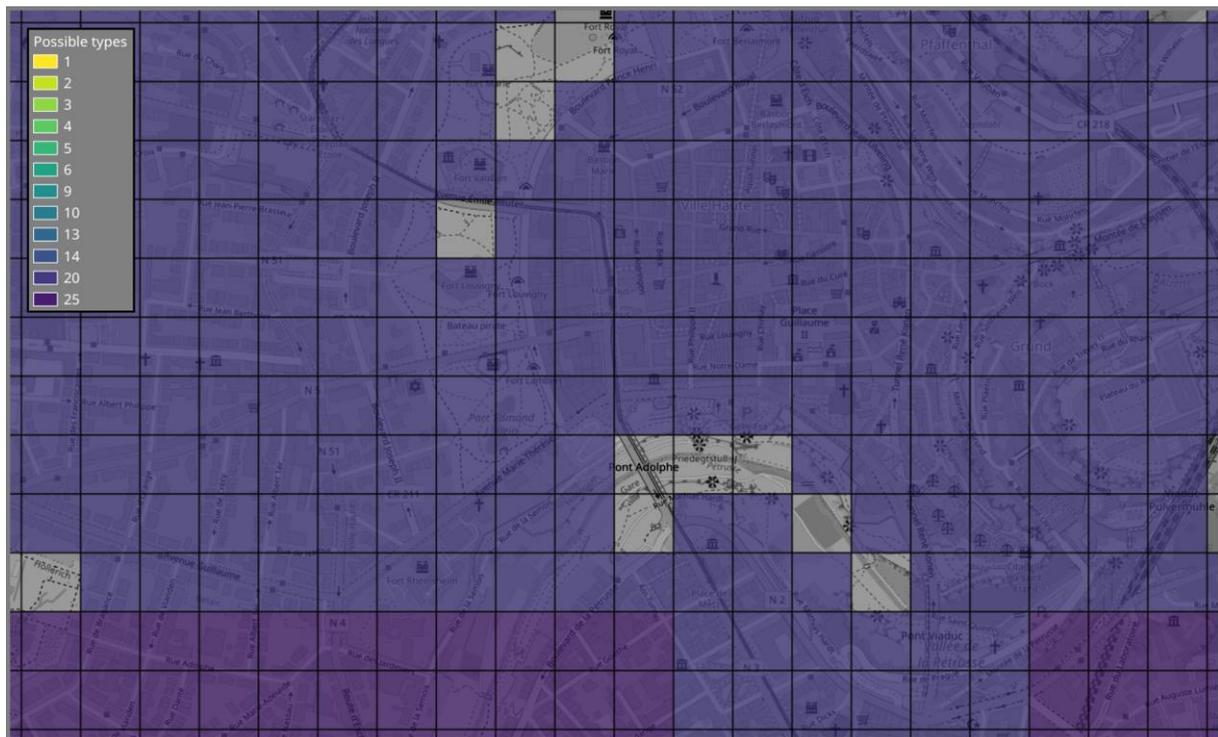
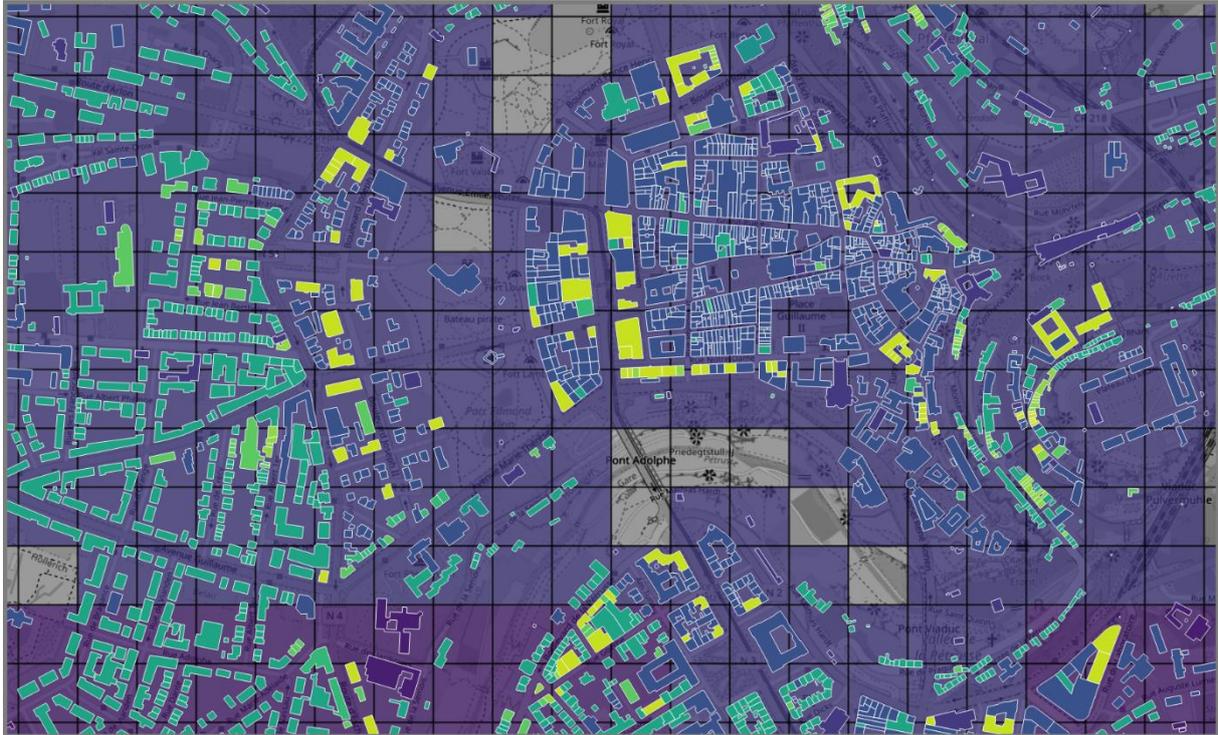


Abbildung 28: Anzahl der möglichen Gebäudetypen pro Zelle entsprechend dem aggregierten Modell für Luxemburg.

Dieser letzte Schritt der Exposure-Modellierung wird durch das dritte und letzte *Rabotnik* Modul (*rabotnik-obm*) oder für einmalige große Berechnungen mit unserem Tool *Finalizer* (GeoForschungsZentrum Potsdam 2023d) realisiert. Insgesamt ergibt sich, dass sobald ein Gebäude in OSM hinzugefügt oder geändert wird, dieses im ersten Modul mit Exposure-Indikatoren angereichert wird. Das erste Modul bestimmt die ID der Zelle, in der sich das Gebäude

befindet und gibt diese an das zweite Modul weiter, in dem die Vollständigkeit der Zelle bestimmt und die ID an das dritte Modul weitergegeben wird. In diesem werden die ingenieurtechnischen Gebäudeklassen mit den Gebäuden in dieser Zelle zusammengeführt und das



finale gebäudegenaue Exposure-Modell für diese eine Zelle erstellt.

Abbildung 29: Karte wie in Abb. 30. Zusätzlich werden die Gebäude, eingefärbt nach Anzahl möglicher Typen, angezeigt.

Die erhöhte räumliche Auflösung dieses Modells gegenüber klassischen Exposure-Modellen erfordert die Ergreifung zusätzlicher Maßnahmen, um persönliche Daten im Falle einer öffentlichen Bereitstellung der Daten zu schützen. Zellen, in denen nur ein (oder sehr wenige) Gebäude vorhanden sind, erlauben es dem Nutzer potentiell detaillierte Angaben zu diesem Gebäude auszulesen. Aufgrund der Tatsache, dass unser Modell eine probabilistische Beschreibung jedes Gebäudes liefert und diese fehlerbehaftet sein kann, können derartige Daten nicht öffentlich gemacht werden. Um dennoch nützliche Daten ausliefern zu können, wurde eine Methode implementiert, die die Gebäudedaten pro Zelle aggregiert und, sollten zu wenige Gebäude zu einer Zelle gehören, diese rekursiv immer weiter zu größeren Zellen aggregiert, bis sich eine einstellbare Minimalanzahl an Gebäuden in den neuen Zellen befindet (Abb. 30).

Das entwickelte System ist hochdynamisch. Sobald ein Gebäude in OSM verändert wird, dauert es etwa fünf Minuten, bis OSM diese Veränderung über die minütlichen Updates zur Verfügung stellt. Diese werden sofort von unserem System konsumiert und das Gebäude wird mit den Indikatoren angereichert und die Gebäudedatenbank entsprechend aktualisiert. Daraufhin wird unmittelbar die Vollständigkeitsbestimmung der Zelle aktualisiert, in der sich das Gebäude befindet, und die Exposure-Daten für diese Zelle neu berechnet. Der gesamte Vorgang nach dem Einlesen der Updates von OSM dauert ca. zwei Minuten, womit das Modell in weniger als zehn Minuten nach dem Hinzufügen oder Ändern eines Gebäudes in OSM dieses in die Exposure-Daten integriert (Abb. 31). Dies ermöglicht es, neue Gebäudedaten, die durch Crowdsourcing (Abschnitt 2.6.1), oder aus Daten aus Überflügen (Abschnitt 2.2) gewonnen werden, umgehend in das Exposure-Modell zu übertragen.

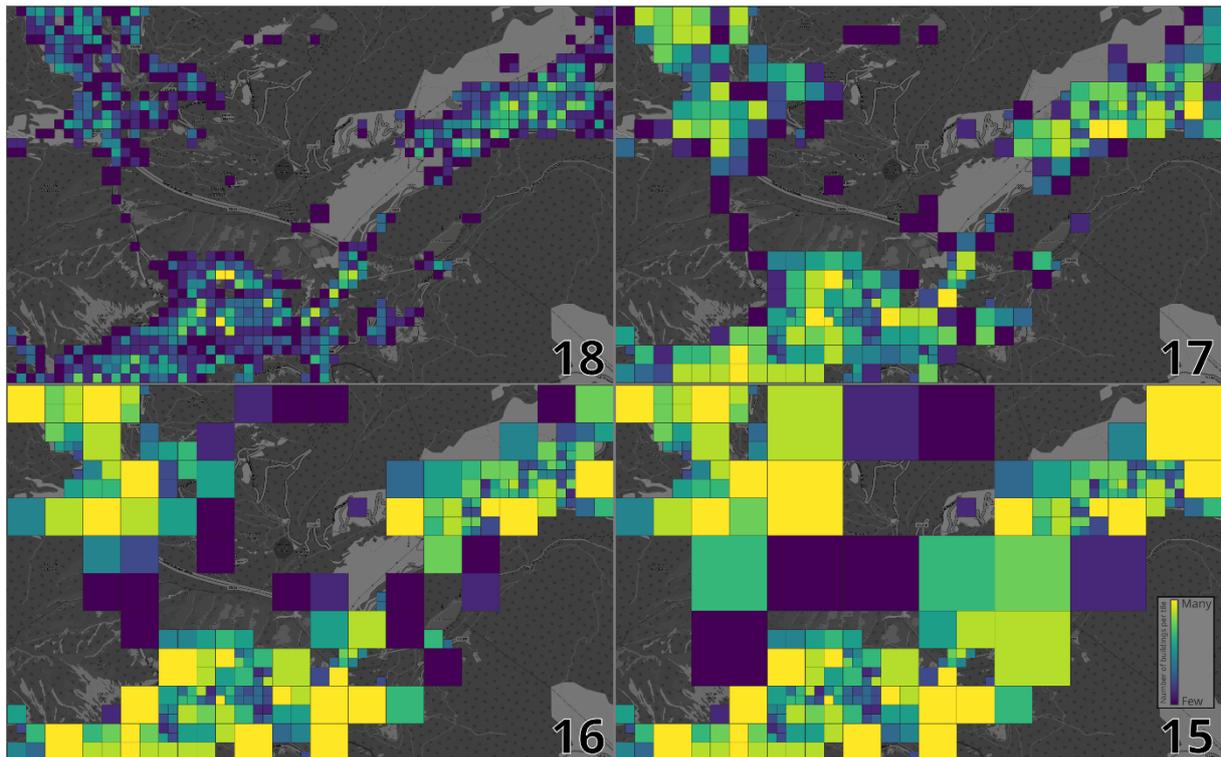


Abbildung 30: Darstellung der Aggregation des Exposure-Modells zum Schutz persönlicher Informationen. Die Farben zeigen die Anzahl Gebäude pro Zelle, je heller die Farbe, desto mehr Gebäude. Unter der Annahme, dass violette Zellen zu wenige Gebäude enthalten, werden diese zu den nächstgrößeren Zellen aggregiert, bis nur noch wenige oder keine Zellen mit sehr wenigen Gebäuden vorhanden sind. Gezeigt sind hier das Ausgangsmodell auf zoom level 18 (oben links) und die nächsten drei Aggregationsstufen der zoom level 17, 16, und 15.

Gleichzeitig ist das System so ausgelegt, dass es über mehrere Abstraktionsschichten verfügt, jeweils für die Taxonomie-Beschreibungen, die Exposure-Daten allgemein und die zugrundeliegende Datenbanksoftware. Exposure-Modelle können daher für kleinere Gebiete, oder einzelne Länder lokal (auf normalen Desktopcomputern oder Laptops) in dateibasierten SpatiaLite Datenbanken oder bei globalen Modellen und kurzen Updatezyklen auf serverbasierten PostGIS Datenbanken erzeugt werden.

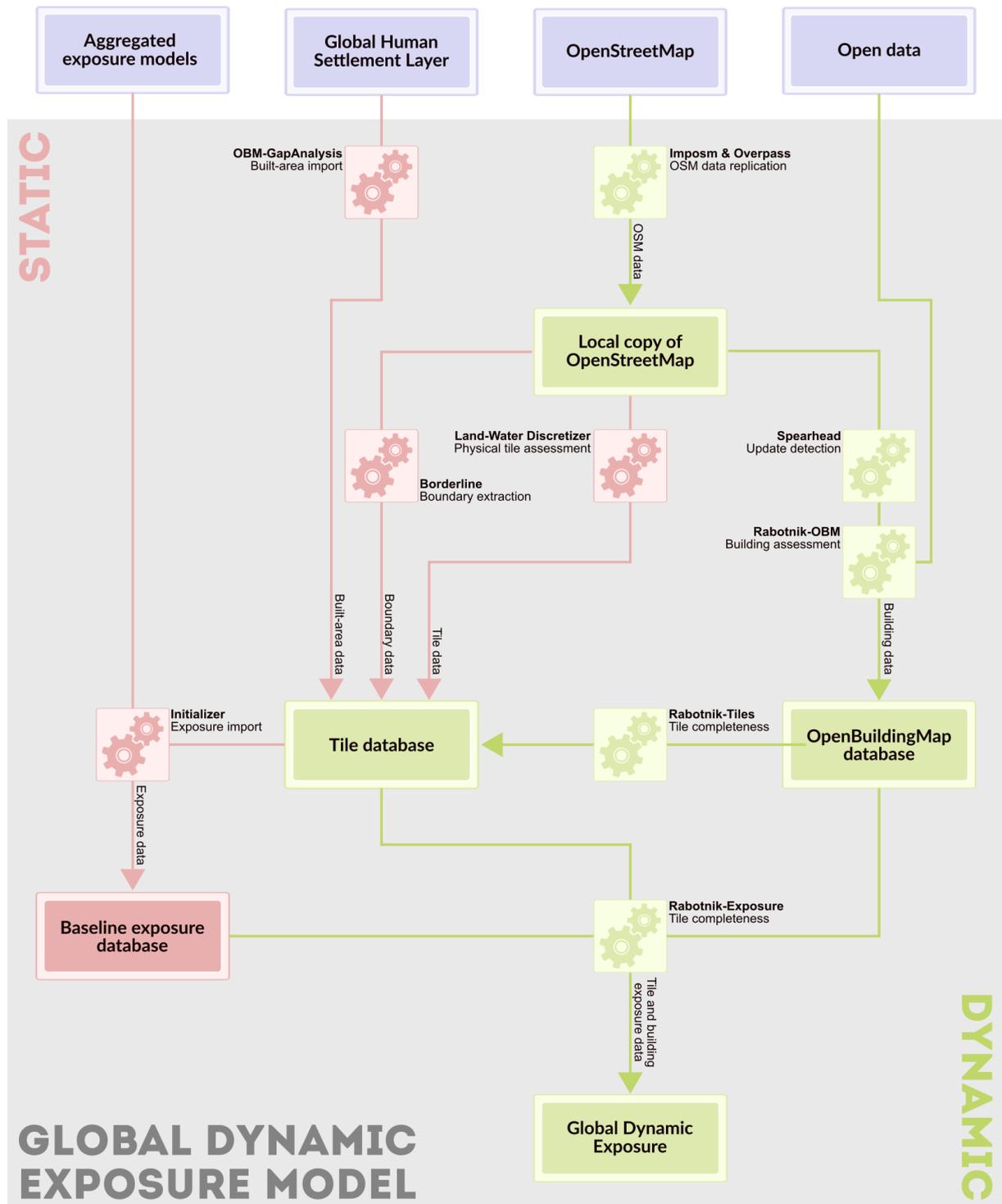


Abbildung 31: Schema des Global Dynamic Exposure-Modells. Die rot dargestellten Elemente sind statisch und werden einmal pro Exposure-Generierung prozessiert. Die in grün dargestellten Elemente werden verwendet, um jedes veränderte Gebäude zu prozessieren.

#### 2.4.1.1 Offene aggregierte Exposure-Modelle

Für Europa und Taiwan existieren offene aggregierte Exposure-Modelle, die als Quelle für ingenieurtechnische Informationen verwendet werden können. Das einzige uns bekannte Modell für Japan ist leider nicht offen und konnte daher nicht im Projekt verwendet werden. Daher wurde ein japanisches aggregiertes Exposure-Modell im Rahmen des Projekts entwickelt. Dieses Modell wird vollständig aus offenen Gebäudedaten (z. B. aus der Volkszählung) abgeleitet und führt zu einem offenen Inventar einheitlich definierter Gebäudeparameter, die für Risikobewertungen zur Verfügung stehen. Die räumliche Verteilung der Gebäude wird dabei für verschiedene regionale Ebenen Japans (*shi* (市), *ku* (区), *machi* (町) oder *mura* (村)) durchgeführt. Die japanische Land- und Wohnungsdatenbank ESTAT enthält Informationen über Gebäudetypen (Wohnungen, Einfamilienhäuser, Mietshäuser) die Anzahl der Gebäude, die Art der Wohnung (Nutzungszweck), die Anzahl und Größe der Gebäude, die Art der Besitzverhältnisse (Häuser im Eigentum, vergebene Häuser und vermietete Häuser), die Art des Baumaterials (Holz und nicht Holz), das Baujahr, die Anzahl der Stockwerke, die Anzahl der Personen pro Wohnung, und die Größe der Wohnung (Fläche in Quadratmetern). Nach Auswertung dieser Informationen wurden verschiedene Kombinationen von Gebäudetyp, Baumaterial, Baujahr und Anzahl der Stockwerke auf der Grundlage der GEM-Taxonomie Gebäudeklassen zugeordnet. Darüber hinaus wurden die für die Schadensbewertung erforderlichen Gebäudeparameter (z. B. durchschnittliche Geschossfläche einer Wohnung, Wiederbeschaffungskosten pro Flächeneinheit einer Wohnung, Anzahl der Personen pro Wohnung) der ermittelten Gebäudeklasse auf Gemeindeebene zugeordnet und in einer öffentlich zugänglichen Datenbank gespeichert.

Die Qualität des Modells wird in hohem Maße durch die Verfügbarkeit von Gebäudeparametern und deren Erhebungsqualität in den Volkszählungsdaten beeinflusst. Den Gewerbe- und Industriedaten aus der Volkszählung mangelt es an Informationen über die Anzahl der Stockwerke, so dass sie für unser Modell aus anderen Quellen abgeleitet werden müssen. Außerdem sind die Informationen über die Bezirke, die das Modell definieren, sehr komplex, da Japan in mehrere Verwaltungseinheiten auf derselben Verwaltungsebene unterteilt ist. Solche Besonderheiten und Komplexitäten schränken die Flexibilität und Vielseitigkeit des Modells ein, auch aufgrund der großen Unsicherheit der Erhebungsmethoden des Modells. Das Modell kann in seiner Auflösung nach oben oder unten skaliert werden.

Trotz dieser Einschränkungen liefert das Modell eine sehr klare Momentaufnahme der Verteilung der regionalen Gebäudeklassen und ihrer möglichen Anzahl (Abb. 32). Es stellt auch einen offenen Katalog von Regeln für die Zuordnung japanischer Gebäudeattribute zu einer auf der GEM-Taxonomie basierenden Gebäudeklasse dar und schafft damit die Möglichkeit für die wissenschaftliche und nicht-wissenschaftliche Gemeinschaft, an der Bewertung mitzuarbeiten.

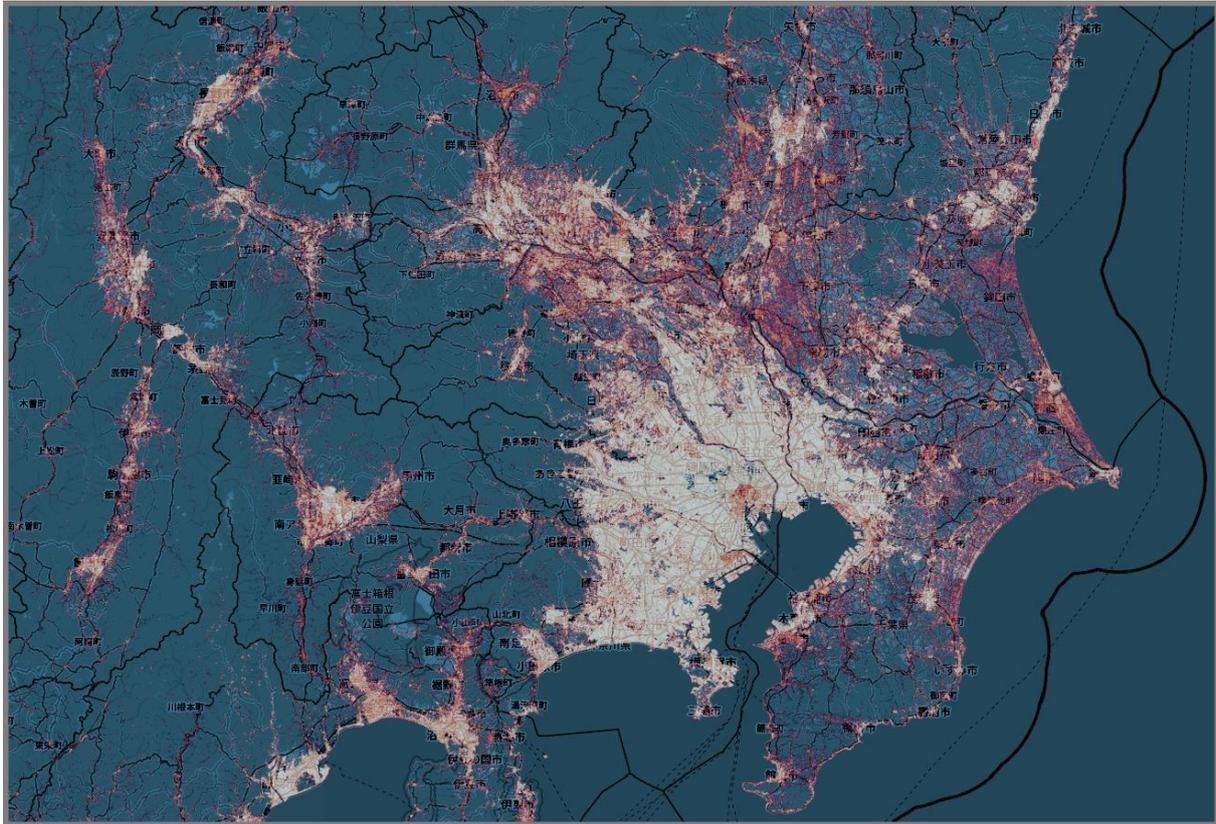


Abbildung 32: Exposure-Modell für Japan. Dargestellt ist die Anzahl der Gebäude pro zoom level 18 Zelle für die Kanto-Region mit Tokio, dem größten Ballungsraum der Welt, in der Mitte. Je heller die Farbe, desto mehr Gebäude befinden sich in der Zelle.

#### 2.4.2 Initiale Schadensabschätzung

Das Exposure-Modell wird im LOKI-System (Abschnitt 2.1) für die Schadensabschätzung verwendet, sobald sich ein Erdbeben ereignet. Basierend auf dieser initialen Abschätzung kann eine Missionsplanung (Abschnitt 2.3) initiiert werden. Für diese Abschätzungen wurde ein neuer Schadensrechner, der *loss-calculator* (GeoForschungsZentrum Potsdam 2023e), implementiert, da bestehende Rechner nicht in der Lage sind, Schäden direkt für einzelne Gebäude zu bestimmen. Der *loss-calculator* berechnet die zu erwartenden Schäden eines Erdbebens auf der Grundlage (1) einer Intensitätsverteilung der Bodenbewegungen, (2) des Exposure-Modells und (3) der Fragilitätsfunktionen für die im Exposure-Modell vorhandenen Gebäudetypen. Für menschliche und ökonomische Verluste werden die letzteren durch Vulnerabilitätsfunktionen ersetzt. Für jedes Gebäude bestimmt der *loss-calculator* die Intensität der Bodenbewegung und wendet für alle möglichen Gebäudetypen und deren Wahrscheinlichkeiten die entsprechende Fragilitäts- oder Vulnerabilitätsfunktion (Martins et al. 2021) an. Diese geben die Wahrscheinlichkeiten an, einen bestimmten Schadensgrad zu erfahren. Schließlich aggregiert der *loss-calculator* alle diese Wahrscheinlichkeiten über die verschiedenen möglichen Gebäudetypen und berechnet die Gesamtwahrscheinlichkeit, die jeweiligen Schadensgrade zu erfahren (Abb. 33). Analog ist das Verfahren, um die Anzahl an Opfern und den geldwerten Schaden zu berechnen. Aufgrund der vorher beschriebenen Abstraktionsschichten kann der *loss-calculator* auch für aufeinanderfolgende Schadensereignisse verwendet werden, indem der Schaden des ersten Ereignisses als Teil der Gebäudetypenbeschreibung an die Berechnung des nächsten Ereignisses weitergereicht wird.

### 2.4.3 Visualisierung aktueller Lageinformation

Das Ergebnis der Schadens- oder Verlustberechnungen wird Anwender:innen als dateibasierte SpatiaLite-Datenbank ausgeliefert, die schnelle Visualisierungen leicht macht. Die Datenbank enthält bereits wichtige vorbereitete Datenansichten (*database views*), welche die entscheidenden Ergebnisse durch einfaches *drag 'n drop* in einem Geographischen Informationssystem (GIS), wie QGIS, anzeigen. Der *loss-calculator* kann sowohl mit den klassischen aggregierten Exposure-Modellen von GEM als auch mit unserem neuen gebäudegenauen Modell verwendet werden. Bei den Fragilitäts- und Vulnerabilitätsfunktionen unterstützt der *loss-calculator* alle gängigen Typen (kontinuierliche und diskrete) von GEM.

Um die Nutzung weiter zu vereinfachen, wurde ein *Application Programming Interface* (API) und ein damit kommunizierendes QGIS Plug-in entwickelt. Damit kann direkt in QGIS eine Schadensberechnung durchgeführt und auf eine Installation der Software und Datenbanken verzichtet werden. Nutzer:innen können nach einem Erdbeben die gewünschte Region auswählen, für die das Plugin mit der *ShakeMAPI* (GeoForschungsZentrum Potsdam 2023f) die Intensitätsverteilung eines Erdbebens (auf der Grundlage der Erdbebenparameter) und mit dieser die Schäden und Verluste berechnet. Alle Berechnungen werden auf dem Server des GFZ durchgeführt und die Resultate den Anwender:innen als SpatiaLite Datenbank zur Verfügung gestellt. Die API erweitert zudem die Datenbank, um benötigte Felder für die Missionsplanung bereitzustellen.

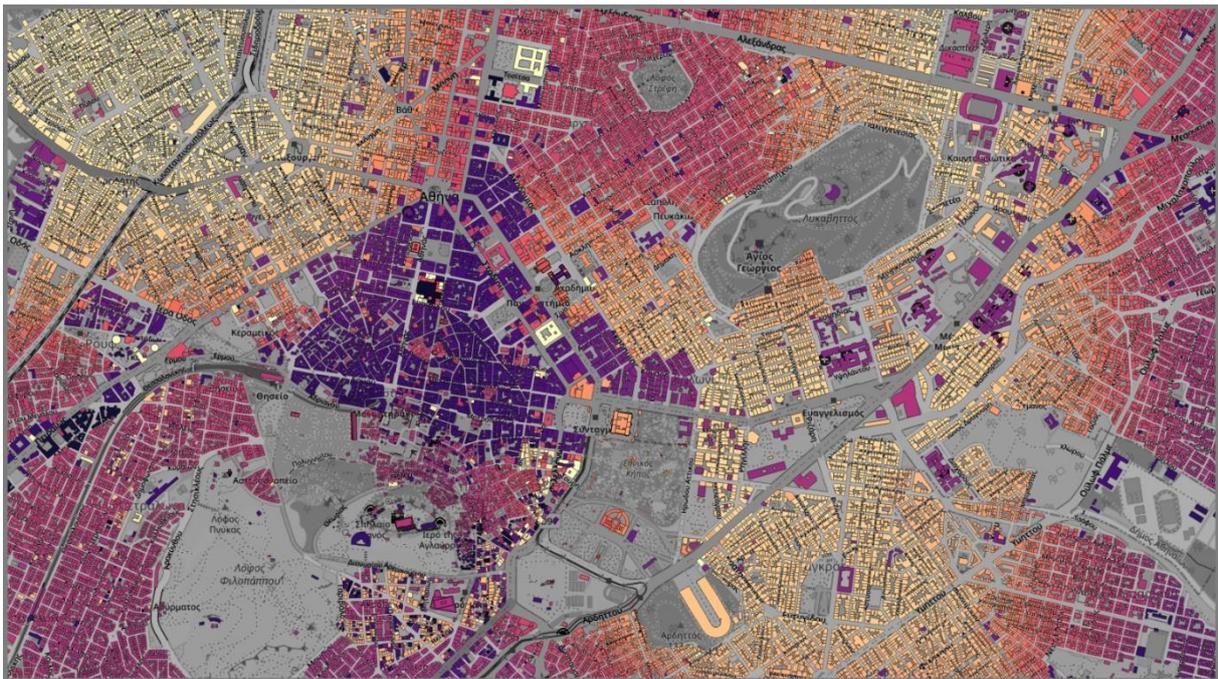


Abbildung 33: Schadensberechnung für ein Erdbeben in der Nähe von Athen, Griechenland. Die Wahrscheinlichkeit leichter Schäden pro Gebäude ist in Farben dargestellt. Je heller die Farbe, desto höher die Wahrscheinlichkeit. Sowohl die lokalen Schwankungen der Bodenbewegungsintensität als auch die jeweiligen Gebäudetypen beeinflussen den zu erwartenden Schadensgrad.

## 2.5 AP 5 – Schadensklassifikation (KIT)

### 2.5.1 Schadenskatalog zur Klassifizierung von Erdbebenschäden an Gebäuden

Nach einem Erdbeben ist die zügige Klassifizierung der Schäden an Gebäuden und Infrastrukturen sowie die Beurteilung der Standsicherheit von essentieller Bedeutung. Um eine objektive Klassifikation der Erdbebenschäden zu ermöglichen, dient der entwickelte Schadenskatalog als Basis für die automatisierte Schadensklassifikation (Abschnitt 2.7) und für das auf Crowdsourcing basierende Micro-Mapping (Abschnitt 2.6). Zur einheitlichen Beurteilung wurden für die Materialien Stahlbeton, Mauerwerk, Holz und Stahl jeweils Schadenskataloge für die Klassifizierung in fünf Schadensgrade entwickelt, die sowohl materialspezifische als auch globale Merkmale enthalten. Diese umfassen Beschreibungen, konkrete Grenzwerte und Beispielbilder, sodass sie sowohl für Algorithmen als auch für die menschliche visuelle Beurteilung geeignet sind. Bei geringen Schadensgraden sind maximale Rissbreiten verschiedener Rissarten entscheidend zur eindeutigen Abgrenzung der Schadensgrade. Für hohe Schadensgrade ist das globale Tragverhalten des Gebäudes maßgebend.

Hinsichtlich der Schadensklassifizierung ist eine Unterscheidung der Bauwerksmaterialien von Bedeutung, da ein identischer Schaden je nach Material eine unterschiedliche Beeinträchtigung bewirken und damit einem abweichenden Schadensgrad zugeordnet werden kann. Weitere Merkmale einer Gebäudeklasse, wie das Tragsystem oder die Anzahl der Stockwerke, sind für eine Klassifizierung bereits eingetretener Schäden weniger relevant, da der Ist-Zustand beurteilt wird. Der Fokus hier liegt auf Gebäuden in Stahlbeton- und Mauerwerksbauweise, da sie einen Großteil der europäischen Gebäudeinfrastruktur ausmachen und häufig starke Beschädigungen erfahren. Die Schadenskataloge für Mauerwerk und Stahlbeton sind in Kohns et al. (2022a) und Kohns & Stempniewski (2021) beschrieben.

Die vorgeschlagenen Schadenskataloge basieren auf verschiedenartigen Informationen zur Bewertung von Schadensmerkmalen. Dazu zählen beispielsweise Schadensskalen, Beurteilungsformblätter, Schadensdokumentationen, Richtlinien und experimentelle Untersuchungen (vgl. Kohns et al. 2022a). Das Ziel ist es, eine möglichst allgemeingültige, übersichtliche, umfassende und eindeutige Darstellung für Gebäude aus Stahlbeton und Mauerwerk zu entwickeln. Für eine differenzierte Klassifizierung werden fünf konkrete Schadensgrade gewählt. Die in der Literatur enthaltenen Informationen variieren stark und sind teilweise hinsichtlich fünf Schadensgraden nicht ausreichend ausführlich und konkret, um eine eindeutige Abgrenzung der Schadensgrade vornehmen zu können. Daher wurden die Schadensmerkmale der vorhandenen Schadensskalen den fünf Schadensgraden neu zugeordnet und erweitert. Die Spannen der Kriterien wurden so evaluiert, dass sie weder zu konservativ noch zu unsicher sind. Für die geringen Schadensgrade sind konkrete Rissbreiten zur Abgrenzung erforderlich. Die Rissbreiten der Literatur wurden unter Berücksichtigung des Hintergrundes der Bildquellen und der zugehörigen Schadensklassen ausgewertet und überwiegende oder mittlere Werte der Bandbreiten gewählt. Zusätzlich sind nicht alle vorhandenen Informationen für die automatisierte Beurteilung anhand von UAV-Aufnahmen geeignet, sodass hier Anpassungen für die Eindeutigkeit vorgenommen wurden.

Der entwickelte und vorgeschlagene Schadenskatalog unterscheidet für eine detaillierte Klassifizierung fünf Schadensgrade: (1) Leichter Schaden (Slight damage), (2) Mäßiger Schaden (Moderate damage), (3) Starker Schaden (Heavy damage), (4) Sehr starker Schaden (Extreme damage) und (5) Zerstörung (Destruction). Zu diesen Schadensgraden werden sowohl globale als auch materialspezifische Schadensmuster beschrieben. Der Aufbau des Schadenskatalogs ist für die geringen Schadensgrade (1)-(3) maßgeblich durch materialspezifische Merkmale gesteuert, während für die hohen Schadensgrade (4)-(5) das globale Verhalten des

gesamten Gebäudes bestimmend ist. Im Schadenskatalog sind Beschreibungen, Grenzwerte, schematische Abbildungen und Beispielbilder vorangegangener Erdbeben enthalten, um eine möglichst objektive und eindeutige Klassifizierung zu ermöglichen.

Im Folgenden werden die wichtigsten im Schadenskatalog enthaltenen Schadensmerkmale auszugsweise dargestellt, weitere Informationen und Beispielfotos finden sich in Kohns et al. (2022a). Für die geringen Schadensgrade (1)-(3) wird zwischen tragenden und nichttragenden Bauteilen unterschieden. Für Stahlbeton werden die tragenden Bauteile in Balken, Stützen, Schubwände, Knotenbereiche und Decken unterteilt. Bei den hier betrachteten Mauerwerksgebäuden sind die tragenden und aussteifenden Elemente im Wesentlichen die Wände. Die globale Beurteilung des Gebäudes enthält allgemeingültige Merkmale, Schäden an Dächern und Schornsteinen sowie Grenzen der Schiefstellung. Sehr geringe Schäden an nichttragenden Bauteilen und normativ zulässige Risse in tragenden Bauteilen werden nicht als Schaden berücksichtigt.

#### *(1) Leichter Schaden*

Auf globaler Ebene bedeutet ein leichter Schaden, dass keine Beeinträchtigung der Tragfähigkeit vorliegt und kein standsicherheitsrelevanter bzw. tragfähigkeitsmindernder Schaden an tragenden Elementen eingetreten ist. Ein leichter Schaden an nichttragenden Elementen ist möglich, aber es besteht keine Gefährdung der Menschen durch herabfallende Bauteile. Die Dachkonstruktion ist intakt und auf weniger als 10 % der Dachfläche kann es zu losen Dachziegeln kommen. Für die Grenzwerte der Schiefstellung des Gebäudes bzw. der Geschosse und Bauteile werden 0,2 % für Stahlbeton und 0,1 % für Mauerwerk empfohlen.

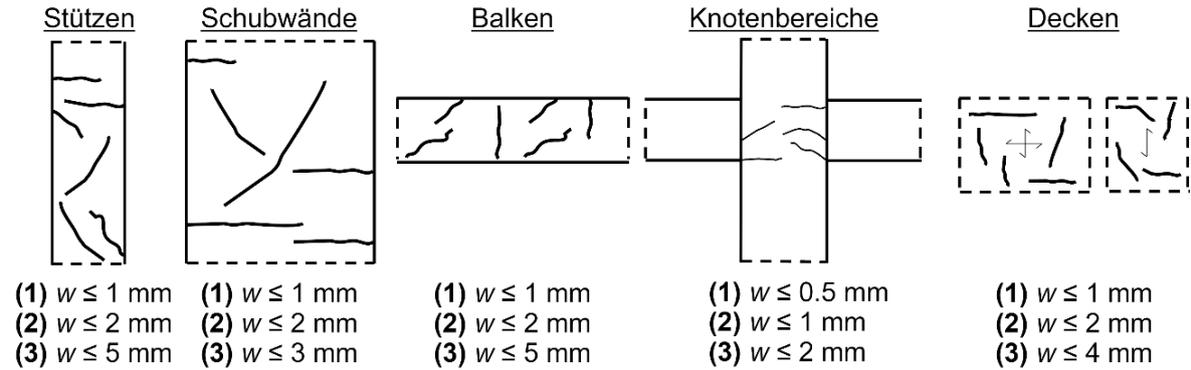
Die materialspezifischen Schadensmerkmale für Stahlbeton sind in Abb. 34 für die tragenden und nichttragenden Bauteile beschrieben und schematisch dargestellt. Ein wichtiger Aspekt sind die verschiedenen Rissarten und -verläufe mit den Rissbreiten  $w$  in den unterschiedlichen Bauteilen ((1) für Leichter Schaden).

In Abb. 35 sind die Schadensmerkmale für tragende bzw. aussteifende und nichttragende Bauteile von Mauerwerksgebäuden enthalten. Die Rissart *a* beschreibt die horizontalen und vertikalen Risse ausgehend von Tür- und Fensteröffnungen und die Rissbreite beträgt bis zu 1 mm. Diese Rissbreite ist ebenfalls gültig für die Rissart *b* - diagonale Risse auf den Wandflächen -, die Rissart *c* - Formung von Keilen an Wandecken - und die Rissart *d* - Risse an den Verbindungsstellen von orthogonalen Elementen, wie Wand-Wand- oder Wand-Decken-Verbindungen.

**Stahlbeton – Schadensgrade 1-3**

**Tragende Bauteile**

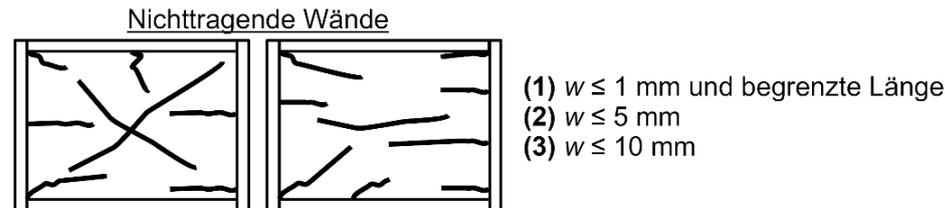
- Rissbreiten  $w$  und repräsentative Rissbilder



- (1) Geringfügige, lokale Betonabplatzungen
  - (2) / (3) Großflächige Betonabplatzungen
  - (2) Lokal freigelegte Bewehrung
  - (3) Freigelegte und beschädigte Bewehrung
  - (3) Separation horizontaler von vertikalen Bauteilen
- (1) Leichter Schaden**  
**(2) Mäßiger Schaden**  
**(3) Starker Schaden**

**Nichttragende Bauteile**

- Rissbreiten  $w$



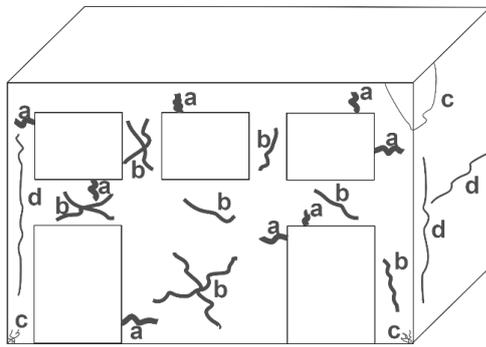
- (1) Leichte Separation von der Tragstruktur möglich
- (1) Geringfügige, lokale Abplatzungen
- (2) Separation von der Tragstruktur  $\leq 2$  mm
- (2) Großflächige Abplatzungen
- (2) / (3) Druckversagen lokal in den Eckbereichen
- (3) Separation von der Tragstruktur  $\leq 2$  mm
- (3) Druckversagen in den Eckbereichen
- (3) Teilversagen möglich

Abbildung 34: Schadensmerkmale des leichten (1), mäßigen (2) und starken (3) Schadens für tragende und nichttragende Stahlbetonbauteile (Kohns et al. 2022a).

## Mauerwerk – Schadensgrade 1-3

### Tragende Bauteile

- Rissbreiten  $w$  und repräsentative Rissbilder



- a: (1)  $w \leq 1$  mm  
 (2)  $w \leq 10$  mm  
 (3)  $w \leq 15$  mm
- b: (1)  $w \leq 1$  mm (1) **Leichter Schaden**  
 (2)  $w \leq 5$  mm  
 (3)  $w \leq 10$  mm (2) **Mäßiger Schaden**
- c: (1)  $w < 1$  mm  
 (2)  $w \leq 1$  mm (3) **Starker Schaden**  
 (3)  $w \leq 2$  mm
- d: (1)  $w \leq 1$  mm  
 (2)  $w \leq 2$  mm  
 (3)  $w \leq 5$  mm

- (1) Lokales Herabfallen von kleinen Teilen losen Gips/Putzes
- (2) Lokale Abplatzungen
- (2)/(3) Herabfallen von großen Teilen losen Gips/Putzes
- (3) großflächige Abplatzungen
- (3) Druckversagen der Ziegel an den Wandecken
- (3) Lokale Abplatzungen / Versagen der Außenschale bei zweischaligem Mauerwerk

### Nichttragende Bauteile

- (1) Risse bis max. 2 mm
- (1) Lokale Abplatzungen auf begrenzter Fläche
- (2) Risse bis max. 10 mm
- (2) / (3) Großflächige Abplatzungen
- (2) Schäden an nichttragenden Elementen
- (3) Risse bis max. 15 mm
- (3) Lokales Materialversagen
- (3) Teileinsturz möglich

Abbildung 35: Schadensmerkmale des leichten (1),mäßigen (2) und starken (3) Schadens für tragende und nichttragende Mauerwerksbauteile (Kohns et al. 2022a).

#### (2) Mäßiger Schaden

Global betrachtet äußert sich ein mäßiger Schaden in einer leichten Beeinträchtigung der Tragfähigkeit durch Schäden an tragenden oder aussteifenden Elementen. Eine Gefährdung durch herabfallende nichttragende Bauteile ist möglich. Es können Verschiebungen der Hauptträger von bis zu 5 mm innerhalb der Dachkonstruktion auftreten und die Nebenträger lokal beschädigt sein. Das Ablösen, Gleiten und Herabfallen von Ziegeln beschränkt sich auf weniger als 20 % der Dachfläche, und Schornsteine weisen Risse und Schäden auf. Die vorgeschlagene Schiefstellung liegt im Bereich von bis zu 0,6 % für Stahlbeton und 0,3 % für Mauerwerk. Die materialspezifischen Merkmale für einen mäßigen Schaden an Stahlbetongebäuden sind in Abb. 34 mit (2) und an Mauerwerksgebäuden in Abb. 35 mit (2) enthalten.

#### (3) Starker Schaden

Bei einem starken Schaden liegt eine erhebliche Beeinträchtigung der Tragfähigkeit des Gebäudes vor, allerdings besteht noch keine sichtbare Gefahr des Teileinsturzes der Tragstruktur. An nichttragenden Elementen treten starke Schäden bis zum Teilversagen ein, sodass die Gefährdung der Menschen durch herabfallende Bauteile deutlich ausgeprägt ist. Zudem sind Schiefstellungen und Lotabweichungen deutlich sichtbar und liegen im Bereich von 0,5 % – 1,0 %. Verschiebungen der Hauptträger innerhalb der Dachkonstruktion betragen bis zu 20

mm und die Nebenträger sind stark beschädigt. Auf großen Teilen der Dachfläche fehlen die Ziegel und die Rissbildung in den Schornsteinen reicht bis zum Ein- bzw. Absturz. Für den materialbezogenen starken Schaden spielen weiterhin die Rissbreiten eine Rolle, die für Stahlbeton in Abb. 34 (3) und für Mauerwerk in Abb. 35 (3) dargestellt sind.

#### (4) Sehr starker Schaden

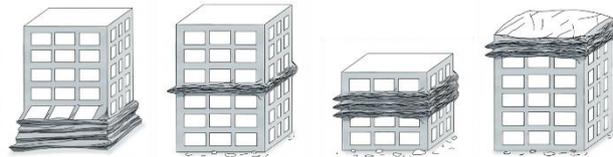
Hinsichtlich sehr starker Schäden spielt das Gesamtgebäude eine große Rolle. Dennoch sind weiterhin materialspezifische Schadensmuster zu berücksichtigen, wobei aufgrund der starken Ausprägung keine Unterscheidung mehr in tragende und nichttragende Bauteile erforderlich ist. Die globalen Schadensmuster sind in Abb. 36 visualisiert. Bei diesem Schadensgrad sind ein oder mehrere Geschosse des Gebäudes betroffen.

### Globale Schadensmuster – Schadensgrad 4

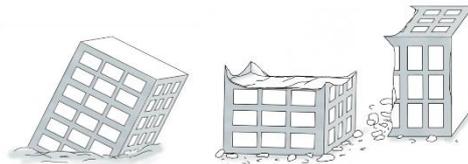
- Einsturz von einem oder mehreren oberen Geschosse → schiefe Ebene oder Schutthaufen



- „pancake collapse“: Einsturz von einem oder mehreren Geschossen



- Schiefstellung des gesamten Gebäudes
- Umkippen des oberen Teils des Gebäudes



- Schiefstellung von weichen Geschossen („soft-storey“)
- Zusammenstoß und Zerstörung benachbarter Gebäude(-teile) („pounding“)

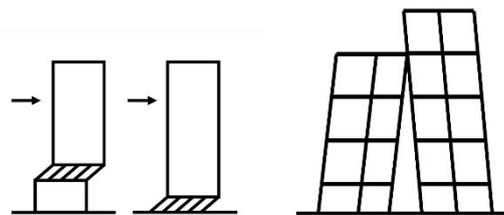


Abbildung 36: Globale Schadensmerkmale des sehr starken Schadens (Schadensgrad 4, Kohns et al. 2022a).

Zu den materialspezifischen Schadensmerkmalen für sehr starke Schäden an Stahlbetongebäuden zählen der Zerfall des Betonkerns, das Knicken und der Bruch der Bewehrung und allgemein das Versagen von tragenden Elementen und Verbindungen bis hin zum Teileinsturz. Zusätzlich treten starke bleibende Verschiebungen (größer als bei (3)) und Lotabweichungen sowie Trennungen von tragenden oder aussteifenden Elementen auf. Gründungselemente können durch erhebliche Bodenbewegungen versagen. Bei den Mauerwerkswänden reichen die Schäden von breiten, durchlaufenden Rissen bis hin zum partiellen oder kompletten Einsturz. Zudem weisen Wände größere Schiefstellungen als bei (3) auf oder kippen vollständig um. An Anschlussbereichen zu Gebäudeecken entstehen sichtbare Spalten. Bei bewehrtem Mauerwerk knickt die Wandbewehrung aus.

*(5) Zerstörung*

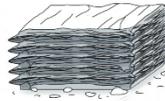
Der höchste Schadensgrad, die Zerstörung, betrifft immer das gesamte Gebäude, sodass nur noch globale Schadensmuster relevant sind (Abb. 37). Hierbei sind in der Regel alle Geschosse betroffen und das Gebäude ist größtenteils eingestürzt, sodass im Wesentlichen nur noch Schutt, Trümmerteile oder einzelne Ebenen erkennbar sind. Der Einsturz kann dabei auf unterschiedliche Art und Weise geschehen.

**Globale Schadensmuster – Schadensgrad 5**

- Versagen gesamtes Gebäude schief zu einer Seite über den Grundriss hinaus



- „pancake collapse“: Einsturz aller Geschosse



- Schutthaufen komplett



- Schutthaufen mit teilweise erkennbaren Deckenplatten oder vertikal stehenden Elementen



- Umkippen des gesamten Gebäudes

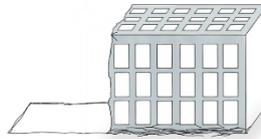


Abbildung 37: Globale Schadensmerkmale der Zerstörung (Schadensgrad 5).

Auf Basis der beschriebenen qualitativen und quantitativen Merkmale soll eine objektive Beurteilung des Erdbebenschadens erfolgen, um eine möglichst genaue Einordnung in die Schadensgrade zu erzielen. Die Schadenskataloge dienen somit als Handlungshilfe für die Schadensklassifizierung. Pro Schadensgrad sind mögliche Schadensmuster dargestellt, die nicht alle notwendigerweise gleichzeitig auftreten müssen. Bereits ein eindeutiges Schadensmerkmal führt zur Charakterisierung und damit Festlegung des Schadensgrads. Unter Berücksichtigung der Wichtigkeit des Bauteils in Bezug auf die Gesamttragfähigkeit und der auftretenden Häufigkeit, kann aus der Schadensgradklassifizierung des einzelnen Bauteils auf die Gesamtbeurteilung des Gebäudes geschlossen werden.

Die Umsetzung des Schadenskatalogs erfolgt in den automatisierten und auf Crowdsourcing basierenden Ansätzen (Abschnitt 2.6 und 2.7). Bei der Anwendung ist die Erkennbarkeit der Tragstruktur und der Schäden von außen zu berücksichtigen. Für das Micro-Mapping wurde der Schadenskatalog in ein Tutorial umgesetzt, um die Klassifizierung möglichst einfach darzustellen und den Anwender:innen bei der Entscheidung für den richtigen Schadensgrad zu unterstützen. Um die Schadenskataloge international verwenden zu können, wurden auch Übersichten zur Schadensklassifikation von Gebäuden aus Holz und Stahl entwickelt. In Taiwan beispielsweise bestehen 10 % der Gebäude aus Stahl und vor allem die Hochhäuser aus Stahl sind im Hinblick auf die hohe Anzahl der bewohnenden Menschen von Bedeutung. In Japan bestehen 80 % der Einfamilienhäuser aus Holz und bilden damit einen Großteil der

traditionellen Bebauung. Gebäude in Stahl- und Holzbauweise erfahren aufgrund ihrer materialbedingten Duktilität bei gleicher Intensität meist geringere Schäden als Stahlbeton- und Mauerwerksgebäude. Zudem konzentrieren sich die Schäden meist auf die Verbindungen verschiedener Bauteile und die Knotenbereiche sind häufig von außen schwer erkennbar. Dies führt zu seltener vorhandenen und weniger detaillierten Beschreibungen der entstandenen Schäden vorangegangener Erdbeben. Die erstellten Übersichten enthalten materialspezifische Merkmale für fünf Schadensgrade und die globalen Merkmale sind ebenfalls anwendbar. Die Übersichten finden sich im entsprechenden Verzeichnis des LOKI-GitLabs. Somit ist das Ergebnis die Bereitstellung eines Schadenskatalogs mit Schadensmerkmalen, schematischen Abbildungen sowie Schadensbildern zu Gebäuden aus unterschiedlichen Baumaterialien.

### **2.5.2 Ermittlung von Fragilitätskurven auf Basis von nichtlinearer Analyse von Gebäudeklassen**

Für seismische Risikoanalysen sind zuverlässige Vorhersagen und Abschätzungen von Erdbebenschäden und dem seismischen Verhalten von Gebäuden unerlässlich. Eine gängige Methode ist die Verwendung von Fragilitätskurven, die die Wahrscheinlichkeit des Überschreitens eines Schadensgrads für eine definierte Gebäudestruktur und Intensität beschreiben. Im vorliegenden Projekt dienen die Fragilitätskurven zur Berechnung der ersten initialen Schadensprognose (Abschnitt 2.4) zur Abschätzung der Lage und Schwere der vorhandenen Schäden. Es wurde ein neuer Ansatz zur Ermittlung der Fragilitätskurven entwickelt, der Kriterien zur Definition der Schadensgrade auf verschiedenen Ebenen verwendet, um möglichst alle Schadensmuster abzudecken.

Die Fragilitätskurven wurden für die fünf Schadensgrade entwickelt, die im Schadenskatalog (Abschnitt 2.5.1) enthalten sind. Die beobachteten Schäden des Schadenskatalogs werden dazu mit der numerischen Erdbebenantwort des Gebäudes verknüpft. Daher werden in diesem Ansatz verschiedenartige Kriterien auf unterschiedlichen Skalen definiert, um die Lage der fünf Schadensgrade auf der numerisch berechneten Antwortkurve des Gebäudes zu definieren. Die Kriterien enthalten Grenzwerte für materialspezifische und globale Merkmale zur Erfassung verschiedener Schadensarten. Über Häufigkeit und räumliche Verteilung werden diese Schadenskriterien mit ihren definierten Grenzwerten den fünf Schadensgraden zugeordnet. Der neue Ansatz berücksichtigt die verschiedenen möglichen Schadensbilder auf verschiedenen Skalen umfassender als bekannte Ansätze in der Literatur auf Basis von Verschiebungskriterien auf der Grundlage von Fließ- und Endverschiebung der Bilinearisierung der Kraft-Verformungs-Kurve. Darüber hinaus kann der Ansatz auf alle Gebäudeklassen und auf regionalspezifische Material- und Systemcharakteristika angewendet werden. Für die Definition der fünf vorgeschlagenen Schadensstufen sind die Menge und die Verteilung der Schadenskriterien wichtig, da das erste Auftreten nicht immer zum Erreichen des Schadensgrads führt. Mit diesem Ansatz auf verschiedenen Ebenen können auch Schäden, die in der Pushover-Kurve nicht ersichtlich sind, erkannt und bei den abgeleiteten Schadensgrenzwerten berücksichtigt werden. Die Kurven und die Schadensgrenzwerte bilden die Grundlage für das weitere Verfahren zur Entwicklung von Fragilitätsfunktionen. Im Folgenden wird der Ansatz für verschiedene Materialien und Beispiele erläutert.

#### *(1) Stahlbeton*

In Kohns et al. (2022b) und Kohns et al. (2022c) ist der beschriebene Ansatz zur Ermittlung der Fragilitätskurven für Gebäude aus Stahlbeton beschrieben und für ein regelmäßiges vierstöckiges Gebäude in Stahlbetonbauweise exemplarisch angewandt. Es wird eine nichtlineare statische Pushover-Analyse durchgeführt und die Lage der Schadensgrade anhand materialspezifischer und globaler Kriterien auf der Pushover-Kurve definiert.

Die materialspezifischen Schadenskriterien zur Ermittlung der Schadensentwicklung in Stahlbetongebäuden auf der Grundlage von Dehnungen und Verformungen sind in Tab. 2 dargestellt. Die erforderlichen Parameter sind nach EN 1992-1-1 bzw. EN 1998-3 zu bestimmen (Kohns et al. 2022b).

Tabelle 2: Materialspezifische Schadenskriterien und zugehörige Grenzwerte für Stahlbetongebäude (Kohns et al. 2022b).

Schadenskriterium	Grenzwert
(a) Zugfestigkeit Beton	$\varepsilon_{ct} = f_{ctm}/E_c$
(b) Abplatzungen Betondeckung (unumschnürter Beton)	$\varepsilon_{csp} = -0.0025$
(c) Risse Betonkern (umschnürter Beton)	$\varepsilon_c = -0.01$
(d) Fließen der Bewehrung	$\varepsilon_{sy} = +0.002$
(e) Versagen der Bewehrung	$\varepsilon_u = 3/8 * \varepsilon_{uk}$
(f) Krümmung bei Beginn der Rissbildung	$\varphi_c = \varepsilon_c/x$
(g) Krümmung beim Einsetzen des Fließens	$\varphi_y = (1.75 * f_{yk})/(E_s * h)$
(h) Sehnenrotation beim Einsetzen des Fließens	EN 1998-3 (A.10a)/(A.11a)
(i) Sehnenrotationskapazität im Bruchzustand	EN 1998-3 (A.1)
(j) Schubfestigkeit	EN 1998-3 (A.12)

Für jeden Schadensgrad werden mehrere der in Tab. 2 enthaltenen Kriterien verwendet, wobei ein Kriterium wiederum für verschiedene Schadensgrade verwendet werden kann. Die jeweiligen Schadenskriterien werden anhand der Häufigkeit und der räumlichen Verteilung den fünf Schadensgraden zugeordnet, was in Tab. 3 dargestellt ist. Es werden dabei nur die Stützen und nicht die sekundären Balken betrachtet, da ein Stützenversagen wesentlich kritischer ist.

Tabelle 3: Zuordnung der Schadenskriterien (1) zu den Schadensgraden über Häufigkeit und Verteilung (2).

Leicht		Mäßig		Stark		Sehr stark		Zerstörung	
(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
(a)	alle <sup>1</sup>	(b)	≥ 30 %	(b)	alle	(c)	≥ 30 %	(c)	alle
(d)	≥ 30 %	(d)	alle	(c)	≥ 10 %	(e)	≥ 10 %	(e)	≥ 30 %
(f)	alle <sup>1</sup>	(g)	alle	(e)	erste	(i)	≥ 30 %	(i)	≥ 50 %
(h)	≥ 30 %	(h)	alle	(i)	erste	(j)	≥ 30 %	(j)	≥ 50 %
				(j)	erste				

<sup>1</sup>Die Stützen des gesamten Gebäudes in allen Stockwerken sind betroffen, andernfalls wird die Verteilung/der Prozentsatz geschossweise betrachtet (Kohns et al. 2022b).

Zusätzlich werden noch globale Schadenskriterien verwendet, die sich direkt aus der Pushover-Kurve ergeben und in Tab. 4 dargestellt sind. Die globalen Kriterien für leichten und mäßigen Schaden werden nur maßgebend, wenn ein materialspezifisches Kriterium bereits bei einer geringeren Verschiebung/Kraft auftritt.

Tabelle 4: Globale Schadenskriterien (Kohns et al. 2022b).

Schadensgrad	globales Kriterium
Leicht	mind. 50 % der maximalen Kraft auf dem aufsteigenden Ast
Mäßig	mind. 75 % der maximalen Kraft auf dem aufsteigenden Ast
Stark	maximale Kraft
Sehr stark	5 % Lastabfall auf dem absteigenden Ast
Zerstörung	20 % Lastabfall auf dem absteigenden Ast

Somit finden für jeden Schadensgrad vier bis fünf materialspezifische Kriterien und ein globales Kriterium Anwendung. Die Position des Schadensgrades auf der Pushover-Kurve wird durch das Minimum der Verschiebungswerte, das sich durch die Überprüfung der verschiedenen Kriterien ergibt, definiert. Aus den entsprechenden Positionen der Schadensgrade auf den Pushover-Kurven werden die Werte für die Interstorey-Drift-Werte (ISD) beziehungsweise die spektrale Verschiebung abgeleitet, wobei mögliche unterschiedliche Schadensmechanismen mit verschiedenen Kriterien und Skalen berücksichtigt werden. Diese Werte bilden die Grundlage für die weitere Entwicklung von Fragilitätsfunktionen. Dazu wird das Vulnerability Modellers Toolkit (VMTK) von Martins et al. (2021) verwendet, wobei die entsprechenden Eingangsparameter adäquat gewählt sind. In Abb. 38 ist das exemplarisch untersuchte vierstöckige Stahlbetonrahmengebäude dargestellt. Die Modellierung und nichtlineare statische Analyse erfolgt mit der Software SeismoStruct (Seismosoft 2022). Es werden sowohl die beiden Belastungsrichtungen  $x$  und  $y$  als auch zwei verschiedene Horizontallastverteilungen (gleichförmig und modal) untersucht. Die Schadenskriterien und die Lage der Schadensgrade werden anhand der Tabellen 2 bis 4 bestimmt. Die Fragilitätskurven werden unter Berücksichtigung von über 2000 Erdbebenaufzeichnungen mit dem VMTK (Martins et al. 2021) ermittelt. Die entwickelten Fragilitätskurven für das Stahlbetonrahmengebäude auf Basis des neuen Ansatzes sind in Abb. 39 dargestellt. Die zugehörigen Parameter der kumulativen logarithmischen Normalverteilung finden sich in Tab. 5.

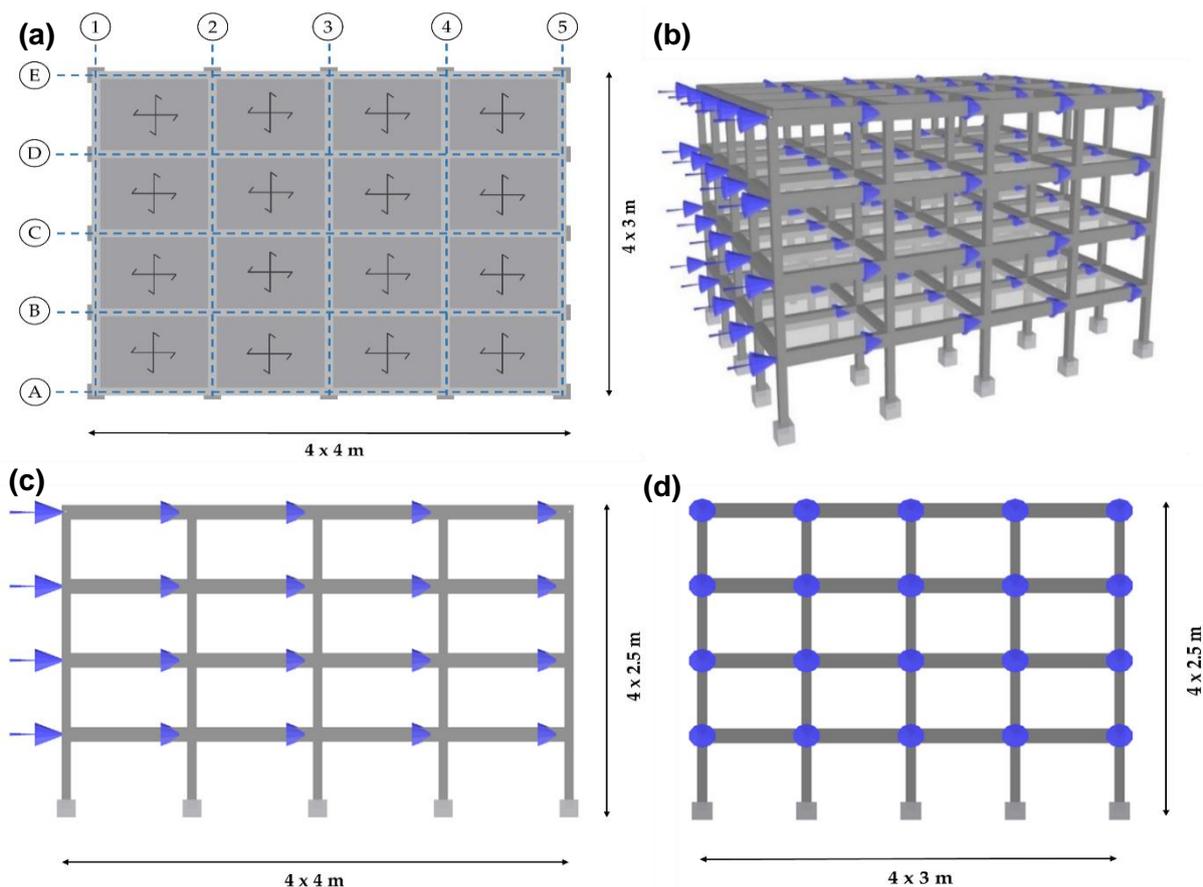


Abbildung 38: (a) Grundriss, (b) 3D-Modell, (c) Ansicht A-A, und (d) Ansicht 1-1 des untersuchten Stahlbetonskelettbbaus (Kohns et al. 2022b).

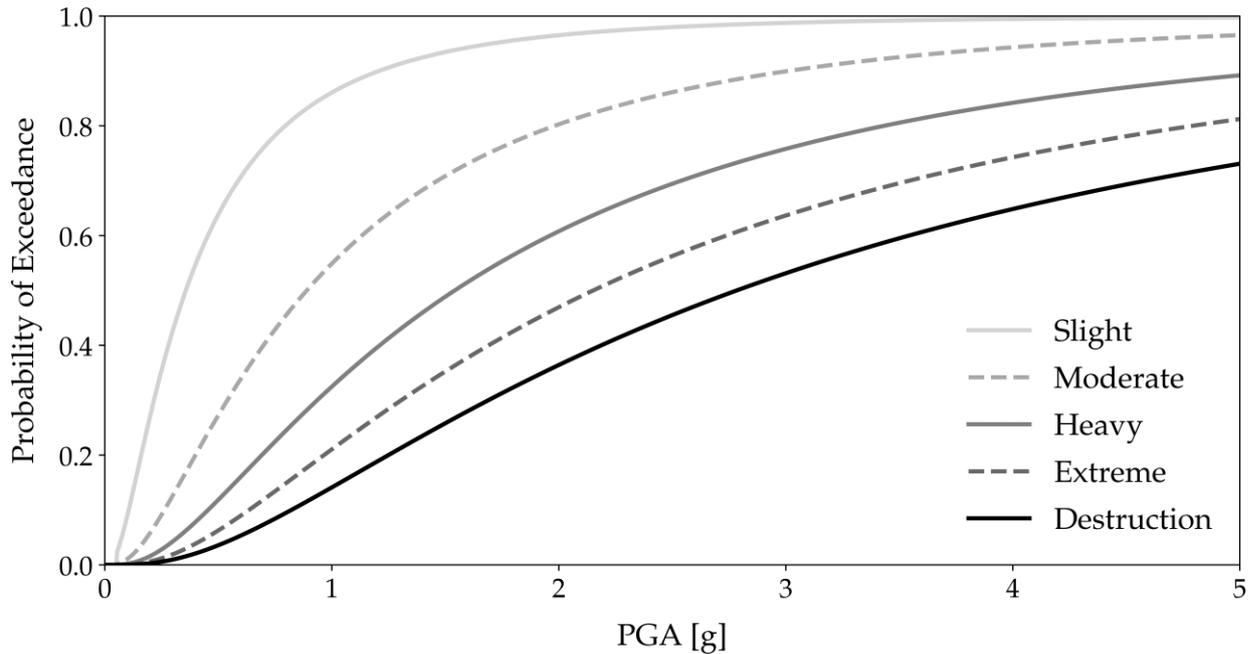


Abbildung 39: Fragilitätsfunktionen für die fünf Schadensgrade für das Stahlbetonrahmengebäude (Kohns et al. 2022b).

Tabelle 5: Fragilitätsparameter der kumulativen Lognormalverteilungen für die fünf Schadensgrade (Kohns et al. 2022b).

Schadensgrad	Leicht	Mäßig	Stark	Sehr stark	Zerstörung
Erwartungswert [g]	-1.030	-0.116	0.433	0.767	1.024
Standardabweichung [g]	0.952	0.952	0.952	0.952	0.952

Die ermittelten Fragilitätskurven wurden mit Daten aus der Literatur abgeglichen und evaluiert. Dabei wurden zum einen die Schadensgrenzwerte und zum anderen die Kurvenparameter der Fragilitätskurven verglichen. Der Vergleich der eigenen Fragilitätskurven mit Fragilitätskurven des SYNER-G report D3.1 for RC buildings (2011) und des European Seismic Risk Models 2020 (ESRM20) (Crowley et al. 2021) zeigt, dass die mit dem neuen Ansatz entwickelten Fragilitätsfunktionen im mittleren Bereich liegen, sowohl grafisch als auch die Kurvenparameter. Details und weitere Informationen sind in den genannten Veröffentlichungen Kohns et al. (2022b) und Kohns et al. (2022c) enthalten.

Weiterhin wurde ein traditionell japanisches fünfstöckiges Stahlbetonrahmengebäude modelliert und Fragilitätskurven auf Basis des vorgestellten multiskalaren Ansatzes für die Schadenskriterien ermittelt.

Tabelle 6: Materialspezifische und globale Schadenskriterien für Mauerwerksgebäude und Zuordnung zu den Schadensgraden.

Schadensgrad	Schadenskriterium	Häufigkeit/Verteilung
Leichter Schaden	Elementdrift für leichte Schädigung	erstes Auftreten/alle Elemente
	Biegung = 0.0015/Schub = 0.00075	
	≥ 50 % der maximalen Schubkraft (aufsteigender Ast)	gesamte Pushover-Kurve

	70 % der Verschiebung am Fließpunkt der Bilinearisierung	Bilinearisierung der gesamten Pushover-Kurve
	ISD Element $\leq 0.0005$	erstes Auftreten/alle Elemente
	ISD Pushover-Kurve $\leq 0,03 \%$	gesamte Pushover-Kurve
<b>Mäßiger Schaden</b>	Elementdrift für mäßige Schädigung Biegung = 0.003/Schub = 0.0015	erstes Auftreten/alle Elemente
	$\geq 75 \%$ der maximalen Schubkraft (aufsteigender Ast)	gesamte Pushover-Kurve
	wesentliche Änderung der Steigung der gesamten Pushover-Kurve	gesamte Pushover-Kurve
	Verschiebung am Fließpunkt der Bilinearisierung	Bilinearisierung der gesamten Pushover-Kurve
	ISD Element $\leq 0.0015$	erstes Auftreten/alle Elemente
	ISD Pushover-Kurve $\leq 0,1 \%$	gesamte Pushover-Kurve
<b>Starker Schaden</b>	Elementdrift für wesentliche Schädigung Biegung = 0.006/ Schub = 0.003	erstes Auftreten/nur Pfeiler
	75 % der Bruchverschiebung bei 80 % maximaler Schubkraft	gesamte Pushover-Kurve
	40 % Verschiebung am Fließpunkt der Bilinearisierung + 60 % Verschiebung bei Versagen eines Elements	gesamte Pushover-Kurve
	98 % der maximalen Schubkraft	gesamte Pushover-Kurve
	ISD Element $\leq 0.0035$	erstes Auftreten/alle Elemente
	ISD Pushover-Kurve $\leq 0,3 \%$	gesamte Pushover-Kurve
<b>Sehr starker Schaden</b>	Elementdrift für Versagen Biegung = 0.008/Schub = 0.004	erstes Auftreten/nur Pfeiler
	Abfall maximale Schubkraft auf unter 80 %	gesamte Pushover-Kurve
	Verschiebung bei Versagen eines Elements	erstes Auftreten/alle Elemente
	ISD Element $\leq 0.0055$	erstes Auftreten/alle Elemente
	ISD Pushover-Kurve $\leq 0,5 \%$	gesamte Pushover-Kurve
<b>Zerstörung</b>	Elementdrift für Einsturz Biegung = 0.012/Schub = 0.006	erstes Auftreten/nur Pfeiler
	Elementdrift für Versagen Biegung = 0.008/Schub = 0.004	mind. zwei Außenwände/nur Pfeiler
	Abfall maximale Schubkraft auf unter 65 %	gesamte Pushover-Kurve
	ISD Element $\leq 0.0075$	erstes Auftreten/alle Elemente
	ISD Pushover-Kurve $\leq 0,7 \%$	gesamte Pushover-Kurve

## (2) Mauerwerk

Der multiskalare Ansatz zur Bestimmung der Lage der Schadensgrade kann ebenfalls für Gebäude aus tragendem Mauerwerk angewendet werden. Die zugehörigen Kriterien und die Zuordnung zu den Schadensgraden sind in Tab. 6 dargestellt.

Die Umsetzung wird hier anhand eines traditionellen deutschen Einfamilienhauses (EFH) gezeigt, das mit der Software 3muri (S.T.A. Data 2022) modelliert und mithilfe der statisch nicht-linearen Pushover-Analyse untersucht wurde. Abb. 40 zeigt das EFH in 3muri, wobei die Software auf einer Makroelementmodellierung basiert (b).

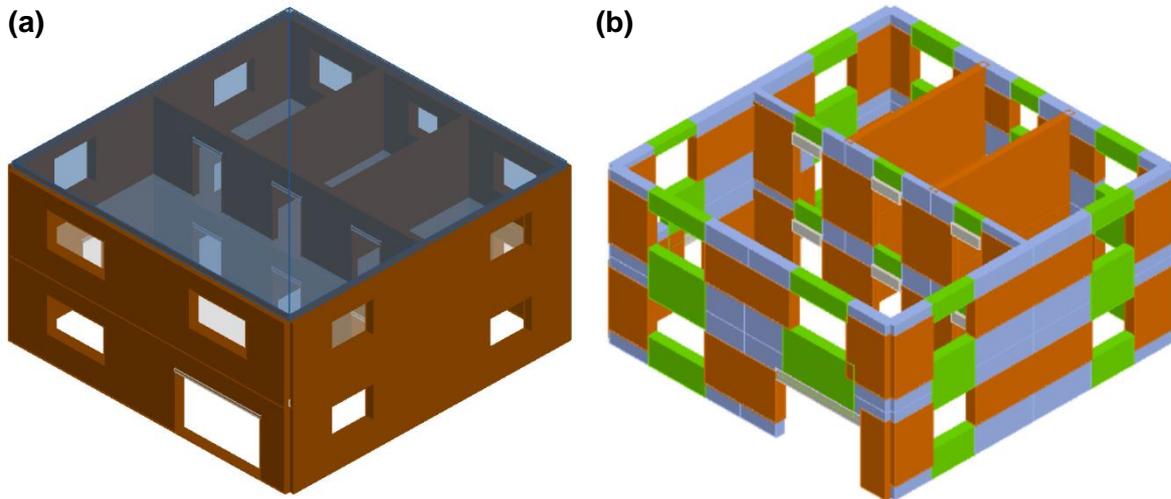


Abbildung 40: (a) Modelliertes Einfamilienhaus in 3muri und (b) zugehörige Makroelemente.

Die in Tab. 6 enthalten Schadenskriterien werden untersucht und damit die Lage der Schadensgrade auf den Pushover-Kurven ( $\pm x/y$ , gleichförmig/modal) definiert. Die daraus abgeleiteten minimalen Schadensgrenzwerte sind wiederum die Basis für die weitere Entwicklung der Fragilitätskurven mit dem VMTK (Martins et al. 2021), welche in Abb. 41 und Tab. 7 dargestellt sind.

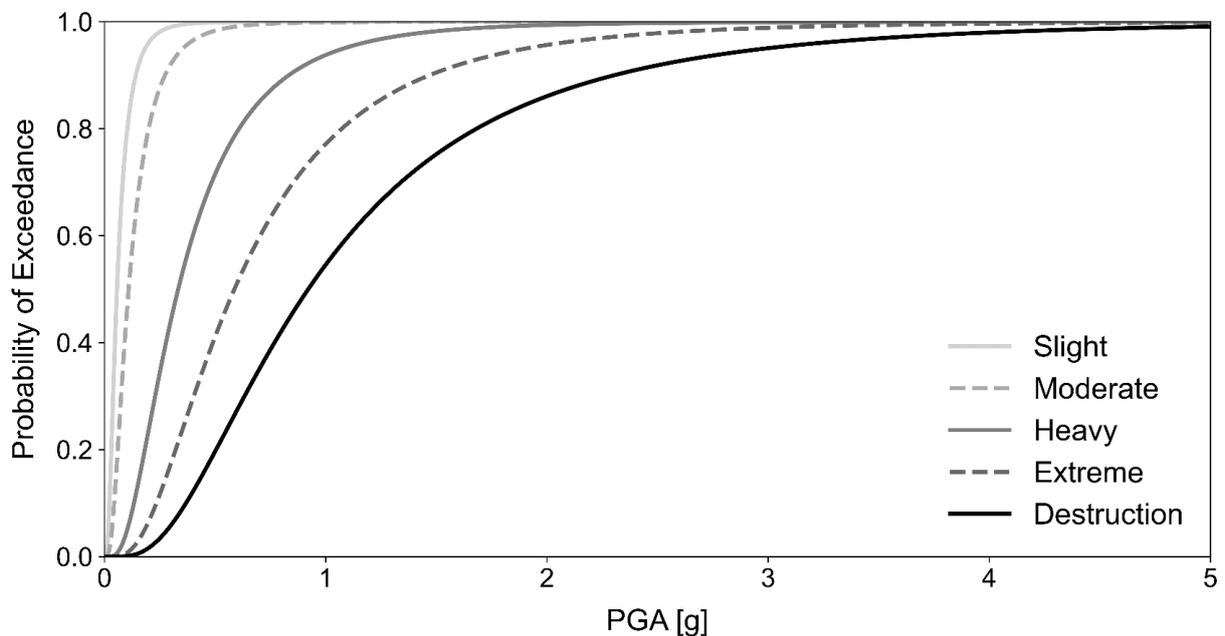


Abbildung 41: Fragilitätskurven für die fünf Schadensgrade für das Mauerwerksgebäude.

Tabelle 7: Fragilitätsparameter der kumulativen Lognormalverteilungen für die fünf Schadensgrade bei Mauerwerk.

Schadensgrad	Leicht	Mäßig	Stark	Sehr stark	Zerstörung
Erwartungswert [g]	-2.872	-2.214	-1.099	-0.532	-0.082
Standardabweichung [g]	0.715	0.715	0.715	0.715	0.715

Der Vergleich mit verschiedenen Fragilitätskurven in der Literatur (Crowley et al. 2021, Lagomarsino und Cattari 2014) zeigt, dass für die geringen Schadensgrade meist die eigenentwickelten Kurven einen geringeren Erwartungswert haben und somit konservativer sind. Eine mögliche Erklärung ist, dass anhand der verschiedenartigen Kriterien bereits früher Schäden erkannt werden. Für die hohen Schadensgrade liegen die eigenen Fragilitätskurven im mittleren Bereich zwischen den bestehenden Kurven. Die Standardabweichungen liegen in einem sehr ähnlichen Bereich wie in der Literatur, wodurch sich eine übereinstimmende Form der Fragilitätskurven ergibt.

### *(3) Stahlbeton mit Mauerwerksausfachungen*

Neben reinen Stahlbeton- oder Mauerwerksgebäuden, sind Stahlbetonrahmengebäude mit Mauerwerksausfachungen eine häufige Bauweise. Die Mauerwerksausfachungen werden als nichttragend angenommen, aber wirken sich auf die Steifigkeit und Festigkeit des Gesamttragwerks aus und beeinflussen dessen Tragfähigkeit. Außerdem kann sich die Schadensentwicklung verändern und Schäden am Stahlbetonrahmentragsystem durch das Versagen der Mauerwerksausfachungen verursacht werden.

Um diese weitverbreitete Bauweise zu berücksichtigen, wurde der Ansatz für die tragende Stahlbetonbauweise um das nichttragende Mauerwerk erweitert. Für die Schadensentwicklung im Stahlbetonrahmen werden die Kriterien aus Tab. 2 und deren Verteilung aus Tab. 3 verwendet. Die Modellierung der Ausfachungen erfolgt in SeismoStruct als „infills“. Diese Elementklasse modelliert die Ausfachungen nach dem Ansatz von Crisafulli (1997) über sechs Streben - in jeder Diagonalrichtung sind zwei parallele Streben vorhanden, die die Druck- und Zugkräfte über zwei gegenüberliegende Diagonalecken abtragen, und eine dritte Strebe, die die Schubkräfte von der Ober- zur Unterseite der Ausfachung aufnimmt. Die Kontaktlänge zwischen Rahmen und Ausfachung spielt eine wesentliche Rolle, um die Wirkung der Ausfachung zu berücksichtigen. Um die Schädigung der Ausfachungen abzubilden, werden Verschiebungswerte für die fünf Schadensgrade definiert. Dazu werden die Interstorey-Drift-Werte des tragenden Mauerwerks verdoppelt, da ein höherer Schaden an nichttragenden Elementen als an tragenden Element möglich ist (Abschnitt 2.5.1). Das erste Auftreten der Überschreitung der Verschiebung ist maßgebend, aber der Schadensgrad für die Ausfachung ist eine Stufe höher als für den Stahlbetonrahmen. Somit wird beispielsweise ein mäßiger Schaden an der Ausfachung einem leichten Schaden des Stahlbetonrahmens beziehungsweise des Gesamtgebäudes zugeordnet.

Als Beispiel wurde das „Street House“ gewählt, welches mit gemischter Nutzung die meistverbreitete Konstruktionsart des taiwanesischen Gebäudebestands darstellt. Das offene Erdgeschoss wird für kommerzielle Zwecke genutzt, während sich in den oberen Geschossen typischerweise Wohneinheiten befinden. In den Obergeschossen sind in der Richtung senkrecht zur Straße die Ausfachungswände als Wohnungstrennwände und Außenwände über die ganze Gebäudelänge vorhanden, parallel zur Straße sind Füllwände nur in Form von Außenwänden angeordnet. Im Erdgeschoss ist aufgrund der kommerziellen Nutzung die Lage von Füllwänden in Straßenrichtung auf die straßenabgewandte Seite des Gebäudes begrenzt und somit ist ein offener Korridor an der Straße vorhanden.

Bei der Analyse ist besonders die Asymmetrie der Anordnung der Ausfachungswände zu berücksichtigen, wodurch sich ein variierendes Tragverhalten in die beiden Koordinatenrichtungen  $x$  und  $y$  sowie jeweils in positive und negative Belastungsrichtung ergibt. Außerdem werden zwei unterschiedliche Horizontallastverteilungen (gleichförmig und modal) untersucht. Das in SeismoStruct modellierte Street House ist in Abb. 42 dargestellt.

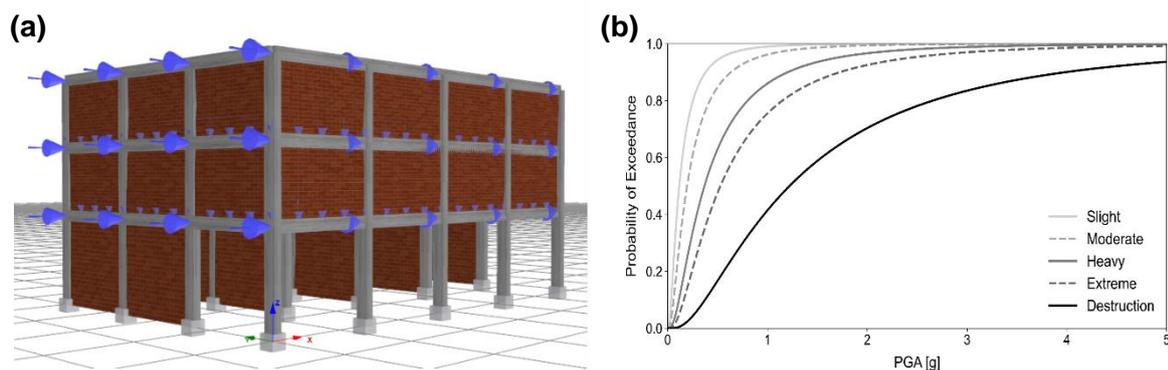


Abbildung 42: (a) Modellierung des Street Houses mit Mauerwerksausfachungen und (b) zugehörige Fragilitätskurven.

Die Fragilitätskurven wurden, wie zuvor, für Stahlbeton, unter Berücksichtigung der zusätzlichen Verschiebungskriterien für die Mauerwerksausfachungen, entwickelt und sind in Abb. 42 dargestellt. Dabei wurden über 2000 Aufzeichnungen von Erdbeben in Taiwan verwendet.

Der Vergleich mit den Fragilitätskurven nach Liao et al. (2006) zeigt, dass durch die unterschiedliche Form der Kurven für geringe Beschleunigungen, die selbst entwickelten Fragilitätskurven konservativer sind, für hohe Beschleunigungen jedoch die von Liao et al. (2006). Wenn die darin enthaltenen Schadensdaten mit den Fragilitätskurven verglichen werden, werden die eingetretenen Schadensquoten teilweise von den Fragilitätskurven nach Liao et al. (2006) und teilweise von den eigenen Fragilitätskurven besser getroffen. Somit ist eine gute Übereinstimmung gegeben.

Nach der Erläuterung des Ansatzes mit verschiedenartigen Schadenskriterien und den zugehörigen Beispielen für die verschiedenen Materialien, wurden allgemeingültige Erkenntnisse dargestellt. Die hier entwickelten Fragilitätskurven basieren auf einer begrenzten Anzahl an Analysen für ein bestimmtes Gebäudemodell. Wenn Gebäude, die sich unter Erdbebenbelastung ähnlich verhalten, zusammengefasst werden, ergibt sich eine Gebäudeklasse. Wichtige Parameter, die eine Gebäudeklasse beschreiben, sind unter anderem das Material, die Tragstruktur und die Anzahl der Geschosse. Für einen Gebäudetyp sind außerdem zahlreiche Simulationen für unterschiedliche Materialeigenschaften, Bewehrungsgrade und -anordnungen, Querschnittsabmessungen und (un)regelmäßige Grundrisse erforderlich. Damit ergeben sich bei den finalen Fragilitätskurven für Gebäudeklassen größere Standardabweichungen und die Fragilitätskurven sind allgemeingültiger anwendbar.

Fragilitätskurven beschreiben die Wahrscheinlichkeit zum Erreichen eines Schadensgrads bei einer bestimmten Intensität. Vulnerabilitätsfunktionen beschreiben hingegen oft den Verlust, den tatsächlichen Schaden oder die weiteren Konsequenzen. Dazu werden „damage to loss“-Modelle verwendet, die beispielweise die Schadensgrade oder die Schadensparameter, wie die Verschiebung, mit Wahrscheinlichkeitsverteilungen für Verluste korrelieren. Das können ökonomische und menschliche Verluste (Tote/Verletzte) sein, aber auch die Abschätzung der Nutzbarkeit der Gebäude. In der Literatur finden sich verschiedene Modelle, die je nach Bauart und Land entsprechend anzupassen sind. Beispiele für einfache Transformationsmodelle, die sich auf den italienischen Gebäudebestand aus Mauerwerk und Stahlbeton beziehen, sind in Da Porto et al. (2021) enthalten. Martins et al. (2021) verwenden ein „damage to loss“-Modell auf globaler Ebene und in Crowley et al. (2021) sind Vulnerabilitätsfunktionen für ökonomische bzw. menschliche Verluste für Europa gegeben.

Die verwendeten Kriterien zur Bestimmung der Schadensgrade basieren auf dem Schadenskatalog (Abschnitt 2.5.1), sodass in beiden Fällen fünf Schadensgrade und sowohl material-spezifische als auch globale Schadensmuster unterschieden werden. Wenn die Kriterien zur Ermittlung des Schadensgrades bestimmt sind, kann der maßgebende Verschiebungswert, wie zuvor beschrieben, als Minimum bestimmt werden. Wenn die eingetretenen Dehnungen und Deformationen wiederum bei dieser bestimmten Verschiebung ermittelt werden, kann darüber auf typische Schadensmuster geschlossen werden, die im Schadenskatalog enthalten sind. Diese können dann wiederum für die Schadensbewertung mittels Crowdsourcing verwendet werden. Außerdem dienen die Schadensgrade als Entscheidungskriterien für die Rettungsmaßnahmen.

Das allgemeine Ziel des Teilprojekts, eine Entscheidungsgrundlage für die Schadensklassifizierung durch automatische und Crowdsourcing-basierte Methoden zu entwickeln, wurde mit unserer umfassenden Schadensklassifikation erreicht.

## **2.6 AP 6 – Crowdsourcing (UHD-GIScience)**

Im Fokus dieses Arbeitspakets stand die Entwicklung neuer Methoden und Tools zur Erhebung, Analyse und Bewertung nutzergenerierter Geoinformation zur Bestimmung struktureller Gebäudeschäden. Dies beinhaltete zum einen die Entwicklung eines Completeness-Tools (Ullah et al. 2023; Abschnitt 2.6.1) zur Bewertung der Vollständigkeit von OpenStreetMap-Daten, die für die Exposure-Modellierung genutzt werden können (Abschnitt 2.4). Zum anderen wurde eine bildbasierte Micro-Mapping Anwendung zur visuellen Bewertung struktureller Gebäudeschäden durch Freiwillige entwickelt, die mit automatischen Methoden der Schadensbestimmung (Abschnitt 2.7) kombiniert werden kann. Ein weiterer Bestandteil des Moduls war die Entwicklung einer Methodik zur Schadensdetektion und mehrklassigen Schadensbestimmung (Abschnitt 2.6.2.2) auf Grundlage aufgenommener Daten aus UAV-Übersichts- und Detailflügen (Abschnitt 2.2), entsprechend der im LOKI-System definierten Anwendungsfälle (Abschnitt 2.1). In Kombination mit der automatischen Schadensklassifizierung auf Basis von 3D-Daten (Abschnitt 2.7) stellt das Crowdsourcing eine einzigartige und ergänzende Methode zur Schadensklassifizierung anhand von Bildern dar. Diese entwickelten Crowdsourcing-Tools wurden in eine Webanwendung, die Crowdmap-App (Heidelberg Institute for Geoinformation Technology 2023) integriert, die eine nachhaltige und breite Nutzung der Tools durch verschiedene Gruppen von Anwender:innen ermöglicht. Eine Evaluation der entwickelten Tools und Methoden fand durch regelmäßige Workshops und Modultests mit LOKI-Partner:innen und potenziellen Anwender:innen des LOKI-Systems statt. Zusätzlich wurden die Tools durch eine Fragebogen-basierte Methode zur Bewertung partizipativer Methoden nach Ballatore et al. (2020) evaluiert. Durch regelmäßiges Feedback konnte die Crowdmap-App iterativ optimiert und an die Anforderungen potenzieller Anwender:innen angepasst werden. Im Projektantrag war geplant, diesen Ansatz auch direkt für 3D-Daten zu nutzen. Jedoch wurde während der Entwicklung und durch den kontinuierlichen Austausch mit Anwender:innen und Projektpartner:innen deutlich, dass ein Fokus auf die Nachhaltigkeit und Nutzerfreundlichkeit eines Tools bei Nutzung von 2D-Daten zielführender ist. Beispielsweise ist so ein leichter Einstieg für Anwender:innen möglich, die noch nicht mit visualisierten 3D-Daten gearbeitet haben. Im Folgenden werden die im Projekt entwickelten Methoden und Tools und die Ergebnisse ihrer Evaluation beschrieben.

### 2.6.1 Crowdsourcing für die Exposure-Modellierung

Frei verfügbare Gebäudedaten, wie beispielsweise Gebäudegrundrisse oder Gebäudehöhe (Stockwerksanzahl), sind essenziell als Eingangsdaten für die Exposure-Modellierung, und OpenStreetMap (OSM) kann solche Informationen grundsätzlich bereitstellen. Gerade in abgelegenen Regionen ohne Maßnahmen zur Katastrophenvorsorge sind diese Daten jedoch häufig nicht vollständig erfasst. Dadurch kommt der Bewertung der räumlichen Vollständigkeit von Gebäudeinformationen durch geeignete Anwendungen eine wichtige Rolle zu. Für das LOKI-System wurde zu diesem Zweck das Completeness-Tool entwickelt, durch das Gebiete mit fehlenden Gebäuden in OSM identifiziert werden können.

Im Rahmen des LOKI-Projekts wurde mit dem Completeness-Tool (Ullah et al. 2023) eine neue Funktionalität für die MapSwipe-App (Missing Maps 2023) entwickelt. MapSwipe wird für zahlreiche humanitäre Projekte genutzt, bei denen eine große Menge an Satellitenbildern von Nutzer:innen visuell hinsichtlich anwendungsspezifischer Kriterien bewertet wird. Durch das „Swipen“ (Wischen) auf ihrem Smartphone-Bildschirm können Freiwillige zur Bewertung beitragen. Das entwickelte Completeness-Tool ermöglicht es Nutzer:innen auf einfache Art und Weise, die räumliche Vollständigkeit von Gebäudegrundrissen in OSM zu beurteilen. Diese Informationen werden zur Anreicherung und Bewertung der Eingangsdaten des Exposure-Modells genutzt (Abschnitt 2.4). Das Mapping-Prinzip beruht auf einer visuellen Überlagerung aktueller Satellitenbilder durch aktuell kartierte Gebäudegrundrisse aus OSM. Darauf basierend beurteilen Nutzer:innen jeweils für einzelne Ausschnitte eines Satellitenbilds, ob alle Gebäude, die darauf zu sehen sind, bereits in OSM erfasst sind. Das Satellitenbild ist dabei nochmals in kleinere räumliche Kacheln unterteilt, für die Nutzer:innen die Vollständigkeit bewerten (Abb. 43). Für diese kleinen Aufgaben (Micro-Tasks) reichen minimale Vorkenntnisse der Nutzer:innen aus, um in kurzer Zeit große Gebiete auszuwerten. Somit ermöglicht dieser Ansatz im Katastrophenfall eine schnelle Vollständigkeitsbewertung durch eine große Anzahl an Freiwilligen. Der entwickelte Ansatz unterstützt damit die zeitnahe Bereitstellung relevanter Informationen im Schadensfall, indem unvollständig kartierte Gebiete identifiziert und anschließend in Mapathons nachkartiert werden können.

Das Completeness-Tool wurde zunächst in einer Pilotstudie mit den LOKI-Projektpartner:innen getestet und dabei die Nutzungsfreundlichkeit des Tools evaluiert. Die Ergebnisse wurden mit einem Expert:innen-Datensatz als Referenzdaten validiert und zeigen, dass die entwickelte Methodik einen wertvollen Beitrag zur zeitnahen Identifizierung fehlender Gebäudegrundrisse und des Bedarfs zusätzlicher Kartierungen leistet. Schwierigkeiten in der Vollständigkeitsbewertung bestand für Nutzer:innen insbesondere dann, wenn bereits viele Gebäudegrundrisse in einer Kachel kartiert waren: Je vollständiger eine Kachel ist, desto schwieriger ist es für die Teilnehmenden, eine korrekte Antwort zu geben. Häufig tendierten sie eine Kachel als vollständig (*complete*) zu bewerten, obwohl einige Gebäudegrundrisse noch nicht kartiert waren (*incomplete*). Weitere wissenschaftliche Erkenntnisse aus der Evaluierung des Completeness-Tools sind in Ullah et al. (2023) zu finden.

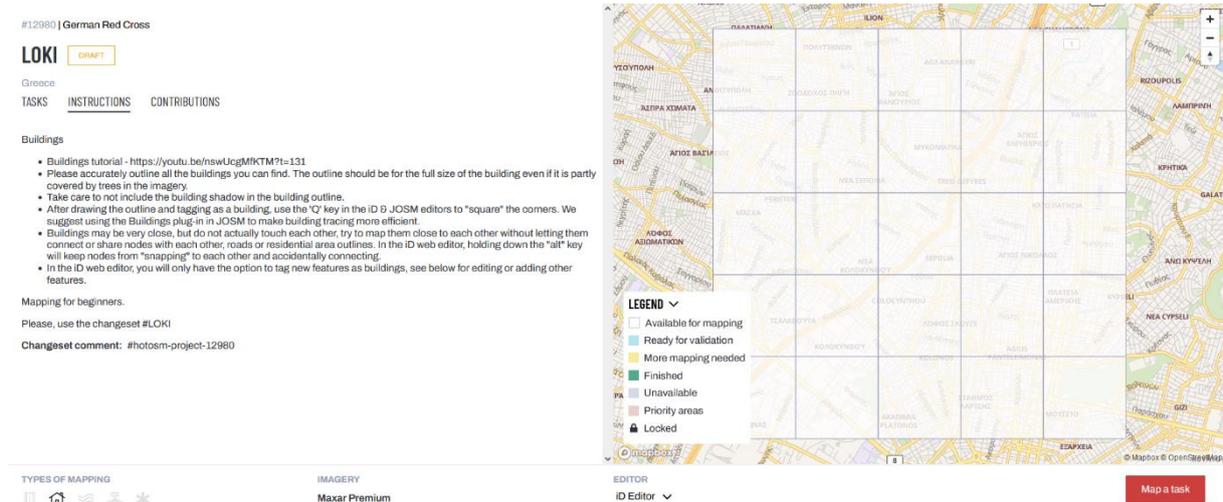


Abbildung 43: Projekt im HOT Tasking Manager für die Kartierung fehlender OSM-Gebäudegrundrisse in Athen.

Completeness - Athen (1) LOKI

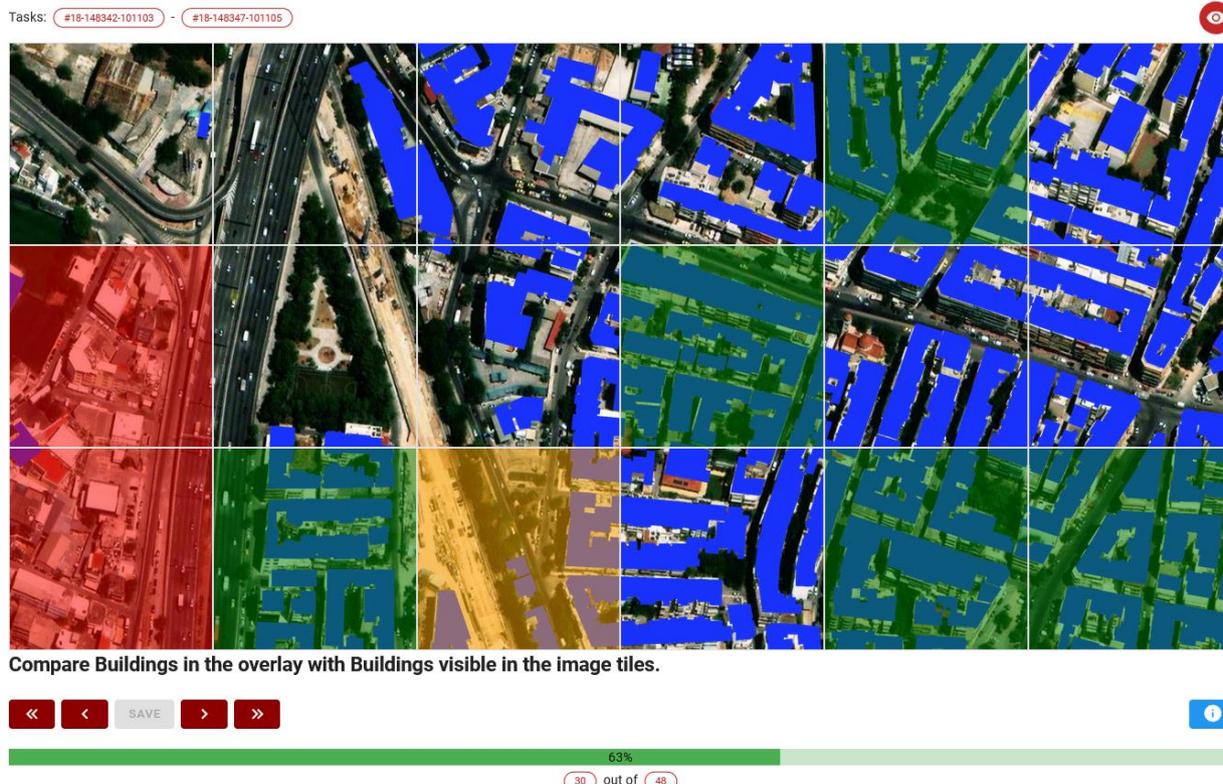


Abbildung 44: Completeness-Mapping mit einem Satellitenbild als Hintergrundbild, überlagert mit bereits kartierten Gebäudegrundrissen aus OpenStreetMap (Blau). Durch Anklicken werden die einzelnen Kacheln durch Nutzer:innen als unvollständig (Rot), unsicher (Gelb) und vollständig (Grün) bewertet.

Durch weitere Evaluierungsphasen wurde das Completeness-Tool schrittweise optimiert und die Nutzungsfreundlichkeit gesteigert. Das Prinzip von Ullah et al. (2023) wurde beibehalten und erweitert basierend auf Feedback, das durch Fragebögen ermittelt wurde. Die Fragebögen wurden im Anschluss an das Completeness-Mapping in kleinen (ca. 15 Personen) Workshops von den Teilnehmenden ausgefüllt. Die Fragebögen basieren auf dem von Ballatore et al. (2020) eingeführten allgemeinen Fragebogen zur Evaluierung von partizipativen Methoden. Basierend auf den Ergebnissen des Completeness-Tools können nun in Regionen mit fehlenden OSM-Gebäudegrundrissen Mapping-Events zur Erhebung der fehlenden Informationen

durchgeführt werden. In Zusammenarbeit mit dem Deutschen Roten Kreuz wurde im Rahmen einer Pilotstudie mit LOKI-Projektpartner:innen ein Task im HOT Tasking Manager des Humanitarian-OpenStreetMap-Teams erstellt (Abb. 43) um eine Kartierung in Athen durchzuführen. Athen wurde als Testgebiet ausgewählt, da hier sehr heterogene OSM-Daten vorliegen und eine natürliche Exposition für Erdbebenereignisse vorliegt. Zunächst konnte mithilfe des Completeness-Mappings ein großer Bedarf zur Kartierung fehlender Gebäudegrundrisse in OSM identifiziert werden. Im Rahmen eines Mapathons wurde anschließend die Verknüpfung der Ergebnisse des Completeness-Tools und des Hot-Tasking-Managers zu einem vollständigen Workflow zur Erhebung fehlender Gebäudegrundrisse erprobt. Diese neu kartierten Gebäudegrundrisse standen durch die Verknüpfung des HOT-Tasking-Managers mit der OSM-Datenbank direkt für eine aktualisierte Exposure-Modellierung (Abschnitt 2.4) zur Verfügung.

Für die Berechnungen im gebäudegenauen Exposure-Modell (Abschnitt 2.4) sind neben dem Gebäudegrundriss weitere semantische Attribute wie z. B. Gebäudehöhe oder Dachform notwendig. Eine weitere Ergänzung der Eingangsdaten für die Exposure-Modellierung fand daher durch die Integration eines bestehenden Crowdsourcing-Tools zur Erhebung semantischer Gebäudeinformationen statt. Die hierfür verwendete StreetComplete-App (StreetComplete 2022) ermöglichte in diesem Zusammenhang die Smartphone-basierte Erhebung fehlender Gebäudeattribute, wie beispielsweise die Stockwerksanzahl, für bereits in OSM vorhandene Gebäude auf eine spielerische und einfache Art und Weise (Abb. 44). Die direkte Schnittstelle zur Datenbank von OSM ermöglicht auch hier eine Verfügbarmachung neu erhobener Gebäudeattribute in OSM und damit für die Exposure-Modellierung ohne größere zeitliche Verzögerung.

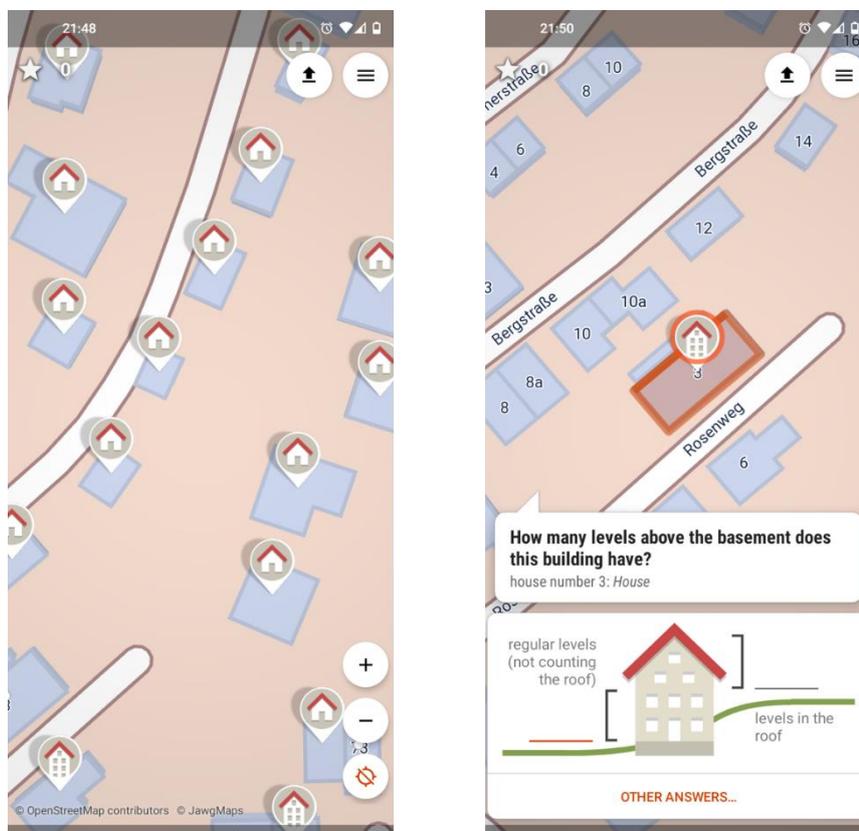


Abbildung 45: StreetComplete-App zur Ergänzung von Gebäudeattributen in OpenStreetMap.

## 2.6.2 Crowdsourcing zur Schadensklassifizierung

Als komplementäre Methode und zur Validierung automatischer Methoden zur Schadensbestimmung (Abschnitt 2.7) wurde in LOKI ein Micro-Mapping-basierter Ansatz zur Bestimmung struktureller Gebäudeschäden entwickelt. Dieser Ansatz nutzt die Stärke der visuellen Interpretation des Menschen für eine bildbasierte Schadensbestimmung in kleinen, durch Freiwillige leicht zu lösenden Klassifizierungsaufgaben (Micro-Tasks). Die Schadensklassifizierung erfolgt dabei auf Basis von Bildern aus UAV-Befliegungen (Abschnitt 2.2) und basiert auf den im Schadenskatalog entwickelten Kriterien zur Bestimmung verschiedener Schadensgrade (Abschnitt 2.5).

Entsprechend des mehrstufigen Aufnahme- und Auswertungsprozesses in LOKI (Abschnitt 2.1) erfolgt die Klassifizierung von Schäden in der Crowdmap-App anhand von zwei Aufgabentypen: (1) Schadensdetektion (*Schaden/kein Schaden*) und (2) detaillierte Schadensbestimmung in fünf Schadensgrade (*leicht, mäßig, stark, sehr stark, zerstört*). Als Hilfestellung zur Unterscheidung der einzelnen Schadensgrade wurde ein umfangreiches Tutorial entwickelt, welches Beispielbilder und Beschreibungen der einzelnen Schadensgrade und -muster beinhaltet und Teilnehmende bei der Schadensbestimmung unterstützt.

### 2.6.2.1 Tutorial

Als Hilfestellung und Entscheidungsgrundlage für Nutzer:innen der Micro-Mapping-Methodik wurde ein umfangreiches Tutorial entwickelt (Abb. 46 und 47), welches die für die Schadensklassifizierung relevanten Schadensgrade und -muster verständlich aufbereitet und strukturiert.

## Outline

<b>I. Introduction</b>	1
<b>II. Damage classification: Overview</b>	2
# (0) - No damage (visible)	2
# (1) - Slight damage	2
# (2) - Moderate damage	2
# (3) - Heavy damage	3
# (4) - Extreme damage	3
# (5) - Destruction	4
<b>III. Detailed damage classification into five damage grades</b>	
1.1. Slight - Masonry	5
1.2. Slight - Reinforced Concrete	7
2.1. Moderate - Masonry	9
2.2. Moderate - Reinforced Concrete	11
3.1. Heavy - Masonry	13
3.2. Heavy - Reinforced Concrete	15
4.1. Extreme - Masonry	17
4.2. Extreme - Reinforced Concrete	20
5. Destruction - Masonry and Reinforced Concrete	23

Abbildung 46: Inhaltsübersicht des Tutorials für die visuelle Schadensklassifizierung. Je nach fachlichem Hintergrund und Vorwissen der Teilnehmenden ist ein englisches oder deutsches Tutorial verfügbar

### # (3) – Heavy damage

- Large falling elements of roof or building
- Large detachment of roof tiles; damage to chimney up to collapse or damage to roof construction
- Large cracks in structural elements
- Large areas of spalling or falling of plaster
- Local crushing of masonry at corners
- Exposed reinforcement and locally buckled/broken reinforcement

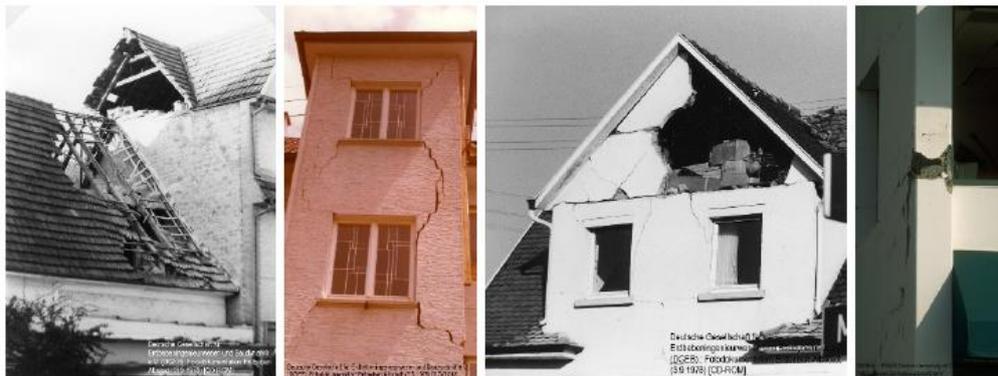


Abbildung 47: Auszug des Tutorials mit Hinweisen zur korrekten Klassifizierung von Bildern.

Das Tutorial startet mit einer Übersicht zur ersten Einordnung vorliegender Schäden. Im darauffolgenden Teil werden weitere Details beschrieben, die sich auf die unterschiedlichen Schadensausprägungen beziehen, welche durch Materialunterschiede hervorgerufen werden. Im letzten Teil finden sich Detailinformationen über Rissbreiten und darüber, wie diese als unterstützende Information für die Schadensbewertung genutzt werden können. Durch diesen Aufbau wurde eine hilfreiche Entscheidungsgrundlage für Nutzer:innen mit wenig Vorwissen geschaffen, die gleichzeitig die Kriterien zur Schadensbeurteilung ingenieurwissenschaftlich korrekt abgebildet. Das Tutorial kann sowohl als Trainingsmaterial vor der eigentlichen Schadensbestimmung, als auch während der Schadensbestimmung als Hilfestellung für konkrete Aufgaben verwendet werden.

#### 2.6.2.2 Aufgabentyp 1 - Binäre Schadensklassifizierung

Die binäre Schadensklassifizierung wurde für die Schadensbestimmung auf Basis von RGB-Bildern aus UAV-Übersichtsflügen entwickelt. Die Klassifizierung einzelner Gebäude in Schaden bzw. kein Schaden kann im LOKI-System (Abschnitt 2.1) in der UAV-Missionsplanung (Abschnitt 2.3) für die detaillierte Aufnahme einzelner Gebäude berücksichtigt werden. Abb. 48 zeigt eine binäre Klassifizierungsaufgabe in der Crowdmap-App, bei der die Schadensbewertung auf Basis eines Bildes aus Übersichtsflügen vorgenommen wird. Durch die Zoomfunktion können beschädigte Gebäude im dargestellten Ausschnitt von Nutzer:innen identifiziert werden.

## LOKI: Damage detection (binary)

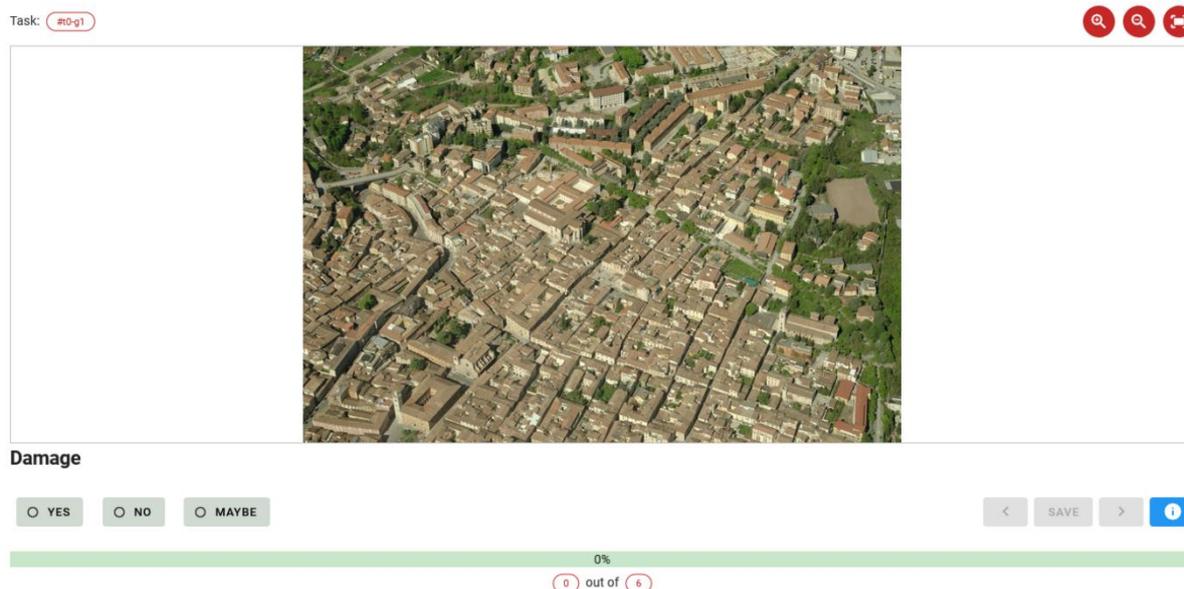


Abbildung 48: Binäre Klassifizierungsaufgabe anhand eines Übersichtsbildes in der Crowdmap-App (Heidelberg Institute for Geoinformation Technology 2023).

Die Ergebnisauswertung der binären Klassifizierung aus den Workshops zeigt im Allgemeinen, dass Anwender:innen überwiegend mit *kein Schaden (no)* und LOKI-Partner:innen differenzierter geantwortet haben. *Vielleicht (maybe)* wurde selten verwendet, bei Anwender:innen wurde diese Antwortmöglichkeit nie gewählt. Die abschließende Bestimmung der Schadensklasse im dargestellten Ausschnitt wurde auf Basis der Übereinstimmung der einzelnen Antworten der Nutzer:innen erstellt. Dabei zeigt sich, dass Einzelergebnisse korrekt sein können, auch wenn die Übereinstimmung niedrig ist. Die Genauigkeit der binären Schadensbestimmung wurde auf Basis eines Expert:innen-Referenzdatensatzes evaluiert. Dabei zeigte sich, dass vorhandene Schäden bei sehr hohen Übersichtsflügen (also niedrigerer räumlicher Auflösung der UAV-Bilder) trotz Zoom-Funktion nicht immer erkannt werden, insbesondere, wenn Schäden nur in kleinen Ausschnitten des dargestellten Bildes oder nur an Teilen eines Gebäudes (z. B. an Fassaden oder Dächern) auftreten. Bei der Interpretation der Ergebnisse aus der binären Schadensbestimmung durch die Micro-Mapping-Anwendung ist zu beachten, dass Schaden vorhanden sein kann, auch wenn dieser nicht von den Nutzer:innen erkannt wird. In solchen Fällen kann jedoch davon ausgegangen werden, dass der vorliegende Schadensgrad eher niedrig ist und deshalb nicht erkannt wurde. Die in diesem Aufgabentyp erzielten Ergebnisse sind daher nützlich, um eine erste Schadensabschätzung in Gebieten zu erzielen, in denen eine flächige Verbreitung hoher Schadensgrade vorhanden ist.

### 2.6.2.3 Aufgabentyp 2 – Klassifizierung in fünf Schadensgrade

UAV-Detailaufnahmen einzelner Gebäude können für die detaillierte Klassifizierung in fünf Schadensgrade genutzt werden (Abb. 49), die auf dem im Projekt entwickelten Schadenskatalog (Abschnitt 2.5) basieren: Leichter Schaden, mäßiger Schaden, starker Schaden, sehr starker Schaden und Zerstörung. Diese Schadensklassen werden durch die Klasse *kein Schaden* ergänzt.

## LOKI: Damage analysis (multi-class)

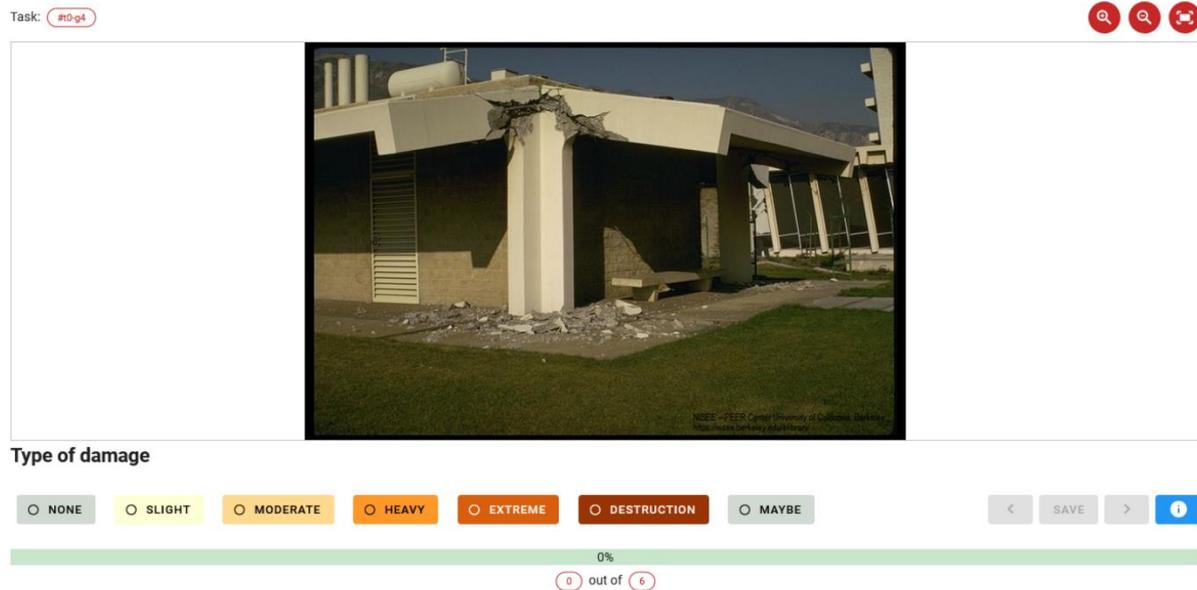


Abbildung 49: Klassifizierung anhand mehrerer Schadensgrade in der Crowdmapp-App (Heidelberg Institute for Geoinformation Technology 2023).

Wie bei der binären Schadensklassifizierung wurde die detaillierte Schadensbestimmung mit Anwender:innen und LOKI-Partner:innen in Modultests getestet. Die Ergebnisse dieses Aufgabentyps zur detaillierten Bestimmung verschiedener Schadensgrade wurden ebenfalls mithilfe eines Referenzdatensatzes von Expert:innen evaluiert. Die Evaluation zeigte, dass sich insbesondere bei einer kleinen Anzahl von Nutzer:innen, diese sich bezüglich des vorherrschenden Schadensgrades einig sein können, der Schadensgrad dennoch falsch sein kann. In solchen Fällen ist die Berücksichtigung der Antwort mit der höchsten Wahrscheinlichkeit und die Streuung der Antworten geeigneter. Die Ergebnisse der Tests haben gezeigt, dass eine Schadensklasse oft unter oder über der korrekten Klasse ausgewählt wurde. Damit lässt sich eine Tendenz bzw. ein Bereich des Schadens angeben. Hinzu kommt, dass einige Fotos nicht eindeutig sind und die Klassenzuordnung teilweise eher subjektiv ist. Gerade bei nicht eindeutigen Fotos, die verschiedene Schadensgrade enthalten, streuen die Antworten stark. Somit ist hier auch die Streuung eine gute zusätzliche Auswertungsvariante.

Darüber hinaus wurde die Nutzung des für diesen Aufgabentyp entwickelten Tutorials untersucht. Hierfür wurden einzelne Bilder in das Tutorial eingebaut, die auch in den Micro-Mapping-Aufgaben zur detaillierten Schadensbestimmung gezeigt wurden. Teilweise bewerteten Nutzer:innen den Schadensgrad in diesen Bildern falsch, obwohl der korrekte Schadensgrad in den Tutorial-Beispielen gegeben war. Künftig sollte daher noch mehr Zeit ausschließlich für das Vorab-Training der Nutzer:innen anhand des Tutorials eingeplant werden, bevor diese mit der Bearbeitung der Mikro-Mapping Aufgaben beginnen.

Ergebnisse der zweiten Workshops haben außerdem gezeigt, dass Nutzer:innen mit Vorwissen und fachlichem Hintergrund im Bereich Crowdsourcing oder im Umgang mit der Crowdmapp-App weniger Schwierigkeiten bei einzuordnenden Schadensmustern (z. B. Rissbreiten) haben. Vorab-Workshops können daher dazu genutzt, bestimmte Gruppen von Nutzer:innen vorab mit dem Tutorial und der Anwendung vertraut zu machen. So wären im Schadensfall bereits einige Gruppen von Nutzer:innen mit Vorwissen vorhanden, deren Auswertung bei nicht eindeutigen Schadensbewertungen stärker gewichtet werden oder als Referenz dienen können. Wie sich im Austausch mit Anwender:innen im Bereich Katastrophenschutz gezeigt

hat, verfügen diese teilweise bereits über bestehende Netzwerke von Freiwilligen, die vorab in Workshops mit der Micro-Mapping-Anwendung geschult und im Falle eines Schadensereignisses schnell mobilisiert werden können. Für die Schulung können beispielsweise bereits bestehende Testprojekte in der Crowdmap-App (Abschnitt 2.6.3) verwendet werden, für die Expert:innen-Referenzdatensätze genutzt werden können.

#### 2.6.2.4 Klassifizierungsergebnisse für die einzelnen Schadensgrade

Nachfolgend werden die Klassifizierungsergebnisse für einzelne Schadensgrade (Abschnitt 2.4) in der detaillierten Schadensbestimmung dargestellt, die in den Workshops mit Anwender:innen und LOKI-Partner:innen erzielt wurden. Ursachen von Fehlklassifizierungen wurden dabei mithilfe bauingenieurlicher Expertise hergeleitet.

Die Schadensgrade *leichter Schaden und Zerstörung* zeigen insgesamt einen hohen Anteil richtiger Antworten (79 % über 15 Fotos, 92 % über 12 Fotos), mittlere Schadensgrade streuen weiter (51 % - 62 % richtige Antworten über je 15 Fotos).

Die Schadensklasse *slight (leichter Schaden)* wird meistens korrekt klassifiziert wobei Fehlklassifizierungen überwiegend aus einer falschen Zuordnung zur Schadensklasse *moderate (mäßig)* und selten zur Schadensklasse *extreme (sehr stark)* resultieren. Diese Fehlklassifizierung in ähnliche Schadensgrade wird für viele Anwendungsfälle als akzeptabel angesehen, da sie immer eine konservativere Bewertung des Schadens darstellen (höchster erkannter Schaden wird benannt). Selbst für Expert:innen ist es auf Basis einzelner Bilder teilweise schwer einzuschätzen, ob bestimmte Rissgrößen und -muster sowie Abplatzungen noch einen *leichten* Schaden charakterisieren, insbesondere wenn die ganze Fassade im Bild dargestellt wird.

Bei Bildern der Schadensklasse *mäßiger Schaden* wurden oft mehr als 50 % der Bilder korrekt klassifiziert. Fehlklassifizierungen treten in Form einer Klassifizierung in eine Schadensklasse höher (*stark*) oder niedriger (*leicht*) auf. Für die korrekte Zuordnung relevante Rissbreiten und -längen werden dabei oft unterschätzt, wenn diese im Bild mitsamt der ganzen Fassade eines Gebäudes dargestellt sind. Risse werden somit also erkannt, eignen sich daher aber nicht immer für eine korrekte visuelle Klassifizierung in den Schadensgrad *mäßig*.

Die Schadensklasse *starker Schaden* wurde häufig in die Schadensklassen *moderat und sehr stark* fehlklassifiziert. Eine Unterschätzung des Schadens erfolgte dabei häufiger als eine Überschätzung. Ursache hierfür ist ebenfalls die Unterschätzung der Rissbreiten, die nicht als ausreichend kritisch angesehen wurden, um den Schadensgrad *stark* auszuweisen. Außerdem sind Schäden an nichttragenden Bauteilen und die Abgrenzung zu tragenden Bauteilen schwer einzuschätzen.

Bei der Schadensklasse *sehr starker Schaden* dominiert bei Fehlklassifizierungen die Tendenz zur Unterschätzung des Schadensgrades, bei der fälschlicherweise *starker* oder *mäßiger* Schaden bestimmt wurde. Hierbei wird davon ausgegangen, dass Schäden oft nicht als *sehr stark* erkannt wurden, da ihre Bedeutung für die Tragfähigkeit bei Nutzer:innen ohne bauingenieurliche Fachexpertise nicht bekannt ist.

Die Schadensklasse *Zerstörung* wurde überwiegend korrekt klassifiziert. Wenige Fehlklassifizierungen ergaben sich, wenn noch stehende Gebäudeteile auf dem Bild zu sehen waren.



Abbildung 50: Beispielfotos für schwer zu lösende Klassifizierungsaufgaben. (a) Leichter Schaden: Risse und Abplatzungen sind vermutlich in ihrer Größe schwer einzuschätzen, da die ganze Fassade dargestellt ist (Earthquake Engineering Research Institute 2022). (b) Moderater Schaden: Tendenz zu leichtem Schaden, da die Rissbreite schwierig einzuschätzen ist. Die Beurteilung ist noch in Ordnung (Pacific Earthquake Engineering Research Center 2022). (c) Starker Schaden: Freigelegte und ausgeknickte Bewehrung wird offensichtlich nicht erkannt. Die Risse und Abplatzungen führen zur Einschätzung eines moderaten Schadens (Pacific Earthquake Engineering Research Center 2022). (d) Sehr starker Schaden: Unterschätzung, da es schwierig einzuschätzen ist, ob eine Neigung bereits vor dem Erdbeben vorhanden war und wie kritisch diese für die Standsicherheit ist (Pacific Earthquake Engineering Research Center 2022). (e) Weite Streuung der Ergebnisse, da das Bild nicht eindeutig ist. Es wird vermutlich oft nicht erkannt, dass es sich um ein komplett umgekipptes Gebäude handelt (Pacific Earthquake Engineering Research Center 2022).

### 2.6.2.5 Zusammenfassung der Evaluation der Micro-Mapping-Methodik zur Schadensbestimmung

Basierend auf den Ergebnissen des Fragebogens und des Micro-Mappings, lässt sich Folgendes nennen:

- Positives Feedback zur Nutzbarkeit der Anwendung durch Anwender:innen (THW Heidelberg, Feuerwehr Heidelberg, Deutsches Rotes Kreuz International)
- Anwender:innen freuen sich bereits auf die Anwendung in eigenen Projekten und im Katastropheneinsatz
- Vorschläge zur Verbesserung der Anwendung, wie z. B. die Sichtbarkeit des Projektfortschritts in Prozent, wurden optimiert (dadurch wurde die Motivation der Teilnehmenden deutlich gesteigert, weitere Aufgaben zu lösen).
- Der Aufgabentyp der binären Schadensbestimmung erlaubt die überblicksartige Bestimmung hoher Schadensgrade.
- Im Aufgabentyp der detaillierten Schadensbestimmung von fünf Schadensgraden (Abschnitt 2.5) sind sehr hohe und sehr niedrige Schadensgrade leicht zu bestimmen. Schwierigkeiten bestehen in der Bestimmung mittlerer Schadensgrade, wobei auch hierbei Tendenzen abgeleitet werden, sodass ein Schadensbereich ausgewiesen werden kann
- Gebäude, die in der automatischen Schadensklassifizierung (Abschnitt 2.7) mit hoher Unsicherheit klassifiziert werden, können im Micro-Mapping zusätzlich visuell durch Nutzer:innen mit unterschiedlichem fachlichen Hintergrund und Vorwissen beurteilt werden. Solche Gebäude, die weder automatisch, noch visuell mit ausreichender Sicherheit klassifiziert wurden, können an Expert:innen zur manuellen Auswertung weitergeleitet werden. Durch diesen mehrstufigen Auswertungsprozess kann die Anzahl der Bilder und Gebäude, die von Expert:innen manuell begutachtet werden müssen, enorm reduziert und Zeit bei der Schadensbestimmung eingespart werden.
- Indem eine große Anzahl an Nutzer:innen gleichzeitig und räumlich ungebunden an der Schadensauswertung in schnellen und leicht zu lösenden Aufgaben teilnehmen kann, eignet sich die entwickelte Anwendung gut für den Einsatz im Erdbebenfall.

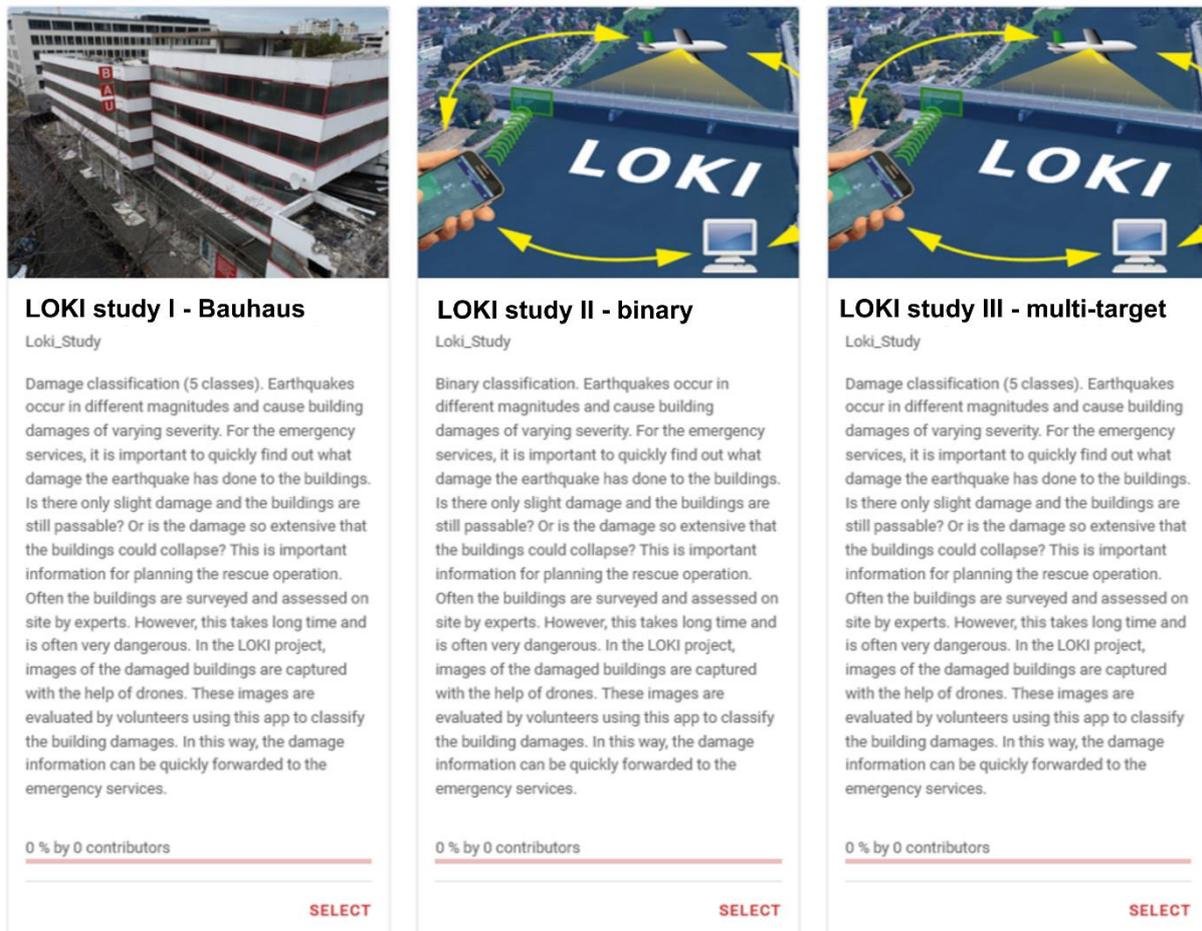
### 2.6.2.6 Aggregation der bildbasierten Auswertung zu gebäudegenauen Schadensgraden

Die Ableitung gebäudespezifischer Schadensgrade aus der pro-Bild Schadensbestimmung in Micro-Mapping-Tasks erfolgt durch eine Aggregation der Schadensgrade aller Bilder eines Gebäudes, die jeweils von mehreren Nutzer:innen ausgewertet wurden. Somit ergeben sich Wahrscheinlichkeiten für die verschiedenen Schadensgrade. Die ursprüngliche Idee, nur einen Schadensgrad pro Gebäude auszuweisen, wurde auf Basis des Feedbacks von Anwender:innen verworfen. Stattdessen werden pro Gebäude die Wahrscheinlichkeiten jedes Schadensgrades ausgegeben, sodass Anwender:innen und Entscheidungsträger:innen eine umfangreichere Informationsgrundlage zur Verfügung steht.

## 2.6.3 Integration in die Crowdmap-App

Sowohl das Completeness-Tool, als auch die Micro-Mapping-Methodik sind zum Projektende als Webanwendung in die Crowdmap-App (Heidelberg Institute for Geoinformation Technology 2023) integriert (Abb. 51). Zunächst war die Micro-Mapping-Methodik mit der Pybossa-Anwendung als Backend implementiert worden. Im zweiten Projektjahr wurde das Backend auf die Anwendung MapSwipe (<https://mapswipe.org>) umgestellt. Die Änderung des Backends bewirkt nicht nur technische Vorteile und eine langfristige Nutzbarkeit des Micro-Mapping-Tools im LOKI-System, sondern auch zusätzliche Synergien verschiedener Mapping-Anwendungen anderer Forschungsprojekte, wie z. B. die Weiterentwicklung der Nutzungsoberfläche. Zunächst wurde der Wechsel von einem Pybossa-HTML-Template zu einer eingebetteten

VueJS-Webanwendung und die Weiterentwicklung zu einer eigenständigen Webanwendung vollzogen. Im darauffolgenden Schritt wurde der Client in das neue Backend integriert und in mehreren Workshops mit LOKI-Partner:innen und Anwender:innen (Abschnitt 2.9) getestet, evaluiert und verbessert. Für die Tests wurden sowohl Bilder aus eigenen UAV-Befliegungen einzelner Gebäude (Abschnitt 2.7) als auch Datensätze mit Bildern von erdbebenbeschädigten Gebäuden aus anderen Quellen genutzt. Die Crowdmap-App (<https://crowdmap.heigit.org>) wird vom Heidelberg Institute for Geoinformation Technology (HeiGIT) als Service bereitgestellt und gepflegt, sodass eine nachhaltige und langfristige Nutzung und Weiterentwicklung sichergestellt werden kann.



**LOKI study I - Bauhaus**  
Loki\_Study

Damage classification (5 classes). Earthquakes occur in different magnitudes and cause building damages of varying severity. For the emergency services, it is important to quickly find out what damage the earthquake has done to the buildings. Is there only slight damage and the buildings are still passable? Or is the damage so extensive that the buildings could collapse? This is important information for planning the rescue operation. Often the buildings are surveyed and assessed on site by experts. However, this takes long time and is often very dangerous. In the LOKI project, images of the damaged buildings are captured with the help of drones. These images are evaluated by volunteers using this app to classify the building damages. In this way, the damage information can be quickly forwarded to the emergency services.

0 % by 0 contributors

**SELECT**

**LOKI study II - binary**  
Loki\_Study

Binary classification. Earthquakes occur in different magnitudes and cause building damages of varying severity. For the emergency services, it is important to quickly find out what damage the earthquake has done to the buildings. Is there only slight damage and the buildings are still passable? Or is the damage so extensive that the buildings could collapse? This is important information for planning the rescue operation. Often the buildings are surveyed and assessed on site by experts. However, this takes long time and is often very dangerous. In the LOKI project, images of the damaged buildings are captured with the help of drones. These images are evaluated by volunteers using this app to classify the building damages. In this way, the damage information can be quickly forwarded to the emergency services.

0 % by 0 contributors

**SELECT**

**LOKI study III - multi-target**  
Loki\_Study

Damage classification (5 classes). Earthquakes occur in different magnitudes and cause building damages of varying severity. For the emergency services, it is important to quickly find out what damage the earthquake has done to the buildings. Is there only slight damage and the buildings are still passable? Or is the damage so extensive that the buildings could collapse? This is important information for planning the rescue operation. Often the buildings are surveyed and assessed on site by experts. However, this takes long time and is often very dangerous. In the LOKI project, images of the damaged buildings are captured with the help of drones. These images are evaluated by volunteers using this app to classify the building damages. In this way, the damage information can be quickly forwarded to the emergency services.

0 % by 0 contributors

**SELECT**

Abbildung 51: Übersicht von Projekten zur Schadensbestimmung in der Crowdmap-App (Heidelberg Institute for Geoinformation Technology 2023).

## 2.7 AP 7 – Automatische Schadensbestimmung (UHD-3DGeo)

Im Projekt wurde zur automatischen Schadensbestimmung in multi-temporalen Punktwolken ein änderungsbasierter Ansatz entwickelt, der gebäudespezifische Schäden auf Basis von Änderungen eines Gebäudes vor und nach einem Erdbebenereignis automatisch ableitet. Zur Bestimmung höherer Schadensgrade bei unzureichenden vorab verfügbaren realen Trainingsdaten wurde in Zahr et al. (2023a) ein Ansatz entwickelt, bei dem das zur Schadensbestimmung eingesetzte Modell des maschinellen Lernens vorab mit Daten aus virtuellem Laserscanning (VLS) trainiert wird und somit im Schadensfall direkt zur Schadensbestimmung in realen Punktwolken-Datensätzen eingesetzt werden kann. Die Schadensbestimmung integriert dabei auch die für einzelne Schadensgrade typischen Schadensmuster aus dem Scha-

denskatalog (Abschnitt 2.5). Insbesondere für geringe Schadensgrade kann die neu entwickelte Methode der Ebenen- und Korrespondenz-basierten Änderungsdetektion aus Zahs et al. (2022a) zum Einsatz kommen.

### **2.7.1 Ansatz zur änderungsbasierten Schadensbestimmung**

Rechtzeitige und zuverlässige Informationen über erdbebenbedingte Gebäudeschäden spielen eine entscheidende Rolle für die effektive Planung von Rettungs- und Wiederaufbaumaßnahmen. Eine automatische Schadensbestimmung auf Grundlage der Analyse von 3D-Punktwolken kann innerhalb weniger Stunden schnelle und objektive Informationen über die Schadenslage liefern. Die Vielfalt möglicher Schadensmerkmale ist dabei groß und die Übertragbarkeit von automatischen Methoden, die für einen Untersuchungsstandort entwickelt wurden, auf andere geografische Regionen ist begrenzt (Vetrivel et al. 2019), ebenso wie die Übertragbarkeit auf Punktwolken unterschiedlicher Aufnahmeverfahren, insbesondere für Ansätze des Maschinellen Lernens (Kerle et al. 2019). Insbesondere die Trainingsdatenanforderungen moderner Ansätze des maschinellen Lernens sind mit realen Daten schwer zu erfüllen, wenn mehrere Schadensgrade klassifiziert werden sollen (Alzubaidi et al. 2021). In der Praxis können daraus resultierende Fehlklassifizierungen dazu führen, dass beschädigte Gebäude nicht erkannt werden und folglich nicht im Fokus lokaler Einsatzkräfte stehen.

Im Projekt wurde daher eine Methode zur Klassifizierung von Schadensgraden in einem überwachten Ansatz unter Verwendung eines Random-Forest-Klassifikators entwickelt, der vorab auf simulierten Punktwolkendaten aus virtuellem Laserscanning (VLS) trainiert wird (Abb. 52). Mit diesem Ansatz werden bestehende Methoden zur detaillierten Klassifizierung mehrerer Schadensgrade an Gebäuden insbesondere für solche Anwendungen ergänzt, bei denen zeitnahe Schadensinformationen erforderlich sind und keine geeigneten und ausreichenden realen Trainingsdaten vor und nach einem Erdbebenereignis zur Verfügung stehen. Weiterhin wurde untersucht, wie sich die Verwendung von nicht regionsspezifischen Trainingsdaten auf die Klassifizierungsgenauigkeit auswirkt, um die Übertragbarkeit zwischen geografischen Regionen zu bewerten.

Die Methode berücksichtigt folgende Aspekte:

- (1) Schäden werden pro Gebäude klassifiziert, indem die Veränderung geometrischer Merkmale zwischen Punktwolken vor und nach dem Erdbebenereignis abgeleitet wird. Dadurch ist die Methode unabhängig von der Modellierung von Gebäudeformen vor dem Erdbebenereignis und kann Änderungen durch den direkten Vergleich multitemporaler Punktwolken ableiten.
- (2) Der Ansatz integriert Fachwissen aus dem Erdbebeningenieurwesen in den Prozess der Trainingsdatengenerierung aus virtuellen 3D-Szenen. Unter Verwendung des in LOKI entwickelten deskriptiven Schadenskatalogs (Abschnitt 2.5) wird Wissen über mögliche Schadensmuster für verschiedene Schadensgrade einbezogen und die regionale und gebäudespezifische Variabilität möglicher Schadensmuster berücksichtigt. Hierdurch wird sichergestellt, dass die generierten Trainingsdaten das gesamte Spektrum der im realen Datensatz zu erwartenden Schadensbilder abdecken.
- (3) Durch den Einsatz von virtuellem Laserscanning (VLS) zur Generierung simulierter Trainingsdaten werden automatisch gelabelte gebäudespezifische Trainingsdaten mit realistischen Punktwolkeneigenschaften abgeleitet.

- (4) Die Verwendung objektspezifischer Änderungsmerkmale für die Klassifizierung von Gebäudeschäden erlaubt die Verwendung von Punktwolken unterschiedlicher Aufnahmeverfahren (Laserscanning, Photogrammetrie) für das Training und die Anwendung des Modells maschinellen Lernens und damit einen datenbezogenen Transfer des Modells.

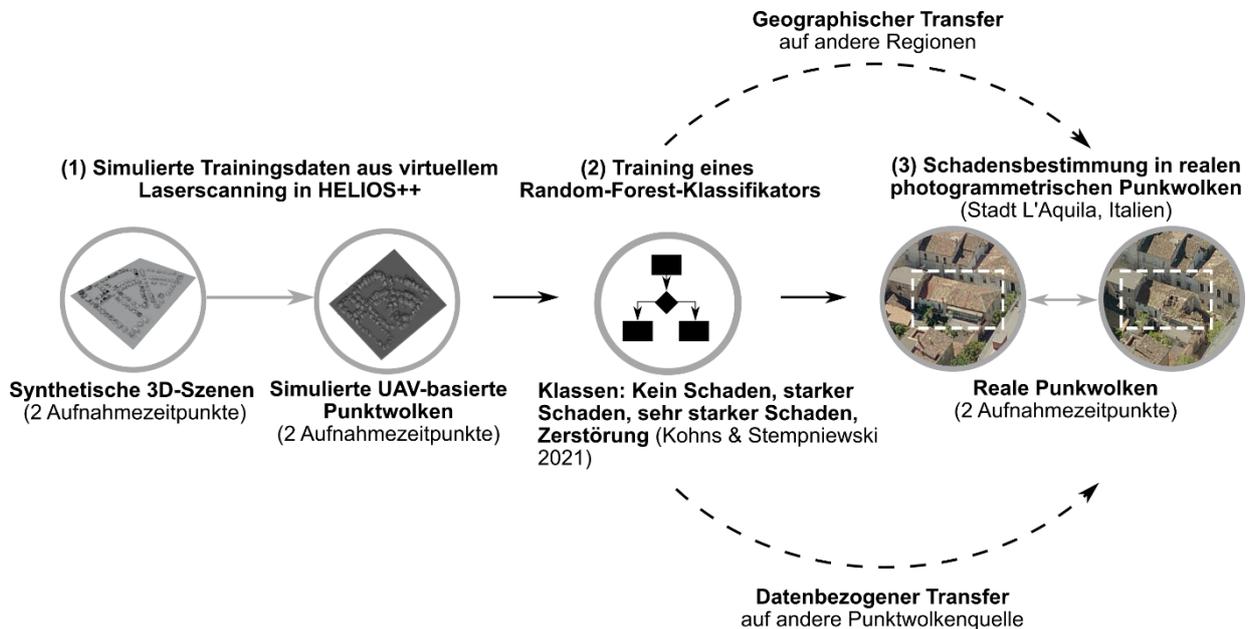


Abbildung 52: Ansatz zur änderungsbasierten Klassifizierung struktureller Gebäudeschäden in realen Punktwolken auf Basis eines mit simulierten Punktwolken trainierten Modells maschinellen Lernens (Zahs et al. 2023a).

In Anlehnung an den Schadenskatalog (Abschnitt 2.5) werden im entwickelten Ansatz vier Schadensgrade berücksichtigt: Kein Schaden, starker Schaden, sehr starker Schaden, Zerstörung. Leichte und mäßige Schäden werden nicht berücksichtigt, da die geometrische Darstellung ihrer typischen Schadensmuster (z. B. Rissbreiten von wenigen Millimetern) in den Punktwolken eine höhere geometrische Auflösung erfordert, d. h. detailliertere Erfassungen, als sie typischerweise durch UAV-basierte Aufnahmen in den Anwendungsfällen von LOKI (Abschnitt 2.1) möglich sind.

Nachfolgend werden die für die Entwicklung und Evaluation des entwickelten Ansatzes zur änderungsbasierten Schadensbestimmung relevanten Schritte im Projekt beschrieben. Dies beinhaltet (1) die 3D-Datenerfassung und Simulation von 3D-Daten (Abschnitt 2.7.1.1), (2) die Weiterentwicklung der an der Universität Heidelberg entwickelten Software HELIOS++ zur Simulation von 3D-Punktwolken mittels virtuellem Laserscanning (Abschnitt 2.7.1.1), (3) die Entwicklung einer Methodik zur schnellen Co-Registrierung multi-temporalen Punktwolken (Abschnitt 2.7.1.2), und (4) die Evaluation der entwickelten Methodik anhand eines realen Datensatzes eines Erdbebens in Italien (Abschnitt 2.7.1.3). Darüber hinaus wurde eine weitere Methode zur Änderungsdetektion entwickelt, die in Abschnitt 2.7.1.4 vorgestellt wird.

#### 2.7.1.1 3D-Datenerfassung und Simulation virtueller 3D-Daten

Zur Entwicklung und Evaluation der Methodik zur automatischen Schadensbestimmung wurden sowohl reale 3D-Punktwolken und Bilddaten erhoben und beschafft sowie synthetische 3D-Punktwolken durch Laserscanning-Simulationen generiert. Diese Daten decken sowohl Einzelgebäude, als auch größere städtische Gebiete ab. Eine Übersicht der im Projekt verwendeten realen und simulierten Datensätze ist in Tab. 8 dargestellt.

Tabelle 8: In LOKI aufgenommene und durch externe Kooperationspartner:innen bereitgestellte reale und simulierte Datensätze.

Aufnahmeobjekt	Datentyp	Quelle	Verwendet für
Campus-Gebäude der Universität Heidelberg (Heidelberg, Deutschland)  Einzelnes Abrissgebäude	Realer Datensatz  3D-Punktwolken und Bilddaten aus UAV-basiertem Laserscanning und Photo-grammetrie (multi-temporal)	Eigene Datenerfassung im Rahmen des Projekts	Methodenentwicklung
Bauhaus Heidelberg (Heidelberg, Deutschland)  Einzelnes Abrissgebäude	Realer Datensatz  3D-Punktwolken und Bilddaten aus UAV-basiertem Laserscanning und Photo-grammetrie (mono-temporal)	Eigene Datenerfassung im Rahmen des Projekts	Methodenentwicklung
Stadt L'Aquila (Italien)  Durch Erdbeben beschädigte Stadt	Realer Datensatz  3D-Punktwolken und Bilddaten aus UAV-basierter Photogrammetrie (multi-temporal)	Externe Kooperationspartner:innen (Firma CGR SpA im Rahmen des IN-ACHUS Forschungsprojekts ( <a href="https://www.in-achus.eu/">https://www.in-achus.eu/</a> ).	Methodenentwicklung und Evaluation
Wohngebäude in Tainan (Taiwan)  Durch Erdbeben beschädigtes Einzelgebäude	Realer Datensatz  3D-Punktwolken aus UAV-basierter Photogrammetrie (mono-temporal)	Externe Kooperationspartner:innen (Prof. Rau, National Cheng-Kung University Taiwan)	Methodenentwicklung
Wohngebäude in Tainan (Taiwan)  Durch Erdbeben beschädigtes Einzel-Gebäude	Realer Datensatz  3D-Punktwolken aus UAV-basierter Photogrammetrie (mono-temporal)	Externe Kooperationspartner:innen (Prof. Rau, National Cheng-Kung University Taiwan)	Methodenentwicklung
Wohngebäude in synthetisch erstellten 3D-Stadtszenen	Simulierter Datensatz  3D-Punktwolken aus virtuellem UAV-basiertem Laserscanning (multi-temporal)	Virtuelles Laserscanning in HELIOS++; veröffentlicht in Zahs et al. 2023b	Methodenentwicklung

### *Reale 3D-Daten*

Reale multi-temporale Daten wurden durch mehrere UAV-basierte Datenerfassungen (Bild- und Laserscanning-Punktwolken, photogrammetrische Punktwolken) verschiedener Abrissobjekte in Deutschland bei verschiedenen Schadenszuständen erhoben. Diese Aufnahmen wurden teilweise ergänzt durch Referenzmessungen mit globalen Satellitennavigationssystemen, und terrestrischem Laserscanning. Des Weiteren wurden reale Datensätze von durch Erdbeben beschädigten Einzelobjekten in Tainan (Taiwan) sowie der Stadt L'Aquila (Italien) vor und nach einem Erdbebenereignis von externen Kooperationspartner:innen (Abschnitt 1.5) bereitgestellt.

3D-Punktwolken von Einzelobjekten aus UAV-basiertem Laserscanning und Photogrammetrie dienen zur Identifizierung von Änderungsmerkmalen, die für die verlässliche Klassifizierung verschiedener Schadensgrade herangezogen werden können. Die Aufnahme multi-modaler Punktwolken (Laserscanning und Photogrammetrie) der Abrissobjekte ermöglichte dabei die Identifizierung objektspezifischer Änderungsmerkmale, die eine Schadensbestimmung sowohl auf Basis von multi-temporalen Laserscanning-Punktwolken als auch multi-temporalen photogrammetrischen Punktwolken zulassen. Der L'Aquila-Datensatz stellte insbesondere für die empirische Studie in Zahs et al. (2023a) eine wichtige Datengrundlage dar, um die Anwendbarkeit der darin entwickelten Methodik zur Änderungs-basierten automatischen Schadensbestimmung auf reale Datensätze zu evaluieren.

### *Simulierte 3D-Daten*

Neben realen 3D-Punktwolken, wurden simulierte 3D-Punktwolken zur Entwicklung der Methodik zur automatischen Schadensbestimmung verwendet. Eine Voraussetzung für die auf maschinellem Lernen basierende Schadensklassifizierung ist die Verfügbarkeit ausreichender Mengen gelabelter Trainingsdaten, welche die gesamte Bandbreite der bei einem Erdbebenereignis zu erwartenden Schadensmuster abdecken. Wenn keine oder unzureichend gelabelte reale Daten verfügbar sind, können das Training von Klassifikatoren für maschinelles Lernen und deren anschließende Anwendung zur Schadensbestimmung von synthetischen Trainingsdaten profitieren. In LOKI wurde virtuelles Laserscanning (VLS) verwendet, um automatisch gelabelte Trainingsdaten für die Schadensbestimmung zu generieren. Dazu wurde die an der Universität Heidelberg entwickelte Software HELIOS++ (Winiwarter et al. 2022) eingesetzt. HELIOS++ ist ein in C++ implementiertes Open-Source-Simulationsframework für terrestrisches statisches, mobiles, UAV-basiertes und luftgestütztes Laserscanning. Eine ursprüngliche Softwareversion konnte im Projekt durch die in vielfacher Hinsicht verbesserte Software HELIOS++ ersetzt werden. Die moderne Implementierung in C++ und die Möglichkeit zur Nutzung von Python-Bindings ermöglicht die schnelle Erstellung simulierter Trainingsdaten und die Kombination mit anderen Workflows. HELIOS++ unterstützt außerdem eine Reihe von Modelltypen für die 3D-Szenendarstellung (Abb. 53). Zu diesen Modelltypen gehören vermaschte Netze, digitale Geländemodelle, Punktwolken und transparente Voxel. In einer Szene können Objektmodelle unterschiedlicher Art kombiniert werden, so dass Darstellungen über mehrere räumliche Skalen in unterschiedlichen Auflösungen und Detailgraden möglich sind. HELIOS++ folgt dabei einem modularen Design, bei dem die Kernkomponenten Plattform, Szene und Scanner individuell und einfach konfiguriert werden können (Abb. 54). HELIOS++ ermöglicht außerdem die Simulation der Strahlendivergenz mit einer Subsampling-Strategie und ist in der Lage, vollständige Wellenausgaben als Grundlage für detaillierte Analysen zu erstellen. In Winiwarter et al. (2022) wurde in einer Literaturübersicht gezeigt, wie sich HELIOS++ unter anderen VLS-Programmen in Bezug auf Eingabemodellunterstützung und Simulation der Strahlendivergenz positioniert. Zudem wurde ein direkter Vergleich von Simulationen mit DART

(Gastellu-Etchegorry et al. 2016), durchgeführt, bei dem eine Szene aus dem Radiative Transfer Model Intercomparison (RAMI, Pinty et al. 2001) verwendet wurde. Dieses Beispiel zeigt, dass HELIOS++ zum Parsen und Vorbereiten der 3D-Szene etwa 10-mal länger benötigt als DART, aber in der Strahlsimulation etwa 314.000 mal schneller arbeitet und 200.000 Strahlen/s erreicht. Ein Vergleich von HELIOS++ mit seinem Vorgänger HELIOS ergab eine um bis zu 99 % reduzierte Laufzeit (Tab. 9). Durch diese Weiterentwicklungen ermöglicht HELIOS++ eine deutlich schnellere Simulation komplexer Szenen und kann einfach und flexibel in Workflows der LOKI-Systemkomponente zur automatischen Schadensbestimmung integriert werden.

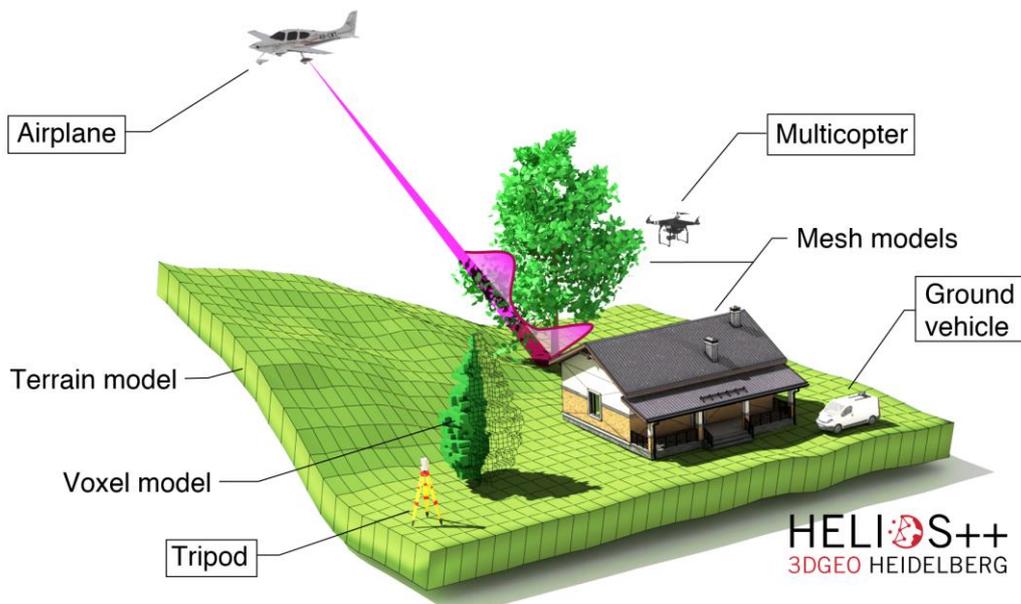


Abbildung 53: Schematisches Konzept von HELIOS++ mit verschiedenen Plattformen (eingerahmte Beschriftungen) und Objektmodellen, die eine Szene bilden (Winiwarter et al. 2022).

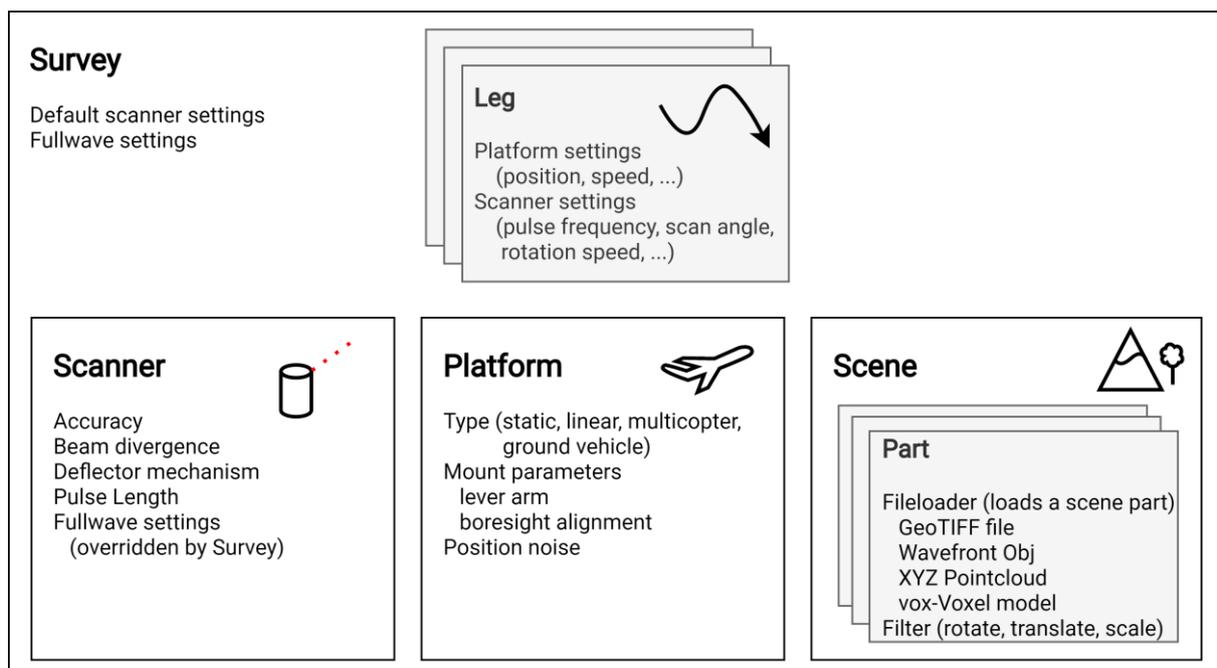


Abbildung 54: Hauptkomponenten und Dateistruktur von HELIOS++ Aufnahme, Szene, Plattform und Scanner. Eine Simulation besteht aus einer oder mehreren sog. Legs und einem einzelnen Scanner, einer Plattform und einer Szene. Eine Szene setzt sich aus einem oder mehreren Teilen zusammen, die durch unterschiedliche Datenmodelle repräsentiert sein können (Winiwarter et al. 2022).

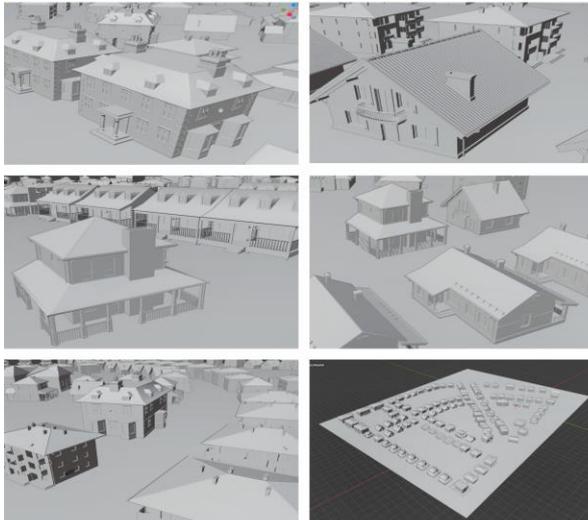
Tabelle 9: Vergleich der Performance von HELIOS und HELIOS++ mit verschiedenen Optionen. Es wurden Standardparameter für die Wellenformmodellierung ( $beamSampleQuality = 3$  und  $binSize\_ns = 0.25$ ;  $numBins = 100$  und  $numFullwaveBins = 200$  für HELIOS++ bzw. HELIOS) verwendet. Die Laufzeiten sind gemittelt über drei Durchläufe ( $\pm$  Standardabweichung), der Speicherbedarf ist der höchste Wert (Maximum) während des gesamten Laufs (Winiwarter et al. 2022).

	HELIOS (Java) Version 2018-09-24		HELIOS++ Version 1.0.9	
<b>Echo width</b>	✓	✓		
<b>Waveform output</b>	✓	✓	✓	
<b>File format</b>	XYZ	XYZ	XYZ	LAS
<b>Scene 1 (ALS, Geo-TIFF)</b>	4,712.1± 613.8 s	2,819.5± 43.0 s	2,721.4± 0.5s	1,048.4± 10.4 s 1,827 MB
<b>Scene 2 (MLS, geometric primitives)</b>	68.0± 2.3 s 560 MB	0.5± 0.0 s 11 MB	0.5± 0.0 s 11 MB	0.7±0.3 s 12.3 MB
<b>Scene 3 (TLS, models)</b>	<b>tree</b> 363.6± 6.7 s 5,360 MB	55.5± 0.0 s 320 MB	45.2± 0.0 s 320 MB	34.4± 0.3 s 320 MB

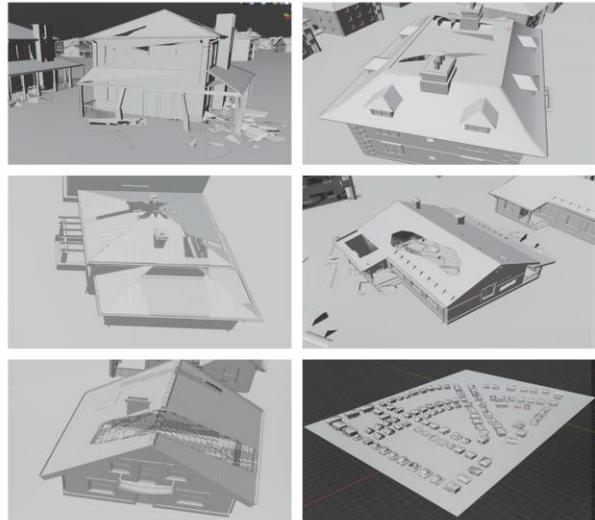
Wie in der Literatur gezeigt, können virtuell gescannte Punktwolken für vielfältige Anwendungen genutzt werden. Hierbei konnten vier Hauptkategorien von Anwendungsfällen identifiziert werden, die von simulierten LiDAR-Punktwolken profitieren: Planung realer Datenerfassungen, Methodenevaluierung, Training von Methoden des maschinellen Lernens und Sensorexperimente. Ein universeller LiDAR-Simulator wie HELIOS++ kann daher für viele verschiedene wissenschaftliche Anwendungen eingesetzt werden, solange sichergestellt ist, dass die Simulation die Realität, die für die gegebene Forschungsfrage spezifisch ist, angemessen abbildet.

Im Projekt wurde HELIOS++ verwendet, um die Aufnahme zuvor erstellter 3D-Szenen (Abb. 55) mit beschädigten und unbeschädigten Gebäuden zu zwei Aufnahmezeitpunkten (vor und nach einem Erdbebenereignis) zu simulieren. Die gewonnenen multi-temporalen Laserscanning-Punktwolken (Abb. 56) dienten in der Methodik zur automatischen Schadensbestimmung als Trainingsdaten für ein Modell des maschinellen Lernens, welches anschließend zur Schadensbestimmung in realen Daten angewendet wurde. Eine detaillierte Beschreibung der 3D-Szenen und abgeleiteten simulierten Punktwolken findet sich in Zahs et al. (2023a).

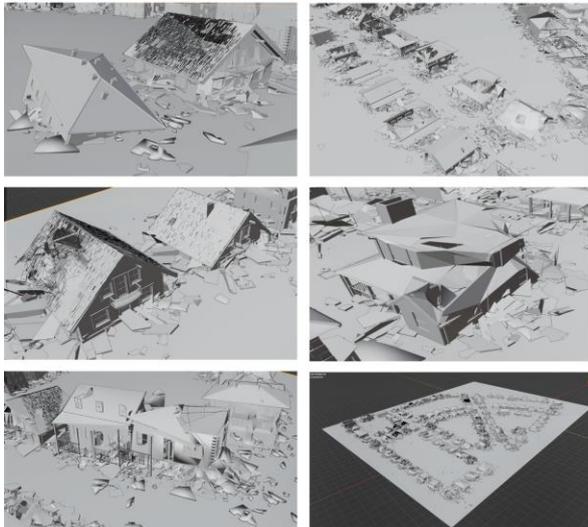
(a) Kein Schaden



(b) Starker Schaden



(c) Sehr starker Schaden



(d) Zerstörung

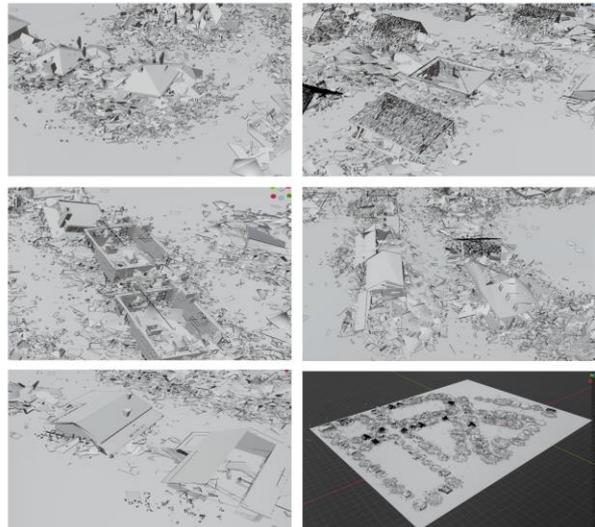


Abbildung 55: Beispielhafte Ausschnitte der 3D-Szenen mit Gebäudemodellen unterschiedlicher Schadensgrade. Die 3D-Szenen wurden als Input für die Simulation von Punktwolken mittels virtuellem Laserscanning in HELIOS++ verwendet (Zahs et al. 2023a).

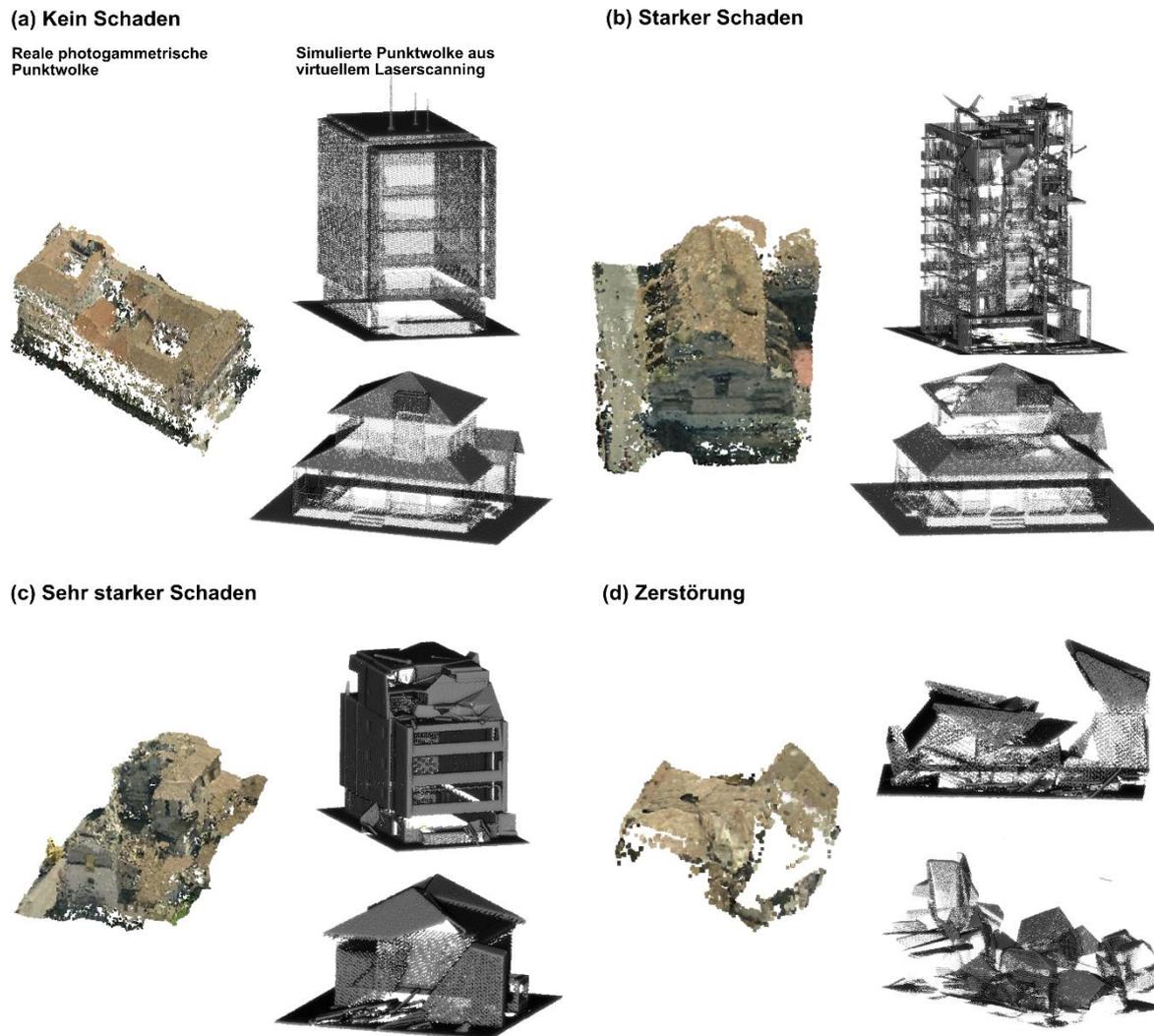


Abbildung 56: Reale photogrammetrische und simulierte Punktwolken aus virtuellem Laserscanning in HELIOS++ für die verschiedenen Schadensgrade (Zahs et al. 2023a).

### 2.7.1.2 3D-Punktwolkengenerierung und Verwaltung

Voraussetzung für die entwickelten änderungsbasierten Methoden zur automatischen Schadensbestimmung ist die Co-Registrierung der multi-temporalen Punktwolken. Nach UAV-basierten Aufnahmen kann es vorkommen, dass die daraus generierten Punktwolken aufgrund von absoluten Positionierungsungenauigkeiten leicht (Zentimeter bis Dezimeter) zueinander versetzt sind. Wird dieser Versatz nicht vor Anwendung der änderungsbasierten Methoden zur Schadensbestimmung korrigiert, kann dies zu fälschlicherweise detektierten Änderungen und damit Schadenszuweisungen führen. Im Rahmen des Projekts wurde deshalb eine Oberflächen-basierte Methodik zur automatischen Co-Registrierung von 3D-Punktwolken angewandt. Die Methodik verwendet über mehrere Aufnahmen unveränderte Bereiche (z. B. Felswände, unbeschädigte Gebäude) in Punktwolken zweier Aufnahmezeitpunkte. Für diese Bereiche werden die Abstände zwischen den beiden Punktwolken durch rigide Transformation (ohne Skalierung) mittels eines Iterative Closest Point Algorithmus (ICP, Besl & McKay 1992) minimiert.

### 2.7.1.3 Evaluation des Ansatzes zur änderungsbasierten Schadensbestimmung

Der entwickelte Ansatz zur änderungsbasierten Schadensbestimmung wurde anhand eines realen Datensatzes multitemporaler photogrammetrischer Punktwolken der Stadt L'Aquila (Abb. 57) evaluiert. Ziel war es, zu untersuchen, inwiefern das auf simulierten Laserscanning-

Punktwolken trainierte Modell erfolgreich für (1) die Detektion von Gebäudeschäden (binär) und (2) die detaillierte Bestimmung mehrerer Schadensgrade aus dem Schadenskatalog (Abschnitt 2.5) eingesetzt werden kann. Die Evaluation fand auf Basis verschiedener Metriken zur Bewertung der Klassifizierungsgenauigkeit statt.

Die Ergebnisse zeigen zum einen die Anwendbarkeit und Übertragbarkeit der Methode auf Punktwolken verschiedener Aufnahmeverfahren, die zum Training (virtuelles Laserscanning) und zur Anwendung (reale Photogrammetrie) des Modells für die Schadensbestimmung verwendet werden. Dies ist durch die Verwendung einer Reihe generischer objektspezifischer Änderungsmerkmale möglich, die Schadensmuster sowohl in den simulierten Laserscan-Punktwolken als auch in den realen Punktwolken charakterisieren. Simulierte Punktwolken aus virtuellem Laserscanning stellen somit eine wertvolle Quelle für realistische, gelabelte Trainingsdaten für die jeweilige Klassifizierungsaufgabe dar.

Zum anderen konnte durch den entwickelten Ansatz eine geographische Übertragbarkeit des auf simulierten Daten trainierten Modells erreicht werden (Tabelle 10: Klassifizierungsergebnisse für mit verschiedenen Input-Daten trainierte Random-Forest (RF)-Klassifikatoren. Trainiert wurde mit generischen simulierten Laserscan-Punktwolken (RF simuliert) und regionsspezifischen realen photogrammetrischen Punktwolken (RF real). So konnte das Modell auf geometrische Änderungen trainiert werden, welche die relevanten Schadensgrade in verschiedenen geographischen Regionen charakterisieren. Infolgedessen werden bei der Bewertung mehrerer Schadensgrade im realen Datensatz hohe Klassifizierungsgenauigkeiten erzielt (Gesamtgenauigkeit: 92,0 % - 95,1 %; F1-Score: 78,05 % - 91,67 %). Die Klassifizierungsgenauigkeit verbesserte sich nur geringfügig, wenn reale Trainingsdaten verwendet wurden (Gesamtgenauigkeit: < +2 %, F1-Score: < +3 %). Gleiches zeigte sich für die reine Detektion beschädigter Gebäude, bei der durch das rein mit simulierten Trainingsdaten trainierte Modell 89,6 % der beschädigten Gebäude erkannt wurde. Die Verwendung realer regionsspezifischer Trainingsdaten erhöhte die Erkennungsrate nur geringfügig um +3,1 %.

Angesichts der beiden Aspekte der Übertragbarkeit unseres Ansatzes stellt dieser einen wertvollen methodischen Beitrag zur Bestimmung struktureller Gebäudeschäden in realen Punktwolken dar. Er ist besonders für solche Anwendungen relevant, bei denen zeitnahe Informationen über die Schadenssituation erforderlich sind, und keine ausreichenden realen Trainingsdaten vorab verfügbar sind. In der praktischen Anwendung ergibt sich durch den entwickelten Ansatz ein wertvoller Zeitgewinn für Rettungsmaßnahmen nach einem Erdbebenereignis, da entsprechende Klassifikatoren vorab trainiert und im Falle eines Erdbebens ohne zeitliche Verzögerung zur Schadensbestimmung eingesetzt werden können, sobald erste Daten aus UAV-Flügen verfügbar sind.

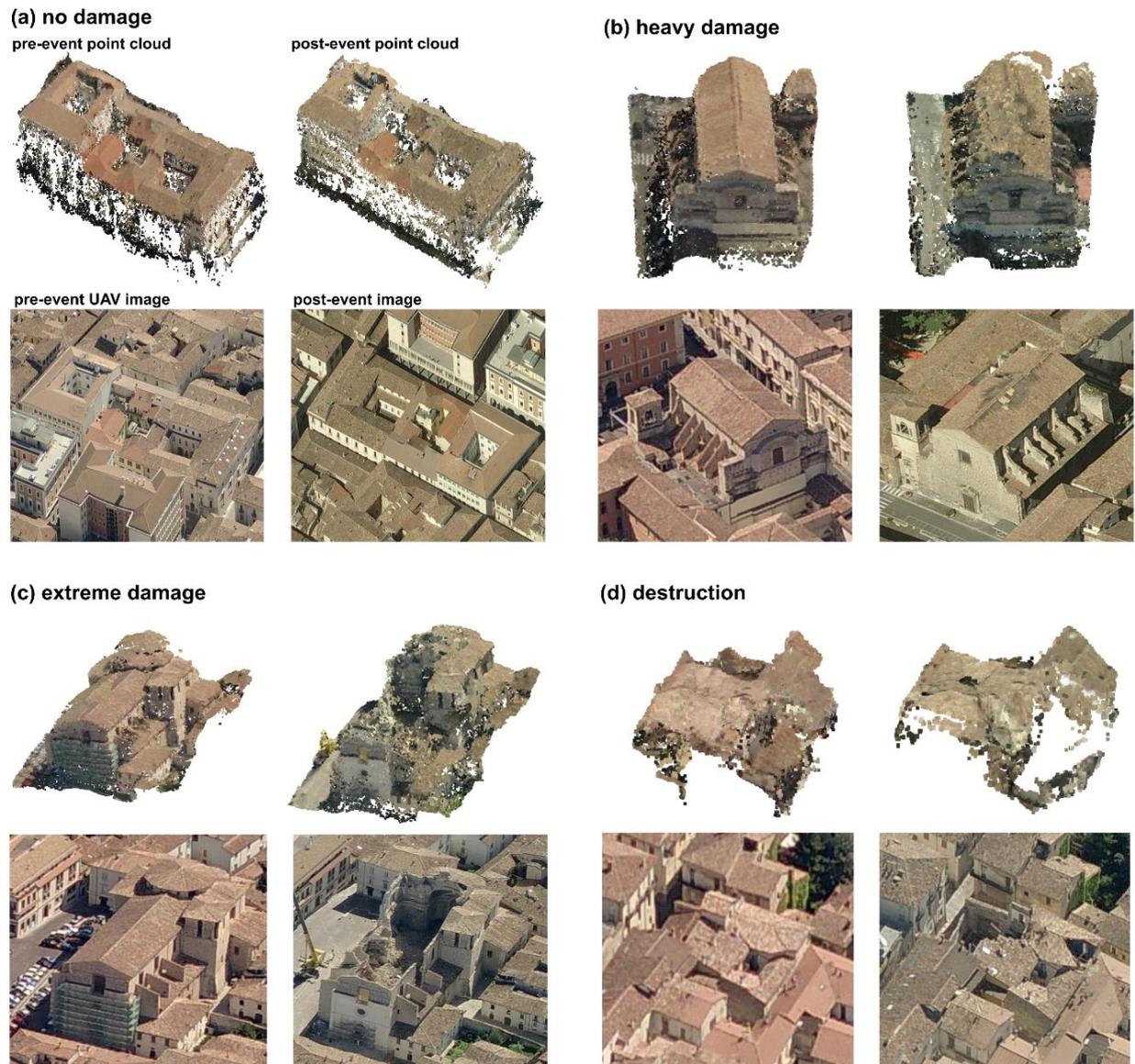


Abbildung 57: Beispiele für UAV-Bilder und daraus generierte photogrammetrische 3D-Punktwolken von Einzelgebäuden unterschiedlicher Schadensgrade im Testgebiet L'Aquila (Zahs et al. 2023a).

Tabelle 10: Klassifizierungsergebnisse für mit verschiedenen Input-Daten trainierte Random-Forest (RF)-Klassifikatoren. Trainiert wurde mit nicht-regionsspezifischen simulierten Laserscan-Punktwolken (RF simuliert) und region-spezifischen realen photogrammetrischen Punktwolken (RF real).

	Alle Schadensgrade	Kein Schaden	Starker Schaden	Sehr starker Schaden	Zerstörung
<b>RF simuliert</b>					
Overall accuracy [%]	95,12	95,12	92,80	92,00	93,60
F1-Score [%]	91,67	91,67	78,05	88,33	88,89
<b>RF real</b>					
Overall accuracy [%]	96,80	96,80	93,60	92,00	93,60
F1-Score [%]	94,59	94,59	78,95	83,87	89,19

#### 2.7.1.4 Korrespondenz- und Ebenen-basierte Methode zur Änderungsbestimmung

Als ergänzende Methode wurde im Projekt eine Korrespondenz- und Ebenen-basierte Änderungsmethodik (Zahs et al. 2022a) entwickelt. Diese Methode wurde für den komplexeren Fall natürlicher Oberflächen entwickelt und evaluiert und kann ebenso für die Schadensbestimmung an Gebäuden eingesetzt werden. Vorteil für die Anwendungsfälle in LOKI (Abschnitt 2.1) ist die schnelle Anwendbarkeit für die Schadensbestimmung nach Erdbebenereignissen, da diese Methode keine Rekonstruktion geometrisch komplexer Objekte erfordert, sondern Änderungen zwischen simpleren, homologen ebenen Flächen quantifiziert. Zudem werden deutlich weniger Trainingsdaten benötigt als bei Schadensklassifizierungen mittels Deep-Learning-Ansätzen. Somit ist eine Übertragung und Anwendung dieser Methode viel schneller auf neue Untersuchungsgebiete mit anderen baulichen und geographischen Gegebenheiten möglich. Die Verwendung von aus den Daten automatisch abgeleiteten Ebenen erlaubt es außerdem, kleinere signifikante Veränderungen (cm-Bereich) als durch bisherige Ansätze zu bestimmen. Letzteres ist vor allem für die Bestimmung niedrigerer Schadensgrade relevant.

Der Ansatz (Abb. 58) besteht aus drei wesentlichen Schritten und (1) extrahiert ebene Flächen in Punktwolken aus zwei Aufnahmezeitpunkten, (2) identifiziert entsprechende ebene Flächen zwischen zwei Punktwolken mit Hilfe einer binären Random-Forest-Klassifizierung und (3) berechnet Punktwolkendistanzen (M3C2-Algorithmus; Lague et al. 2013) und die damit verbundene Unsicherheit zwischen den entsprechenden ebenen Flächen. Eine detaillierte Beschreibung der Methode ist in Zahs et al. (2022a) zu finden.

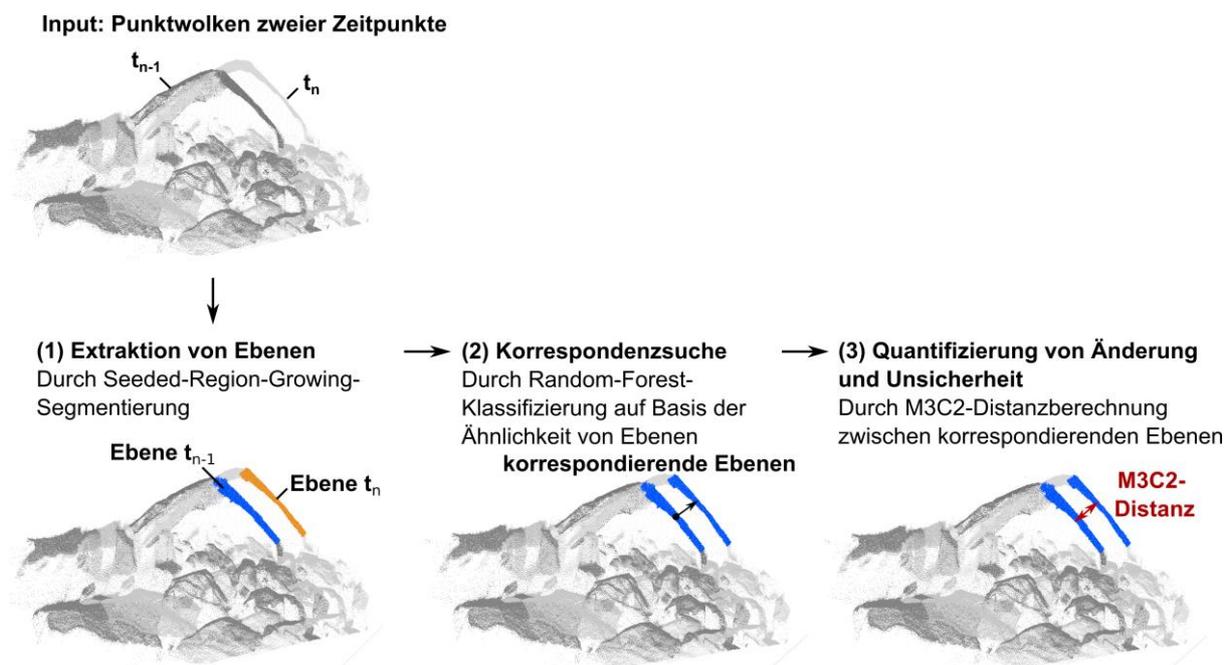


Abbildung 58: Überblick über den Ebenen- und Korrespondenz-basierten M3C2-Ansatz zur Quantifizierung von Veränderungen zwischen homologen ebenen Flächen und der damit verbundenen Unsicherheit auf Grundlage von Punktwolken zweier Aufnahmezeitpunkte (Zahs et al. 2022a).

Es konnte gezeigt werden, dass mit dem entwickelten Ansatz eine siebenfache Verringerung der Unsicherheit der quantifizierten Änderungen im Vergleich zur Referenzmethode (Lague et al. 2013) erreicht werden kann (Abb. 59). Die Methode ergänzt damit 3D-Änderungsanalysen in Anwendungen, die darauf abzielen, Änderungen kleinerer Größenordnungen in photogrammetrischen oder Laserscanning-Punktwolken verlässlich abzuleiten. Im Erdbebenkontext kann die Methode zur Bestimmung niedrigerer Schadensgrade eingesetzt werden, die z. B. durch

leichte Schrägstellung von Fassaden bzw. einzelner Fassaden- und Wandteile gekennzeichnet sind. Durch die geringeren Unsicherheiten bei der Quantifizierung von Änderungen können daher bereits kleine Änderungen bzw. Schäden verlässlich bestimmt und zur automatischen Schadensbestimmung herangezogen werden.

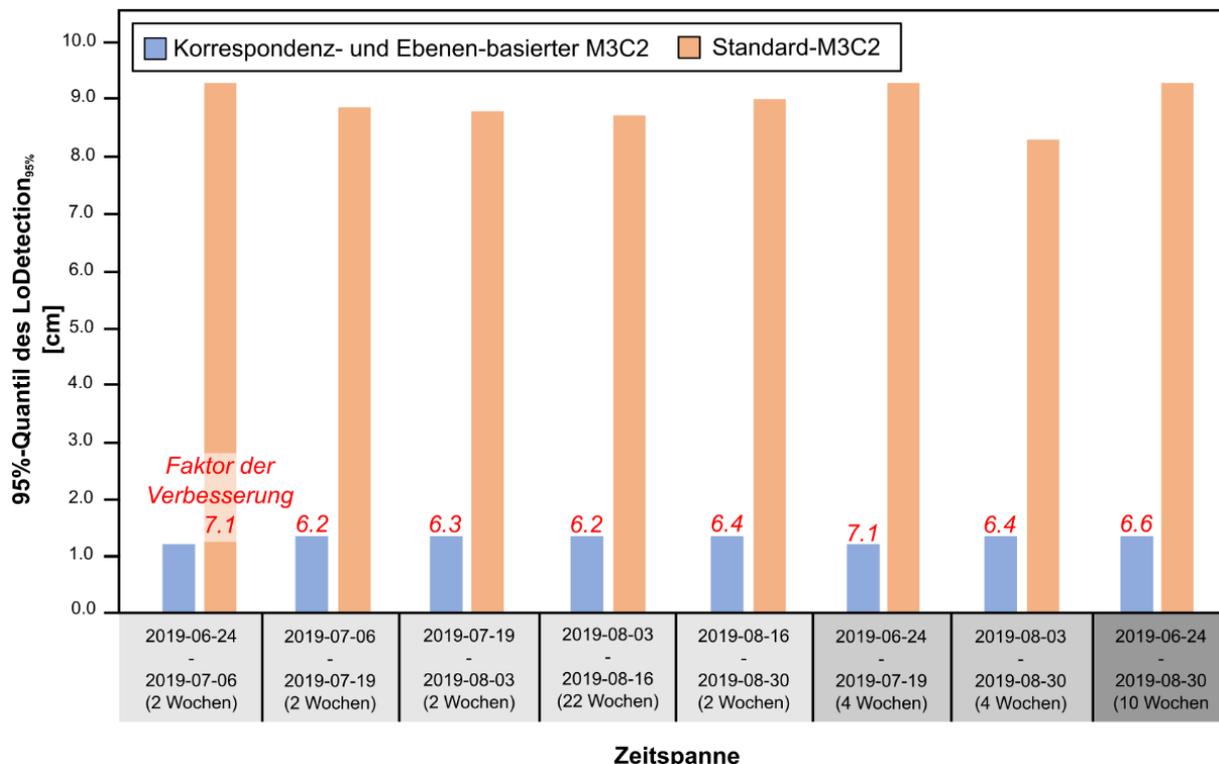


Abbildung 59: Verringerung der mit der quantifizierten Änderung verbundenen Unsicherheit (LoDetection) im Vergleich zur Referenzmethode (Lague et al. 2013). Dargestellt sind verschiedene Zeitspannen zwischen zwei Aufnahmezeitpunkten, für die Änderungen zwischen zwei Punktwolken quantifiziert und damit verbundene Unsicherheiten bestimmt wurden (Zahs et al. 2022a).

Ein weiterer Vorteil der entwickelten Methode ist die vielseitige Einsetzbarkeit für verschiedene geographische Anwendungsfälle über den Erdbebenkontext hinaus. Die Methode stellt ein wichtiges Werkzeug für die 3D-Änderungsanalyse in komplexen natürlichen Szenen für viele Fragestellungen, wie z. B. Hangrutschungen, dar, bei denen Szenencharakteristika die Identifizierung entsprechender flächiger Segmente in Punktwolken zweier Epochen erlauben.

Quellcodes und Daten der entwickelten Methoden sind in zitierbaren Repositorien frei verfügbar (Zahs et al. 2023b, Zahs et al. 2022b). Darüber hinaus wurde die Methode aus Zahs et al. 2022a in die Python-Bibliothek py4dgeo (py4dgeo Development Core Team 2023) integriert. py4dgeo bündelt verschiedene Methoden der 3D/4D-Änderungsanalyse in einer umfassenden Python-Bibliothek. Diese ist als internationales Open-Source-Projekt konzipiert, das in nahezu jede 3D- und GIS-Software im Geodatenbereich, die Python unterstützt, z. B. als Plugins integriert werden kann.

## **2.8 AP 8 – Fusion, Systemintegration, Pilotierung und Evaluation des Gesamtsystems (Gesamtverbund)**

Ziel dieses Arbeitspakets war die Entwicklung eines integrierten und evaluierten funktionsfähigen Prototyps des LOKI-Gesamtsystems (Abschnitt 2.1). Zur Fusion und Integration aller Teilkomponenten wurde dazu eine Integrations-Pipeline im zentralen LOKI-Quellcode-Repository aufgebaut, welche eine kontinuierliche Integration aller Teilsysteme der einzelnen Komponenten in das Gesamtsystem ermöglicht (Abschnitt 2.8.1). Des Weiteren wurde das System in zwei großen Feldstudien pilotiert (Abschnitt 2.8.2) und evaluiert. Dabei wurden potentielle Anwender:innen in Form mehrfacher Demonstrationen und Modultests involviert. Die Evaluationsergebnisse wurden für einen iterativen Verbesserungsprozess der Module und des Gesamtsystems genutzt, um die Anwendbarkeit des Systems in der Praxis zu erhöhen (Abschnitt 2.8.3).

### **2.8.1 Fusion und Integration**

Die Fusion und Integration der einzelnen Systemkomponenten zu einem Gesamtsystem stellte Meilenstein 2 des Projekts dar (Abschnitt 1.3) und wurde über eine Continuous-Integration-Pipeline in der öffentlich zugänglichen zentralen GitLab-Instanz des LOKI-Projekts (LOKI Gesamtverbund 2023a) umgesetzt. Bei Änderungen am Quellcode der jeweiligen Systemkomponenten werden Docker-Images in der GitLab-Registry gespeichert. Diese Images können von anderen Komponenten geladen und daraus ein Docker-Container gestartet werden, wodurch die darunterliegenden Services gestartet werden. Durch Einsatz dieser Docker-Services in der Continuous-Integration-Pipeline kann zum Zeitpunkt der Änderungen am Quellcode einer Komponente getestet werden, ob weiterhin alle Schnittstellen des Systems intakt sind und erwartungsgemäß funktionieren, wodurch die Integrierbarkeit aller Komponenten kontinuierlich sichergestellt werden kann.

### **2.8.2 Pilotierung**

Die Pilotierung des prototypischen Gesamtsystems ist Teil von Meilenstein 3 und 4 des Projekts (Abschnitt 1.3) und wurde durch eine Feldstudie umgesetzt. Dabei wurden alle Funktionen der einzelnen Komponenten und deren Schnittstellen getestet und evaluiert. Die Tests (Tab. 11) wurden entlang des gesamten Workflows (Abb. 60) in einem potenziellen Anwendungsfall durchgeführt.

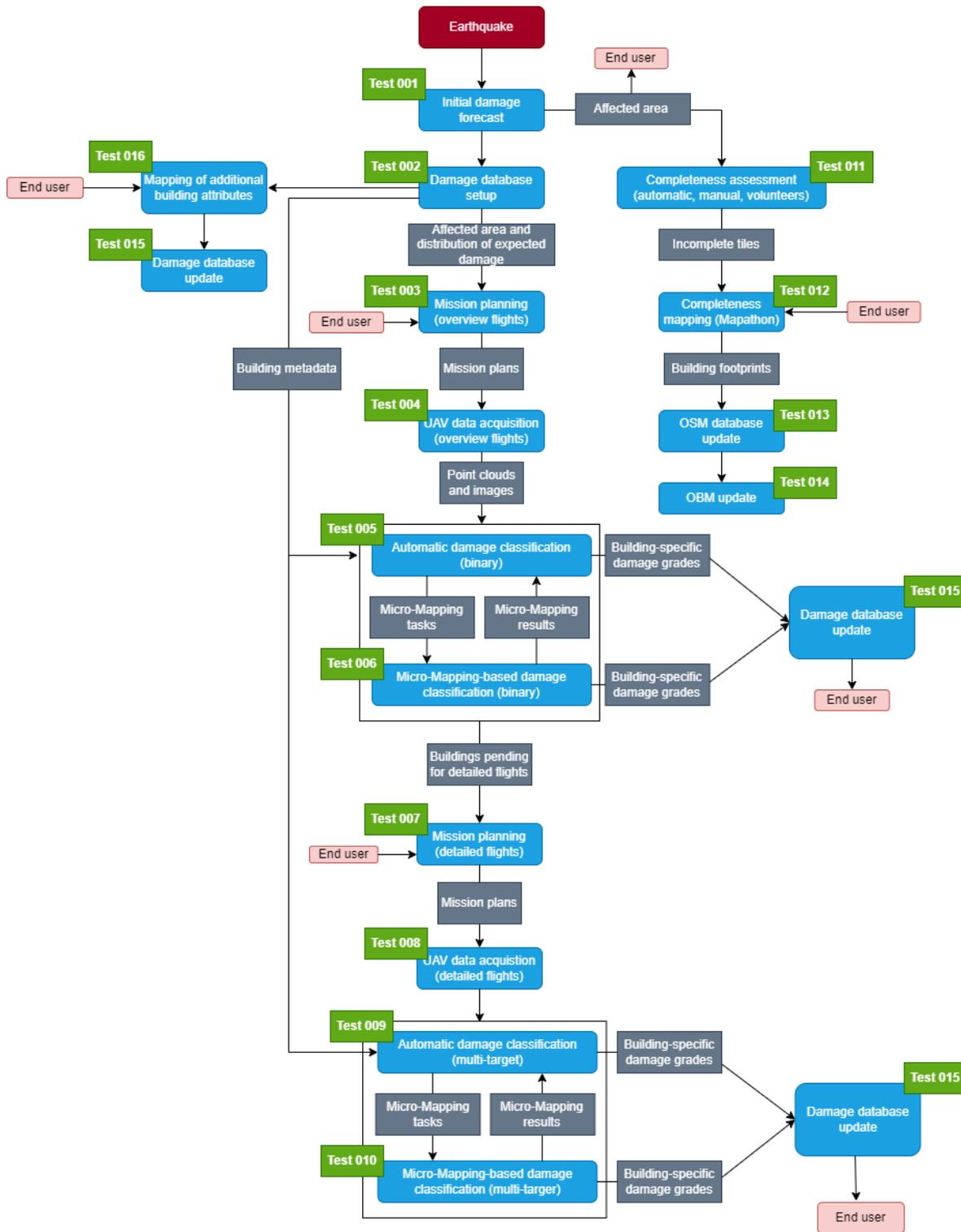


Abbildung 60: Workflow des im Rahmen der Pilotierung getesteten Anwendungsfalls, mit IDs der durchgeführten Tests in Grün dargestellt.

Tabelle 11: Im Rahmen der Pilotierung des prototypischen Gesamtsystems durchgeführte Tests (T), ihre hauptverantwortlichen Projektpartner und zugehörigen Module. Die einzelnen Tests-IDs sind auch in Abb. 60 dargestellt.

Test-ID	Partner	Modul	Beschreibung
T-01	GFZ	Berechnung des Bodenbewegungsfelds	Überprüfung der ShakeMAPI auf die Berechnung eines Bodenbewegungsfelds für ein bestimmtes Erdbebenereignis aus Ort und Stärke des Hypozentrums und dessen Ausgabe in eine Datei.
T-02	GFZ	Einrichtung der Schadensdatenbank	Test der Schadensbewertung des Loss-calculator unter Verwendung des in T-01 berechneten Bodenbewegungsfelds und Schreiben der gebäudebasierten Schadensdaten in die Exposure-Datenbank.
T-03	FZI	Missionsplanung für Übersichtsflüge	Testen zum Laden der Schadensdaten aus der Expositionsdatenbank von T-02 und der darauf basierenden Missionsplanung der Übersichtsflüge. Außerdem Test der resultierenden Schnittstelle zur Übermittlung der Flugpläne an die UAVs via UgCS und DJI Pilot.
T-04	Aeromey	Datenaufnahme in Übersichtsflügen	Test zur Ausführung der vom FZI ermittelten Flugpläne für die Übersichtsflüge und Datenaufnahme.
T-05	UHD-3DGeo	Automatische Schadensdetektion auf Basis der Punktwolken aus Übersichtsflügen	Ziel dieses Tests ist es, die Schnittstellen und Funktionalität des Moduls Automatische Schadensklassifizierung (binär) anhand des vorgegebenen Workflows für den Rahmen-test zu testen.
T-06	UHD-GIScience	Binäre Schadenserkennung durch Micro-Mapping	Test zur manuellen binären Klassifizierung der Bilder in „Schaden“ und „kein Schaden“, welche von der automatischen Klassifizierung in T-05 nur mit geringer Sicherheit klassifiziert werden konnten, über Crowdmap-App durch Freiwillige.
T-07	FZI	Missionsplanung für Detailflüge	Test zum automatisierten und manuellen Hinzufügen neuer Detailflug-Anfragen und Missionsplanungen für die Detailbefliegungen und Test der entsprechenden Schnittstelle zur Übermittlung der Flugpläne an die UAVs via UgCS und DJI Pilot.
T-08	Aeromey	Datenaufnahme in Detailflügen	Test zur Ausführung der vom FZI ermittelten Flugpläne für die Detailflüge und Datenaufnahme.

T-09	UHD-3DGeo	Automatische Schadensklassifikation für mehrere Schadensgrade auf Basis der Punktwolken aus den Detailflügen	Test zu den Schnittstellen und der Funktionalität des Moduls Automatische Schadensklassifizierung für mehrere Schadensgrade.
T-10	UHD-GIScience	Nichtbinäre Schadenserkennung durch Micro-Mapping	Test zur manuellen Klassifizierung der Bilder in zu den Schadensklassen (leicht, mäßig, stark, extrem, zerstört) welche von der automatischen Klassifizierung in T-09 nur mit geringer Sicherheit klassifiziert werden konnten, über eine Kartenwisch-App durch Freiwillige.
T-11	GFZ, UHD-GIScience	Gebäude-Vollständigkeitsbewertung durch Crowdsourcing und manuelle Vollständigkeitsbewertung	Test der Mapswipe-App auf Mobiltelefonen und Bewertung der Vollständigkeit eines Testgebiets durch Freiwillige.
T-12	UHD-GIScience	Kartierung zusätzlicher Gebäudegrundrisse durch einen Mapathon und mittels HOT-Tasking-Manager	Test der Identifikation unvollständiger Ausschnitte der Karte eines Testgebiets. Test des Kartierens dieser unvollständigen Ausschnitte mittels HOT-Tasking-Manager durch Freiwillige in Form eines Mapathons.
T-13	GFZ	Update der OSM-Datenbank	Test des automatischen Updates der OSM-Datenbank.
T-14	GFZ	Schadensdatenbank und dessen API	Test des automatischen Updates der OBM-Datenbank.
T-15	GFZ	Update der Schadensdatenbank	Test der Möglichkeit, manuelle Schadensklassifizierungen der Schadensdatenbank per API-Aufruf oder über eine .CSV-Datei hinzuzufügen.
T-16	UHD-GIScience	Erfassung zusätzlicher Gebäudeattribute mittels StreetComplete-App	Test der StreetComplete App in Heidelberg. Spielerische und einfache Methode, weitere Gebäudedaten (z. B. Gebäudehöhe, Anzahl der Stockwerke, Dachform) zu erfassen. Daten werden direkt in OSM-Datenbank gespeichert und sind so nutzbar für Exposure-Modellierung.

### 2.8.3 Demonstration und Evaluation

Die entwickelten Systemkomponenten wurden in Modultests mit potenziellen Anwender:innen des Systems getestet und evaluiert. Diese waren ein wesentlicher Bestandteil von Meilenstein 3 und 4 (Abschnitt 1.3) im Projekt.

### 2.8.3.1 Modultest UAV-Missionplanung (FZI)

In einem gemeinsamen Workshop mit dem THW Heidelberg wurde die Planung von Übersichts- und Detailflügen mit der Missionsplanungslösung des FZI getestet. Dabei zeigte das THW großes Interesse an der vorgestellten Planungslösung und fokussierte Fragen des direkten Einsatzes auf durch das THW eingesetzte UAV-Modelle. Auf Basis des Tests konnte die Notwendigkeit identifiziert werden, den Export der fertigen Missionspläne auch im .kml-Format zu ermöglichen. Diese Anforderung wurde in der Folge umgesetzt, um die Missionsplanung für den Einsatz durch das THW zu erleichtern.

### 2.8.3.2 Modultest Micro-Mapping (UHD-GIScience, KIT)

Im Oktober 2022 nahmen Mitglieder der Feuerwehr Heidelberg und des THW Heidelberg und des Deutschen Roten Kreuzes (DRK) International an einem Modultest der entwickelten Crowdmap-App zur Erdbebenschadensklassifizierung teil. Anhand verschiedener Aufgaben wurden die unterschiedlichen Projekttypen (Schadensdetektion und mehrklassige Schadensbestimmung) getestet: Die Teilnehmer:innen testeten das Tool und bearbeiteten Micro-Mapping-Aufgaben zur Schadensbestimmung.

Darüber hinaus wurde Feedback der Anwender:innen zu Aspekten der Nutzungsfreundlichkeit der Webanwendung anhand eines Fragebogens erhoben, um noch bessere Einblicke in die Anforderungen der Anwender:innen zu erhalten. Die Ergebnisse wurden in der Folge für die kontinuierliche Verbesserung der Webanwendung genutzt.

### 2.8.3.3 Modultest Automatische Schadensbestimmung (UHD-3DGeo, KIT)

Die Methodik der automatischen Schadensbestimmung (Schadensdetektion und Bestimmung mehrerer Schadensgrade) wurde im Rahmen mehrerer Workshops mit potenziellen Anwender:innen evaluiert und iterativ verbessert. Hierdurch konnte sichergestellt werden, dass die mit den Methoden erzielten Ergebnisse im Schadensfall hilfreiche Informationen für lokale Einsatzkräfte darstellen. Folgende Aspekte wurden auf Basis von Anwender:innen-Feedback umgesetzt: Der modulare Aufbau der LOKI-Gesamtarchitektur (Abschnitt 2.1) erlaubt zum einen die allein stehende Nutzung des Moduls zur automatischen Schadensbestimmung mithilfe der entwickelten Methoden. Diese sind im Gesamtworkflow im zentralen LOKI-GitLab-Repository offen implementiert und können zukünftig durch weitere Methoden flexibel erweitert oder ausgetauscht werden. Die Kompatibilität mit anderen Modulen der Gesamtarchitektur ist über definierte Schnittstellen (API) sichergestellt (Abschnitt 2.1). Diese Schnittstellen gewährleisten auch, dass das Modul der automatischen Schadensbestimmung auch mit Schadensinformation aus dem Micro-Mapping (Abschnitt 2.6) evaluiert werden kann und die angewendeten Modelle maschinellen Lernens mit Trainingsdaten aus Micro-Mapping-Klassifizierungen trainiert werden können.

Zweitens wurde die Kombination der Stärken von Ansätzen des maschinellen Lernens und der visuellen Interpretation durch Freiwillige in Micro-Mapping-Aufgaben angestrebt. Hierfür wurden beide Module hinsichtlich ihrer Performance zur Bestimmung der fünf verschiedenen Schadensgrade (Abschnitt 2.5) zunächst unabhängig evaluiert. Die optimale Kombination und Gewichtung der Schadensbestimmung durch beide Module hängt dabei stark von Ereignis-spezifischen Bedingungen ab (z. B. Datenverfügbarkeit und -qualität, zeitliche Beschränkungen, räumlicher Umfang, Schadensausmaß) und kann nur schwer vorab festgelegt werden. Daher ist die Verfügbarkeit der unabhängigen Klassifizierungsergebnisse aus beiden Modulen für Anwender:innen von großer Relevanz. Entsprechend wurde auf eine direkte Fusion der Ergebnisse aus beiden Modulen verzichtet und die Gesamtarchitektur des LOKI-Systems um Schnittstellen erweitert, die eine Speicherung und Zusammenführung der Ergebnisse aus bei-

den Modulen in einer Schadensdatenbank (Abschnitt 2.4) ermöglichen. Diese Datenbank erlaubt Anwender:innen des LOKI-Systems auf Schadensinformation aus beiden Modulen zurückzugreifen und ermöglicht dadurch enorme Flexibilität im Umgang mit der bereitgestellten Schadensinformation und deren gezielte Kombination für den konkreten Anwendungsfall. Durch regelmäßige Anwender:innentreffen konnten die Erkenntnisse zur Leistungsfähigkeit beider Module zur Bestimmung verschiedener Schadensgrade vermittelt werden, sodass ein informierter Umgang mit der durch LOKI bereitgestellten Schadensinformation erzielt wurde. Als Datengrundlage für den abschließenden Modultest dienten photogrammetrische 3D-Punktwolken zweier beschädigter Einzelgebäude auf dem Gelände des Trainingscenter Retten und Helfen (TCRH) in Mosbach, die im Rahmen der Pilotierung des LOKI-Systems erfasst wurden. Schäden der erfassten Gebäude wurden durch die im Projekt entwickelte Methodik zur automatischen Schadensbestimmung auf Basis eines rein mit simulierten Trainingsdaten trainierten Modells des maschinellen Lernens bestimmt. Eine wesentliche Erkenntnis aus diesem Modultest besteht im großen zeitlichen Mehrwert, der durch den verwendeten Ansatz des Vorab-Trainings eines Modells mit simulierten Daten gesehen wird. Dies erlaubt den direkten Einsatz des Moduls im Falle eines Erdbebens, sobald Daten aus UAV-Befliegungen zur Verfügung stehen und ermöglicht Einsatzkräften vor Ort eine schnellere Verfügbarkeit flächendeckender Schadensinformation. Darüber hinaus ergab der Modultest, dass als Ergebnis der Schadensklassifizierung die Ausgabe nur des Schadensgrades mit der höchsten Klassenwahrscheinlichkeit keinen ausreichenden Informationsgehalt für lokale Einsatzkräfte darstellt, da dadurch mögliche Unsicherheiten bei der Schadensbestimmung nicht ersichtlich werden. Dementsprechend wurde die Ausgabe der Schadensbestimmung so angepasst, dass diese alle Schadensklassen und deren Klassenwahrscheinlichkeiten enthält. Darüber hinaus ergab sich auch aus Sicht der Anwender:innen die Notwendigkeit den entwickelten Ansatz auf einem größeren realen Datensatz zu testen, um die Übertragbarkeit des auf simulierten Laserscan-Punktwolken trainierten Klassifikators auf reale photogrammetrische Punktwolken ausführlicher zu evaluieren. Dies wurde anschließend in Zahs et al. (2023a) umgesetzt.

#### 2.8.3.4 Modultest Visualisierung der Schadensinformation (GFZ)

Im November 2022 fand ein Modultest mit dem THW Heidelberg für die Visualisierung der durch die verschiedenen Komponenten des LOKI-Systems bereitgestellten Schadensinformationen statt. Ziel des Tests war es, zu zeigen, wie die Schadensberechnungen der LOKI-Module in einem geographischen Informationssystem, wie z. B. QGIS, visualisiert werden können. Hierfür wurde eine Live-Demonstration des Loss-Calculators durchgeführt. Es wurde diskutiert, welche Informationen sinnvollerweise dargestellt werden sollten und wie dies technisch umgesetzt werden kann. Es wurde entschieden, dass SQL-Datenbank-Ansichten erstellt werden sollten, in denen die Daten aus mehreren Tabellen der Datenbank auf sinnvolle Weise verknüpft werden. Solche Ansichten waren zum Beispiel der wahrscheinlichste Schadensgrad eines Gebäudes.

Im Dezember 2022 fand ein zweiter Modultest zur Schadensvisualisierung statt, bei dem im ersten Modultest besprochenen Entwicklungen in einer Live-Demonstration vorgestellt und erneut mit dem THW Heidelberg evaluiert wurden. Dies beinhaltete auch ein neu entwickeltes QGIS-Plugin, welches die initiale Schadensberechnung und ihre Darstellung auf einer Karte erleichtert. Im Workshop wurde ein entwickelter Kartenstil vorgestellt, der die verschiedenen Schadensinformationen klassifiziert und die jeweiligen Klassen entsprechend unterschiedlich farblich darstellt. Das Feedback zum entwickelten Visualisierungsansatz war positiv, insbesondere weil sich dieser in bei Anwender:innen immer häufiger genutzte geographische Informationssysteme einfach integrieren lässt.

## 2.9 AP 9 – Verbreitung und Verwertung (Gesamtverbund)

Ziel der Verbreitung und Verwertung der Projektergebnisse war es, diese zu konsolidieren und zu kommunizieren, um Perspektiven zur Verwertung über das Projektende hinaus zu schaffen. Dies beinhaltete die Verbreitung der Projektergebnisse sowohl auf wissenschaftlicher, als auch auf technischer und wirtschaftlicher Ebene.

### 2.9.1 Workshops mit potenziellen Anwender:innen des LOKI-Systems

Ein wesentlicher Bestandteil der Verbreitungs- und Verwertungsstrategie war der intensive und kontinuierliche Austausch mit potenziellen Anwender:innen des LOKI-Systems (Abschnitt 1.5.1). Hauptanwender:innen, die aus dem LOKI-Projekt Nutzen ziehen können, sind im Bereich des Katastrophenmanagements zu finden. Dies sind zum Beispiel Abteilungen der Feuerwehr, des Technischen Hilfswerks (THW), des Deutschen Roten Kreuzes (DRK) oder des Arbeiter-Samariter-Bundes (ASB). Die ins LOKI-Projekt einbezogenen Akteur:innen sind: ASB Mannheim, Feuerwehr Heidelberg, DRK International, THW Heidelberg und Branddirektion Karlsruhe.

Während der gesamten Projektlaufzeit bzw. der Entwicklung der Module fand ein kontinuierlicher Austausch mit den Anwender:innen statt. Dies umfasste im Wesentlichen die folgenden drei Phasen:

- (1) Erhebung von Anforderungen und Definition von Anwendungsfällen (Abschnitt 2.1)
- (2) Prototypische Implementierung und iterative Verbesserung (Abschnitt 2.8)
- (3) Demonstration und Evaluation (Abschnitt 2.8)

#### *(1) Erhebung von Anforderungen und Definition von Anwendungsfällen*

In ersten Anwendertreffen wurden die Anforderungen der Anwender:innen ermittelt und Anwendungsfälle und externe Schnittstellen diskutiert: Das Treffen mit der Branddirektion Karlsruhe fand im Mai 2021 statt. Dieser Workshop bestand aus drei Teilen: der Vorstellung des LOKI-Projekts, einer Präsentation der Vorgehensweise bei Gebäudeeinstürzen durch die Branddirektion, und schließlich einem Interview mit Fragen zum allgemeinen Ablauf einer Katastrophensituation und zum möglichen Einsatz des LOKI-Systems. Es hat sich gezeigt, dass LOKI vor allem in den ersten Einsatzminuten einen großen Vorteil bieten kann, da durch die erste Schadensprognose die wichtigsten Bereiche (hohe Schäden in Kombination mit vielen Personen) identifiziert und nach wenigen Minuten durch Übersichtsflüge verifiziert werden können. In Übersichtsflügen aufgenommene Bilddaten und 3D-Punktwolken können die Planung und Priorisierung von Maßnahmen unterstützen. Detailbefliegungen einzelner Gebäude sind vor allem zu einem späteren Zeitpunkt, nach der akuten Gefahrenabwehr, interessant und hilfreich. Die Rettung von Menschen hat immer Vorrang, daher ist die erste Priorität immer, sich einen Überblick zu verschaffen, wo viele Menschen in Gefahr sind.

Ein zweites Anwender:innentreffen im Oktober 2021 mit dem ASB Mannheim statt. Es wurde eine ähnliche Struktur mit einer Einführung, einer Präsentation und einer Interviewrunde verfolgt. Es hat sich gezeigt, dass LOKI als Übersicht für Rettungsmaßnahmen in den ersten Minuten nach der Katastrophe und für die schnelle Beurteilung der Stabilität von Gebäuden (Sicherheit der Rettungskräfte, Entlassung von evakuierten Personen aus der Betreuung) dienen kann. Die Prioritätensetzung reicht von Menschenleben über Verkehrswege für Rettungsmaßnahmen bis hin zur Versorgungsinfrastruktur. Bezüglich der UAV-Daten wurde die Übermittlung der Daten an die anfordernde Stelle zur Auswertung thematisiert. Es stellte sich heraus, dass vor Ort die Kommunikation zwischen den Hilfsorganisationen oft schwierig ist und es keine zentrale und standardisierte Plattform zur Sammlung der Informationen gibt. Oft werden UAVs vor Ort nicht angefordert, weil sie noch nicht etabliert sind oder ihr Nutzen aktuell noch nicht bekannt ist.

Ein weiteres Treffen fand im November 2021 mit dem THW Heidelberg statt. Auch hier wurde aus Gründen der Vergleichbarkeit eine ähnliche Gliederung des Treffens gewählt. LOKI kann sowohl als Überblick für Rettungsmaßnahmen in den ersten Minuten nach der Katastrophe dienen als auch die Aufgaben des THW unterstützen, wie zum Beispiel die Beurteilung der Stabilität von Gebäuden. Bei der Priorisierung stehen immer Menschenleben im Vordergrund und die Gefahren werden entsprechend bewertet. Erste Erfahrungen mit dem Einsatz von UAVs haben gezeigt, dass die Einsatzmöglichkeiten vielfältig sind und weiter ausgebaut werden müssen. Ein wichtiger Aspekt ist der Umgang mit dem Ausfall der Datenübertragungsinfrastruktur im Katastrophenfall. Der Einsatz des LOKI-Systems zeigt das Potential zur Optimierung der Rettungsmaßnahmen.

Im Nachgang wurden die Ergebnisse der drei Treffen verglichen und die Anforderungen an das LOKI-Gesamtsystem und seine Module definiert, sodass diese in der weiteren Entwicklung berücksichtigt werden konnten.

### *(2) Prototypische Implementierung und iterative Verbesserung*

Anwender:innen wurden außerdem über Testbefliegungen und Feldexperimente in die prototypische Implementierung und iterative Verbesserung der Module und des Systems einbezogen. Dazu zählten die verschiedenen Modultests, die in Abschnitt 2.8 beschrieben sind. Ziel war es, mit Anwender:innen den Stand der Entwicklung der Module und die Umsetzung der erhobenen Anforderungen zu testen und zu evaluieren, um die Praxistauglichkeit des entwickelten Prototypen sicherzustellen.

### *(3) Demonstration und Evaluation*

Im Zuge der Demonstration und Evaluation fand im Januar 2023 ein großer gemeinsamer Anwenderworkshop mit Anwender:innen des DRK international (Berlin), des THW Heidelberg, des Katastrophenschutzes (Berufsfeuerwehr) der Stadt Heidelberg und allen LOKI-Partner:innen statt (Abb. 61). Der Workshop fand in hybridem Format statt, um auch Teilnehmenden aus der Ferne eine Teilnahme zu ermöglichen, um ein möglichst breites Spektrum abzudecken. Das Ziel des Workshops war der Austausch zur langfristigen Verwertung der Projektergebnisse und zu den Perspektiven zur Integration der Module in die Systeme der Anwender:innen.

Der Workshop startete mit einer kurzen Einführung zum Projekt LOKI und anschließend der Präsentation der Ergebnisse der entwickelten LOKI-Komponenten. Im Anschluss fand eine ausführliche Diskussion mit Anwender:innen statt. Dabei standen die Anwendbarkeit und Möglichkeiten zur Integration der Komponenten in die Systeme der Anwender:innen, Verbesserungsvorschläge, allgemeines Feedback und die zukünftige weitere Zusammenarbeit und Verwertung des Systems im Vordergrund (Abb. 62). Die rege Diskussion führte zu folgenden Ergebnissen (in Auszügen):

1. Integration der Module in die Systeme der Anwender:innen
  - Nutzung der initialen Schadensberechnung und Visualisierung für die direkte Einsatzplanung und Szenarien geplant
  - THW plant den Einsatz des Tools zu Übersichts- und Detailflügen, da unabhängig vom Schaden universell einsetzbar
  - Konkretisierung weiterer Zusammenarbeit
2. Verbesserungsvorschläge
  - Erweiterung der Missionsplanung auf kommerzielle UAVs
  - Verfügbarkeit und Bedienbarkeit der Tools im Einsatzfall (Dokumentation und Anleitung) muss gewährleistet sein

- Erweiterung auf kritische Infrastruktur und den Einbezug von Nachbargebäuden als Konsequenz eines Schadens
  - Erweiterung auf weitere Katastrophenereignisse (z. B. Bombenfund und Hochwasser)
  - Ermöglichung einer Offline-Nutzung des Tools ermöglichen
3. Allgemeines Feedback
- Positives Feedback, Anwendung bereits möglich
  - Langfristige Bereitstellung der Tools ist wichtig
  - Interesse an Anfragen und Austausch mit anderen Ländern
  - Aufbau geschulter Community für Micro-Mapping notwendig
4. Weiterentwicklung und zukünftige Zusammenarbeit
- Definition zentraler Ansprechpartner:innen für zukünftige Zusammenarbeit und Nutzung der entwickelten Module
  - Kurzfristig:
    - Test der Schadensberechnung und Feedback
    - Integration weiterer UAV-Modelle in die Missionsplanung und ggf. Bereitstellung eines Services
    - Umsetzung konkreter Aufgaben und Anwendungsfälle in gemeinsamen Abschlussarbeiten und Praktika
  - Langfristig:
    - Integration des LOKI-Systems auf deutschlandweiter Ebene des THW
    - Internationalisierung der Module
    - Einbezug von internationalen Anwender:innen und Entwicklung von geeigneten Feedback-Methoden



Abbildung 61: Teilnehmende des Workshops vor Ort und online.



Abbildung 62: Gesammelte Ideen der Teilnehmenden, die als Grundlage für die Diskussion dienen.

Im Allgemeinen wurde das große Interesse seitens der Anwender:innen deutlich. Durch den Workshop wurde ein direkter Austausch zwischen Entwickler:innen und Anwender:innen aus unterschiedlichen Bereichen und Disziplinen ermöglicht. Es konnten konkrete nächste Schritte für die weitere Zusammenarbeit identifiziert werden.

Wir danken allen Anwender:innen für den kontinuierlichen aktiven Austausch während der gesamten Projektlaufzeit und die gute Zusammenarbeit. Durch diesen Austausch wird eine Verwertung und Verbreitung der Projektergebnisse und Module im Katastrophenschutz über das Projekt hinaus ermöglicht.

### 2.9.2 Wissenschaftliche und technische Verbreitung und Verwertung

Die wissenschaftliche Verwertung im Gesamtverbund erfolgte durch die Veröffentlichung von Forschungsergebnissen in nationalen und internationalen begutachteten Fachzeitschriften und Konferenzbeiträgen (Abschnitt 5) und durch den Austausch in bereits bestehenden Netzwerken der Projektpartner:innen, wodurch ein Wissenstransfer in die internationale wissenschaftliche Gemeinschaft erzielt werden konnte. Zu den Konferenzen, an denen Mitglieder des Verbundes teilgenommen haben, gehören: AGILE-Konferenz, die 17. DACH-Tagung Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik 2021, IABSE 2021, die European Geoscience Union (EGU) General Assembly 2021/2022/2023, die Dritte Europäische Konferenz für Erdbebeningenieurwesen und Seismologie 2022, die CREST 2022, und die URBASIS-Sommerschule 2022. Dadurch können in LOKI erzielte Forschungsergebnisse für die methodische und inhaltliche wissenschaftliche Weiterentwicklung in den verschiedenen Fachdisziplinen der Projektpartner:innen und in interdisziplinären Forschungskontexten genutzt werden. Darüber hinaus fließen Forschungs- und Projektergebnisse in Lehrveranstaltungen und in Dissertationen und studentische Abschlussarbeiten ein und unterstützten damit die Qualifizierung des wissenschaftlichen Nachwuchses.

Die technische Verwertung im Gesamtverbund erfolgte durch die dauerhaft unter einer Open-Source-Lizenz öffentlich zur Verfügung gestellten Daten, Quellcodes und Dokumentation des Gesamtsystems, seiner Module und ihrer Schnittstellen. Offene Standards und die Möglichkeit die einzelnen Module einzeln zu verwenden oder flexibel zu kombinieren unterstützen dabei die langfristige und nachhaltige Nutzung, Erweiterung und Verwertung des Systems. Ein großer Teil des Quellcodes ist im LOKI-GitLab-Repository mit detaillierter Dokumentation zu finden. Zusätzlich wurden die neu- und weiterentwickelten Methoden in bestehenden Open-Source Softwareprojekte (z. B. HELIOS++ (Winiwarter et al. 2022), py4dgeo (py4dgeo Development Core Team 2023), Global Dynamic-Exposure-Projekt (GeoForschungsZentrum Potsdam 2023)) integriert. Eine vollständige Liste der Quellcode-Repositoryn befindet sich in Abschnitt 5.

Eine zentrale Rolle in der wissenschaftlich-technischen Verwertung spielte außerdem das in das GitLab-Projekt integrierte LOKI-Wiki (LOKI Gesamtverbund 2023b). Über dieses konnten Forschungsergebnisse und Projektaktivitäten gegenüber einer breiten allgemeinen Öffentlichkeit verfügbar gemacht werden. Das Wiki (Abb. 63) bietet als zentraler Einstieg für die Öffentlichkeit einen Gesamtüberblick zum LOKI-System, seiner Einsatzmöglichkeiten sowie der einzelnen Module und deren Schnittstellen. Darüber hinaus sind dort der Gesamtverbund und zentrale Kontaktpersonen aufgelistet, sodass eine schnelle Kontaktaufnahme für weiteren Austausch ermöglicht wird. Zudem sind im Wiki zentrale Projektergebnisse der einzelnen Teilprojekte und des Gesamtverbundes übersichtlich dargestellt. Über einen News-Blog können außerdem wichtige Ereignisse während der Projektlaufzeit in Kurzzusammenfassungen nachverfolgt werden. Der Aufbau und das Layout des Wikis ähnelt einer Webseite (Navigationsbereich, hierarchisch und einheitlich formatierte Wiki-Seiten, Verlinkungen zwischen den Wiki-Seiten, Einbindung aussagekräftiger Graphiken, externe Verlinkungen), und ermöglicht dadurch eine Nutzungsfreundlichkeit und intuitive Navigation. Durch die Einbindung des Wikis in das LOKI-GitLab-Projekt (LOKI Gesamtverbund 2023b) sind allgemeine Modulbeschreibungen und zentrale Projektergebnisse direkt mit dem dazugehörigen Programmcode und der technischen Dokumentation der Module verknüpft. Außerdem verlinkt das Wiki zu allen wissenschaftlichen Veröffentlichungen der Projektergebnisse. Somit stellt das Wiki den zentralen Anlaufpunkt für die breite Öffentlichkeit dar und bietet sowohl einen schnellen Überblick über das Projekt als auch Möglichkeiten, detaillierte Informationen zu den Modulen und Projektergebnissen nachzulesen und Kontakt zum LOKI-Konsortium aufzunehmen. Die einzelnen Teilprojekte verlinken auf ihren jeweiligen Webseiten (Abschnitt 5.6) zudem zur LOKI-Projektseite des Verbundkoordinators, zum LOKI-Wiki, und zum LOKI-GitLab-Projekt.

Weitere Öffentlichkeitsarbeit wurde durch die 3DGeo-Arbeitsgruppe der Universität Heidelberg in Form von News-Blog-Beiträgen (3DGeo Research Group 2023b), Twitter-Beiträgen (3DGeo Research Group 2023c), und eines Youtube-Videos (3DGeo Research Group 2021) betrieben, in dem die Kombination von Crowdsourcing und automatisierter Methoden zur Schadensbestimmung dargestellt wird.

Abbildung 63: Startseite des öffentlich zugänglichen LOKI-Wiki ([https://git.gfz-potsdam.de/loki/loki\\_wiki/-/wikis/home](https://git.gfz-potsdam.de/loki/loki_wiki/-/wikis/home)).

## 3 Bewertung der Ergebnisse

### 3.1 Bewertung der wissenschaftlichen Ergebnisse

Die erzielten Projektergebnisse tragen in vielfältiger Weise zu einer schnelleren Bereitstellung aktueller Lageinformation nach einem Erdbebenereignis bei. Es wurden zahlreiche neuartige Ansätze und Methoden entwickelt, die einen wesentlichen Forschungsbeitrag in den verschiedenen Fachdisziplinen darstellen.

#### 3.1.1 Exposure-Modellierung (GFZ)

Exposuremodelle sind für automatisierte und/oder großräumige Schadensabschätzungen notwendig. Klassische Exposuremodelle beschreiben Gebäudebestände in aggregierter Form und werden selten erneuert, um Veränderungen zu erfassen. Daher können mit diesen Modellen keine gebäudegenauen Prognosen oder Abschätzungen erstellt werden. Diese können jedoch bei der Betrachtung von kritischer Infrastruktur, wie Krankenhäusern, notwendig sein und sind notwendig bei stark lokalisierten Gefahren, wie Sturzfluten, Lavaströmen oder Tsunamis, die, wenn sie ein Gebäude nicht treffen, keinen Schaden anrichten.

Die in LOKI erzielten Verbesserungen in der Exposuremodellierung beheben diese Schwachstellen. Durch die Kombination klassischer Exposuremodelle mit offenen Gebäudedaten von OpenStreetMap und einer asynchronen Verarbeitungsengine wird ein dynamisches Exposuremodell realisiert, das in nahezu Echtzeit alle neuen zur Verfügung stehenden Daten verarbeitet. Dadurch können erfasste Gebäudedaten einer Vorortbegehung oder durch Crowdsourcing sofort für die weitere Verwendung zur Verfügung gestellt werden. Der dynamische Charakter ermöglicht es ferner, das Modell kontinuierlich aktuell zu halten, so dass zu jeder Zeit der bestmögliche Datenbestand verwendet werden kann. Hinzu kommt, dass die regelbasierte Verarbeitungsengine durch weitere Regeln zur Gebäudeklassifizierung erweitert werden kann, um die Genauigkeit des Exposuremodells zu erhöhen, oder dieses für andere Naturgefahren zu erweitern. Durch seine Dynamik und Flexibilität ist dieses Modell bereits integraler Teil anderer Projekte auf EU-Ebene geworden und wird mittelfristig in EU-weite Services integriert.

#### 3.1.2 Automatisierte Missionsplanung (FZI)

Grundvoraussetzung bei der Planung von UAV-Flugmissionen zur Erfassung von definierten Gebieten ist die Einhaltung einer geforderten Überlappung der einzelnen Bildaufnahmen. Nur hierdurch ist eine Rekonstruktion von qualitativ hochwertigen 3D-Punktwolken möglich. Aktuelle Systeme erreichen dies durch die Definition eines konstanten zeitlichen Auslöseintervalls des Kamerasensors in Kombination mit einer daraus resultierenden konstanten Fluggeschwindigkeit. Durch die konstante Fluggeschwindigkeit wird jedoch das physikalische Potenzial des Fluggeräts nicht ausgeschöpft.

Der im Projekt neu entwickelte Ansatz basiert darauf, dass zur Einhaltung der geforderten Überlappung der einzelnen Bildaufnahmen lediglich die Positionen, an denen Aufnahmen erfolgen sollen, benötigt werden. Wie das UAV diese definierten Aufnahmepunkte erreicht ist dabei ein Freiheitsgrad, der erstmals gezielt ausgenutzt werden kann. Daher wurden im Rahmen des Projekts Modelle entwickelt, welche die Problemstellung zur Befliegung einer definierten Menge an räumlichen Aufnahmepunkten unter Berücksichtigung der vollen physikalischen Manövrierbarkeit eines UAV beschreiben. Zur Lösung der Problemstellung wurden mehrere Methoden entwickelt und evaluiert. Diese Studien ergaben, dass durch dieses neue Vorgehen ein signifikanter Anteil an Flugzeit eingespart werden kann. Damit ist es innerhalb einer durch die Batteriekapazität vorgegebenen maximalen Flugzeit möglich, deutlich größere Gebiete, bei gleichzeitiger Sicherstellung der geforderten Datenqualität, zu befliegen, als dies

mit Systemen aus dem Stand der Technik der Fall wäre. Im praktischen Einsatz nach Katastrophenereignissen ergeben sich dadurch wichtige zeitliche Vorteile bei der Bereitstellung aktueller Lageinformation in mehrstufigen Aufnahme- und Auswertungsverfahren. Die entwickelten Ansätze und Methoden sind allgemeingültig und auch auf andere Problemstellungen übertragbar.

### **3.1.3 Schadensklassifikation – Schadenskatalog und Fragilitätskurven (KIT)**

Nach einem Erdbeben sind die zügige und objektive Klassifizierung der Schäden an Gebäuden und Infrastrukturen sowie die Beurteilung deren Standsicherheit von essentieller Bedeutung. Hierzu wurden erstmals Schadenskataloge für die vier Materialien Stahlbeton, Mauerwerk, Holz und Stahl entwickelt. Diese enthalten globale und materialspezifische Merkmale für fünf Schadensgrade, sodass eine detaillierte Klassifizierung ermöglicht wird. Die Schadenskataloge sind übersichtlich aufgebaut und enthalten umfassende und konkrete Beschreibungen, schematische Abbildungen und Beispielfotos. Da die Schadensmerkmale allgemeingültig und tragkonstruktionsunabhängig enthalten sind, ist eine geographische Übertragbarkeit gegeben. Der Schadenskatalog ist die Basis für die automatische und Crowdsourcing-basierte Schadensbestimmung. Die eindeutigen Merkmale und die Bewertung der Schäden von außen machen eine Anwendung auf Basis von UAV-Bilddaten möglich. Außerdem können generalisierte geometrische Schadensmuster für die automatische Änderungsanalyse abgeleitet werden. Durch die Verwendung der Bilder und die Vereinfachung der Beschreibungen, war die Erstellung eines Tutorials möglich, sodass auch Freiwillige einbezogen werden können.

Fragilitätskurven bieten die Möglichkeit einer schnellen Abschätzung der Gebäudeschäden nach Eintritt des Erdbebens oder bereits vorab. Der entwickelte Multiskalenansatz zur Bestimmung der Lage der fünf Schadensgrade auf der Antwortkurve des Gebäudes enthält verschiedenartige materialspezifische und globale Schadenskriterien. Anhand der verschiedenen Kriterien können auch Schadensmuster erkannt werden, die nicht in Form eines Lastabfalls in der Gebäudeantwortkurve sichtbar sind. Die Fragilitätskurven, die aus den Schadensgrenzwerten abgeleitet werden, beinhalten somit differenzierte mögliche Schadensmuster auf verschiedenen Skalen. Mögliche Schadensmuster werden somit umfassender berücksichtigt als durch bekannte Ansätze, in denen Verschiebungskriterien auf der Grundlage von Fließ- und Endverschiebung der Bilinearisierung der Kraft-Verformungs-Kurve herangezogen werden. Darüber hinaus kann der Ansatz auf alle Gebäudeklassen und auf regionalspezifische Material- und Systemcharakteristika angewendet werden. Außerdem ist auch eine Anpassung der Materialeigenschaften und Kriterien möglich, die sich im Laufe der Lebenszeit des Gebäudes ändern. Somit ist der Ansatz allgemeingültig anwendbar und übertragbar.

### **3.1.4 Crowdsourcing und nutzergenerierte Geoinformation (UHD-GIScience)**

Die Entwicklung Crowdsourcing-basierter Ansätze zur Schadensbestimmung stellt einen komplementären methodischen Beitrag zu automatischen Methoden der Schadensbestimmung dar. Eine wesentliche Erkenntnis aus der Evaluierung der entwickelten Methodik besteht darin, dass insbesondere geringe und hohe Schadensgrade gut durch die visuelle Interpretation von UAV-Bildern durch Freiwillige identifiziert werden können. Dies konnte insbesondere durch die enge Verknüpfung der interaktiven Micro-Mapping-Anwendung mit Schadenskriterien aus dem in LOKI entwickelten Schadenskatalog erreicht werden. Die Kombination und komplementäre Nutzung Crowdsourcing-basierter Ansätze mit automatischen Ansätzen zur Schadensbestimmung für Zwecke der Validierung oder des Trainings stellt damit einen wertvollen methodischen Beitrag in diesem Forschungsfeld dar und kann durch die Implementierung der Crowdsourcing-Tools in nachhaltige Softwareprojekte weiterentwickelt und untersucht werden.

### 3.1.5 Automatische Schadensbestimmung (UHD-3DGeo)

Für die automatische gebäudegenaue Schadenbestimmung wurde der große Mehrwert einer engen Verknüpfung von virtuellem Laserscanning und Methoden des Maschinellen Lernens gezeigt. Der entwickelte Ansatz zur automatischen Schadensbestimmung auf Basis von Klassifikatoren maschinellen Lernens, die vorab mit simulierten Daten trainiert wurden, leistet einen wesentlichen neuen methodischen Beitrag zum Stand der Forschung in diesem Bereich. Erstmals wurden für die Schadensbestimmung nach einem Erdbeben ausschließlich simulierte Punktwolken zum Training eines Modells maschinellen Lernens verwendet, die anschließend erfolgreich zur Schadensbestimmung in realen Punktwolken mit hohen Klassifizierungsgenauigkeiten angewendet wurden. Die Integration von Domänenwissen aus dem Erdbebeningenieurwesen in die Generierung geeigneter Trainingsdaten trug hierzu wesentlich bei. Eine wichtige damit zusammenhängende Erkenntnis besteht darin, dass mit diesem Ansatz erstmals sowohl ein geographischer Transfer auf neue Regionen als auch ein datenbezogener Transfer von (simulierten) Laserscanning-Punktwolken als Trainingsdaten auf photogrammetrische Punktwolken realisiert werden konnte. Dies ermöglicht im Erdbebenfall die direkte Anwendung des Modells zur Schadensbestimmung in realen, aus UAV-Bildern rekonstruierten Punktwolken. Hieraus ergibt sich eine bedeutende Zeitersparnis im Vergleich zu bisherigen Ansätzen, in denen vorab-trainierte Modelle eine begrenzte Anwendbarkeit auf neue Daten oder geographische Gebiete aufweisen und geeignete Trainingsdaten nach einem Erdbebenereignis erst in zeitaufwändigen, teils manuellen Verfahren generiert werden müssen. Eine weitere wichtige Erkenntnis aus der entwickelten Methode besteht darin, dass das Konzept auf andere Naturgefahrenszenarien (z. B. Hochwasser) übertragbar sein kann, wobei lediglich geeignete simulierte Trainingsdaten mit entsprechenden Schadensmustern generiert werden müssen.

### 3.2 Positionen des zahlenmäßigen Zwischennachweises

Die Ausgaben wurden der ursprünglichen Bewilligung und den genehmigten Umwidmungen folgend getätigt. Die Hauptpositionen waren die Kosten für wissenschaftliche Mitarbeiter:innen, gefolgt von den Kosten für die Beschaffung von Hardware und Dienstreisen für die Geländekampagnen.

### 3.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die erzielten Projektergebnisse tragen in vielfältiger Weise zu einer schnelleren Bereitstellung aktueller Lageinformation nach einem Erdbebenereignis bei. Es wurden zahlreiche neuartige Ansätze und Methoden entwickelt, die einen wesentlichen Forschungsbeitrag in den verschiedenen Fachdisziplinen sowie fachübergreifend darstellen. Die Synergien der Kombination von UAV-Hardware, automatisierter Flugmissionsplanung, automatischer Schadensklassifizierung und der visuellen Schadenserfassung durch Freiwillige auf Basis eines neu entwickelten Schadenskatalogs und der Berechnung gebäudespezifischer Schadenswahrscheinlichkeiten für ein bestimmtes Erdbebenszenario werden in dieser Umfänglichkeit noch in keiner aktuellen und vorangegangenen Arbeit erforscht. Dadurch bleibt die Einzigartigkeit des LOKI-Projekt bis dato unverändert bestehen, wodurch letztlich richtungweisende Impulse für die Entwicklung künftiger Systeme zur Lageerfassung nach Naturkatastrophen gesetzt werden.

Das beantragte Projekt hätte in diesem Umfang nicht von den Antragsteller:innen (Universität Heidelberg, Aeromey GmbH, GeoForschungsZentrum Potsdam, FZI Forschungszentrum Informatik, Karlsruher Institut für Technologie) finanziell getragen werden können.

Die Personalkosten für die beantragten Stellen der wissenschaftlichen Mitarbeitenden im Projekt konnten nicht anderweitig getragen werden. Neben der maßgeblichen Bearbeitung der

wissenschaftlichen und technischen Fragestellungen dieses Projekts, übernahmen diese Stellen wichtige administrative und organisatorische Aufgaben, wie z. B. die Planung und Durchführung von Testbefliegungen, Feldexperimenten und Workshops mit Anwender:innen, die Betreuung von studentischen Hilfskräften und die Verbreitung wissenschaftlicher Forschungsergebnisse auf Konferenzen und in Fachzeitschriften.

Die Beschaffung von Hardware, wie z. B. UAV-Systeme und Workstations zur Datenprozessierung, ermöglichte frühzeitig im Projekt den Test und die Evaluierung der entwickelten Methoden in Testbefliegungen und Feldexperimenten.

Aufgrund pandemiebedingter Einschränkungen der Reisemöglichkeiten konnten Dienstreisen für Feldexperimente und Kooperationen im Ausland nicht im geplanten Umfang durchgeführt werden. Alternativ wurden Dienstreisen für häufigere kleinere Tests und Evaluierungen in Inlands-Feldstudien realisiert und intensive Kooperationen und regelmäßige Austausche mit lokalen potenziellen Anwender:innen des LOKI-Systems genutzt.

Weitere Kosten für Publikationen, die Aufnahme von Referenzdaten mit zusätzlichen Sensorsystemen und die Teilnahme an Konferenzen konnten zusätzlich durch weitere Geldgeber:innen gedeckt werden.

### **3.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses**

#### **3.4.1 Wissenschaftliche Verwertung**

Die wissenschaftliche Verwertung im Gesamtverbund nach Projektende erfolgt über die Verfügbarkeit der bereits publizierten Forschungsergebnisse in nationalen und internationalen Fachzeitschriften und Konferenzbeiträgen und durch den Austausch in bereits bestehenden Netzwerken der Projektpartner, wodurch ein Wissenstransfer in die internationale wissenschaftliche Gemeinschaft erfolgt. Dadurch können in LOKI erzielte Forschungsergebnisse für die methodische und inhaltliche wissenschaftliche Weiterentwicklung in den verschiedenen Fachdisziplinen der Projektpartner und in interdisziplinären Forschungskontexten genutzt werden. Zusätzlich sind weitere Forschungsbeiträge zur Publikation in nationalen und internationalen Konferenzen und Fachzeitschriften in Vorbereitung, die auf den im Projekt erzielten Ergebnissen aufbauen. Dies beinhaltet sowohl Publikationen aus den einzelnen Forschungsschwerpunkten, als auch interdisziplinäre Publikationen mehrerer Projektpartner.

Darüber hinaus fließen Forschung und Projektergebnisse nach Projektende in Lehrveranstaltungen der Projektpartner und in neue interdisziplinäre Kurse und in Dissertationen und Abschlussarbeiten zur Qualifizierung des wissenschaftlichen Nachwuchses ein (Abschnitt 5). Dies ermöglicht den direkten Wissenstransfer der Projektergebnisse an zukünftige Generationen von Wissenschaftler:innen und Fachanwender:innen.

#### **3.4.2 Technische Verwertung**

Die technische Verwertung im Gesamtverbund erfolgt durch die dauerhaft unter einer Open-Source-Lizenz öffentlich zur Verfügung gestellten Quellcodes und Dokumentation des Gesamtsystems, seiner Module und ihrer Schnittstellen im zentralen GitLab-Projekt (LOKI Gesamtverbund 2023a). Die einzelnen Module können bei Bedarf einzeln verwendet und flexibel kombiniert werden, was die Verwertung und Anwendung erleichtert und fördert. Die Verwertung und Verbreitung wurde bereits während der Projektlaufzeit durch die aufgebauten Kontakte und die intensive Zusammenarbeit mit Gruppen von Anwender:innen im Bereich Katastrophenschutz (Abschnitt 2.9) begonnen und wird nach Projektende weitergeführt. Darüber hinaus können hierfür auch weitere bereits bestehende Kooperationen und Mitgliedschaften der Projektpartner:innen in nationalen und internationalen Netzwerken und Organisationen ge-

nutzt werden. Verwertungsperspektiven, Formen und Zeithorizonte einer weiteren Zusammenarbeit wurden bereits in einem gemeinsamen Workshop mit Anwender:innen identifiziert (Abschnitt 2.9). Einzelne Module können beispielsweise direkt durch Anwender:innen eingesetzt werden, für andere sind kleinere Anpassungen, Erweiterungen und Tests in Zusammenarbeit mit Anwender:innen notwendig. Größere Weiterentwicklungen der Module und des Gesamtsystems, beispielsweise für den Einsatz für andere Naturgefahren, können durch eine Fortführung der Zusammenarbeit in Folgeprojekten oder durch Auftragsforschung erfolgen. Die Verwertung kann durch die öffentliche Verfügbarkeit des Quellcodes der Module und des Gesamtsystems auf Anwender:innen jenseits der bereits bestehenden Kooperationen und Kontakte ausgeweitet werden und potentiell von weiteren Forschungsgruppen, Stakeholdern und auch Firmen für Folgevorhaben eingesetzt und weiterentwickelt werden. Darüber hinaus wurden im Rahmen des Projekts erhobene Daten veröffentlicht, sofern sie unter eine offene und freie Lizenz gestellt werden dürfen. Dies ermöglicht die Verwendung der erhobenen Daten in anderen Forschungs- und Praxisprojekten und erweitert generell die Geodatenbasis (z. B. Trainings- und Testdaten für Modelle maschinellen Lernens). Die Datensätze sind hierbei über eine DOI zitierbar und stehen, neben den Internetauftritten der Projektpartner, auf etablierten Daten-Plattformen mit standardisierter Metadatenbeschreibung zur Verfügung.

### **3.4.3 Wirtschaftliche Verwertung**

Auf der wirtschaftlichen Ebene ist die Verwertung durch die Aeromey GmbH sichergestellt. Die im Rahmen des Projektes entwickelte UAV-Plattform soll nachgelagert weiterentwickelt werden. Aufgrund eines großen Bedarfs an leistungsfähigen Trägerplattformen für verschiedenste Nutzlasten soll die LOKI-UAV zusammen mit weiteren Partnern aus der Wirtschaft zu einem kommerziellen Produkt weiterentwickelt und am Markt vertrieben werden. Entsprechende Gespräche mit zwei interessierten Partnern wurden bereits geführt und die entsprechenden Absichten zur Zusammenarbeit wurden erklärt. Alleine auf dem deutschen Markt gibt es eine Vielzahl an Interessenten für das Flugsystem, darunter Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (BOS) oder Anwender:innen aus dem Bereich Katastrophenschutz. Die im Projekt als langfliegende Plattform entwickelte UAV erlaubt dabei eine flexible Kombination des UAVs mit verschiedenen Sensorsystemen (RGB- und Wärmebildkameras, Laserscanner) und deckt dadurch ein großes Einsatzspektrum im Bereich Vermessung, Forschung, Dienstleistungen für öffentliche Auftraggeber, aber auch Schadenskartierung für verschiedene Naturgefahren, wie beispielsweise Erdbeben, Überflutungen, Lawinen, Waldbrände, Hangrutschungen und Felsstürze, ab. Die offenen Standards und Schnittstellen der einzelnen LOKI-Module erlauben dabei die Kombination der Trägerplattform und angebrachten Sensorsysteme mit weiteren LOKI-Modulen für konkrete Anwendungsfälle. Diese funktionalen Vorteile erhöhen die Chancen zum Vertrieb des UAVs als kommerzielles Produkt zusätzlich.

## **4 Fortschritt seitens Dritter**

Der Einsatz von UAVs in der Lageerfassung nach Naturkatastrophen wird aktuell stark erforscht und entwickelt sich stetig weiter. Folglich wurden auch abseits des LOKI-Projekts neue Erkenntnisse gewonnen. Beispielsweise wurde im Projekt „Live-Lage“ (Deutsches Luft- und Raumfahrtzentrum 2023) mit großem Erfolg daran gearbeitet, neuartige optische Sensoren mit den Möglichkeiten unbemannter Flugsysteme zu kombinieren. Auch wird in den Forschungsdisziplinen der einzelnen Komponenten des LOKI-Systems geforscht, wie dem nachfolgenden Abschnitt zum modulspezifischen Fortschritt seitens Dritter zu entnehmen ist. Keine der aktuellen und vorangegangenen Projekte und Arbeiten fokussiert jedoch die Entwicklung eines

modularen Gesamtsystems mit abgestimmten und fest definierten Schnittstellen zwischen einer Vielzahl von Systemkomponenten zur Lageerfassung nach Naturkatastrophen, welches das Kernvorhaben des LOKI-Konsortiums beschreibt. Nur durch einen solchen Systemaufbau ist es möglich, bei Bedarf einzelne Komponenten auszutauschen oder gar wegzulassen, um damit beispielsweise den Einsatz des LOKI-Systems auch in anderen Domänen zu gewährleisten und fortwährende Verbesserung und Adaption des Gesamtsystems zu ermöglichen. Des Weiteren umfasst das LOKI-System die Erarbeitung eines vollständigen Arbeitsflusses und somit auch der Interaktion aller Komponenten, wodurch eine effiziente Lageerfassung speziell für den Erdbebenfall garantiert wird. Die Synergien der Kombination von spezieller UAV-Hardware, Flugmissionsplanung, automatischer Schadensklassifizierung als auch manueller Schadenserfassung durch Freiwillige auf Basis eines speziell entwickelten Schadenskatalogs und der Berechnung von gebäudespezifischer Schadenswahrscheinlichkeiten für ein bestimmtes Erdbebenszenario werden in dieser Umfänglichkeit noch in keiner aktuellen und vorangegangenen Arbeit erforscht. Dadurch bleibt die Einzigartigkeit des LOKI-Projekt bis dato unverändert bestehen, wodurch letztlich richtungweisende Impulse für die Entwicklung künftiger Systeme zur Lageerfassung nach Naturkatastrophen gesetzt werden. Im Folgenden wird der Fortschritt seitens Dritter in den jeweiligen Forschungsschwerpunkten dargelegt.

#### **4.1 Exposure-Modellierung (GFZ)**

Für die Abschätzung der bebauten Fläche im Exposure-Modell wurde der Fernerkundungsdatensatz *Global Human Settlement Layer* (GHSL) verwendet. Zunächst wurde der GHSL2018-Layer (GHS BUILT LDSMT GLOBE R2018A) verwendet. Der Layer mit einem 30 x 30 m-Raster enthielt jedoch Fehler. So wurden viele bebaute Flächen nicht erkannt oder nicht bebaute Flächen als bebaute Flächen deklariert, wie Häfen und Industriegebiete. Im Jahr 2022 wurde der neue GHSL2022 (European Commission Joint Research Centre 2023) veröffentlicht (Pesaresi & Politis 2022, Schiavina et al. 2022). Der Layer GHS-BUILT-S R2022A, mit einem Raster von 10 x 10 m, umfasst nicht nur viele bebaute Gebiete, die in der 2018er Version nicht erkannt wurden, sondern unterscheidet auch zwischen Straßen und Gebäuden. Die Gesamtabschätzung ist mit diesem Layer viel besser als mit dem Datensatz von 2018.

Die aggregierten Exposure-Modelle (pro Land) des Europäischen Erdbebenrisikomodells (ESRM20) wurden als Input verwendet. Der Vorteil dieses Datensatzes ist, dass die Daten offen sind und die Taxonomien nach dem GEM-Standard für Gebäudetaxonomien klassifiziert wurden. Allerdings werden die Grenzen in diesem Datensatz durch GADM-Verwaltungsgrenzen-IDs (Global Administrative Areas 2023) identifiziert, die teilweise erheblich ungenau sind (Abweichungen bis ca. 1 km). Sie mussten mit Hilfe des Borderline-Moduls (GeoForschungs-Zentrum Potsdam 2023g) auf OSM-Verwaltungsgrenzen abgebildet werden.

#### **4.2 Automatisierte Missionsplanung (FZI)**

Nach ausführlichen Recherchen wurde herausgefunden, dass eine geeignete Berücksichtigung der Flugphysik einen großen Mehrwert zur operativen Missionsplanung von UAVs liefert (Henchey & Rosen 2020; Coutinho et al. 2018, Otto et al. 2018). Insbesondere für die weitverbreiteten Multicopter UAVs existierte hierbei jedoch noch kein adäquates Verfahren zur vollen Ausschöpfung dessen Bewegungspotentials bezüglich Zeiteffizienz, welches einen kritischen Faktor im Fall eines Großschadensereignisses darstellt. Daher wurde die Forschung in dieser Richtung intensiviert.

### 4.3 Schadensklassifikation (KIT)

Während der Projektlaufzeit wurde das European Seismic Risk Model (ESRM20; Crowley et al. 2021) publiziert und open-source zur Verfügung gestellt. Daher konnte die initiale Schadensprognose auf Basis der darin enthaltenen Fragilitätskurven für Beispielszenarien in Europa durchgeführt werden. Außerdem dienten diese Fragilitätskurven zur Evaluierung und Vergleich der selbst entwickelten Fragilitätskurven anhand des Ansatzes auf Basis von Schadenskriterien auf mehreren Ebenen (Abschnitt 2.5.2). Weiterhin wurde das Vulnerability modellers toolkit (Martins et al. 2021) als open-source Plattform publiziert. Diese Python-Anwendung wurde zur Entwicklung der Fragilitätskurven verwendet.

### 4.4 Crowdsourcing und nutzergenerierte Geoinformation (UHD-GIScience)

Während des Projekts etablierte sich die StreetCompleteApp (StreetComplete 2022). Zur Nutzung der Synergien mit dem LOKI-Projekt wurde die App als Tool zur Ergänzung von OSM Gebäudeattributen eingesetzt. Diese dienten als weitere Inputdaten für die Exposure-Modellierung (Abschnitt 2.6.1).

### 4.5 Automatische Schadensbestimmung (UHD-3DGeo)

Es wurden Studien Dritter veröffentlicht, welche die Anwendung von Deep-Learning-Ansätzen für bild- oder punktwolkenbasierte Schadensklassifizierung an Gebäuden untersuchten. Diese Studien zeigten die Stärke von Deep-Learning insbesondere für binäre Klassifizierungsansätze (Liao et al. 2020, Huang et al. 2019, Nex et al. 2019). Gleichzeitig zeigten sie auch die Herausforderungen solcher Ansätze hinsichtlich des großen Bedarfs an Trainingsdaten und der begrenzten Übertragbarkeit auf neue geographische Gebiete oder Eingangsdaten (de Gélis et al. 2021, Kerle et al. 2020). Diese Erkenntnisse flossen in die Entwicklung des in LOKI verwendeten Ansatzes zur automatischen Schadensbestimmung mit ein, indem das Potenzial von virtuellem Laserscanning (Winiwarer et al. 2022) zur Erzeugung simulierter Trainingsdaten genutzt wurde. Darüber hinaus wurde Expertenwissen im Bereich Erdbebeningenieurwesen in die Generierung simulierter Trainingsdaten integriert, wodurch der trainierte Klassifikator zur Schadensbestimmung in realen 3D-Punktwolken in anderen geographischen Regionen realisiert werden konnte.

## 5 Veröffentlichungen

Die Ergebnisse des Projekts wurden in zahlreichen wissenschaftlichen Fachzeitschriften und Präsentationen auf Konferenzen verwertet. Darüber hinaus wurden Quellcodes entwickelter Methoden sowie erhobene Datensätze online in zitierbaren Repositorien veröffentlicht und langfristig nutzbar gemacht. Weiterhin floss die im Projekt durchgeführte Forschung in Dissertationen der Projektmitarbeitenden und in studentische Abschlussarbeiten ein.

### 5.1 Zeitschriftenartikel

1. Kohns, J., Stempniewski, L. & Stark, A. (2022a): Entwicklung von Schadenskatalogen für die visuelle Beurteilung von Gebäuden im Erdbebenfall. *Bauingenieur* 97 (12), S. 403-412. <https://doi.org/10.37544/0005-6650-2022-12-39>
2. Kohns, J., Stempniewski, L. & Stark, A. (2022b): Fragility functions for reinforced concrete structures based on multiscale approach for earthquake damage criteria. *Buildings* 12 (8), S. 1-17. <https://doi.org/10.3390/buildings12081253>

3. Meyer, F. & Glock, K. (2022): Kinematic Orienteering Problem with time-optimal trajectories for multirotor UAVs. *IEEE Robotics and Automation Letters* 7 (4), S. 1142-1149. <https://doi.org/10.1109/LRA.2022.3194688>
4. Winiwarter, L., Esmoris Pena, A., Weiser, H., Anders, K., Martínez Sanchez, J., Searle, M. & Höfle, B. (2022): Virtual laser scanning with HELIOS++: A novel take on ray tracing-based simulation of topographic full-waveform 3D laser scanning. *Remote Sensing of Environment* 269, S. 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112772>
5. Ullah, T., Lautenbach, S., Herfort, B. & Schorlemmer, D. (2023): Assessing Completeness of OpenStreetMap building footprints using a gamification approach via MapSwipe. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 12 (4), S. 1-20. <https://doi.org/10.3390/ijgi12040143>
6. Zahs, V., Anders, K., Kohns, J., Stark, A. & Höfle, B. (eingereicht): Assessment of structural building damage from multi-temporal photogrammetric point clouds using a machine learning model trained on virtual laser scanning data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*.
7. Zahs, V., Winiwarter, L., Anders, K., Williams, J.G., Rutzinger, M. & Höfle, B. (2022): Correspondence-driven plane-based M3C2 for lower uncertainty in 3D topographic change quantification. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 183, S. 541-559. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2021.11.018>

## 5.2 Konferenzbeiträge

1. Delattre, F., Kriegerowski, M. & Schorlemmer, D. (2021): An asynchronous and flexible data and task management ecosystem. *Second International Conference on Natural Hazards and Risks in a Changing World*, S. 54. Online unter: [https://www.uni-potsdam.de/fileadmin/projects/natriskchange/Ank%C3%BCndigungen/NatRiskChange2021-Conference\\_Book\\_Abstracts.pdf](https://www.uni-potsdam.de/fileadmin/projects/natriskchange/Ank%C3%BCndigungen/NatRiskChange2021-Conference_Book_Abstracts.pdf) (zuletzt abgerufen: 14.05.2023)
2. Evaz Zadeh, T., Nievas, C. & Schorlemmer, D. (2022): Loss-calculator: Computing earthquake damage using aggregated and building-wise exposure models [Poster]. *URBASIS Summer School 2022*.
3. Evaz Zadeh, T., Nievas, C. & Schorlemmer, D. (2021): Tile- and building-by-building-based damage calculations. *Second International Conference on Natural Hazards and Risks in a Changing World*, S. 55. Online unter: [https://www.uni-potsdam.de/fileadmin/projects/natriskchange/Ank%C3%BCndigungen/NatRiskChange2021-Conference\\_Book\\_Abstracts.pdf](https://www.uni-potsdam.de/fileadmin/projects/natriskchange/Ank%C3%BCndigungen/NatRiskChange2021-Conference_Book_Abstracts.pdf) (zuletzt abgerufen: 14.05.2023)
4. Garcia, Ospina, N. & Schorlemmer, D. (2021): OBMGapAnalysis – Automatic building completeness assessment with open settlement datasets. *Second International Conference on Natural Hazards and Risks in a Changing World*, S. 55. Online unter: [https://www.uni-potsdam.de/fileadmin/projects/natriskchange/Ank%C3%BCndigungen/NatRiskChange2021-Conference\\_Book\\_Abstracts.pdf](https://www.uni-potsdam.de/fileadmin/projects/natriskchange/Ank%C3%BCndigungen/NatRiskChange2021-Conference_Book_Abstracts.pdf) (zuletzt abgerufen: 14.05.2023)
5. Groß, S., Herfort, B., Marx, S. & Zipf, A. (2023): Exploring MapSwipe as a crowdsourcing tool for (rapid) damage assessment: The Case of the 2021 Haiti Earthquake. *AGILE GIScience Series* 4, S. 1-11. <https://doi.org/10.5194/agile-giss-4-5-2023>
6. Kohns, J., Zahs, V., Ullah, T., Schorlemmer, D., Nievas, C., Glock, K., Meyer, F., Mey, H., Stempniewski, L., Herfort, B., Zipf, A. & Höfle, B. (2021): Innovative methods for earthquake damage detection and classification using airborne observation of critical infrastructures (project LOKI). *EGU General Assembly Conference Abstracts*, S. 1-2. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-2712>

7. Kohns, J. & Stempniewski, L. (2021a): Classification of earthquake-induced building damage using innovative methods. IABSE Congress Ghent 2021: Structural Engineering for Future Societal Needs, Congress Proceedings, S. 1366-1374. <https://doi.org/10.2749/ghent.2021.1366>
8. Kohns, J. & Stempniewski, L. (2021b): Entwicklung von Schadenskriterien für nichtlineare Erdbebenuntersuchungen an Stahlbeton- und Mauerwerksgebäuden. Tagungsband zur 17. D-A-CH-Tagung Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik, S. 101-102.
9. Kohns, J., Stempniewski, L. & Stark, A. (2022c): Earthquake damage criteria for non-linear analysis of reinforced concrete buildings as basis for fragility functions. Proceedings of the Third European Conference on Earthquake Engineering and Seismology (3ECEES), S. 1646-1653.
10. Meyer, F. & Glock, K. (2021): Trajectory-based traveling salesman problem for multi-rotor UAVs. International Conference on Distributed Computing and Sensor Systems (DCOSS), S. 335-345. <https://doi.org/10.1109/DCOSS52077.2021.00061>
11. Prehn, K. & Schorlemmer, D. (2021): How to assess the degree of completeness of building stock data in OpenStreetMap. Second International Conference on Natural Hazards and Risks in a Changing World, S. 60. Online unter: [https://www.uni-potsdam.de/fileadmin/projects/natriskchange/Ank%C3%BCndigungen/NatRiskChange2021-Conference\\_Book\\_Abstracts.pdf](https://www.uni-potsdam.de/fileadmin/projects/natriskchange/Ank%C3%BCndigungen/NatRiskChange2021-Conference_Book_Abstracts.pdf) (zuletzt abgerufen: 14.05.2023)
12. Schorlemmer, D. (2022): Global Dynamic Exposure and the OpenBuildingMap [Vortrag]. URBASIS Summer School 2022.
13. Schorlemmer, D. (2021): Earthquake and OpenStreetMap [Vortrag]. World Conference on Earthquake Engineering.
14. Schorlemmer, D. (2020): Earthquake and OpenStreetMap [Vortrag]. State of the Map 2020.
15. Schorlemmer, D., Beutin, T., Cotton, F., Garcia Ospina, N., Hirata, N., Ma, K. F., Nievas, C., Prehn, K., & Wyss, M. (2021): Global Dynamic Exposure and the OpenBuildingMap – A Crowd-Sourced Approach to Disaster Risk Assessment and Reduction. Second International Conference on Natural Hazards and Risks in a Changing World, S. 61. Online unter: [https://www.uni-potsdam.de/fileadmin/projects/natriskchange/Ank%C3%BCndigungen/NatRiskChange2021-Conference\\_Book\\_Abstracts.pdf](https://www.uni-potsdam.de/fileadmin/projects/natriskchange/Ank%C3%BCndigungen/NatRiskChange2021-Conference_Book_Abstracts.pdf) (zuletzt abgerufen: 14.05.2023)
16. Schorlemmer, D., Beutin, T., Cotton, F., Garcia Ospina, N., Hirata, N., Ma, K. F., Nievas, C., Prehn, K., & Wyss, M. (2020): Global dynamic exposure and the OpenBuildingMap – A big-data and crowd-sourcing approach to exposure modelling. EGU General Assembly Conference Abstracts. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-18920>
17. Schorlemmer, D. & Delattre, F. (2020): Buildings are the new streets [Vortrag]. State of the Map 2020.
18. Shinde, S., Fleming, K., Nievas, C., Schorlemmer, D. (2023): A census-derived aggregated exposure model (AEM) for Japan. EGU General Assembly Conference Abstracts. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-15231>
19. Shinde, S., Fleming, K., Nievas, C., Schorlemmer, D. (2022): A census derived aggregated exposure model for Japan [Poster]. URBASIS Summer School 2022.

20. Shinde, S., Fleming, K., Nievas, C., Schorlemmer, D. (2021): A census-derived aggregated exposure model (AEM) for Japan. Second International Conference on Natural Hazards and Risks in a Changing World, S. 62. Online unter: [https://www.uni-potsdam.de/fileadmin/projects/natriskchange/Ank%C3%BCndigungen/NatRisk-Change2021-Conference\\_Book\\_Abstracts.pdf](https://www.uni-potsdam.de/fileadmin/projects/natriskchange/Ank%C3%BCndigungen/NatRisk-Change2021-Conference_Book_Abstracts.pdf) (zuletzt abgerufen: 14.05.2023)
21. Zahs, V., Herfort, B., Kohns, J., Ullah, T., Anders, K., Stempniewski, L., Zipf, A. & Höfle, B. (2021a): 3D point cloud-based assessment of detailed building damage through a combination of machine learning, crowdsourcing and earthquake engineering. EGU General Assembly Conference Abstracts, S. 1-2. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-1304>

### 5.3 Preprints

1. Ullah, T., Lautenbach, S., Herfort, B., Schorlemmer, D. (2023): Assessing Completeness of OpenStreetMap Building Footprints Using a Gamification Approach in MapSwipe. Preprints 2023, 2023010550. <https://doi.org/10.20944/preprints202301.0550.v1>
2. Zahs, V., Anders, K., Kohns, J., Stark, A. & Höfle, B. (2023a): Classification of structural building damage grades from multi-temporal photogrammetric point clouds using a machine learning model trained on virtual laser scanning data. arXiv:2302.12591 [cs.CV] <https://doi.org/10.48550/arXiv.2302.12591>

### 5.4 Abschlussarbeiten

1. Benammar, J. (2021): Numerische Untersuchungen zum seismischen Schädigungsverhalten von Mauerwerksgebäuden mittels Pushover-Analyse [unveröffentlichte Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie].
2. Chaker, D. (2021): Numerische Untersuchungen zum Erdbebenverhalten von Gebäuden aus Stahlbeton mittels Pushover-Analyse [unveröffentlichte Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie].
3. Förderer, D. C. (2020): Entwicklung und Erweiterung eines robusten Multi-Agenten-Verfahrens zum UAV-gestützten Monitoring [unveröffentlichte Masterarbeit, FZI Forschungszentrum Informatik].
4. Groß, S. (2022): Exploring MapSwipe as a crowdsourcing tool for damage assessment: The case of the 2021 Haiti earthquake [unveröffentlichte Bachelorarbeit, Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg].
5. Gruhler, M. (2021): Länderspezifische Bauweisen und Erdbebenschäden in Japan [unveröffentlichte Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie].
6. Hähnke, S. (2020): Klassifizierung von Erdbebenschäden an Brücken [unveröffentlichte Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie].
7. Knissel, T. (2022): Dubins Team Orienteering Problem in a post-earthquake scenario, [unveröffentlichte Masterarbeit, FZI Forschungszentrum Informatik].
8. Knoblauch, S. (2020): Entwicklung von dezentralen Koordinations- und Suchmechanismen zur Optimierung der UAV-gestützten Lageerkundung in Katastrophengebieten [unveröffentlichte Masterarbeit, FZI Forschungszentrum Informatik].
9. Kraemer, L. (2022): Untersuchung von Bauwerksparmetern mit Einfluss auf die Erdbebenanfälligkeit von Gebäuden [unveröffentlichte Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie].
10. Müller, F. (2022): Pushover-Analyse repräsentativer taiwanesischer Stahlbetongebäude [unveröffentlichte Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie].

11. Teicht, M. (2020): Flugroutenmodellierung zur UAV-gestützten Schadensermittlung im Katastrophenfall [unveröffentlichte Bachelorarbeit, FZI Forschungszentrum Informatik].
12. Schrempf, M. (2020): Klassifizierung von Erdbebenschäden an Wohngebäuden [unveröffentlichte Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie].
13. Sikiric, S. (2021): Länderspezifische Bauweisen und Erdbebenschäden in Taiwan [unveröffentlichte Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie].
14. Sune Pages, R. (2020): Numerical investigations of the earthquake behaviour of masonry buildings using pushover analysis [unveröffentlichte Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie].
15. Volk, M. (2022): Optimierung von Flugrouten unter kinematischen Nebenbedingungen [unveröffentlichte Seminararbeit, FZI Forschungszentrum Informatik].

## 5.5 Datenpublikationen

1. Zahs, V., Anders, K., Kohns, J. Stark, A. & Höfle, B. (2023b): Assessment of structural building damage from multi-temporal photogrammetric point clouds using a machine learning model trained on virtual laser scanning data [Daten und Quellcode]. heiDATA. <https://doi.org/10.11588/data/D3WZID>
2. Zahs, V., Winiwarter, L., Anders, K., Williams, J.G., Rutzinger, M., Bremer, M. & Höfle, B. (2021b): Correspondence-driven plane-based M3C2 for quantification of 3D topographic change with lower uncertainty [Daten und Quellcode]. heiDATA. <https://doi.org/10.11588/data/TGSVUI>

## 5.6 Quellcode und Web-Services

1. 3DGeo Research Group (2023a): damage\_clf\_3dgeo [Quellcode]. Online verfügbar: [https://git.gfz-potsdam.de/loki/damage\\_clf\\_3dgeo](https://git.gfz-potsdam.de/loki/damage_clf_3dgeo) (zuletzt abgerufen: 06.04.2023)
2. FZI Forschungszentrum Informatik (2023a): top\_uav\_cpp [Quellcode]. Online verfügbar: [https://github.com/fzi-forschungszentrum-informatik/top\\_uav\\_cpp](https://github.com/fzi-forschungszentrum-informatik/top_uav_cpp) (zuletzt abgerufen: 17.04.2023)
3. FZI Forschungszentrum Informatik (2023b): top\_uav\_py [Quellcode]. Online verfügbar: [https://github.com/fzi-forschungszentrum-informatik/top\\_uav\\_py](https://github.com/fzi-forschungszentrum-informatik/top_uav_py) (zuletzt abgerufen: 17.04.2023)
4. GIScience Research Group (2023a): aggregation\_module\_micro\_mapping\_giscience [Quellcode]. Online unter: [https://git.gfz-potsdam.de/loki/aggregation\\_module\\_micro\\_mapping\\_giscience](https://git.gfz-potsdam.de/loki/aggregation_module_micro_mapping_giscience)
5. GIScience Research Group (2023b): micromapping\_backend\_giscience [Quellcode]. Online unter: [https://git.gfz-potsdam.de/loki/micromapping\\_backend\\_giscience](https://git.gfz-potsdam.de/loki/micromapping_backend_giscience)
6. GIScience Research Group (2023c): micromapping\_client\_giscience. Online verfügbar: [https://git.gfz-potsdam.de/loki/micromapping\\_client\\_giscience](https://git.gfz-potsdam.de/loki/micromapping_client_giscience) (zuletzt abgerufen: 06.04.2023)
7. GeoForschungszentrum Potsdam (2023a): database-lib [Quellcode]. Online verfügbar: <https://git.gfz-potsdam.de/globaldynamicexposure/libraries/database-lib> (zuletzt abgerufen: 06.04.2023)
8. GeoForschungszentrum Potsdam (2023b): database-obmbuildings [Quellcode]. Online verfügbar: <https://git.gfz-potsdam.de/globaldynamicexposure/openbuildingmap/database-obmbuildings> (zuletzt abgerufen: 06.04.2023)
9. GeoForschungszentrum Potsdam (2023c): database-obmtiles [Quellcode]. Online verfügbar: <https://git.gfz-potsdam.de/globaldynamicexposure/openbuildingmap/database-obmtiles> (zuletzt abgerufen: 06.04.2023)

10. GeoForschungszentrum Potsdam (2023d): exposure-finalizer [Quellcode]. Online verfügbar: <https://git.gfz-potsdam.de/globaldynamicexposure/exposure-finalizer> (zuletzt abgerufen: 06.04.2023)
11. GeoForschungszentrum Potsdam (2023e): exposure-initializer [Quellcode]. Online verfügbar: <https://git.gfz-potsdam.de/globaldynamicexposure/exposure-initializer> (zuletzt abgerufen: 06.04.2023)
12. GeoForschungszentrum Potsdam (2023f): exposure-japan [Quellcode]. Online verfügbar: <https://git.gfz-potsdam.de/globaldynamicexposure/exposure-japan> (zuletzt abgerufen: 06.04.2023)
13. GeoForschungszentrum Potsdam (2023g): exposure-lib [Quellcode]. Online verfügbar: <https://git.gfz-potsdam.de/globaldynamicexposure/libraries/exposure-lib> (zuletzt abgerufen: 06.04.2023)
14. GeoForschungszentrum Potsdam (2023h): exposure-share [Quellcode]. Online verfügbar: <https://git.gfz-potsdam.de/globaldynamicexposure/exposure-share> (zuletzt abgerufen: 06.04.2023)
15. GeoForschungszentrum Potsdam (2023i): globaldynamicexposure-client\_gfz [Quellcode]. Online verfügbar: [https://git.gfz-potsdam.de/loki/globaldynamicexposure-client\\_gfz](https://git.gfz-potsdam.de/loki/globaldynamicexposure-client_gfz) (zuletzt abgerufen: 06.04.2023)
16. GeoForschungszentrum Potsdam (2023j): globaldynamicexposure-calculator-loss\_gfz [Quellcode]. Online verfügbar: [https://git.gfz-potsdam.de/loki/globaldynamicexposure-calculator-loss\\_gfz](https://git.gfz-potsdam.de/loki/globaldynamicexposure-calculator-loss_gfz) (zuletzt abgerufen: 06.04.2023)
17. GeoForschungszentrum Potsdam (2023k): openbuildingmap-client\_gfz [Quellcode]. Online verfügbar: [https://git.gfz-potsdam.de/loki/openbuildingmap-client\\_gfz](https://git.gfz-potsdam.de/loki/openbuildingmap-client_gfz)
18. GeoForschungszentrum Potsdam (2023l): shakemAPI [Quellcode]. Online verfügbar: <https://git.gfz-potsdam.de/loki/shakemapi> (zuletzt abgerufen: 06.04.2023)
19. GeoForschungszentrum Potsdam (2023m): spearhead [Quellcode]. Online verfügbar: <https://git.gfz-potsdam.de/globaldynamicexposure/openbuildingmap/spearhead> (zuletzt abgerufen: 06.04.2023)
20. GeoForschungszentrum Potsdam (2023n): taxonomy-lib [Quellcode]. Online verfügbar: <https://git.gfz-potsdam.de/globaldynamicexposure/libraries/taxonomy-lib> (zuletzt abgerufen: 06.04.2023)
21. GeoForschungszentrum Potsdam (2022a): borderline [Quellcode]. Online verfügbar: <https://git.gfz-potsdam.de/globaldynamicexposure/borderline> (zuletzt abgerufen: 06.04.2023)
22. GeoForschungszentrum Potsdam (2022b): database-osmreplication [Quellcode]. Online verfügbar: <https://git.gfz-potsdam.de/globaldynamicexposure/openbuildingmap/database-osmreplication> (zuletzt abgerufen: 06.04.2023)
23. GeoForschungszentrum Potsdam (2022c): docker-exposure-generator [Quellcode]. Online verfügbar: <https://git.gfz-potsdam.de/globaldynamicexposure/containers/docker-exposure-generator> (zuletzt abgerufen: 06.04.2023)
24. GeoForschungszentrum Potsdam (2022d): docker-imposm [Quellcode]. Online verfügbar: <https://git.gfz-potsdam.de/globaldynamicexposure/server-components/containers/docker-imposm> (zuletzt abgerufen: 06.04.2023)
25. GeoForschungszentrum Potsdam (2022e): docker-obm-database [Quellcode]. Online verfügbar: <https://git.gfz-potsdam.de/globaldynamicexposure/server-components/containers/docker-obm-database> (zuletzt abgerufen: 06.04.2023)
26. GeoForschungszentrum Potsdam (2022f): docker-rabotnik-messagebus [Quellcode]. Online verfügbar: <https://git.gfz-potsdam.de/globaldynamicexposure/rabotnik/containers/docker-rabotnik-message-bus> (zuletzt abgerufen: 06.04.2023)

27. GeoForschungszentrum Potsdam (2022g): docker-rabotnik-obm [Quellcode]. Online verfügbar: <https://git.gfz-potsdam.de/globaldynamicexposure/rabotnik/containers/docker-rabotnik-obm> (zuletzt abgerufen: 06.04.2023)
28. GeoForschungszentrum Potsdam (2022h): docker-rabotnik-tiles [Quellcode]. Online verfügbar: <https://git.gfz-potsdam.de/globaldynamicexposure/rabotnik/containers/docker-rabotnik-tiles> (zuletzt abgerufen: 06.04.2023)
29. GeoForschungszentrum Potsdam (2022i): losscalculator [Quellcode]. Online verfügbar: <https://git.gfz-potsdam.de/globaldynamicexposure/loss-calculator> (zuletzt abgerufen: 06.04.2023)
30. GeoForschungszentrum Potsdam (2022j): obmgapanalysis [Quellcode]. Online verfügbar: <https://git.gfz-potsdam.de/globaldynamicexposure/openbuildingmap/obmgapanalysis> (zuletzt abgerufen: 06.04.2023)
31. GeoForschungszentrum Potsdam (2022k): rabotnik [Quellcode]. Online verfügbar: <https://git.gfz-potsdam.de/globaldynamicexposure/rabotnik/rabotnik> (zuletzt abgerufen: 06.04.2023)
32. GeoForschungszentrum Potsdam (2022l): rabotnik-obm [Quellcode]. Online verfügbar: <https://git.gfz-potsdam.de/globaldynamicexposure/rabotnik/rabotnik-obm> (zuletzt abgerufen: 06.04.2023)
33. GeoForschungszentrum Potsdam (2022m): rabotnik-tiles [Quellcode]. Online verfügbar: <https://git.gfz-potsdam.de/globaldynamicexposure/rabotnik/rabotnik-tiles> (zuletzt abgerufen: 06.04.2023)
34. GeoForschungszentrum Potsdam (2021a): docker-rabotnik-instance [Quellcode]. Online verfügbar: <https://git.gfz-potsdam.de/globaldynamicexposure/rabotnik/containers/docker-rabotnik-instance> (zuletzt abgerufen: 06.04.2023)
35. GeoForschungszentrum Potsdam (2021b): docker-spearhead [Quellcode]. Online verfügbar: <https://git.gfz-potsdam.de/dynamicexposure/server-components/containers/docker-spearhead> (zuletzt abgerufen: 06.04.2023)
36. GeoForschungszentrum Potsdam (2021c): exposure-taiwan [Quellcode]. Online verfügbar: <https://git.gfz-potsdam.de/globaldynamicexposure/exposure-taiwan> (zuletzt abgerufen: 06.04.2023)
37. Heidelberg Institute for Geoinformation Technology (2023): Crowdmap-App [Webservice]. Online verfügbar: <https://crowdmap.heigit.org> (zuletzt abgerufen: 06.04.2023)
38. Karlsruher Institut für Technologie (2023): damage\_katalogue\_kit [Quellcode]. Online verfügbar: [https://git.gfz-potsdam.de/loki/damage\\_katalogue\\_kit](https://git.gfz-potsdam.de/loki/damage_katalogue_kit) (zuletzt abgerufen: 06.04.2023)
39. LOKI-Gesamtverbund (2023a): LOKI GitLab-Projekt [Quellcode]. Online verfügbar: <https://git.gfz-potsdam.de/loki> (zuletzt abgerufen: 06.04.2023)
40. py4dgeo Development Core Team (2023): py4dgeo: library for change analysis in 4D point clouds [Quellcode]. Version 0.5.0. Online verfügbar: <https://github.com/3dgeo-heidelberg/py4dgeo> (zuletzt abgerufen: 06.04.2023)
41. Winiwarter, L., Esmorís Pena, A., Weiser, H., Anders, K., Martínez Sanchez, J., Searle, M. & Höfle, B. (2023): HELIOS++: Heidelberg LiDAR Operations Simulator ++ [Quellcode]. Version 1.1.0. Online verfügbar: <https://github.com/3dgeo-heidelberg/helios>
42. Zahs, V., Anders, K., Kohns, J. Stark, A. & Höfle, B. (2023b): Assessment of structural building damage from multi-temporal photogrammetric point clouds using a machine learning model trained on virtual laser scanning data [Data and Source Code]. hei-DATA. <https://doi.org/10.11588/data/D3WZID>

43. Zahs, V., Winiwarer, L., Anders, K., Williams, J.G., Rutzinger, M., Bremer, M. & Höfle, B. (2021b): Correspondence-driven plane-based M3C2 for quantification of 3D topographic change with lower uncertainty [Data and Source Code]. heiDATA. <https://doi.org/10.11588/data/TGSVUI>

## 5.7 Öffentlichkeitsarbeit

1. 3DGeo Research Group (2023b): GIScience News Blog [News-Blog]. Online unter: <https://giscienceblog.uni-heidelberg.de/?s=loki> (zuletzt abgerufen: 06.04.2023)
2. 3DGeo Research Group (2023c): LOKI auf Twitter [Twitter-Beiträge]. Online unter: <https://twitter.com/search?q=LOKI%2C%20BMBF&src=typd&lang=de> (zuletzt abgerufen: 06.04.2023)
3. 3DGeo Research Group (2023d): LOKI – Luftgestützte Observation Kritischer Infrastrukturen [Webseite]. Online verfügbar: <https://www.uni-heidelberg.de/loki> (zuletzt abgerufen: 06.04.2023)
4. 3DGeo Research Group (2021): UAV-based building-specific damage assessment in the LOKI research project [Projekt-Video]. Online unter: <https://youtu.be/d8qYMEJUPg> (zuletzt abgerufen: 06.04.2023)
5. FZI Forschungszentrum Informatik (2023d): LOKI – Luftgestützte Observation Kritischer Infrastrukturen [Webseite]. Online verfügbar: <https://www.fzi.de/project/loki/> (zuletzt abgerufen: 06.04.2023)
6. LOKI-Gesamtverbund (2023b): LOKI – Luftgestützte Observation Kritischer Infrastrukturen [Wiki]. Online unter: [https://git.gfz-potsdam.de/loki/loki\\_wiki](https://git.gfz-potsdam.de/loki/loki_wiki) (zuletzt abgerufen: 06.04.2023)

## 6 Literatur

- 3DGeo Research Group (2023a): LOKI – Luftgestützte Observation Kritischer Infrastrukturen [Webseite]. Online verfügbar: <https://www.uni-heidelberg.de/loki> (zuletzt abgerufen: 05.04.2023)
- 3DGeo Research Group (2023b): GIScience News Blog [News Blog]. Online unter: <http://k1z.blog.uni-heidelberg.de/tag/loki/> (zuletzt abgerufen: 06.04.2023)
- 3DGeo Research Group (2023c): LOKI auf Twitter [Twitter-Beiträge]. Online unter: <https://twitter.com/search?q=LOKI%2C%20BMBF&src=typd&lang=de> (zuletzt abgerufen: 06.04.2023)
- 3DGeo Research Group (2021): UAV-based building-specific damage assessment in the LOKI research project [Projekt-Video]. Online unter: <https://youtu.be/d8qYMEJUPg> (zuletzt abgerufen: 06.04.2023)
- Adams, S. M. & Friedland, C. J. (2011): A survey of unmanned aerial vehicle (UAV) usage for imagery collection in disaster research and management. 9<sup>th</sup> International Workshop on Remote Sensing for Disaster Response 8, S. 1-8. Online verfügbar: [https://www.researchgate.net/publication/266465037\\_A\\_Survey\\_of\\_Unmanned\\_Aerial\\_Vehicle\\_UAV\\_Usage\\_for\\_Imagery\\_Collection\\_in\\_Disaster\\_Research\\_and\\_Management](https://www.researchgate.net/publication/266465037_A_Survey_of_Unmanned_Aerial_Vehicle_UAV_Usage_for_Imagery_Collection_in_Disaster_Research_and_Management) (zuletzt abgerufen: 06.04.2023)
- Alzubaidi, L., Zhang, J., Humaidi, A. J., Al-Dujaili, A., Duan, Y., Al-Shamma, O., Santamaría, J., Fadhel, M. A., Al-Amidie, M. & Farhan, L. (2021): Review of deep learning: concepts, CNN architectures, challenges, applications, future directions. Journal of Big Data 8, S. 1-74. <https://doi.org/10.1186/s40537-021-00444-8>
- Anderson, J., Soden, R., Anderson, K. M., Kogan, M. & Palen, L. (2016): EPICOSM: A software framework for OpenStreetMap data analytics. Proceedings of the 49<sup>th</sup> Annual Hawaii

- International Conference on System Sciences (HICSS). S. 5468-5477. <https://doi.org/10.1109/HICSS.2016.675>
- Atay, N. & Bayazit, O. B. (2007): Emergent task allocation for mobile robots. *Robotics: Science and Systems*, S. 1-8. <https://doi.org/10.15607/RSS.2007.III.007>
- Ballatore, A., McClintock, W., Goldberg, G. & Kuhn, W. (2020): Towards a usability Scale for Participatory GIS, S. 327-348. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-14745-7\\_18](https://doi.org/10.1007/978-3-030-14745-7_18)
- Barrington, L., Ghosh, S., Greene, M., Har-Noy, S., Berger, J., Gill, S., Lin, A. Y. M. & Huyck, C. (2011): Crowdsourcing earthquake damage assessment using remote sensing imagery. *Annals of Geophysics* 54, S. 680-687. <https://doi.org/10.4401/AG-5324>
- Barron, C., Neis, P. & Zipf, A. (2014): A Comprehensive Framework for Intrinsic Open-StreetMap Quality Analysis. *Transactions in GIS* 18 (6), S. 877-895. <https://doi.org/10.1111/tgis.12073>
- Besl, P. J. & McKay, N. D. (1992): A method for registration of 3-D shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 14 (2), S. 239-256. <https://doi.org/10.1109/34.121791>
- Brzev, S., Scawthorn, C., Charleson, A. W., Allen, L., Greene, M., Jaiswal, K.S. & Silva, V. (2013): GEM Building Taxonomy Version 2.0. GEM Technical Report 2013-02 V1.0.0. Online verfügbar: <https://pubs.er.usgs.gov/publication/70058718> (zuletzt abgerufen: 06.04.2023)
- Coutinho, W. P., Battarra, M. & Fliege J. (2018): The unmanned aerial vehicle routing and trajectory optimisation problem, a taxonomic review. *Computers & Industrial Engineering* 120, S. 116-128. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.04.037>
- Crisafulli F.J. (1997): Seismic behaviour of reinforced concrete structures with masonry infills [Dissertation, University of Canterbury, New Zealand]. 416 S. <http://dx.doi.org/10.26021/1979>
- Crowley, H., Despotaki, V., Rodrigues, D., Silva, V., Toma-Danila, D., Riga, E., Karatzetou, A., Fotopoulou, S., Zugic, Z., Sousa, L., Ozcebe, S., & Gamba, P. (2020): Exposure model for European seismic risk assessment. *Earthquake Spectra* 36, S. 252-273. <https://doi.org/10.1177/8755293020919429>
- Crowley, H., Dabbeek, J., Despotaki, V., Rodrigues, D., Martins, L., Silva, V., Romão, X., Pereira, N., Weatherill, G., & Danciu, L. (2021): European Seismic Risk Model (ESRM20). EFEHR Technical Report 002 V1.0.0. <https://doi.org/10.7414/EUC-EFEHR-TR002-ESRM20>
- D'Ayala, D., Meslem, A., Vamvatsikos, D., Porter, K., Rosetto, T. & Silva, V. (2014): Guidelines for analytical vulnerability assessment - Low/Mid-Rise. GEM Technical Report 2014-12 V1.0.0, 162 S. Online verfügbar: [https://cloud-storage.globalquakemodelling.org/public/wix-new-website/pdf-collections-wix/publications/Guidelines%20for%20Analytical%20Vulnerability%20Assessment%20-%20Low Mid-Rise.pdf](https://cloud-storage.globalquakemodelling.org/public/wix-new-website/pdf-collections-wix/publications/Guidelines%20for%20Analytical%20Vulnerability%20Assessment%20-%20Low%20Mid-Rise.pdf) (zuletzt abgerufen: 06.04.2023)
- Da Porto, F., Donà, M., Rosti, A., Rota, M., Lagomarsino, S., Cattari, S., Borzi, B., Onida, M., Gregorio, D. de, Perelli, F. L., Del Gaudio, C., Ricci, P. & Speranza, E. (2021): Comparative analysis of the fragility curves for Italian residential masonry and RC buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering* 19, S. 3209-3252. <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01120-1>
- Dabbeek, J., & Silva, V. (2020): Modeling the residential building stock in the Middle East for multi-hazard risk assessment. *Natural Hazards* 100 (2), S. 781-810. <https://doi.org/10.1007/s11069-019-03842-7>
- de Gélis, I., Lefèvre, S. & Corpetti, T. (2021): Change detection in urban point clouds: An

- experimental comparison with simulated 3D datasets. *Remote Sensing* 13, S. 1-29. <https://doi.org/10.3390/rs13132629>
- Deutsches Luft- und Raumfahrtzentrum (2023): Live-Lage [Projektseite]. Online verfügbar: [https://www.dlr.de/os/en/desktopdefault.aspx/tabid-12893/22517\\_read-52089/](https://www.dlr.de/os/en/desktopdefault.aspx/tabid-12893/22517_read-52089/) (zuletzt abgerufen: 06.04.2023)
- Dittus, M., Quattrone, G. & Capra, L. (2016): Analysing volunteer engagement in humanitarian mapping: Building contributor communities at large scale. *Proceedings of the 19<sup>th</sup> ACM Conference on Computer-Supported Cooperative Work & Social Computing (CSCW)*, S. 108-118. <https://doi.org/10.1145/2818048.2819939>
- Dronocode (2023): QGroundControl. Online verfügbar: <http://qgroundcontrol.com/> (zuletzt abgerufen: 06.04.2023)
- Dubins, L.E. (1957): On curves of minimal length with a constraint on average curvature, and with prescribed initial and terminal positions and tangents. *American Journal of Mathematics* 79 (3), S. 497-516. <https://doi.org/10.2307/2372560>
- Earthquake Engineering Research Institute (2022): Learning from Earthquakes. Online verfügbar: <http://learningfromearthquakes.org/> (zuletzt abgerufen: 06.04.2023)
- Earthquake Engineering Research Institute & International Association for Earthquake Engineering (2023): World Housing Encyclopedia. Online verfügbar: <https://www.world-housing.net/> (zuletzt abgerufen: 06.04.2023)
- European Commission Joint Research Centre (2022): GHSL data package 2022: Public release GHS P2022. Online verfügbar: <https://data.europa.eu/doi/10.2760/19817> (zuletzt abgerufen: 06.04.2023)
- Finkel, R. A., & Bentley, J. L. (1974): Quad trees a data structure for retrieval on composite keys. *Acta Informatica* 4 (1), S. 1-9. <https://doi.org/10.1007/BF00288933>
- Forschungszentrum Informatik (2023a): top\_uav\_cpp [Quellcode]. Online verfügbar: [https://github.com/fzi-forschungszentrum-informatik/top\\_uav\\_cpp](https://github.com/fzi-forschungszentrum-informatik/top_uav_cpp) (zuletzt abgerufen: 17.04.2023)
- Forschungszentrum Informatik (2023b): top\_uav\_py [Quellcode]. Online verfügbar: [https://github.com/fzi-forschungszentrum-informatik/top\\_uav\\_py](https://github.com/fzi-forschungszentrum-informatik/top_uav_py) (zuletzt abgerufen: 17.04.2023)
- Gamba, P., Cavalca, D., Jaiswal, K., Huyck, C., & Crowley, H. (2012): The GED4GEM project: Development of a global exposure database for the global earthquake model initiative. *Proceedings of the 15<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*. Online verfügbar: [http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/WCEE2012\\_3240.pdf](http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/WCEE2012_3240.pdf) (zuletzt abgerufen: 06.04.2023)
- Gastellu-Etchegorry, J. P., Yin, T., Lauret, N., Grau, E., Rubio, J., Cook, B.D., Morton, D. C. & Sun, G. (2016): Simulation of satellite, airborne and terrestrial LiDAR with DART (I): waveform simulation with quasi-monte carlo ray tracing. *Remote Sensing of the Environment* 184, S. 418-435. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.07.010>
- Geiß, C., Jilge, A., Lakes, T. & Taubenböck, H. (2015): Estimation of seismic vulnerability levels of urban structures with multisensor remote sensing. *IEEE Journal of Selected Topics in applied Earth Observations and Remote Sensing*, S. 1939-1936.
- GeoForschungsZentrum Potsdam (2023a): Spearhead [Quellcode]. Online verfügbar: <https://git.gfz-potsdam.de/dynamicexposure/openbuildingmap/spearhead> (zuletzt abgerufen: 05.04.2023)
- GeoForschungsZentrum Potsdam (2023b): Rabotnik [Quellcode]. Online verfügbar: <https://git.gfz-potsdam.de/dynamicexposure/rabotnik/rabotnik> (zuletzt abgerufen: 05.04.2023)

- GeoForschungsZentrum Potsdam (2023c): Exposure-Initializer [Quellcode]. Online verfügbar: <https://git.gfz-potsdam.de/dynamicexposure/globaldynamicexposure/exposure-initializer> (zuletzt abgerufen: 05.04.2023)
- GeoForschungsZentrum Potsdam (2023d): Finalizer [Quellcode]. Online verfügbar: <https://git.gfz-potsdam.de/dynamicexposure/globaldynamicexposure/exposure-finalizer> (zuletzt abgerufen: 05.04.2023)
- GeoForschungsZentrum Potsdam (2023e): Loss-Calculator [Quellcode]. Online verfügbar: <https://git.gfz-potsdam.de/dynamicexposure/globaldynamicexposure/loss-calculator> (zuletzt abgerufen: 05.04.2023)
- GeoForschungsZentrum Potsdam (2023f): ShakemAPI [Quellcode]. Online verfügbar: <https://git.gfz-potsdam.de/loki/shakemapi> (zuletzt abgerufen: 05.04.2023)
- GeoForschungsZentrum Potsdam (2023g): Borderline [Quellcode]. Online verfügbar: <https://git.gfz-potsdam.de/dynamicexposure/borderline> (zuletzt abgerufen: 06.04.2023)
- GeoForschungsZentrum Potsdam (2023h): Dynamic Exposure [Quellcode]. Online verfügbar: <https://git.gfz-potsdam.de/dynamicexposure> (zuletzt abgerufen: 06.04.2023)
- Global Administrative Areas (2023): GADM maps and data. Online verfügbar: <https://gadm.org/index.html> (zuletzt abgerufen: 06.04.2023)
- Global Earthquake Model Foundation (2023): Global Earthquake Model. Online verfügbar: <https://www.globalquakemodel.org/> (zuletzt abgerufen: 06.04.2023)
- Grünthal, G. (1998): European Macroseismic Scale 1998 (EMS-98). Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, 99 S. <https://doi.org/10.2312/EMS-98.full.en>
- Heidelberg Institute for Geoinformation Technology (2023): Crowdmap-App [Webservice]. Online verfügbar: <https://crowdmap.heigit.org> (zuletzt abgerufen: 06.04.2023)
- Henchey, M. & Rosen, S. (2020): Emerging approaches to support dynamic mission planning: survey and recommendations for future research. The Journal of Defense Modeling and Simulation 18 (4), S. 453-468. <https://doi.org/10.1177/1548512919898750>
- Herfort, B., Kaibel, M. & Höfle, B. (2017): 3D-MAPP: 3D-MicroMapping von großen Geodatenansätzen im Web. IÖR Schriften 73, S. 143-148. Online verfügbar: <https://slub.qucosa.de/api/qucosa%3A21275/attachment/ATT-0/> (zuletzt abgerufen: 06.04.2023)
- Huang, H., Sun, G. Y., Zhang, X.M., Hao, Y. L., Zhang, A. Z., Ren, J. C. & Ma, H. Z. (2019): Combined multiscale segmentation convolutional neural network for rapid damage mapping from post earthquake very high-resolution images. Journal of Applied Remote Sensing 13 (2), S. 022007-1-022007-14. <https://doi.org/10.1117/1.JRS.13.022007>
- Jaiswal, K., Wald, D., & Porter, K. (2010): A global building inventory for earthquake loss estimation and risk management. Earthquake Spectra, 26 (3), S. 731-748. <https://doi.org/10.1193/1.3450316>
- Kerle, N. & Hoffman, R. R. (2013): Collaborative damage mapping for emergency response: the role of cognitive systems engineering. Natural Hazards and Earth System Sciences 13 (1), S. 97-113. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-97-2013>
- Kerle, N., Nex, F., Gerke, M., Duarte, D. & Vetrivel, A. (2020): UAV-based structural damage mapping: A review. ISPRS International Journal of Geo-Information 9, S. 1-23. <https://doi.org/10.3390/ijgi9010014.721>
- Kohns, J., Stempniewski, L. & Stark, A. (2022a): Entwicklung von Schadenskatalogen für die visuelle Beurteilung von Gebäuden im Erdbebenfall. Bauingenieur 97 (12), S. 403-412. <https://doi.org/10.37544/0005-6650-2022-12-39>
- Kohns, J., Stempniewski, L. & Stark, A. (2022b): Fragility functions for reinforced concrete structures based on multiscale approach for earthquake damage criteria. Buildings 12 (8), S. 1-17. <https://doi.org/10.3390/buildings12081253>

- Kohns, J., Stempniewski, L. & Stark, A. (2022c): Earthquake damage criteria for non-linear analysis of reinforced concrete buildings as basis for fragility functions. Proceedings of the 3<sup>rd</sup> European Conference on Earthquake Engineering and Seismology - 3ECEES, S. 1646-1653.
- Kohns, J. & Stempniewski, L. (2021): Classification of earthquake-induced building damage using innovative methods. IABSE Congress Ghent 2021: Structural Engineering for Future Societal Needs, S. 1366-1374. <https://doi.org/10.2749/ghent.2021.1366>
- Lague, D., Brodu, N. & Leroux, J. (2013): Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (N-Z). ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 82, S. 10-26 <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.04.009>
- LOKI Gesamtverbund (2023a): LOKI GitLab-Projekt [Quellcode]. Online verfügbar: <https://git.gfz-potsdam.de/loki> (zuletzt abgerufen: 06.04.2023)
- LOKI Gesamtverbund (2023b): LOKI Wiki [Wiki]. Online verfügbar: [https://git.gfz-potsdam.de/loki/loki\\_wiki](https://git.gfz-potsdam.de/loki/loki_wiki) (zuletzt abgerufen: 06.04.2023)
- Lagomarsino, S. & Cattari, S. (2014): Fragility functions of masonry buildings. S. 111-156. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7872-6>
- Liao, Y., Mohammadi M. E. & Wood, R. L. (2020): Deep Learning Classification of 2D Orthomosaic Images and 3D Point Clouds for Post-Event Structural Damage Assessment. Drones 4 (2) S. 1-19. <https://doi.org/10.3390/drones4020024>
- Liao, W.-I., Loh, C.-H. & Tsai, K.-C. (2006): Study on the fragility of building structures in Taiwan. Natural Hazards 37, S. 55-69. <https://doi.org/10.1007/s11069-005-4656-x>
- Martins, L. & Silva, V. (2021): Development of a fragility and vulnerability model for global seismic risk analyses. Bulletin of Earthquake Engineering 19 (15), S. 6719-6745. <https://doi.org/10.1007/s10518-020-00885-1>
- Martins, L., Silva, V., Crowley, H. & Cavalieri, F. (2021): Vulnerability modellers toolkit, an open-source platform for vulnerability analysis. Bulletin of Earthquake Engineering 19, S. 5691-5709. <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01187-w>
- McLain, T. & Beard, R. W. (2014): Implementing Dubins airplane paths on fixed-wing UAVs. S. 1677-1701. [https://doi.org/10.1007/978-90-481-9707-1\\_120](https://doi.org/10.1007/978-90-481-9707-1_120)
- Meyer, F. & Glock, K. (2022): Kinematic orienteering problem with time-optimal trajectories for Multirotor UAVs, IEEE Robotics and Automation Letters, Vol. 7, No. 4, pp. 1142-1149
- Meyer, F. & Glock, K. (2021): Trajectory-based Traveling Salesman Problem for multirotor UAVs. International Conference on Distributed Computing and Sensor Systems (DCOSS), S. 335-342. <https://doi.org/10.1109/DCOSS52077.2021.00061>
- Microsoft Corporation (2023): Bing Maps Tile System. Online verfügbar: <https://learn.microsoft.com/en-us/bingmaps/articles/bing-maps-tile-system> (zuletzt abgerufen: 05.04.2023).
- Missing Maps Project (2023): MapSwipe-App. Online verfügbar: <https://mapswipe.org> (zuletzt abgerufen: 06.04.2023)
- Mocnik, F.-B., Mobasheri, A., Griesbaum, L., Eckle, M., Jacobs, C. & Klöner, C. (2018): A grounding-based ontology of data quality measures. Journal of Spatial Information Science 16, S. 1-25. <https://doi.org/10.5311/JOSIS.2018.16.360>
- Munawar, H. S., Ullah, F., Qayyum, S. & Heravi, A. (2021): Application of deep learning on UAV-based aerial images for flood detection. Smart Cities 4, S. 1220-1242. <https://doi.org/10.3390/smartcities4030065>
- Nex, F., Duarte, D., Tonolo, F.G. & Kerle, N. (2019): Structural building damage detection with deep learning: Assessment of a state-of-the-art CNN in operational conditions. Remote Sensing 11, S. 1-17. <https://doi.org/10.3390/rs11232765>

- OpenBuildingMap (2023): OpenBuildingMap. Online verfügbar: [www.openbuildingmap.org](http://www.openbuildingmap.org) (zuletzt abgerufen: 05.04.2023)
- OpenQuake Platform (2023a): Glossary for GEM Taxonomy. Online verfügbar: <https://storage.globalquakemodel.org/what/physical-integrated-risk/building-taxonomy/> (zuletzt abgerufen: 05.04.2023)
- OpenQuake Platform (2023b): Glossary for GEM Taxonomy. Online verfügbar: <https://storage.globalquakemodel.org/resources/publications/technical-reports/gem-building-taxonomy-report/> (zuletzt abgerufen: 05.04.2023)
- Otto, A., Agatz, N., Campell, J., Golden, B. & Pesch, E. (2018): Optimization approaches for civil applications of unmanned aerial vehicles (UAVs) or aerial drones: A survey. *Networks*, 72, S. 411-458. <https://doi.org/10.1002/net.21818>
- Pacific Earthquake Engineering Research Center (2022): The Earthquake Engineering Online Archive. Online verfügbar: <https://nisee.berkeley.edu/elibrary/> (zuletzt abgerufen: 06.04.2023)
- Penicka, R., Faigl, J., Vana, P. & Saska, M. (2017): Dubins orienteering problem. *IEEE Robotics and Automation Letters* 2 (2), S. 1210-1217. <https://doi.org/10.1109/LRA.2017.2666261>
- Pesaresi, M., Politis, P. (2022): GHS-BUILT-S R2022A - GHS built-up surface grid, derived from Sentinel2 composite and Landsat, multitemporal (1975-2030) [Dataset]. <https://doi.org/10.2905/D07D81B4-7680-4D28-B896-583745C27085>
- Petrides, P., Kolios, P., Kyrkou, C., Theocharides, T. & Panayiotou, C. (2017): Disaster prevention and emergency response using unmanned aerial systems. *Smart cities in the Mediterranean*, S. 379-403. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-54558-5\\_18](https://doi.org/10.1007/978-3-319-54558-5_18)
- Pinty, B., Gobron, N., Widlowski, J.L., Gerstl, S.A.W., Verstraete, M.M., Antunes, M., Bacour, C., Gascon, F., Gastellu, J.P., Goel, N., Jacquemoud, S., North, P., Qin, W. & Thompson, R. (2001): Radiation transfer model intercomparison (rami) exercise. *Journal of Geophysical Research Atmospheres* 106, S. 11937-11956. <https://doi.org/10.1029/2000JD900493>
- Poiani, T. H., dos Santos Rocha, R., Degrossi, L.C. & Porto de Albuquerque, J. (2016): Potential of collaborative mapping for disaster relief: A case study of OpenStreetMap in the Nepal earthquake 2015. *Proceedings of the 49<sup>th</sup> Annual Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)*, S. 188–197. <https://doi.org/10.1109/HICSS.2016.31>
- py4dgeo Development Core Team (2023): py4dgeo: library for change analysis in 4D point clouds. Version 0.5.0 [Quellcode]. Online verfügbar: <https://github.com/3dgeo-heidelberg/py4dgeo> (zuletzt abgerufen: 06.04.2023)
- Schiavina M., Melchiorri M., Pesaresi M., Politis P., Freire S., Maffenini L., Florio P., Ehrlich D., Goch K., Tommasi P. & Kemper T. (2022). GHSL Data Package 2022- Publications Office European Union. S. 1-93. <https://doi.org/10.2760/19817>
- Schorlemmer, D., Beutin, T., Cotton, F., Garcia Ospina, N., Hirata, N., Ma, K. F., Nieves, C., Prehn, K., & Wyss, M. (2020): Global dynamic exposure and the OpenBuildingMap – A big-data and crowd-sourcing approach to exposure modelling. *EGU General Assembly Conference Abstract*. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-18920>
- Sehra, S. S., Singh, J. & Rai, H. S. (2017): Assessing OpenStreetMap data using intrinsic quality indicators: An extension to the QGIS processing toolbox. *Future Internet* 9 (2), S. 1-22. <https://doi.org/10.3390/fi9020015>
- Seismosoft (2022): SeismoStruct 2022 – A computer program for static and dynamic nonlinear analysis of framed structures [Software]. Online verfügbar: <https://seismosoft.com/> (zuletzt abgerufen: 06.04.2023)

- Solutions for All (2023): eCalc. Online verfügbar: <https://www.ecalc.ch/> (zuletzt abgerufen: 06.04.2023)
- StreetComplete (2022): StreetComplete. Version 45.0 [Quellcode]. Online verfügbar: <https://github.com/streetcomplete/StreetComplete/tree/v45.0> (zuletzt abgerufen: 06.04.2023)
- S.T.A. DATA (2022): 3Muri Programm [Software]. Online verfügbar: [www.3muri.com](http://www.3muri.com) (zuletzt abgerufen: 06.04.2023)
- SYNER-G (2011): Systemic Seismic Vulnerability and Risk Analysis for Buildings, Lifeline Networks and Infrastructure Safety Gain: D3.1 - Fragility Functions for Common RC Building Types in Europe. Online verfügbar: [http://www.vce.at/SYNER-G/pdf/deliverables/D3.01\\_Syner-G\\_RC\\_final.pdf](http://www.vce.at/SYNER-G/pdf/deliverables/D3.01_Syner-G_RC_final.pdf) (zuletzt abgerufen: 06.04.2023)
- Tovey, C., Lagoudakis, M. G., Jain S. & Koenig, S. (2005): The generation of bidding rules for auction-based robot coordination. Multi-Robot Systems. From Swarms to Intelligent Automata III, S. 3-14. [https://doi.org/10.1007/1-4020-3389-3\\_1](https://doi.org/10.1007/1-4020-3389-3_1)
- Ullah, T., Lautenbach, S., Herfort, B. & Schorlemmer, D. (2023): Assessing Completeness of OpenStreetMap building footprints using a gamification approach via MapSwipe. ISPRS International Journal of Geo-Information 12 (4), S. 1-20. <https://doi.org/10.3390/ijgi12040143>
- Vasquez-Gomez, J. I., Marciano-Melchor, M., Valentin, L- & Herrera-Lozada, J. C. (2020): Coverage path planning for 2D convex regions. Journal of Intelligent and Robotic Systems 97, S. 81-94. <https://doi.org/10.1007/s10846-019-01024-y>
- Vetrivel, A., Gerke, M., Kerle, N., Nex, F. & Vosselman, G. (2018): Disaster damage detection through synergistic use of deep learning and 3d point cloud features derived from very high resolution oblique aerial images, and multiple-kernel-learning. ISPRS journal of Photogrammetry and Remote Sensing 140, S. 45-59. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.03.001>
- Wada, A., Yamashita, T., Maruyama, M., Arai, T., Adachi, H. & Tsuji, H. (2013): A surveillance system using small unmanned aerial vehicle (UAV) related technologies. NEC Technical Journal 8 (1), S. 68-72. Online verfügbar: <https://www.nec.com/en/global/techrep/journal/q13/n01/pdf/130115.pdf> (zuletzt abgerufen: 06.04.2023)
- Westrope, C., Banick, R. & Levine, M. (2014): Groundtruthing OpenStreetMap building damage assessment. Procedia Engineering 78, S. 29-39. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.07.035>
- Widlowski, J. L., Mio, C., Disney, M., Adams, J., Andredakis, I., Atzberger, C., Brennan, J., Busetto, L., Chelle, M., Ceccherini, G., Colombo, R., Côté, J. F., Eenmäe, A., Essery, R., Gastellu-Etchegorry, J. P., Gobron, N., Grau, E., Haverd, V., Homolová L., Huang, H., Hunt, L., Kobayashi, H., Koetz, B., Kuusk, A., Kuusk, J., Lang, M., Lewis, P.E., Lovell, J.L., Malenovský, Z., Meroni, M., Morsdorf, F., Mottus, M., Ni-Meister, W., Pinty, B., Rautiainen, M., Schlerf, M., Somers, B., Stuckens, J., Verstraete, M.M., Yang, W., Zhao, F. & Zenone, T. (2015): The fourth phase of the radiative transfer model intercomparison (RAMI) exercise: actual canopy scenarios and conformity testing. Remote Sensing of Environment 169, S. 418-437. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.08.016>
- Winiwarter, L., Esmorís Pena, A. M., Weiser, H., Anders, K., Martínez Sánchez, J., Searle, M. & Höfle, B. (2022): Virtual laser scanning with HELIOS++: A novel take on ray tracing-based simulation of topographic full-waveform 3d laser scanning. Remote Sensing of Environment 269, S. 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112772>

- Winiwarter, L., Esmorís Pena, A. M., Weiser, H., Anders, K., Martínez Sanchez, J., Searle, M. & Höfle, B. (2023): Virtual laser scanning with HELIOS++: Heidelberg LiDAR Operations Simulator [Software]. Version 1.1.0. Online unter: <https://github.com/3dgeo-heidelberg/helios>.
- Xu, Z., Yang, J., Peng, C., Wu, Y., Jiang, X., Li, R., Zheng, Y., Gao, Y., Liu, S. & Tian, B. (2014): Development of an AUS for post-earthquake disaster surveying and its application in Ms7.0 Lushan earthquake, Sichuan, China. *Computers & Geosciences* 68, S. 22-30. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2014.04.001>
- Yepes-Estrada, C., Silva, V., Valcárcel, J., Acevedo, A. B., Tarque, N., Hube, M. A., Coronel, G., & María, H. S. (2017): Modeling the residential building inventory in South America for seismic risk assessment. *Earthquake Spectra* 33 (1), S. 299-322. <https://doi.org/10.1193/101915eqs155dp>
- Zlot, R., Stentz, A., Dias, M. B. & Thayer, S. (2002): Multi-robot exploration controlled by a market economy. *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation* 3, S. 3016-3023. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2002.1013690>
- Zahs, V., Anders, K., Kohns, J., Stark, A. & Höfle, B. (2023a): Classification of structural building damage grades from multi-temporal photogrammetric point clouds using a machine learning model trained on virtual laser scanning data. arXiv:2302.12591 [cs.CV] <https://doi.org/10.48550/arXiv.2302.12591>
- Zahs, V., Anders, K., Kohns, J., Stark, A. & Höfle, B. (2023b): Assessment of structural building damage from multi-temporal photogrammetric point clouds using a machine learning model trained on virtual laser scanning data [Data and Source Code]. heiDATA. <https://doi.org/10.11588/data/D3WZID>
- Zahs, V., Winiwarter, L., Anders, K., Williams, J.G., Rutzinger, M. & Höfle, B. (2022a): Correspondence-driven plane-based M3C2 for lower uncertainty in 3D topographic change quantification. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 183, S. 541-559. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2021.11.018>
- Zahs, V., Winiwarter, L., Anders, K., Williams, J.G., Rutzinger, M., Bremer, M. & Höfle, B. (2022b): Correspondence-driven plane-based M3C2 for quantification of 3D topographic change with lower uncertainty [Data and Source Code]. heiDATA. <https://doi.org/10.11588/data/TGSVUI>
- Zahs, V., Herfort, B., Kohns, J., Ullah, T., Anders, K., Stempniewski, L., Zipf, A. & Höfle, B. (2021): 3D point cloud-based assessment of detailed building damage through a combination of machine learning, crowdsourcing and earthquake engineering. *EGU General Assembly Conference Abstracts*, S. 1-2. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-1304>