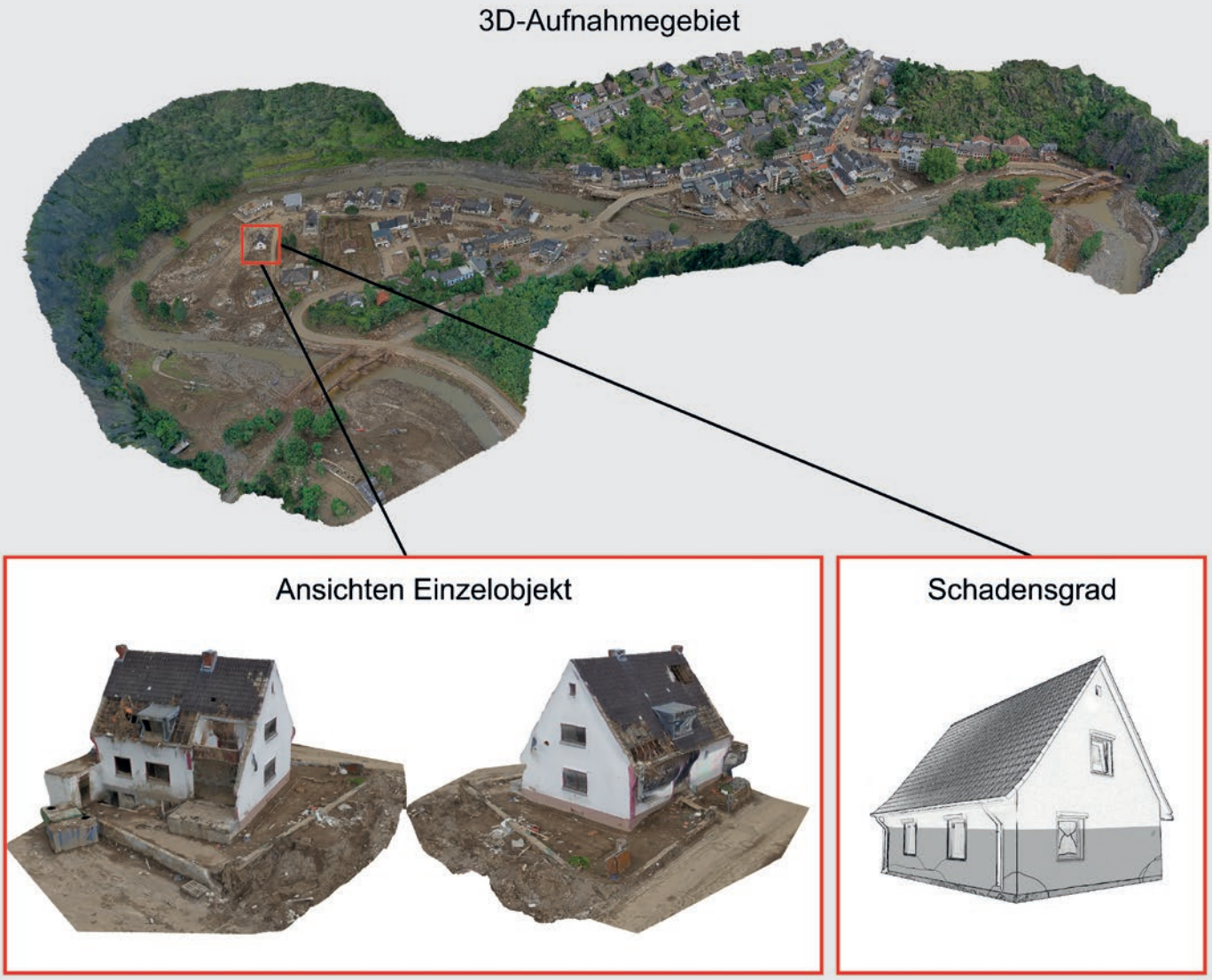
2023
99./100. Jahrgang
Dezember 2022, S. 878–890
Juli 2023, S. 358–373
ISSN 0932-8351
Sonderdruck

Bautechnik
Zeitschrift für den gesamten Ingenieurbau



3D-Lageinformationen von durch Starkregen und Hochwasser betroffenen Gebieten

Jochen Schwarz, Holger Maiwald, Lars Abrahamczyk,
Christian Kaufmann, Norman Hallermann, Guido Morgenthal

Ernst & Sohn
A Wiley Brand

DOI: 10.1002/bate.202200062

Holger Maiwald, Jochen Schwarz, Lars Abrahamczyk, Christian Kaufmann

Das Hochwasser 2021: Ingenieuranalyse der Bauwerksschäden

Das Hochwasserereignis vom Juli 2021 hat besonders in den betroffenen Gebieten von Rheinland-Pfalz und Nordrhein-Westfalen außerordentlich schwere strukturelle Schäden an der allgemeinen Bebauung und der Infrastruktur hinterlassen. Der Beitrag gibt einen Überblick über die Ergebnisse einer Schadensdokumentation, die unmittelbar nach dem Hochwasser im Ahrtal und Bad Münstereifel durchgeführt wurde. Diese setzt eine Linie von Hochwasserschadensanalysen fort, die in den letzten 20 Jahren vom Erdbebenzentrum der Bauhaus-Universität Weimar durchgeführt wurden und in der Entwicklung eines Hochwasserschadensmodells resultierten, mit welchem derartig schwere strukturelle Schäden prognostiziert werden können. Mit der Schadensdokumentation ließen sich die vom EDAC gewonnenen Erkenntnisse über das Verhalten der verschiedenen Bauweisen unter dem Einfluss einer extremen Hochwassereinwirkung vertiefen und plausibilisieren. Die vorgefundenen Schadensbilder des Hochwassers bestätigen die Ansätze des EDAC-Hochwasserschadensmodells und zeigen die Notwendigkeit für eine Erweiterung auf, um die Besonderheiten der Überflutungsbedingungen und des Bauwerksbestands zu berücksichtigen. Es wird die Verbindung zu weiteren Auswertungen hergestellt, indem drohnenbasierte Techniken zur schnellen Zustandserfassung der von einer Naturkatastrophe betroffenen Gebiete und des Bauwerksbestands mit dem Ziel der Generierung von realitätsgetreuen und leicht interpretierbaren Lagebildern vorgestellt werden.

Stichworte Hochwasserschäden; Schadensaufnahme; Schadensanalyse; Schadensgrade; Schadensbilder; Schadensskala; Bauwerksverletzbarkeit

The 2021 flood: engineering analysis of building damage
The flood event of July 2021 left extremely severe structural damage to the general buildings and infrastructure especially in the affected areas of Rhineland-Palatinate and North Rhine-Westphalia. The article gives an overview of the results of a damage documentation that was carried out immediately after the flood in the Ahr valley and Bad Münstereifel. The survey continues a line of flood damage analyses carried out over the past 20 years by the Earthquake Damage Analysis Center at the Bauhaus-Universität Weimar, which has resulted in the development of an engineering-based flood damage model that can takes into account such severe structural damage. With the documentation of the damage, the knowledge gained by EDAC about the behavior of the various building types under the influence of extreme flooding conditions could be deepened and checked for plausibility. The flood damage patterns found confirm the approaches of the EDAC flood damage model and show the need for an extension to take into account the special features of the building stock and the flooding conditions that occurred. A connection is given to ongoing studies, in which drone-based techniques for rapid assessment of the status of areas affected by a natural disaster and the existing buildings are presented with the aim of generating realistic and easily interpretable situation images.

Keywords flood damage; damage survey; damage analysis; damage grades; damage patterns; damage scale; building vulnerability

1 Vorbemerkungen

Das Zentrum für die Ingenieuranalyse von Erdbebenschäden der Bauhaus-Universität Weimar (EDAC) hat beginnend mit dem Hochwasser 2002 in Sachsen in den letzten 20 Jahren wiederholt unmittelbar nach Hochwasserereignissen Schadensanalysen vorgenommen. Aus den dabei gewonnenen Schadensfällen wurden die Grundlagen für das EDAC-Hochwasserschadensmodell [1] abgeleitet. In diesem Schadensmodell wurden die Elemente der Europäischen Makroseismischen Skala 1998 [2] auf die Naturgefahr Hochwasser übertragen. Dabei wird die konkrete Bauwerksverletzbarkeit in Abhängigkeit von den Bauweisen der tragenden Wände und der konkreten Bauausführung in Form von Verletzbarkeitsklassen berücksichtigt. Diese Verletzbarkeitsklassen fassen verschiedene Bauweisen gleicher Schadensanfälligkeit in einem ingenieurorientierten Ansatz zusammen [3].

Im Unterschied zu herkömmlichen Hochwasserschadensmodellen (Übersichten in [4–6]) erlaubt das EDAC-Hochwasserschadensmodell die Prognose der strukturellen Schäden bis hin zu eingestürzten bzw. sogar weggespülten Gebäuden. In diesen Kontext reihen sich auch die Analysen der aktuellen Schadensaufnahmen nach dem Hochwasser vom Juli 2021 in Rheinland-Pfalz und Nordrhein-Westfalen ein.

Dieses hat in den betroffenen Gebieten außergewöhnlich hohe Schäden hinterlassen. Die Münchener Rückversicherung gibt die Schäden durch das Hochwasser in Europa mit 46 Mrd. Euro an, wovon allein auf Deutschland 33 Mrd. Euro entfallen [7]. Die Bundesregierung hat zur Schadensbeseitigung einen Aufbauhilfefonds mit bis zu 30 Mrd. Euro eingerichtet [8]. Sollte diese Schadenssumme im Laufe der Wiederaufbauphase bestätigt werden, würde diese die des Hochwassers 2002 (11,5 Mrd. Euro

[9] ≙ ca. 18,8 Mrd. Euro im Jahr 2021 gemäß Baupreisindex des statistischen Bundesamts [10]) deutlich übertreffen.

Kennzeichnend für das Hochwasser 2021 sind die zum Teil außergewöhnlich hohen Wasserstände und Fließgeschwindigkeiten, die insbesondere im Ahrtal zu schwersten strukturellen Schäden an Gebäuden und Infrastruktur geführt haben.

Dieser Beitrag stellt die ersten Ergebnisse einer unmittelbar nach dem Hochwasser durchgeführten Schadensaufnahme vor. Daraus werden Rückschlüsse zur notwendigen Weiterentwicklung des Schadensmodells gezogen.

2 Hochwasser 2021

2.1 Ursachen

2.1.1 Niederschläge

Das Tiefdruckgebiet Bernd verursachte vom 12. bis 19. Juli 2021 verschiedene Starkregenereignisse in Deutschland. Die meteorologische Situation während dieser Zeit kann [11] entnommen und wie folgt zusammengefasst werden:

Im Zeitraum vom 12. bis 15. Juli 2021 waren großflächig der Westen von Rheinland-Pfalz und der Süden von Nordrhein-Westfalen von den Starkniederschlägen betroffen. In der Folge kam es an mittleren und größeren Flüssen wie Ahr, Emscher, Erft, Kyll, Lippe, Prüm, Ruhr, Rur, Sieg und Wupper zu einer ausgedehnten Hochwassersituation, die sich zum Teil katastrophal entwickelte. Die Überschwemmungen verursachten sehr hohe Sachschäden und kosteten 184 Menschen das Leben.

Die großflächigen Niederschläge erreichten dabei extreme Werte (Bild 1).

So wurden an einer Wetterstation am 13. Juli in Hagen mehr als 241 l/m^2 in 22 h gemessen. Für die Dauerregenfälle am 14./15. Juli wurden im Gebiet von Dortmund über Köln, Euskirchen, Gerolstein, Bitburg bis hin nach Trier mehr als 100 l/m^2 Niederschlag in 72 h registriert, wobei lokale Spitzenwerte von 150 l/m^2 in 24 h zu verzeichnen waren.

Der anhaltende Starkregen betraf große Teile der Flusseinzugsgebiete, wo das Wasser sich sammelte und in den engen Flusstälern kanalisiert wurde.

2.1.2 Abflüsse

In Rheinland-Pfalz wurde besonders das Ahrtal von dieser Situation betroffen. Belastbare Messungen der Scheitelabflüsse liegen vom Hochwasser 2021 an der Ahr nur

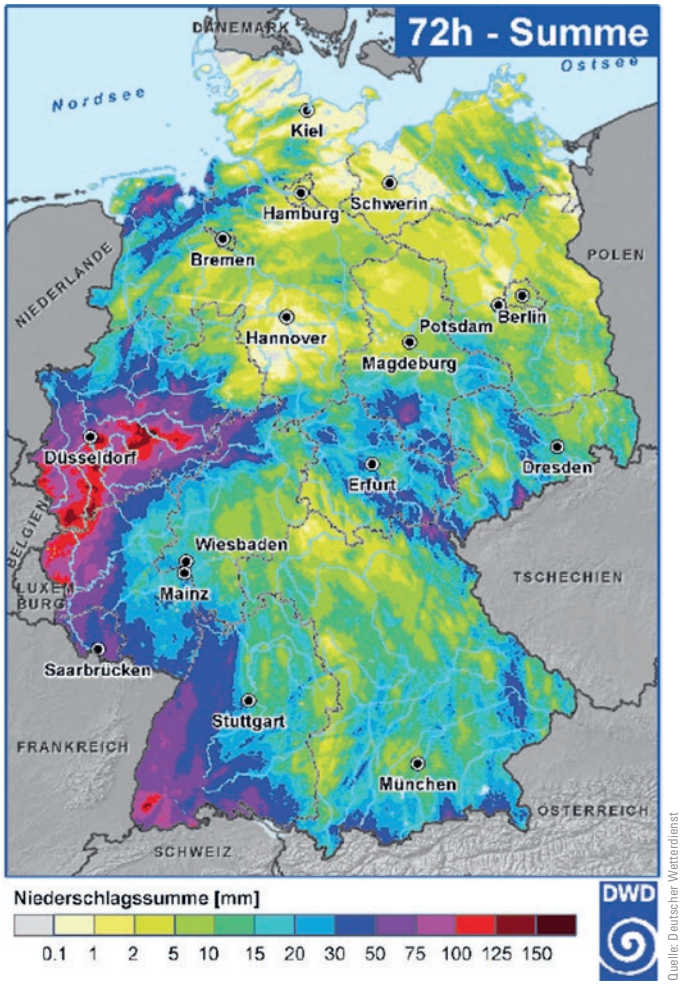


Bild 1 72-h-Niederschlagsmengen [11]
72 h precipitation levels [11]

eingeschränkt vor. So wurden beim Pegel Ahrweiler am 14. Juli 2021 um 19:45 Uhr 555 m^3/s gemessen, bevor der Pegel ausfiel. In den ersten Auswertungen in [12] wurden für den Pegel Altenahr noch 400–700 m^3/s geschätzt. Es wird aber angemerkt, dass die resultierenden Abflussmengen Werte wie beim Hochwasser 1804 erreichten, was auch durch die Angaben in [13, 14] bestätigt wird (Tab. 1).

In den aktuellen Auswertungen in [15] wird für einen Standort unterhalb von Rech ein damit gut übereinstimmender Abfluss von Q = 1030–1230 m^3/s rekonstruiert. Durch die heutige vorhandene Bebauung in den Ortslagen und die Brückenbauwerke, die beim Hochwasser verklausten, übertrafen die Wasserstände des aktuellen Hochwassers die des Hochwassers von 1804 jedoch deutlich. Hydrologische Berechnungen in [16] ergaben für den Bereich Altenahr eine Spannbreite der Scheitelabflüsse von Q = 753–1000 m^3/s. Bei Berücksichtigung der Verklausungen an den Brücken konnten die Wasserstände in Altenahr mit zweidimensionalen, stationären hydraulischen Berechnungen schon mit der Abflussmenge von Q = 753 m/s^2 nachvollzogen werden. Als weitere Erklärungen für die hohen Wasserstände und Diskrepanzen zwischen hydrologischen und hydraulischen Berechnungen werden weitere Prozesse, wie das Versagen der Brü-

Tab. 1 Rekonstruierte Scheitelabflüsse historischer Ahr-Hochwasser nach [13] und Schätzungen für 2021 nach [14] in [m³/s]
Reconstructed peak discharges of historical Ahr floods acc. to [13] and estimates for 2021 acc. to [14] in [m³/s]

Hochwasser	Altenahr	Dernau	Walporzheim
15.07.2021	1000 ± 200	1000–1200	1200–1300
21.06.1804	–	1208	1180
24.06.1888	280	–	–
13.06.1910	496	549	541
16.01.1918	236	–	–
11.01.1920	170	–	–

cken mit induzierten Schwallwellen, als wahrscheinlich angesehen. Diese Effekte sind in künftigen Untersuchungen genauer zu analysieren.

Eine erste Abschätzung der Jährlichkeit des Ereignisses in [14] ergab, dass das Ereignis im Ahrtal im Bereich eines HQ500 einzuordnen ist.

In Nordrhein-Westfalen wurden an fast allen Pegeln der Erft und ihrer Nebengewässer die für ein Extremhochwasser (HQ_{extrem}) ermittelten Wasserstände überschritten. Tab. 2 stellt die rekonstruierten Scheitelabflüsse an der Oberen Erft den bisher gültigen Abflüssen für das HQ_{extrem} gegenüber [17]. Für die stark vom Hochwasser betroffene Stadt Bad Münstereifel werden in [18] ca. 150 m³/s bilanziert, die aus dem Einzugsgebiet des Hochwasserrückhaltebeckens (HRB) Eicherscheid und dem Zwischeneinzugsgebiet zugeflossen sind. Der Zufluss zum HRB von max. 130 m³/s übertraf das Bemessungshochwasser von 43 m³/s somit um das Dreifache. Es wird angemerkt, dass bei einem 10.000-jährlichen Ereignis im HRB Eicherscheid noch ein Freibord von 1 m vorhanden ist. Am 14./15. Juli 2021 betrug das minimale Freibord aber nur noch 40 cm, sodass das HQ(10.000) überschritten wurde.

Tab. 2 Rekonstruierte Scheitelabflüsse an der Oberen Erft [17] in [m³/s]
Reconstructed peak discharges at Upper Erft [17] in [m³/s]

Pegel	HQ_{extrem}	HW 2021
Schönau	29,7	120
Eicherscheid	30,2	140
Möschemer Mühle (Eschweilerbach)	12,4	62
Arloff	56,3	280

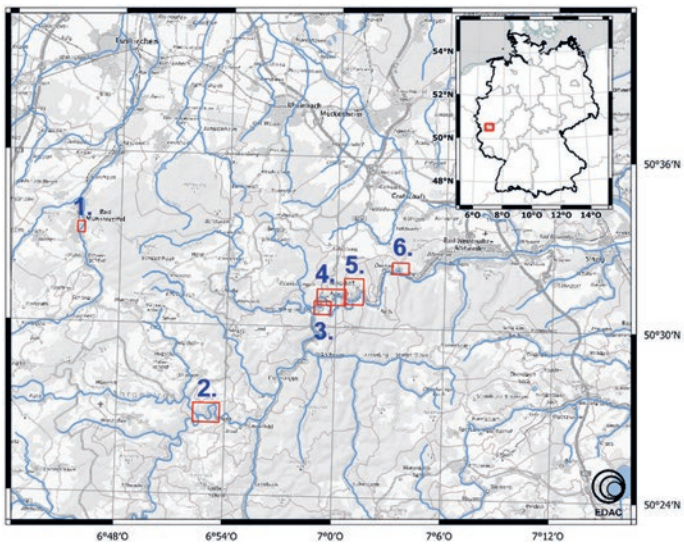
Die resultierenden, zum Teil sehr hohen Wasserstände und Fließgeschwindigkeiten verursachten zahlreiche Zerstörungen an den allgemeinen Hochbauten und der Infrastruktur.

2.2 Schadensdokumentation in Rheinland-Pfalz und Nordrhein-Westfalen

In Anlehnung und Fortführung analoger Einsätze wurde von Mitarbeitern des Erdbebenzentrums im Zeitraum vom 19. Juli bis 5. August 2021 eine Schadensaufnahme im Ahrtal in Rheinland-Pfalz sowie in Bad Münstereifel in Nordrhein-Westfalen durchgeführt (Bild 2).

Zielstellung war die Dokumentation der Schäden an der allgemeinen Bebauung. Neben den vorgefundenen Schadensbildern wurden die relevanten Gebäudedaten und Bauwerksparameter (Nutzung, Etagenzahlen, Einlaufhöhen, Bauweise der Wandkonstruktion, Unterkellerungssituation, Dachkonstruktion u. a.) gemäß der in [19] entwickelten Systematik vor Ort bzw. im Rahmen der Plausibilisierung/Datenergänzung nach der Schadensaufnahme zugewiesen.

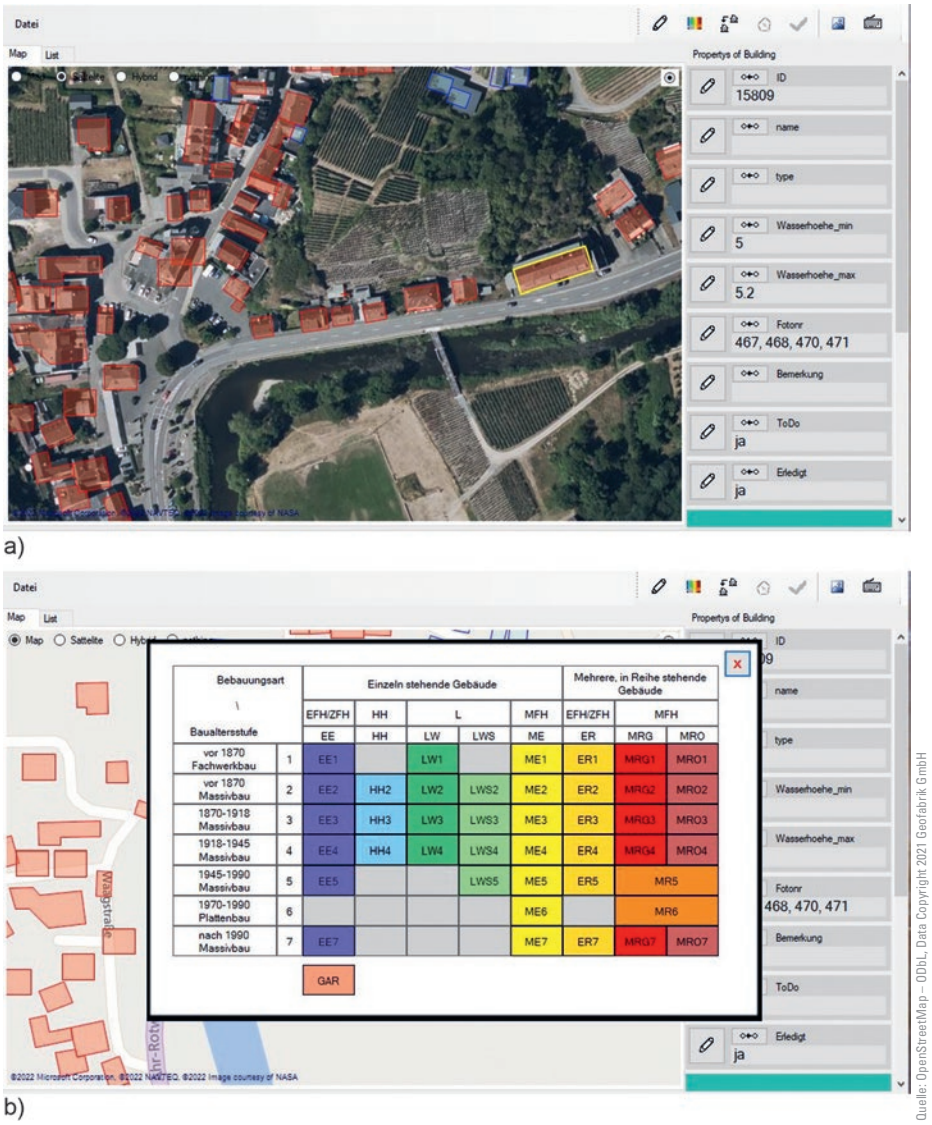
Die 1464 untersuchten Schadensfälle (Tab. 4, 5) wurden mit einer an die Schadenserhebung angepassten Version des am EDAC entwickelten EQUIP-Bauwerkserhebungs-



Schadensaufnahmen EDAC

1. Bad Münstereifel
2. Schuld
3. Altenburg
4. Altenahr + Reimerzhoven
5. Mayschoß + Laach
6. Marienthal

Bild 2 Schadensaufnahmen des Hochwassers 2021
Damage surveys of the flood 2021



Quelle: OpenStreetMap – ODbL, Data Copyright 2021 Geofabrik GmbH

Bild 3 EDAC-Bauwerkserhebungs-Tool EQUIP: a) mit Hintergrundkarten aus Bing Maps: Hintergrund Satellitenfoto, b) Auswahlfeld für die HTWD-Gebäudetypologie
EDAC building survey tool EQUIP: a) with background maps from Bing Maps: background satellite photo, b) selection field for the HTWD building typology

tools [19] dokumentiert. Bild 3 zeigt das Tool mit einem Kartenausschnitt aus dem Untersuchungsgebiet Mayschoß. Insbesondere die einblendbaren Hintergrundkarten (z. B. Straßenkarten oder Satellitenbilder in Bild 3a) in Verbindung mit der Anzeige des eigenen Standorts auf dem GPS-fähigen Tablet-PC erleichterten die Orientierung im Untersuchungsgebiet erheblich. Diese wäre sonst durch die zum Teil stark zerstörte Verkehrsinfrastruktur erschwert gewesen.

Im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projekts „Innovative Vulnerabilitäts- und Risikobewertung urbaner Räume gegenüber Überflutungsereignissen – INNOVARU“ wurde die vom Projektpartner Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden (HTWD) eingebrachte Wohngebäudetypologie [20] als Auswahlmatrix integriert (Bild 3b). Für die einzelnen Gebäudetypen werden typische Werte für die Bauwerksparameter im Programm vordefiniert (z. B. Etagenzahl: 2, Bauweise Erdgeschoss: Mauerwerk, ...), welche dann vor Ort und in der nachfolgenden Auswertung objektspezifisch zu präzisieren sind.

Den Schadensfällen wurden dem EDAC-Hochwasserschadensmodell [1] folgend die Schadensgrade als Maß für die strukturelle Schädigung zugewiesen. Die Kriterien für die Zuordnung der Schadensgrade zu den Schadensfällen können der Schadensskala in [21] entnommen werden, welche im Wesentlichen für die im Bestand dominierenden Mauerwerksbauten entwickelt wurde. (Hinweis: Tab. 6 zeigt die aus der Analyse der Schadensfälle des Hochwassers 2021 resultierende Erweiterung dieser Schadensskala für die Fachwerkbauten.)

Nahezu vollständige Schadensaufnahmen liegen von den Orten Schuld, Altenburg, Altenahr und Mayschoß im Ahrtal vor. Nachträgliche Schadenserhebungen der Orte Reimerzhoven, Laach und Marienthal komplettieren die Schadensdokumentation. Eine weitere vollständige Schadensdokumentation liegt für die historische Altstadt von

Bad Münstereifel in Nordrhein-Westfalen vor, welche wegen ihrer historischen Fachwerkbausubstanz in die Schadensdokumentation aufgenommen wurde. In den Orten Insul, Ahrbrück, Kreuzberg und Rech im Ahrtal wurden außerdem einzelne besonders markante Schadensfälle erfasst.

In Rheinland-Pfalz wurden die Schäden im Ahrtal flussabwärts beginnend in der Gemeinde Schuld bis Mayschoß dokumentiert. Dabei war insbesondere in den ersten Tagen die Zugänglichkeit zu den Orten durch blockierte Straßen stark eingeschränkt und wurde erst im Laufe der Zeit wieder möglich. Dadurch wurde die Bewertung einiger Schadensfälle erschwert, da diese erst nach den Räumungsmaßnahmen eingesehen werden konnten bzw. durch den zwischenzeitlich schon erfolgten Abriss nicht mehr vorzufinden waren.

In diesen Fällen erwies sich die Sichtung von Webressourcen als sehr hilfreich. Privat eingestellte Videos auf Youtube und die Schadensfotos aus der Google-Fotosuche wurden genutzt, um den Istzustand der Bebauung so kurz als möglich nach dem Ereignis zu rekonstruieren.

Eine weitere Möglichkeit einer schnellen Schadensaufklärung ist in der drohnenbasierten Erfassung mit hoch aufgelösten und qualitativ hochwertigen digitalen Bildern der betroffenen Gebiete zu sehen. Dies wird in einem Folgebeitrag [22] genauer betrachtet.

3 Schadensanalyse

3.1 Schadensbilder

Detaillierte Schadensanalysen unmittelbar nach einem Hochwasser [23–25] bilden die Grundlage für die Entwicklung und Validierung des EDAC-Hochwasserschadensmodells [1]. In diesen Untersuchungen wurden auch sehr schwere Schadensfälle bis zum Einsturz von Gebäuden (Schadensgrad D5) berücksichtigt. In der EDAC-Hochwasserschadensdatenbank (Angaben zu Inhalt und Aufbau: [26]) sind Schadensfälle enthalten, die durch Wasserstände von bis zu 6 m über dem Gelände und (nachträglich durch hydraulische Berechnungen zugewiesene) Fließgeschwindigkeiten von bis zu 2,5 m/s verursacht wurden. Derartige Überflutungscharakteristiken sind jedoch nur bei wenigen Schadensfällen zu finden. Daher ist die Schadensanalyse von Flash-flood-Ereignissen [25, 27] von besonderer Bedeutung bei der Gewinnung neuer Schadensdaten.

Bei der in 2021 durchgeführten Schadenserhebung konnten insbesondere im Ahrtal zahlreiche Schadensfälle dokumentiert werden, die durch extreme Einwirkungsbedingungen verursacht wurden. Die wichtigsten Schlussfolgerungen können wie folgt zusammengefasst werden:

- Sehr große Überflutungshöhen > 4–5 m (Bild 4) gekoppelt mit hohen Fließgeschwindigkeiten führten zu teils außerordentlich schweren strukturellen Schäden (Bild 5) bis zu komplett weggespülten Gebäuden, denen ein Schadensgrad D6 zuzuordnen ist (Bild 6). Im Unterschied zum Hochwasser 2002 in Sachsen traten derartige Überflutungshöhen nicht nur punktuell auf, sondern betrafen einzelne Ortschaften wie Altenahr, Altenburg, Laach und Marienthal nahezu flächendeckend (Tab 3).
- Zahlreiche schwere Schäden sind durch den Anprall von Treibgut (Bild 7) und die Unterspülung von Fundamenten (Bild 8) verursacht worden.
- Im Ahrtal wurden viele Gebäude mit Flüssiggas oder Erdöl beheizt. Dabei schwammen zahlreiche Öltanks auf bzw. die im Außenbereich lokalisierten Gastanks davon. Dies führte dazu, dass ein Teil der betroffenen Gebäude durch den Austritt großer Mengen Heizöl kontaminiert wurde.
- Es traten zudem zahlreiche schwere Schadensfälle an historischen Fachwerkbauten mit Lehmausfachungen auf (Bilder 9–11). Wie die höheren mittleren Schadensgrade D_m bei vergleichbaren Wasserständen in den Auswertungen [3, 28] zeigen, besitzt diese Bauweise eine erhöhte Bauwerksverletzbarkeit gegenüber reinen Mauerwerksbauten.

Neben den schweren Schäden an den allgemeinen Hochbauten wurden auch Schäden an der Infrastruktur dokumentiert. Als Beispiele sind hier die im Ahrtal zerstörten Brücken (Bilder 12–14) und Gleise der Ahrtal-

Quelle: Erdbebenzentrum, Bauhaus-Universität Weimar

Bild 4 Extreme Überflutungshöhen in Altenburg (> 5 m, Schadensgrad D2)
Extreme water levels in Altenburg (> 5 m, damage grade D2)

Quelle: Erdbebenzentrum, Bauhaus-Universität Weimar

Bild 5 Schwere strukturelle Schäden in Insul (Schadensgrad D4–D5)
Heavy structural damage in Insul (damage grade D4–D5)

Quelle: Erdbebenzentrum, Bauhaus-Universität Weimar

Bild 6 Weggespültes Gebäude in Insul (Schadensgrad D6)
Washed away building in Insul (damage grade D6)

Quelle: Erdbebenzentrum, Bauhaus-Universität Weimar

Bild 7 Strukturelle Schäden durch Anprall von Treibgut in Schuld (Schadensgrad D4)
Structural damage due to impact of debris in Schuld (damage grade D4)

Quelle: Erdbebenzentrum, Bauhaus-Universität Weimar

Bild 8 Teileinsturz des Gebäudes durch Fundamentunterspülung in Insul (Schadensgrad D4–D5)
Partial collapse of the building due to foundation erosion in Insul (damage grade D4–D5)

bahn (Bild 15), zerstörte Straßen in den betroffenen Orten (Bild 16) sowie die freigelegte und zerstörte unterirdische Infrastruktur wie Ver- und Entsorgungsleitungen (Bild 17) zu nennen. Insbesondere die großen Mengen an Treibgut führten zu Verklausungen an Brücken (Bild 12), die eine zusätzliche Erhöhung der Wasserstände verursachten.

Quelle: Erdbebenzentrum, Bauhaus-Universität Weimar

Bild 9 Strukturelle Schäden an einem Fachwerkbau in Altenburg (Schadensgrad D4)
Structural damage to a half-timbered building in Altenburg (damage grade D4)

Quelle: Erdbebenzentrum, Bauhaus-Universität Weimar

Bild 10 Geschädigte Fachwerkbauten in Bad Münstereifel (Schadensgrad D2)
Damaged half-timbered buildings in Bad Münstereifel (damage grade D2)

Quelle: Erdbebenzentrum, Bauhaus-Universität Weimar

Bild 11 Geschädigte Ausfachung eines Fachwerkbaus in Bad Münstereifel (Schadensgrad D3)
Damaged infill of a half-timbered building in Bad Münstereifel (damage grade D3)

3.2 Dokumentation der Abbruchmaßnahmen

Zahlreiche Gebäude mussten aufgrund ihrer schweren strukturellen Schäden im Zuge der Gefahrenabwehr abgebrochen werden. Diese Abbruchmaßnahmen wurden im Oktober 2021 im Rahmen einer Zweitbegehung im Ahrtal dokumentiert. Dabei wurden zudem noch die Bau-

Quelle: Erdbebenzentrum, Bauhaus-Universität Weimar

Bild 12 Verklauste geschädigte Brücken zwischen Altenburg und Altenahr
Clogged damaged bridges between Altenburg and Altenahr

Quelle: Erdbebenzentrum, Bauhaus-Universität Weimar

Bild 13 Zerstörte Brücke der Ahrtalbahn in Altenahr
Destroyed bridge of the Ahr valley railway in Altenahr

Quelle: Erdbebenzentrum, Bauhaus-Universität Weimar

Bild 14 Zerstörte Brücke der Ahrtalbahn zwischen Rech und Mayschoß
Destroyed bridge of the Ahr valley railway between Rech and Mayschoß

Quelle: Erdbebenzentrum, Bauhaus-Universität Weimar

Bild 15 Zerstörte Gleise Ahrtalbahn bei Altenburg
Destroyed Ahr valley railway tracks near Altenburg

Quelle: Erdbebenzentrum, Bauhaus-Universität Weimar

Bild 16 Zerstörte Straßen in Bad Münstereifel
Destroyed streets in Bad Münstereifel

Quelle: Erdbebenzentrum, Bauhaus-Universität Weimar

Bild 17 Freigelegte unterirdische Infrastruktur in Schuld
Exposed underground infrastructure in Schuld

werks- und Schadensparameter der betroffenen Bauwerkssubstanz des Orts Marienthal an der Ahr dokumentiert.

Die außergewöhnlich hohen Einwirkungsgrößen des aktuellen Ereignisses in Verbindung mit den Ölkontaminationen ließen vermuten, dass viele Gebäude einen wirtschaftlichen Totalschaden erlitten haben und ein Abriss unvermeidbar sein würde. Eine weitere Begehung im März 2022 bestätigte dies.

3.3 Erste Auswertungen

Im Rahmen der Schadensaufnahme wurden insgesamt Schäden an 1464 Einzelobjekten dokumentiert. Davon betreffen 896 Fälle Schäden an Wohngebäuden. An 536 Gebäuden konnten die Hochwassermarken über dem Gelände gemessen bzw. bei größeren Höhen abgeschätzt werden. Eine Zusammenstellung der mittleren und maximalen Werte der dokumentierten Hochwassermarken in den untersuchten Orten ist Tab. 3 zu entnehmen. Für eine vertiefte statistische Auswertung wären die Wasserstände an allen Gebäuden zu ermitteln (Abschn. 3.4).

Tab. 4 gibt einen Überblick über die Verteilung der Bauweisen der geschädigten Gebäude in den Untersuchungsgebieten. Dominierend sind dabei die normal verletzba-

Tab. 3 Auswertung der dokumentierten Hochwassermarken in den Untersuchungsgebieten
Evaluation of the documented flood marks in the study areas

Untersuchungsgebiet	Anzahl HW-Marken	Wasserstand über Gelände [m]	
		Mittelwert	max
Altenahr	47	4,51	6,50
Altenburg	111	4,44	5,50
Bad Münstereifel	219	1,52	5,00
Laach	13	4,65	5,50
Marienthal	11	4,35	5,00
Mayschoß	79	3,10	5,50
Schuld	56	2,16	4,00

ren Mauerwerksbauten, welche im betroffenen Gebiet meist aus vulkanischen Bimsziegeln bestehen. Es wurde auch eine größere Anzahl von Fachwerkbauten (ca. 10 % der dokumentierten Gebäude) geschädigt, welche eine erhöhte Verletzbarkeit gegenüber Hochwassereinwirkung aufweisen. Bauwerke mit einer niedrigen Verletzbarkeit, wie Stahlkonstruktionen und Stahlbetonbauten, spielen eher eine untergeordnete Rolle.

Die Verteilung der Schadensgrade in den einzelnen Untersuchungsgebieten kann Tab. 5 entnommen werden. Die Zeile „Einzel SF“ in den Tab. 4, 5 enthält die dokumentierten markanten Schadensfälle aus den Orten Insul, Ahrbrück, Kreuzberg und Rech im Ahrtal.

3.4 Weiterentwicklung der Schadensprognose-Tools

Das EDAC-Hochwasserschadensmodell [1] ermöglicht über Verletzbarkeitsfunktionen (Specific Vulnerability Functions – SVF) die Prognose von strukturellen Schäden in Form von mittleren Schadensgraden D_m unter Berücksichtigung von Wasserstand, Fließgeschwindigkeit und der konkreten Bauwerksverletzbarkeit (charakterisiert durch die jeweilige Bauweise oder die zugewiesene Verletzbarkeitsklasse). Zudem stehen verschiedene Schadensfunktionen (Specific Damage Functions – SDF) zur Verfügung, um realistische Verlustaussagen für die verschiedensten Hochwasserszenarien treffen zu können [1, 29].

Diese zuletzt im Rahmen des INNOVARU-Projekts weiterentwickelte Methode berücksichtigt differenzierte Korrelationen zwischen Überflutungshöhe, moderaten bis hohen Fließgeschwindigkeiten und strukturellen Schäden in Abhängigkeit von der Verletzbarkeit der verschiedenen Bauweisen und der Anzahl der Stockwerke des Gebäudes [30].

Die Datengrundlage bildeten hierbei der nach dem Hochwasser 2002 erhobene qualifizierte und umfangreiche Schadensdatensatz der EDAC-Hochwasserschadensdatenbank sowie die Daten der Schadensfälle infolge des Tsunamis nach dem Tohoku-Erdbeben in Japan 2011. Mit diesem innovativen Ansatz konnte das Fehlen von zuverlässigen Schadensdaten infolge hoher Fließgeschwindigkeiten, wie sie u. a. bei Sturzflutereignissen auftreten, kompensiert werden.

Von den ca. 5000 Schadensfällen der EDAC-Hochwasserschadensdatenbank konnten ca. 1200 mittels hydronumerischer Simulationen die Fließgeschwindigkeiten zugewiesen werden [31]. Bild 18 zeigt die zugeordneten Schadensgrade D_i dieser Schadensfälle in Abhängigkeit von Wasserstand und Fließgeschwindigkeit. Der begrenzte Bereich hinsichtlich Wasserstand und Fließgeschwindigkeit wird dabei deutlich. Die geclusterten Schadensdaten (Hochwasser + Tsunami) und die daraus abgeleitete Verletzbarkeitsfunktion zur Prognose des mittleren Schadensgrads D_m für die Verletzbarkeitsklasse HW-C (ty-

Tab. 4 Verteilung der Bauweisen in den Untersuchungsgebieten
Distribution of the building types in the study areas

Untersuchungsgebiet	Anzahl der Gebäude						Gesamt
	Fertigteil	Holz	Holzfachwerk	Mauerwerk	Stahlbeton	Stahl	
Altenahr	–	1	9	136	1	1	148
Altenburg	1	3	17	244	6	8	279
Bad Münstereifel	–	2	61	242	7	–	312
Laach	–	4	2	76	2	3	87
Marienthal	–	3	2	76	–	–	81
Mayschoß	1	1	10	180	3	2	197
Reimerzhoven	–	2	6	35	–	–	43
Schuld	1	7	29	208	5	4	254
Einzel SF	–	2	6	53	1	1	63
Gesamt	3	25	142	1250	25	19	1464

Tab. 5 Verteilung der Schadensgrade für den gesamten geschädigten Bauwerksbestand in den Untersuchungsgebieten
Distribution of the damage grades for entire damaged building stock in the investigation areas

Untersuchungsgebiet	Anzahl der Gebäude						Gesamt
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	
Altenahr	7	95	22	12	5	7	148
Altenburg	40	194	20	5	6	14	279
Bad Münstereifel	62	239	11	–	–	–	312
Laach	8	50	12	9	6	2	87
Marienthal	6	45	17	8	3	2	81
Mayschoß	9	156	16	11	3	2	197
Reimerzhoven	3	27	7	3	1	2	43
Schuld	58	131	26	14	7	18	254
Einzel SF	–	15	8	11	4	25	63
Gesamt	193	952	139	73	35	72	1464

pisch für Mauerwerksbauten) werden in Bild 19 dargestellt (s. a. [30]).

Die nach dem Hochwasser 2021 gewonnenen Schadensdaten können in die Weiterentwicklung von Hochwasserschadensmodellen einfließen, indem zusätzliche Stützstellen für die Verletzbarkeits- und Schadensfunktionen bei außergewöhnlich hohen Wasserständen und Fließgeschwindigkeiten verfügbar werden. Am Beispiel der Basisdaten des EDAC-Schadensmodells wird der erwartete Zugewinn durch den grau markierten Parameter-Quader in Bild 18 veranschaulicht.

Eine große Herausforderung besteht in der Bereitstellung und Zuordnung der hydraulischen Kenngrößen (Wasserstände und Fließgeschwindigkeiten) zu den erhobenen Schadensdaten. Je nach Untersuchungsgebiet konnten an einem Teil der betroffenen Gebäude die Wasserstände am Gebäude gemessen bzw. abgeschätzt werden, sodass eine gute Extrapolationsgrundlage für die verbleibenden Bauwerke gegeben ist. Realistische Fließgeschwindigkeiten können jedoch erst durch eine Reinterpretation der konkreten Überflutungsbedingungen mittels einer komplexen hydraulischen Berechnung abgeleitet werden.

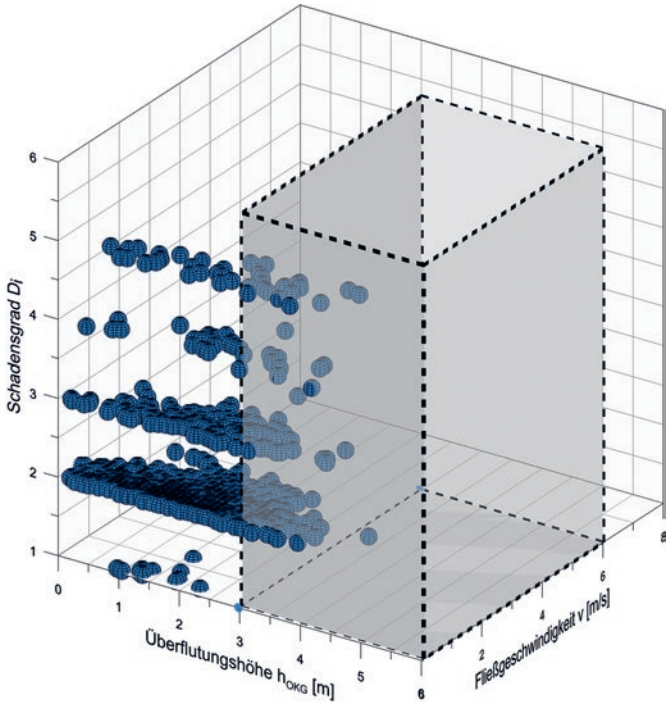


Bild 18 Schadensdaten der EDAC-Hochwasserschadensdatenbank in Abhängigkeit von Wasserstand und Fließgeschwindigkeit
Damage data of the EDAC flood damage data base in dependence of water level and flow velocity

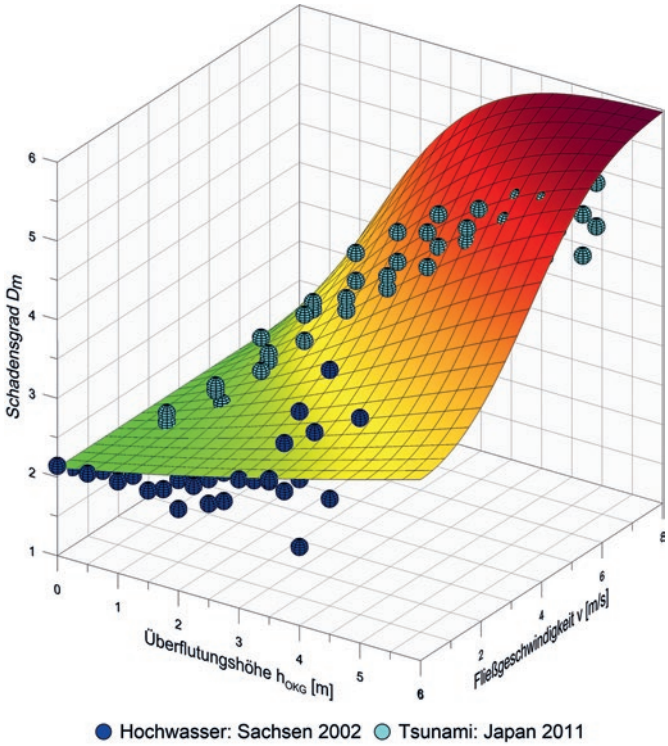


Bild 19 Verletzbarkeitsfunktion und geclusterte Schadensdaten für Verletzbarkeitsklasse HW-C [30]
Vulnerability function and clustered damage data for vulnerability class HW-C [30]

Tab. 6 Definition von Schadensgraden infolge Hochwassereinwirkung für Fachwerkbauten
Definition of damage grades due to flood impact for historical half-timbered houses

Schadensgrad	Schaden		Beschreibung
	strukturell	**nicht strukturell**	
D1	kein	leicht	– reiner Durchfeuchtungsschaden – Verschmutzungen
D2	leicht	moderat	– leichte Risse in tragenden Wänden **bzw. in den Mauerwerks-/ Lehmausfachungen** – eingedrückte Türen und Fenster – Unterspülung von Fundamenten – *Austausch von Ausbauteilen erforderlich* – *Kontaminationen*
D3	moderat	schwer	– größere Risse/Verformungen in tragenden Wänden und Decken – **Zerstörung von Mauerwerks-/Lehmausfachungen (ohne Versagen tragender Fachwerkständer/-riegel)** – Setzungen – Einsturz nicht tragender Wände – *Austausch von nicht tragenden Bauteilen erforderlich*
D4	schwer	sehr schwer	– Einsturz von tragenden Wänden, Decken – **Zerstörung von tragenden Fachwerkständern/-riegeln** – *Austausch von tragenden Bauteilen erforderlich*
D5	sehr schwer	sehr schwer	– Kollaps bzw. Einsturz von größeren Gebäudeteilen – *Abriss erforderlich*
D6	total	total	– Dislokation: Bauwerk vollständig weggeschwemmt, umgestürzt oder vom Fundament verschoben

Erste Analysen der Bauwerksschäden im Ahrtal in Abhängigkeit von Wasserstand und Fließgeschwindigkeit können den Untersuchungen in [32] entnommen werden. Die Schäden wurden in dieser Studie durch den satellitenbildgestützten Copernicus-Emergency-Management-Service [33] mit den entsprechenden Unsicherheiten [34] erfasst. Die hydraulischen Berechnungen in dieser Studie beruhen auf einem digitalen Geländemodell mit einer Auflösung von 10 m × 10 m (DGM 10).

Für eine genauere Erfassung der komplexen hydraulischen Einwirkungsbedingungen bzw. -größen sind mittel- bzw. längerfristig Synergieeffekte aus derzeit laufenden Forschungsprojekten [35] zu erwarten.

3.5 Erweiterung der Schadensskala

Bei der Zuordnung der Schadensgrade zu den dokumentierten Schadensfällen zeigte sich speziell für Holzfachwerkbauten, dass die Schadensskala in [21] einer Erweiterung bedarf. Insbesondere für die Beantwortung der Fragestellung, welcher Schadensgrad bei Schäden an den Ausfachungen bzw. an den tragenden Fachwerkständern und -riegeln anzusetzen ist, fehlen die genauen Beschreibungen der Schadensbilder. Tab. 6 stellt dazu einen Vorschlag bereit (die Anpassungen sind fett gekennzeichnet), der in Tab. 7 mit konkreten Beispielen aus der Schadensdokumentation untersetzt wird.

Es ist darauf hinzuweisen, dass die Prinzipskizzen (dem Vorbild der EMS-98 [2] bzw. [21] folgend) den Versuch zur Verallgemeinerung der beobachteten Schadensbilder und Staffelung nach charakteristischen, von der Einwirkungsintensität abhängigen Schadensgraden darstellen.

4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Das Hochwasser 2021 hat schwere Schäden in den betroffenen Gebieten hinterlassen. Insbesondere im Ahrtal erreichten die Wasserstände und Fließgeschwindigkeiten sehr hohe Werte, die schwere Zerstörungen an den allgemeinen Hochbauten und der Infrastruktur verursachten.

Die dabei beobachteten hohen Schadensgrade bis D6 bestätigen die Ansätze des EDAC-Hochwasserschadensmodells [1, 30].

Mit der Schadensdokumentation entlang der Ahr und in Bad Münstereifel lassen sich die seit dem Hochwasser 2002 vom EDAC gewonnenen Erkenntnisse über das Verhalten der verschiedenen Bauweisen der allgemeinen Bebauung unter dem Einfluss einer extremen Hochwassereinwirkung vertiefen und plausibilisieren.

Die ersten Auswertungen der in den Feldeinsätzen erhobenen Schadensdaten zeigen, dass damit eine wertvolle Erweiterung der Datenbasis für die Plausibilisierung der Verletzbarkeitsfunktionen zur Prognose der strukturellen

Tab. 7 Zuordnung der Schadensgrade D_i zu Schadensfällen an Fachwerkbauten
Assignment of damage grades D_i to damage cases on half-timbered houses

Schadensgrad	Prinzipskizze	Beispiele	
D1			
D2			
D3			
D4			
D5		Beim HW 2021 aufgetreten, aber in den Untersuchungsgebieten nicht vorgefunden	
D6		Beim HW 2021 aufgetreten, aber keine Fotos von weggespülten Fachwerkbauten vorhanden (s. Bild 6)	

Fotos: EDAC, 2021

Schäden gegeben ist. Es ist zu erwarten, dass insbesondere die zahlreichen Schadensfälle im Bereich großer Überflutungshöhen (> 4 m) und hoher Fließgeschwindigkeiten (> 2 m/s) beitragen, die Datenlücken von Schadensmodellen (Bild 18) zu füllen.

Die zahlreichen Schadensfälle an Fachwerkbauten erweitern die Kenntnisse über die Verletzbarkeit sowie das konkrete Schädigungsverhalten dieser Bauweise unter Hochwassereinwirkung beträchtlich. Somit können künftig zusätzliche Stützstellen der Funktionen für Bauwerke der Verletzbarkeitsklasse HW-B bereitgestellt werden. Für diese Bauweise wird im Beitrag eine Erweiterung der (allgemeinen) Schadensskala für Hochwasser vorgestellt. Die Beschreibungen der Schadensmuster in der Skala wären künftig auch auf die weiteren Hauptbauweisen (Stahlbeton, Fertigteilbauten, Lehmbauten) zu adaptieren.

Folgende Gesichtspunkte sind in weiteren Forschungsarbeiten zu vertiefen:

1. Die ersten Auswertungen zeigen, dass insbesondere Schäden durch extreme Einwirkungsbedingungen (Wasserstand, Fließgeschwindigkeit) stärker zu berücksichtigen sind. Die dokumentierten Schäden durch den Anprall von Treibgut und Fundamenterosion sind zusammenzustellen und auszuwerten. Die mit diesen zum Teil zufälligen Prozessen verbundenen strukturellen Schäden bzw. deren Erhöhung bleiben in den Schadensmodellen derzeit noch unberücksichtigt bzw. werden derzeit noch nicht separiert betrachtet.
2. Die Erfahrungen während der Schadensaufnahmen unmittelbar nach der Flut bestätigen, dass für eine effiziente, zeitnahe Datenerhebung mehrere Bearbeitergruppen in einem ausgedehnten Schadensgebiet erforderlich sind. Diese wären durch Drohnenbefliegungen zu unterstützen, die nach dem Ereignis den Istzustand für die weiteren Auswertungen im betreffenden Gebiet sichern. Erste Einblicke zur Anwendung derartiger Befliegungen für die Schadensanalyse und die Erstellung von Lagebildern können dem thematisch anschließenden Beitrag [22] entnommen werden.
3. Daher ist zu empfehlen, eine sofort einsetzbare und handlungsfähige Expertengruppe zu etablieren, die auf Anfrage durch die jeweiligen Landesbehörden aktiviert werden kann.

Hierfür wäre die Mitwirkungsbereitschaft geeigneter Experten anzufragen, die praktischen und technischen Rahmenbedingungen zu schaffen und die notwendigen finanziellen Mittel für derartige Einsätze einzuplanen und bereitzustellen.

4. Eine Steigerung der Effizienz bei der Erstellung der Lagebilder bzw. der Schadensaufnahme wäre erzielbar, wenn die Schadensgrade den durch Befliegung [22] erfassten Bauwerken automatisiert zugewiesen werden. Hier wären entsprechende KI-Algorithmen zu entwickeln. Die zugewiesenen Schadensgrade können dann z. B. für die Priorisierung von Bauwerksbegehungen zur Prüfung der Standsicherheit der Bauwerke herangezogen werden.

Literatur

[1] Maiwald, H.; Schwarz, J. (2011) *Ermittlung von Hochwasserschäden unter Berücksichtigung der Bauwerksverletzbarkeit, EDAC-Hochwasserschadensmodell.* scientific technical reports 01-11. Zentrum für die Ingenieuranalyse von Erdbebenschäden, Bauhaus-Universität Weimar. Weimar: Universitätsverlag.

[2] Grünthal, G.; Musson, R.; Schwarz, J.; Stucchi, M. (1998) *European Macroseismic Scale 1998.* Cahiers de Centre Européen de Géodynamique et de Seismologie 15, Luxembourg.

[3] Schwarz, J.; Maiwald, H. (2007) *Prognose der Bauwerksschädigung unter Hochwassereinwirkung.* Bautechnik 84, H. 7, S. 450–464. https://doi.org/10.1002/bate.200710039

[4] Jongman, B.; Kreibich, H.; Apel, H.; Barredo, J. I.; Bates, P. D.; Feyen, L.; Gericke, A.; Neal, J.; Aerts, J. C. J. H.; Ward P. J. (2012) *Comparative flood damage model assessment: towards a European approach.* Natural Hazards and Earth System Sciences (NHESS) 12, No. 12, pp. 3733–3752. https://doi.org/10.5194/nhess-12-3733-2012

[5] Gerl, T.; Kreibich, H.; Franco, G.; Marechal, D.; Schroter, K. (2016) *A Review of Flood Loss Models as Basis for Harmonization and Benchmarking.* PloS one. 11, No. 7, e0159791. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0159791

[6] Figueiredo, R.; Schröter, K.; Weiss-Motz, A.; Martina, M. L. V.; Kreibich, H. (2018) *Multi-model ensembles for assessment of flood losses and associated uncertainty.* Natural Hazards and Earth System Sciences (NHESS) 18, pp. 1297–1314. https://doi.org/10.5194/nhess-18-1297-2018

[7] Munich Re (2022) *Hurrikane, Kältewellen, Tornados: Wetterkatastrophen in USA dominieren Naturkatastrophen-Schadenstatistik 2021.* München: Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft. https://www.munichre.com/de/unternehmen/media-relations/medieninformationen-und-unternehmensnachrichten/medieninformationen/2022/bilanz-naturkatastrophen-2021.html [Zugriff am: 13. Mai 2022]

[8] Bundesministerium der Finanzen (2021) *Aufbauhilfe für vom Hochwasser betroffene Regionen* [online]. Berlin: Bundesministerium der Finanzen. https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Standardartikel/Themen/Oeffentliche_Finanzen/aufbauhilfe-fuer-vom-hochwasser-betroffene-regionen.html [Zugriff am: 13. Mai 2022]

[9] Deutsche Rückversicherung AG (2005) *Sturmdokumentation Deutschland 1997–2004.* Düsseldorf.

[10] Statistisches Bundesamt (2022) *Preisindizes für die Bauwirtschaft.* Fachserie 17, Reihe 4, Ausgabe Feb. 2022 (1. Vierteljahresausgabe). Berlin: DeStatis.

[11] Deutscher Wetterdienst (2021) *Hydro-klimatologische Einordnung der Stark- und Dauerniederschläge in Teilen Deutschlands im Zusammenhang mit dem Tiefdruckgebiet „Bernd“ vom 12. bis 19. Juli 2021* [online]. Offenbach: Deutscher Wetterdienst. https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/niederschlag/20210721_bericht_starkniederschlaege_tief_bernd.pdf [Zugriff am: 28. Jan. 2022]

[12] CEDIM Forensic Disaster Analysis Group (2021) *Hochwasser Mitteleuropa, Juli 2021 (Deutschland) 21. Juli 2021 – Bericht Nr. 1 „Nordrhein-Westfalen & Rheinland-Pfalz“* [online]. Eggenstein-Leopoldshafen: CEDIM – Center for Disaster Management and Risk Reduction Technology. https://www.cedim.kit.edu/download/FDA_HochwasserJuli2021_Bericht1.pdf [Zugriff am: 28. Jan. 2022]

[13] Roggenkamp, T.; Herget, J. (2015) *Historische Hochwasser der Ahr. Die Rekonstruktion von Scheitelabflüssen ausgewählter Ahr-Hochwasser* in: Kreisverwaltung Ahrweiler [Hrsg.] *Heimatjahrbuch Kreis Ahrweiler 2015.* S. 150–154. https://relaunch.kreis-ahrweiler.de/kvar/VT/hjb2015/hjb2015.47.pdf

[14] Kreienkamp, F. et al. (2021) *Rapid attribution of heavy rainfall events leading to the severe flooding in Western Europe during July 2021* [online]. Oxford: World Weather Attribution. https://www.worldweatherattribution.org/wp-content/uploads/Scientific-report-Western-Europe-floods-2021-attribution.pdf [Zugriff am: 19. Mai 2022]

[15] Roggenkamp, T.; Herget, J. (2022) *Hochwasser der Ahr im Juli 2021 – Abflussabschätzung und Einordnung.* Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 66, H. 1, S. 40–60.

[16] Bettmann, T. (2022) *Das Juli-Hochwasser 2021 in Rheinland-Pfalz.* Berichtsreihe des Forums zum Hochwasserrisikomanagement, Band 13.

[17] Keller, T.; Bangel, H.; Yörük, A.; Räder, R.; Gattke, C. (2022) *Das Erfthochwasser vom 14./15. Juli 2021 – Analysen und Einordnungen.* Vortrag zum Tag der Hydrologie München. München, 22./23. März.

[18] Erftverband (2021) *Hochwasser an der Erft und ihren Nebengewässern 14. bis 16.07.2021, Erste Auswertung des Niederschlags- und Abflussgeschehens* [online]. Bergheim: Erftverband. https://www.erftverband.de/wp-content/uploads/2021/08/20210820_ev_auswertung_hw_20210714.pdf [Zugriff am: 19. Mai 2022]

[19] Schwarz, J.; Maiwald, H.; Kaufmann, C.; Langhammer, T.; Beinersdorf, S. (2018) *Konzeptionelle Grundlagen und Tools zur Bewertung der Multi Hazard Verletzbarkeit von Bestandsbauten.* Bautechnik 95, H. 9, S. 639–652. https://doi.org/10.1002/bate.201800010

[20] Schinke, R.; Golz, S. (2018) *Arbeitshilfe zur Ermittlung potenzieller Hochwasserschäden an Gebäuden auf Basis synthetischer Schadensanalysen im Freistaat Thüringen.* Jena: Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie.

[21] Maiwald, H.; Schwarz, J. (2018) *Vereinheitlichte Schadensbeschreibung und Risikobewertung von Bauwerken unter extremen Naturgefahren.* Bautechnik 95, H. 10, S. 743–755. https://doi.org/10.1002/bate.201800009

[22] Schwarz, J.; Abrahamczyk, L.; Maiwald, H.; Hallermann, N.; Morgenthal, G. (2022) *Das Hochwasser 2021: Erste*

Ansätze einer zeitabhängigen Lagebilderstellung. Bautechnik (in Vorb.).

[23] Zentrum für die Ingenieuranalyse von Erdbebenschäden (o. J.) *Feldeinsätze Hochwasser* [online]. Weimar: Erdbebenzentrum – Institut für Konstruktiven Ingenieurbau. https://edac.biz/forschung/hochwasser/feldeinsaetze [Zugriff am: 19. Mai 2022]

[24] Maiwald, H.; Schwarz, J. (2014) *Schadensmodelle für extreme Hochwasser – Teil 2: Erste Schlussfolgerungen aus dem Ereignis vom Juni 2013*. Bautechnik 91, H. 5, S. 354–367. https://doi.org/10.1002/bate.201300102

[25] Maiwald, H.; Schwarz, J. (2016) *Die Sturzflut von Braunsbach – Ingenieuranalyse der Gebäudeschäden*. Bautechnik 93, H. 12, S. 925–932. https://doi.org/10.1002/bate.201600087

[26] Maiwald, H.; Schwarz, J. (2022) *Ermittlung von Hochwasserschäden unter Berücksichtigung der Bauwerksverletzbarkeit, Erweitertes EDAC-Hochwasserschadensmodell*. scientific technical reports 01-22. Zentrum für die Ingenieuranalyse von Erdbebenschäden, Bauhaus-Universität Weimar. Weimar: Universitätsverlag (in Vorb.).

[27] Laudan, J.; Rözer, V.; Sieg, T.; Vogel, K.; Thieken, A. H. (2016) *Damage assessment in Braunsbach 2016: data collection and analysis for an improved understanding of damaging processes during flash floods*. Natural Hazards and Earth System Science 17, pp. 2163–2179. https://doi.org/10.5194/nhess-17-2163-2017

[28] Maiwald, H.; Schwarz, J. (2015) *Damage And Loss Prognosis Tools Correlating Flood Action And Building's Resistance-type Parameters*. International Journal of Safety and Security Engineering 5, No. 3, pp. 222–250. https://doi.org/10.2495/SAFE-V5-N3-222-250

[29] Maiwald, H.; Schwarz, J. (2014) *Schadensmodelle für extreme Hochwasser – Teil 1: Modellbildung und Validierung am Hochwasser 2002*. Bautechnik, 91, H. 3, S. 200–210. https://doi.org/10.1002/bate.201300101

[30] Maiwald, H.; Schwarz, J.; Kaufmann, C.; Langhammer, T.; Golz, S.; Wehner, T. (2022) *Innovative Vulnerability and Risk Assessment of Urban Areas against Flood Events: Prognosis of Structural Damage with a New Approach Considering Flow Velocity*. Water 14, 2793. https://doi.org/10.3390/w14182793

[31] Maiwald, H.; Schwarz, J. (2009) *Berücksichtigung der Fließgeschwindigkeit bei Hochwasser-Schadensmodellen*. Bautechnik 86, H. 9, S. 550–565. https://doi.org/10.1002/bate.200910056

[32] Pažourková, E.; Salaj, M.; Montoya, R. E. W. (2022) *Incorporation of flow velocity in flood damage estimation Ahr river valley 2021 study*. Proceedings of 8th International Conference on Flood and Urban Water Management. FRIAR 2022, online, July 6–8, 2022.

[33] Copernicus Emergency Management Service (o. J.) *Rapid Mapping* [online]. Brüssel: Europäische Kommission. https://emergency.copernicus.eu/mapping/ems/rapid-mapping-portfolio [Zugriff am: 20. Apr. 2022]

[34] Jacobs, C.; Iber, C. (2022) *Einsatz des Copernicus-EMS beim Hochwasser 2021 in Rheinland-Pfalz*. Berichtsreihe des Forums zum Hochwasserrisikomanagement, Band 13.

[35] Projektverbund KAHR (2022) *Wissenschaftliche Begleitung der Wiederaufbauprozesse nach der Flutkatastrophe in Rheinland-Pfalz und Nordrhein-Westfalen – Klimaanpassung, Hochwasser und Resilienz (KAHR)* [online]. Bonn: Bundesministerium für Bildung und Forschung, Unterabteilung Nachhaltigkeit, Zukunftsvorsorge. https://www.fona.de/de/massnahmen/foerdermassnahmen/KAHR.php [Zugriff am: 19. Mai 2022]

Autoren

Dr.-Ing. Holger Maiwald (Korrespondenzautor)
holger.maiwald@uni-weimar.de
Bauhaus-Universität Weimar
Zentrum für die Ingenieuranalyse von Erdbebenschäden
Marienstraße 13
99421 Weimar

Dr.-Ing. Jochen Schwarz
schwarz@uni-weimar.de
Bauhaus-Universität Weimar
Zentrum für die Ingenieuranalyse von Erdbebenschäden
Marienstraße 13
99421 Weimar

Jun.-Prof. Dr.-Ing. Lars Abrahamczyk
lars.abrahamczyk@uni-weimar.de
Bauhaus-Universität Weimar
Professur Komplexe Tragwerke
Marienstraße 7a
99421 Weimar

Dipl.-Ing. Christian Kaufmann
christian.kaufmann@uni-weimar.de
Bauhaus-Universität Weimar
Zentrum für die Ingenieuranalyse von Erdbebenschäden
Marienstraße 13
99421 Weimar

Zitieren Sie diesen Beitrag

Maiwald, H.; Schwarz, J.; Abrahamczyk, L.; Kaufmann, C. (2022) *Das Hochwasser 2021: Ingenieuranalyse der Bauwerksschäden*. Bautechnik 99, H. 12, S. 878–890. https://doi.org/10.1002/bate.202200062

Dieser Aufsatz wurde in einem Peer-Review-Verfahren begutachtet. Eingereicht: 27. Juni 2022; angenommen: 14. Oktober 2022.

DOI: 10.1002/bate.202300003

Jochen Schwarz, Holger Maiwald, Lars Abrahamczyk, Norman Hallermann, Guido Morgenthal

Methoden für digitale 3D-Lagebilder: Erfahrungen aus dem Hochwasser 2021

Das Hochwasserereignis vom Juli 2021 hat in den besonders betroffenen Gebieten von Rheinland-Pfalz und Nordrhein-Westfalen schwere strukturelle Schäden an der allgemeinen Bebauung und der Infrastruktur hinterlassen. Zur Bewältigung der Folgen und Vorbereitung künftiger Ereignisse wurden verschiedene Forschungsprojekte initiiert, deren inhaltliche Abstimmung und Verzahnung durch die Autoren im Bereich der Lagebilderstellung in Form von themendifferenzierten Workshops angestrebt wurde. Der Beitrag konzentriert sich auf die Erhebung und Aufbereitung von Schadensdaten sowie erste methodische Ansätze, die Lagebilderstellung aus der Sicht der verschiedenen Hauptakteure konzeptionell zu strukturieren und im Zeitfenster effizient zu gestalten. Im Ergebnis stehen Elemente eines (noch ausstehenden) Tools für die schnelle Lageeinschätzung und Unterstützung der Einsatzkräfte, die Begründung von Maßnahmen zur temporären Gebäudesicherung und Unterstützung des Wiederaufbaus auf Basis von belastbaren Risikoszenarien und Schadensprognosen. Anhand und nach Auswertung verfügbarer Daten- und Informationsquellen wird dargestellt, wie rein technisch (Befliegung) sowie empirisch (auf Basis weiterentwickelter Schadensfunktionen) die Erstellung von Lagebildern qualifiziert und die Verfügbarkeit entscheidungsrelevanter Informationen zeitlich vorgelagert werden kann. Schlussfolgerungen und Empfehlungen aus den Untersuchungen und Workshops werden aus Anwendersicht zusammengefasst.

Stichworte Satellitenbilder; Drohnenbefliegung; Hochwasserschäden; Lagebilder; Schadensgrade

Methods for digital 3D assessment of the disaster situation: lessons from the 2021 flood

The flood event of July 2021 caused heavy structural damage to general building stock and infrastructure in the particularly affected areas of Rhineland-Palatinate and North Rhine-Westphalia. In order to cope with the consequences and to prepare for future events, different research projects were initiated. The authors coordinated and interlinked these in the area of situational awareness in the form of topic-specific workshops. The paper focuses on the collection and preparation of damage data as well as first methodological approaches to conceptually structure the disaster situation from the point of view of the various main actors and to design it efficiently in the time frame. The results are elements of a (still under preparation) tool for rapid situation assessment and support of the emergency services, the justification of measures for temporary building safety and support for reconstruction based on reliable risk scenarios and damage prognosis. Based on and after evaluation of available data and information sources, it is shown how purely technically (flights) and empirically (based on improved damage functions) the creation of situation reports can be qualified and the availability of decision-relevant information be stored in advance. Conclusions and recommendations from the studies and workshops are summarized from the user's point of view.

Keywords satellite images; drone flights; flood damage; situation images; damage grades

1 Vorbemerkungen

Im Juli 2021 haben lang anhaltende, sehr starke Regenfälle zu einem extremen Hochwasser im Süden von Nordrhein-Westfalen entlang der Erft und im Norden von Rheinland-Pfalz entlang der Ahr geführt. Großflächige Überschwemmungen und eine starke Zerstörung der Infrastruktur sowie ein hohes Schadensausmaß an den allgemeinen Hochbauten waren die Folge.

Obwohl verschiedene Forschungsprojekte [1, 2] initiiert und die parlamentarische Hinterfragung und juristische Klärung der Verantwortlichkeiten eingeleitet wurden, bleibt unbeantwortet, wie analogen Extremereignissen künftig zu begegnen ist und mit welchen Prognosemodellen und Bewertungstools kurzfristig die längerfristig manifestierten Entscheidungen (z. B. zum Wiederaufbau) abgesichert werden können.

Der vorliegende Beitrag stellt am Beispiel des Hochwassers 2021 verfügbare Daten- und Informationsquellen sowie neue Entwicklungen vor, die zur Erstellung von Lagebildern zu unterschiedlichen Zeitpunkten eingesetzt werden können. Zugleich fasst er die Ergebnisse der bisherigen Untersuchungen und die mit den handlungsverantwortlichen Akteuren durchgeführten Workshops [3, 4] in Form der wesentlichen Schlussfolgerungen und Empfehlungen zusammen.

Lagebilder dienen der Unterstützung von Entscheidungsträgern bei der schnellen Einschätzung des Gefahren- und Schadenspotenzials eines Ereignisses (Katastrophenfall). Dafür werden i. d. R. georeferenzierte, echtzeitnahe Daten und Informationen gebündelt und allgemein sowie akteursspezifisch aufbereitet, um über die Lagekenntnis auch die Reaktionsfähigkeit zu unterstützen. Gleichzeitig dienen Lagebilder der Information der Öffentlichkeit. Die

 © 2023 Ernst & Sohn GmbH,

Zugänglichkeit ist über gesicherte Kommunikations- und Informationskanäle zu gewährleisten.

Proaktiv sollten Lagebilder auch genutzt werden, um Prognosen zu aktualisieren und damit zusätzlich die Entscheidungsfindungen von Handelnden zu unterstützen. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Anforderungen im Hinblick auf Informationen und Detaillierungsgrad zwischen den Akteuren variieren.

Drohnengestützte Aufnahmen ermöglichen eine sehr schnelle und effiziente Aufnahme größerer Überflutungsgebiete. Dabei können diese Systeme sehr flexibel eingesetzt werden, sodass große Flächen ebenso erfasst werden können wie einzelne Objekte in einer hohen Abbildegenauigkeit.

Die aus den aufgenommenen Daten erstellten 3D-Modelle ermöglichen nicht nur die bessere Orientierung im Raum und die exakte Verortung der Luftbildaufnahme am Bauwerksmodell, sondern auch eine geometrische bzw. räumliche Analyse in den 3D-Modellen, sodass weitere Informationen abgeleitet werden können. Die Verarbeitung der Bilddaten zu entsprechenden 3D-Lageinformationen kann je nach Einsatzlage und Anforderung der Einsatzkräfte in unterschiedlichen Detailstufen erfolgen, sodass diese Daten sehr schnell zur Verfügung stehen, aber auch für die spätere Schadensbewältigung genutzt werden können.

Diese Modelle können als 3D-Lagebild dazu beitragen, dass Einsatzkräfte vor Ort, aber auch Krisenstäbe im regionalen Maßstab sich besser orientieren und sicherer operieren können. Solche Aufnahmen können in kurzen Abständen wiederholt und somit die 3D-Lagebilder kontinuierlich fortgeschrieben sowie Veränderungen detektiert werden. So wurden die Gemeinde Altenahr und die Abbruchkante in Erftstadt-Blessem im Rahmen wiederholter Befliegungen dreidimensional erfasst. Ziel dieser weiteren Aufnahmekampagnen war es, die bis dahin eingetretenen Veränderungen an der Infrastruktur und dem Gelände im 3D-Modell sichtbar zu machen.

2 Methoden und Ergebnisse von Datenerhebungen

2.1 Geoinformationen des Copernicus-EMS

Das Rapid Mapping des Copernicus Emergency Management Service stellt bedarfsgerecht und schnell (Stunden bis Tage) Geoinformationen zur Unterstützung von Notfallmanagement-Aktivitäten unmittelbar nach einer Katastrophe bereit [5]. Der Dienst basiert auf der Erfassung, Verarbeitung und Analyse von Satellitenbildern und anderen Geodaten-, Raster- und Vektordatenquellen sowie ggf. sozialen Medien im Schnellmodus. Die Komponente Rapid Mapping erhebt den Anspruch, im Ereignisfall innerhalb von wenigen Stunden erste Situations- und Schadensaufnahmen [6] zu liefern. Im Rahmen der zweiten Komponente Risk and Recovery Mapping werden diese ersten Auswertungen später erneut analysiert und ergänzt.

Der zeitliche Ablauf der Aktivierung des Copernicus-EMS beim Hochwasser 2021 kann den Ausführungen in [6] entnommen werden und wird nachfolgend zusammengefasst wiedergegeben. In Anbetracht eines sich abzeichnenden großen Hochwasserereignisses in den rheinland-pfälzischen Teilen der Einzugsgebiete von Ober-, Mittelrhein und Mosel wurde vom Landesamt für Umwelt (Rheinland-Pfalz) in Abstimmung mit weiteren Bundesländern die Aktivierung des Copernicus-EMS in die Wege geleitet. Aufgrund der Beteiligung mehrerer Bundesländer übernahm das Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK) die Koordinierung der Aktivierung. Der räumliche Fokus verschob sich dann für Rheinland-Pfalz auf die Katastrophengebiete der Nebengewässer von Rhein und Mosel im Norden und Westen der rheinland-pfälzischen Eifel.

Die ersten Karten mit den Ausdehnungen der Überflutungen konnten am Abend des 15. Juli 2021 bzw. in der Nacht vom 15. auf 16. Juli 2021 bereitgestellt werden. Die Fortschreibung der Überflutungsgebiete erfolgte am 16. Juli 2021 auf Basis von Radaraufnahmen. Die abgeleiteten Überflutungskarten wurden in der Nacht vom 16. auf 17. Juli 2021 zur Verfügung gestellt. Erste Schadenskartierungen folgten am 19. Juli 2021 gegen Mittag.

In [6] wird auf die Probleme der eher begrenzten Datenqualität hingewiesen. Die relativ grob aufgelösten Radardaten (4 m – Radarsat-2-Satellit, 10 m – Sentinel-1-Satellit) ermöglichen zwar prinzipiell ein gutes Erkennen von Wasserflächen und erlauben die Erfassung der Erdoberfläche auch bei geschlossener Wolkendecke, allerdings wird dies bei engen Tälern und in bebauten Gebieten durch Abschattungseffekte erschwert.

Die vom Copernicus-EMS bereitgestellten Schadensauswertungen basieren dagegen auf optischen Fernerkundungsdaten (PLEAIDIS-Satellitenmission – 0,5 m Auflösung, DLR-Luftbildaufnahmen – 12 cm Auflösung). Allerdings unterliegen die optischen Satellitendaten dem Problem, dass in Teilgebieten die Erdoberfläche aufgrund von Wolkenbedeckung nicht erfasst werden konnte. Zudem lässt die senkrechte Aufnahmeperspektive häufig keine genauere Beurteilung von Schäden an Gebäuden zu, sofern sie nicht so schwer sind, dass sie im Satellitenbild erkennbar werden.

In Bild 1 werden beispielhaft für die Ortschaft Altenahr im Ahrtal die nach dem Hochwasser jeweils verfügbaren Informationen zeitlich gestaffelt dargestellt.

Die anfängliche Überbewertung der Schäden an der allgemeinen Bebauung (Bilder 1a, 1b) ist wahrscheinlich auf den Anfall großer Treibgutansammlungen zwischen den Gebäuden zurückzuführen. Der bei der traditionellen Ingenieuraufnahme der Schäden [7] vorgefundene tatsächliche Schädigungszustand kann den Darstellungen in den

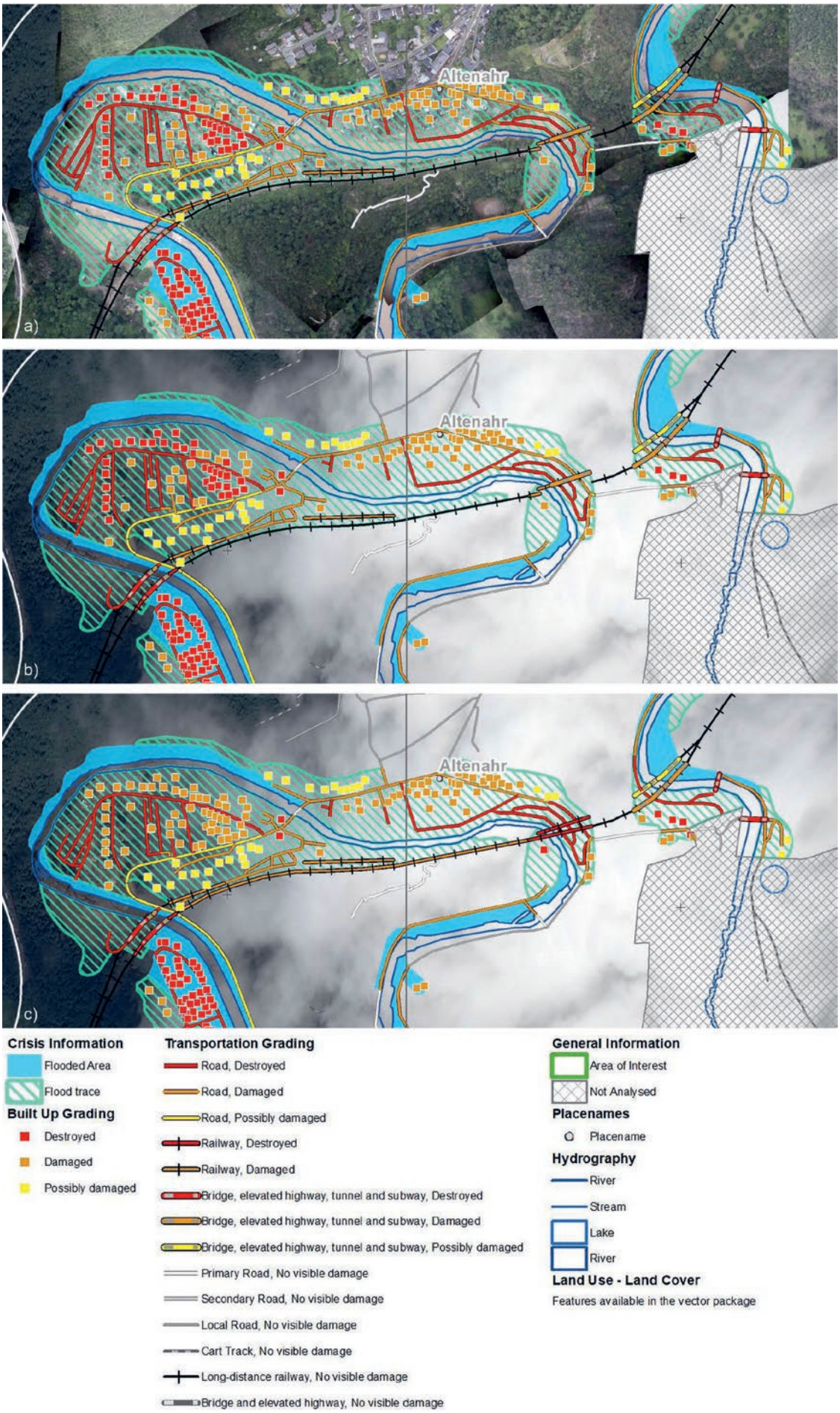


Bild 1 Copernicus-EMS Rapid Mapping Dienst für Altenahr: a) 21. Juli 2021, b) 23. Juli 2021, c) 11. Aug. 2021
Copernicus-EMS Rapid Mapping Service for Altenahr a) July 21, 2021, b) July 23, 2021, c) Aug. 11, 2021

Abschn. 2.3, 5.2 entnommen werden. Ohne Ortskenntnis der Bearbeiter ist eine Unterscheidung der Gebäudetypen nur eingeschränkt möglich [6]. Zerstörte Wohnhäuser, Garagen oder weggespülte Campinganwesen werden gleichermaßen als zerstörte Gebäude ausgewiesen. So handelt es sich bei den im unteren Bereich des Ausschnitts sichtbaren, als zerstört ausgewiesenen Gebäuden um einen Campingplatz.

Trotz der Limitierungen der im Rahmen des Copernicus-EMS kartierten Schäden waren diese von großer Bedeutung, da sie bis dato in der Frühphase der Katastrophenbewältigung als einzige Informationsquelle für den Zustand der Verkehrsinfrastruktur und Gebäude verfügbar waren.

2.2 Befliegungsdaten

Die satellitengestützten Kartierungsdaten des Copernicus-EMS wurden durch weitere Befliegungsdaten ergänzt, die i. d. R. eine höhere Auflösung bieten. Eine Übersicht über die Befliegungsaktivitäten in Nordrhein-Westfalen ist Bild 2 zu entnehmen [8], in dem auch die Gebiete der von der Bauhaus-Universität Weimar durchgeführten Schadensaufnahmen [7] vom Hochwasser 2021 gekennzeichnet sind. Des Weiteren sind auch die vom Copernicus-EMS (CEMS) erfassten Gebiete dargestellt.

Nachfolgend wird beispielhaft auf zwei weitere Befliegungsaktivitäten eingegangen.

Vom Zentrum für satellitengestützte Kriseninformation (ZKI) wurden besonders betroffene Orte präsentiert, die gemeinsam mit den Einsatzkräften vor Ort definiert wurden [9]. Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) hat hierfür Luftbilddaten mit Auflösungen von 10 cm bis 15 cm bereitgestellt. Bild 3 zeigt bspw. die Hochwassersituation am 15. Juli 2021 für die historische Altstadt von Bad-Münstereifel in Nordrhein-Westfalen, für welche auch eine Bauwerks- und Schadensdokumentation vorliegt [7].

Eine luftbildbasierte Bestandsaufnahme des Ahrtals wurde von der Firma GeoFly GmbH Magdeburg einige Tage nach dem Hochwasser durchgeführt [10]. Bild 4 zeigt Auszüge aus dem daraus entwickelten 3D-Modell, welches in Form eines Browser-basierten Viewers zur Verfügung steht. Diese Daten weisen gegenüber den Ergebnissen der Drohnenbefliegungen (Abschn. 3) eine geringere Auflösung auf, haben aber nicht unwesentlich zur Ergänzung der schadensrelevanten Informationen und der Bauwerksparameter bei den Vor-Ort-Aufnahmen in [7] beigetragen. Insbesondere ließen sich zahlreiche Schadensfälle genauer spezifizieren, die nicht direkt einsehbar, schon stark beräumt bzw. zum Teil schon abgerissen waren.

2.3 Traditionelle (bodenständige) Ingenieuraufnahmen

Traditionelle Ingenieuraufnahmen sind in den letzten Jahrzehnten in den Beiträgen zur „Ingenieuranalyse der

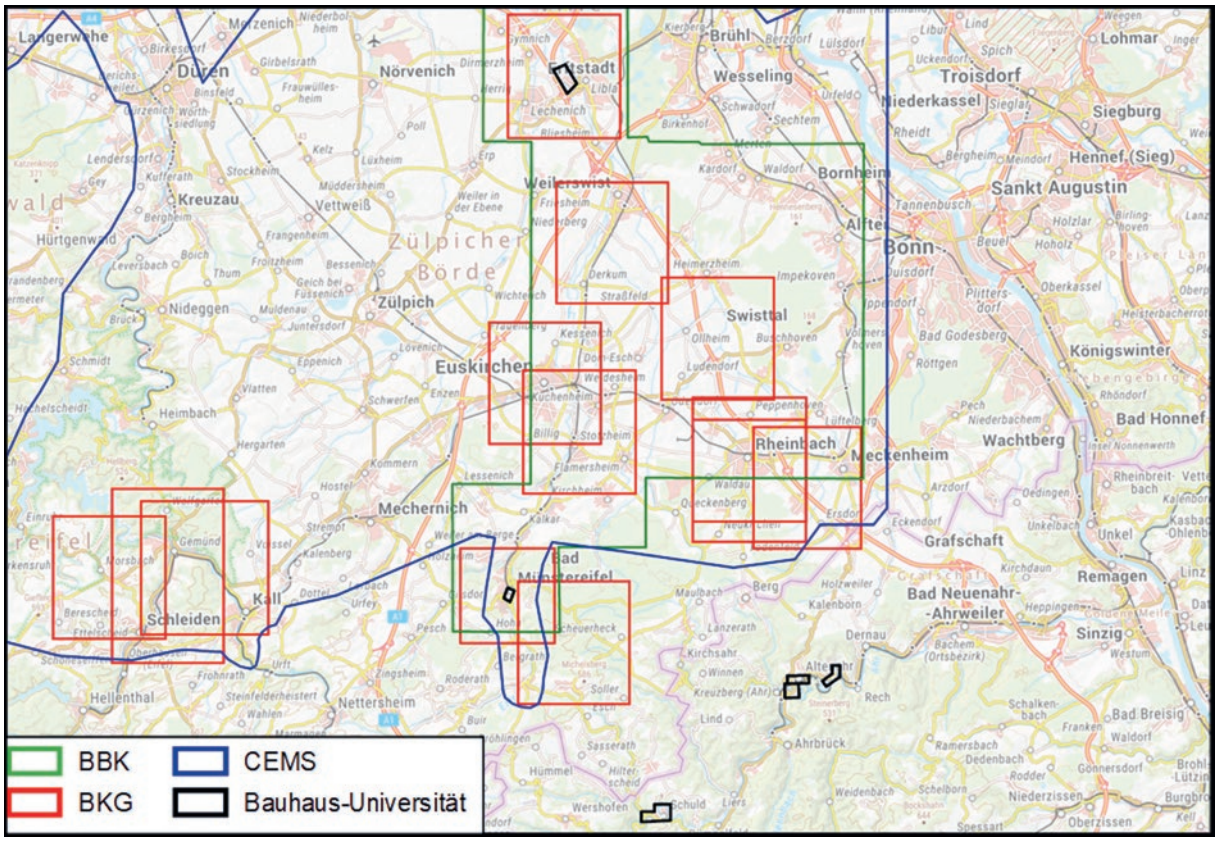


Bild 2 Schadensaufnahmen Hochwasser 2021 (Begehung und Befliegung) mit Darstellung anderer Befliegungsaktivitäten (gemäß [8])
Damage survey flood 2021 (inspection and aerial survey) with representation of other aerial activities (acc. to [8])

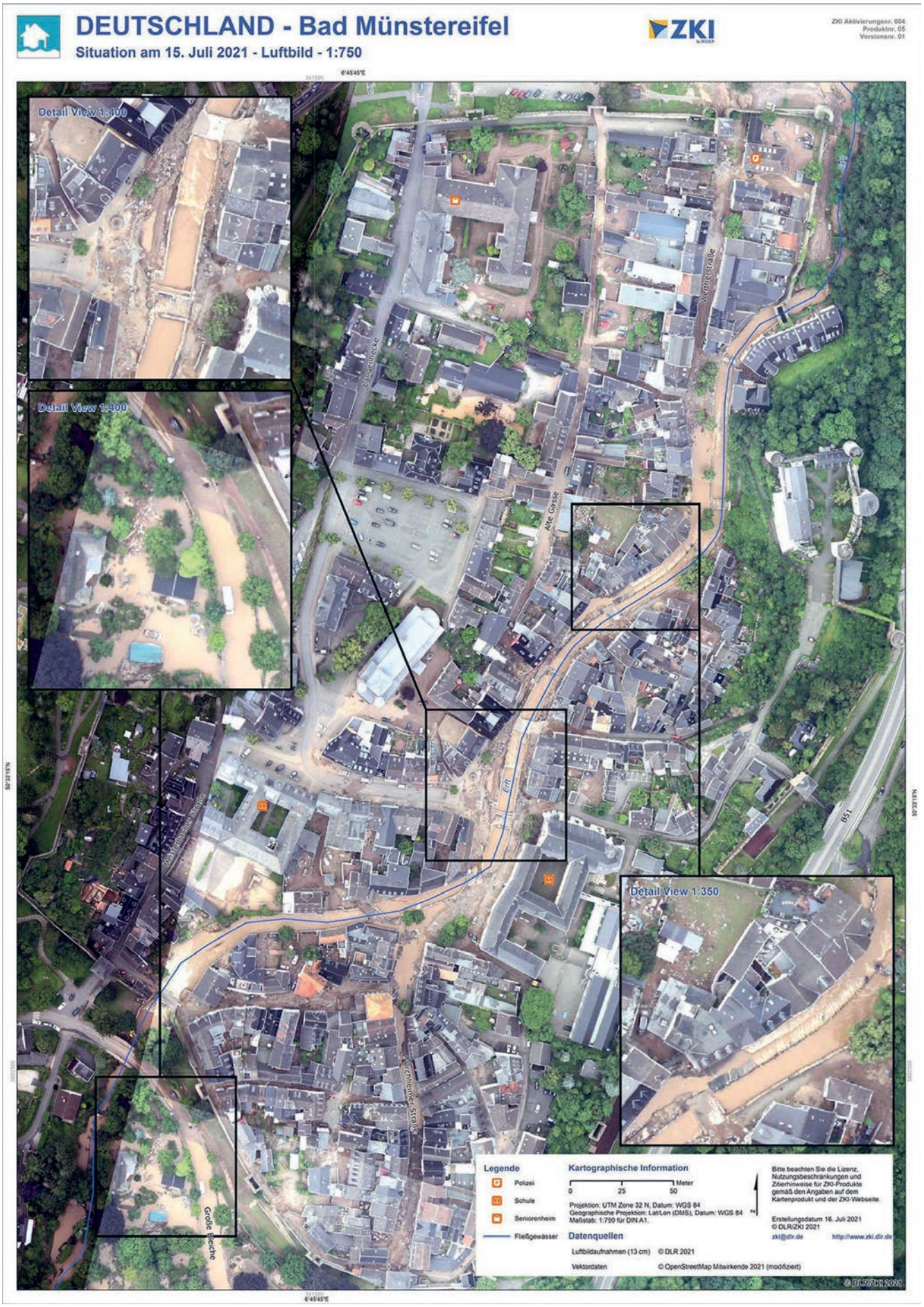


Bild 3 Hochwassersituation am 15. Juli 2021 in Bad Münstereifel, Luftbild: DLR-ZKI (CC BY-NC-ND 3.0)
Flood situation on July 15, 2021 in Bad Münstereifel, aerial photo: DLR-ZKI (CC BY-NC-ND 3.0)

Bild 4 3D-Modell Altenahr aus den Befliegungen der Firma GeoFly GmbH [10]: a) Übersicht, b) Detailauszug
3D model Altenahr from the surveys of the company GeoFly GmbH [10]: a) overview, b) detail

Schäden von extremen Naturereignissen“ im In- und Ausland vorgelegt worden. Sie beziehen sich auf Erdbeben, Hochwasser, Tsunami, Tornados und Sturzfluten und können u. a. unter www.edac.biz mit den entsprechenden Publikationshinweisen nachvollzogen werden.

Die Qualität besteht in der zwischenzeitlich durch die Erstautoren in [11] vereinheitlichten Beschreibung der Schadensgrade und der Darstellung des Zusammenhangs zwischen den Bauweisen und ihrer Verletzbarkeit, die in Form der Verletzbarkeitsfunktionen den Einstieg in szenarienbasierte Schadensprognosen bzw. simulative Risikoanalysen [12–15] ermöglichen. Die durch Ingenieurkompetenz und Expertise qualifizierten Datenbanken sind weiterhin unverzichtbar, wenn es um die Entwicklung und Prüfung belastbarer Modellansätze geht.

Bild 5a zeigt exemplarisch die Schädigungssituation im Untersuchungsgebiet Altenahr, wie sie sich aus den Vor-Ort-Datenerhebungen in [7] ableiten ließ; Bild 5b verdeutlicht die Veränderungen, die sich aus dem Abriss und den Folgemaßnahmen bis zum Okt. 2021 ergaben. Die Darstellung zeigt die Schadensgrade als Maß für die strukturelle Schädigung der Bauwerkssubstanz [11].

Die Verteilung der Schadensgrade in den Untersuchungsgebieten Altenburg und der historischen Altstadt von Bad Münstereifel kann den Darstellungen in Abschn. 5.2 ent-

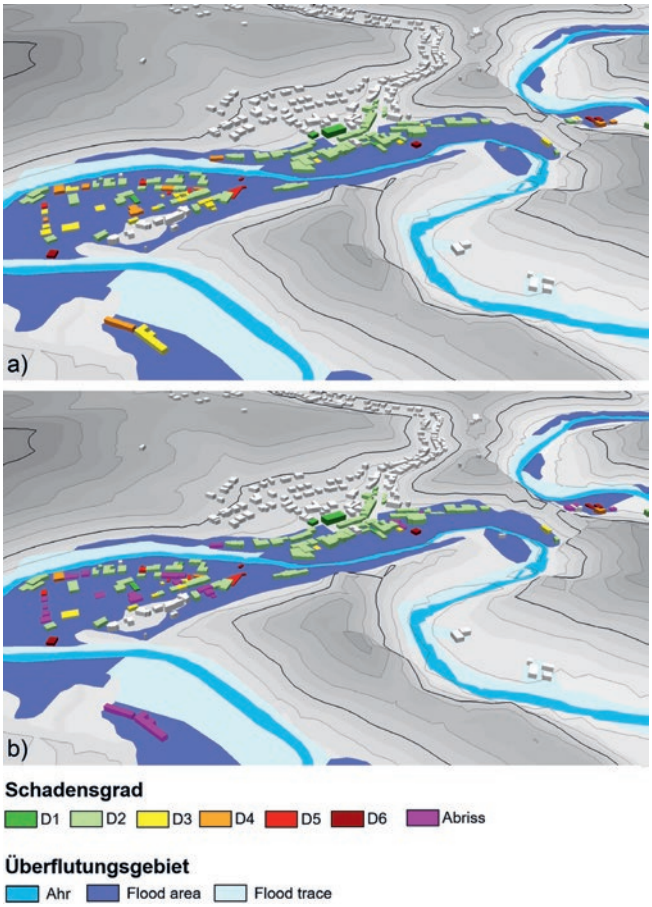


Bild 5 Bewertung der Schäden an der allgemeinen Bebauung in Altenahr durch die Vor-Ort-Aufnahmen in [7]: a) Schadensgrade nach dem Hochwasser, b) Schäden inkl. Abrisse (Stand Okt. 2021)
Evaluation of the damage to the general building stock in Altenahr through the damage surveys in [7]: a) damage grades after the flood, b) damage including demolitions (as of Oct. 2021)

nommen werden. Aufgrund der geringeren Wasserstände und geringeren Fließgeschwindigkeiten wurden in Bad Münstereifel nur Schadensgrade ≤ D3 beobachtet. Eine Nachbegehung im März 2022 zeigte auch, dass es keine hochwasserbedingten Abrisse im Gebiet gegeben hat.

Betrachtet man das Zeitfenster, in dem die Daten erhoben und in Form der Schadensgrade ingenieurmäßig bewertet wurden, wird klar, dass die Ergebnisse für die Generierung von Lagebildern zu spät vorliegen (Zeitpunkt t_2 gemäß Bild 10) und das Ziel darin bestehen muss, hier wesentlich früher (Zeitpunkt t_1 gemäß Bild 10) über entsprechende Ergebnisse bzw. Auswertungen zu verfügen. Im Vorgriff auf die Ausführungen in Abschn. 4 und Bild 10 bedeutet dies, statt zum Zeitpunkt von t_2 bereits bei t_1 – oder sogar früher – Informationen bereitzustellen.

3 Neue Methoden zur Datenerhebung

3.1 Konzeptionelle Grundlagen und neuartige Ansätze

Zusätzlich zur manuellen Schadensdokumentation [7] erfolgte durch die Autoren eine drohnenbasierte Erfassung ausgewählter Gemeinden mit hoch aufgelösten und qualitativ hochwertigen digitalen Bildern. Ziel der Aufnahmen war die vollständige georeferenzierte Erfassung der Ortslagen samt Bebauung zur Erstaufnahme der Geländeoberfläche und der entstandenen Schäden an Infrastruktur und Gebäuden. Aus den Bilddaten wurden detaillierte, georeferenzierte 3D-Punktwolken und texturierte 3D-Oberflächenmodelle erstellt, die für den Abgleich mit vorhandenen Daten aus der vorliegenden Geodaten-

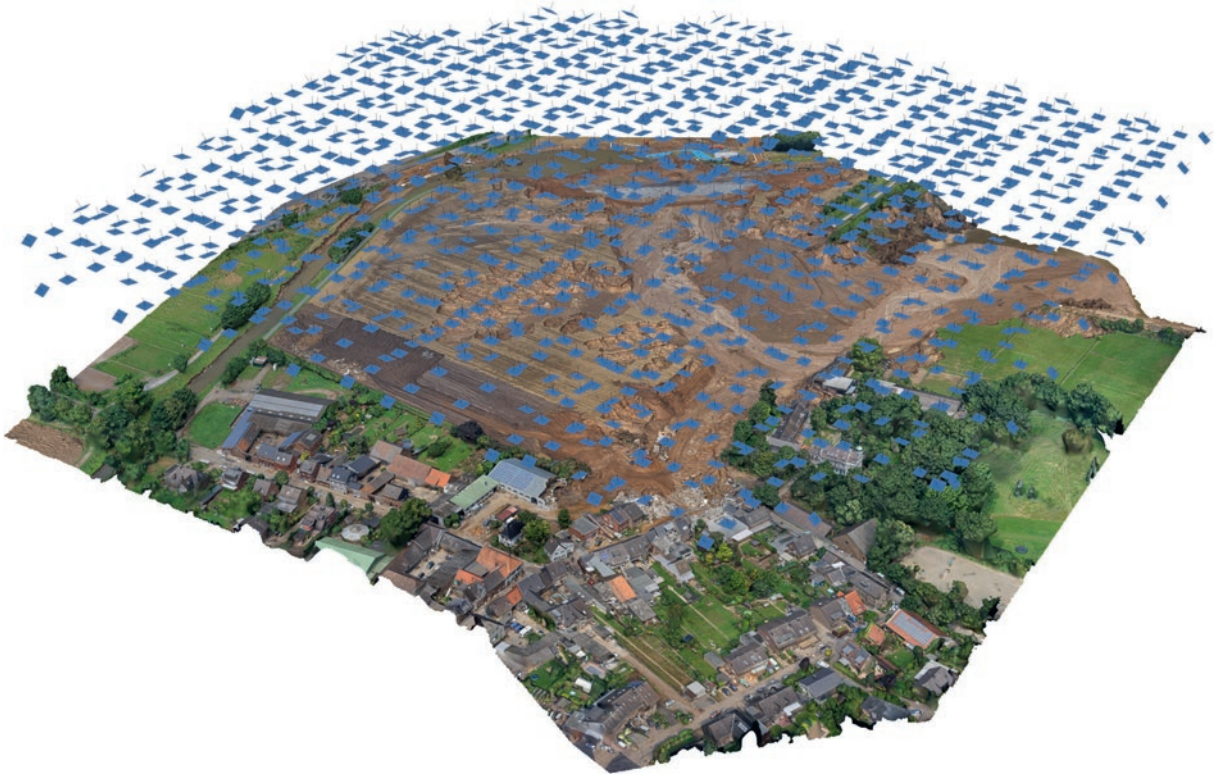


Bild 6 Drohnenbasierte Aufnahme und georeferenzierte 3D-Modellierung der Ortslage Erftstadt-Blessem
Drone-based recording and georeferenced 3D modeling of the site of Erftstadt-Blessem

Bild 7 Georeferenzierte 3D-Modellierung der Abbruchkante in Erftstadt-Blessem, Überblendung des einfarbigen 3D-Geländemodells mit dem texturierten 3D-Geländemodell
Georeferenced 3D modeling of the break-off edge in Erftstadt-Blessem, overlaying of the monochrome 3D terrain model with the textured 3D terrain model

basis sowie detaillierten Schadensauswertungen genutzt werden sollten. Darüber hinaus sind mit diesen Daten aussagekräftige 3D-Lageinformationen zu generieren, die es Einsatzkräften ermöglichen, die Zugänglichkeit nicht direkt einsehbarer Bereiche abzuschätzen.

Die Bilder 6, 7 zeigen beispielhaft die Aufnahmepositionen aus 100 m Flughöhe und die 3D-Rekonstruktion der Abbruchkante der Gemeinde Erftstadt-Blessem vom 4. Aug. 2021. Eine Wiederholungsaufnahme des Gebiets erfolgte im März 2022.

In Rheinland-Pfalz wurde die sehr stark betroffene Gemeinde Altenahr in einem höheren Detaillierungsgrad aus 70 m Flughöhe in zwei Aufnahmekampagnen (Aug. 2021, Okt. 2021) zur Beurteilung der Schadensentwicklung erfasst. Eine Wiederholungsaufnahme erfolgte zusammen mit anderen Untersuchungsgebieten [7] im März 2022. Darüber hinaus wurden in den Gemeinden einzelne Bauwerke (Brücken) hoch detailliert aus kurzer Distanz erfasst, um daraus Grundlagen für die statisch-konstruktive Bewertung und Sanierungs- bzw. Neuplanung der Bauwerke ableiten zu können [3, 4].

Bild 8 zeigt die georeferenzierte 3D-Rekonstruktion der Gemeinde Altenahr in der Draufsicht der einzelnen Aufnahmekampagnen.

Auf vorgeplanten GPS-gestützten Flugrouten werden die Gebiete nahezu lückenlos erfasst. Die sichere Steuerung der Flugsysteme erlaubt auch unter komplexen Einsatzbedingungen und über größere Distanzen Detailaufnahmen von exponierten Bauwerken. Die erzeugten Bild- und Videodaten können direkt zur Vervollständigung des aktuellen Lagebilds genutzt werden.

Aus den erfassten Luftbilddaten können im Anschluss an die Aufnahme georeferenzierte 3D-Gelände- und Bauwerksmodelle erzeugt werden, die eine detaillierte Beurteilung der aktuellen Lage ermöglichen.

Die technische Herausforderung besteht darin, die Datenebenen zu überlagern und mit den erhobenen Schadensinformationen in time zu koppeln (Bild 9). Diese Prozesse lassen sich automatisieren, um kurzfristig Datensätze auszuwerten und miteinander zu verschneiden. Für die Bereitstellung und Visualisierung der Modelldaten wurde die Webplattform INFRA//TWIN [16] genutzt, mit der auch extrem umfang- und detailreiche 3D-Modelle und heterogene Datensätze performant dargestellt werden können.

3.2 Untersuchungsbedarf

Wie Bild 9 veranschaulichen soll, ist die Verbindung zwischen dem aus den Überfliegungsdaten abgeleiteten Oberflächenmodell und der qualifizierten Beschreibung der Gebäude noch nicht gelöst. Dies betrifft nach dem Ereignis auch die Zuordnung von globalen und/oder lokalen Schadensgraden, die Bereitstellung entsprechender Zuordnungsmuster und aussagefähiger (auf die Verletzbarkeit ausgerichteter) Attribute (Bauweise, Verletzbarkeitsklasse).

Neue Ansätze erfordern die Bereitstellung von Interpretationsmustern für unterschiedliche Perspektiven bzw. Aufnahmewinkel in vertikaler (Abbildung der Grundrisse) und horizontaler Aufnahme bzw. Projektionslinie (Abbildung der Aufrisse bzw. Fassaden), die perspektivisch generischen KI-Verfahren zugeführt werden und die Abstraktion der Gebäudekontur ermöglichen sollten.

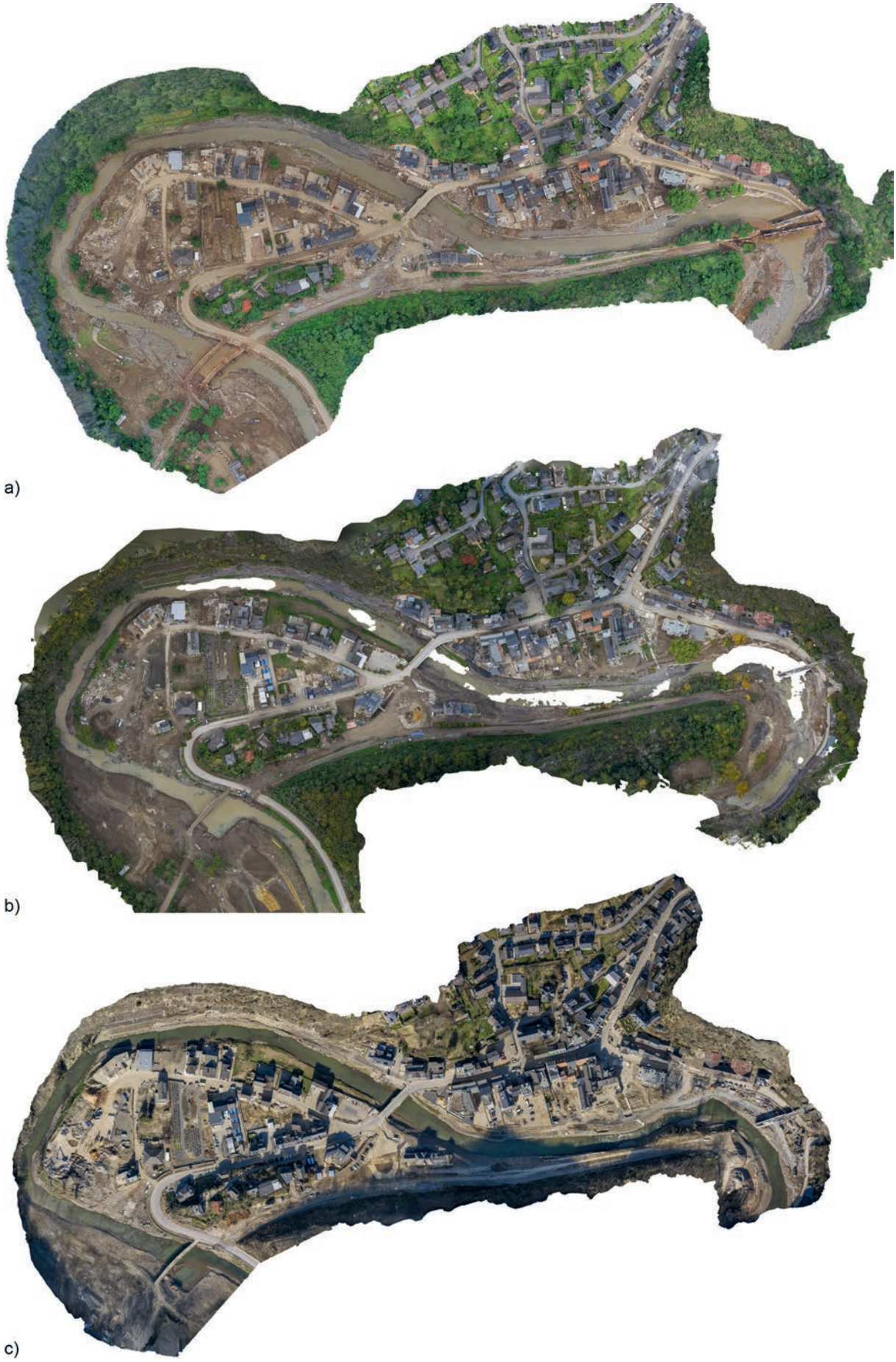


Bild 8 Draufsicht der georeferenzierten 3D-Rekonstruktion der Gemeinde Altenahr: a) Aufnahmekampagne 1 (Aug. 2021), b) Aufnahmekampagne 2 (Okt. 2021), c) Aufnahmekampagne 3 (März 2022)
Top view of the georeferenced 3D reconstruction of the municipality of Altenahr: a) recording campaign 1 (Aug. 2021), b) recording campaign 2 (Oct. 2021), c) recording campaign 3 (Mar. 2022)

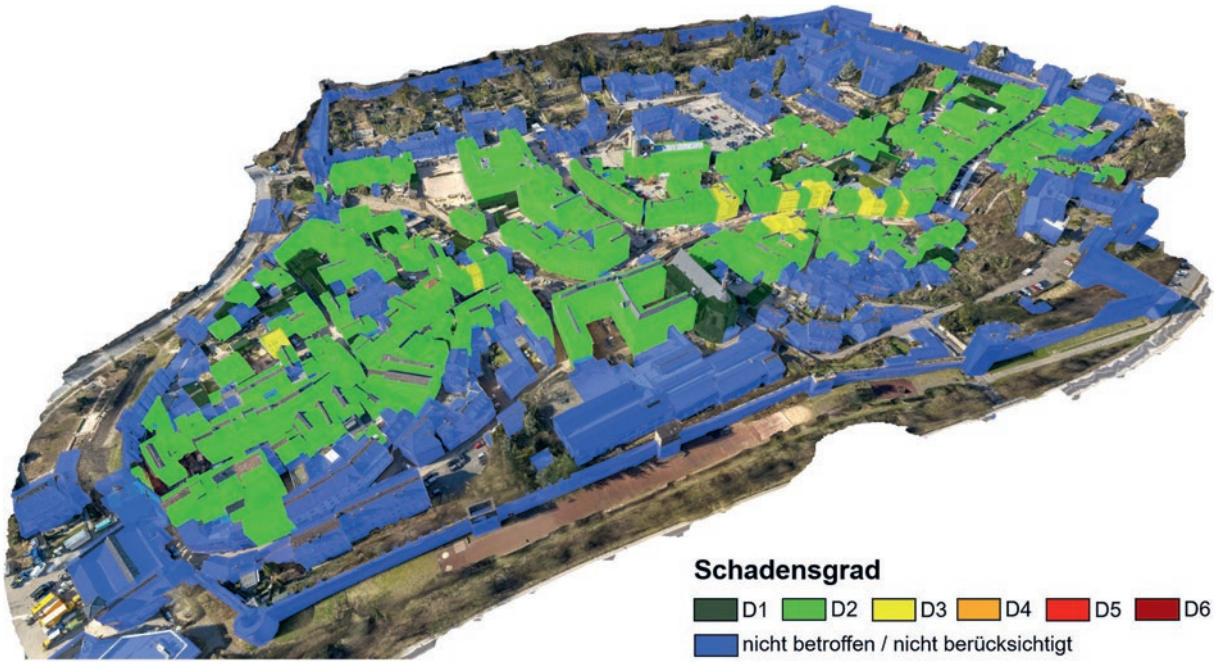


Bild 9 Überlagerung des Geländemodells mit dem 3D-Stadtmodell (City JSON) zur Darstellung der beobachteten Schadensgrade in der historischen Altstadt von Bad Münstereifel in der Webplattform INFRA//TWIN (www.infratwin.com)
Overlay of the terrain model with the 3D city model (City JSON) for the representation of the observed damage grades in the historic old town of Bad Münstereifel using the INFRA//TWIN web platform (www.infratwin.com)

4 Lagebilder

In den Bundesländern sind den Hochwassermeldepegeln unterschiedliche Warnkriterien in Form von Alarm-, Informations-, Melde- oder Warnstufen zugeordnet [17, 18], die mit entsprechenden Maßnahmen verbunden sind. In der Regel werden drei oder vier Stufen definiert [19, 20]. Die Auslösung des Katastrophenalarms bleibt der höchsten Stufe vorbehalten, sofern nicht durch einen Deichbruch o. Ä. vor Erreichen der zugehörigen Wasserstände eine gefährliche Situation entsteht.

Das Auslösen des Katastrophenalarms ist abhängig von der Gesetzgebung des jeweiligen Bundeslands. In der Regel ist dazu jedoch eine aktive Entscheidung der zuständigen Behörde für Katastrophenschutz (Landrat in den Kreisen, Oberbürgermeister in kreisfreien Städten, die für den Katastrophenschutz zuständigen Ministerien oder Senatsverwaltungen sowie ggf. die mittleren staatlichen Verwaltungsebenen in den Ländern [21, 22]) notwendig.

Demgegenüber geht das Bundesland Sachsen einen etwas anderen Weg und hat, die Erfahrungen des Hochwassers 2002 berücksichtigend, eine verbindliche Regelung eingeführt: Wenn zu erwarten ist, dass die Richtwasserstände der Alarmstufe 4 erreicht werden, ist nach Ausrufung der Alarmstufe 3 der Katastrophenvoralarm und bei Erreichen der Alarmstufe 4 der Katastrophenalarm auszurufen [22]. Mit Ausrufung des Katastrophenalarms wird der Hochwasseralarmplan durch den Maßnahmenkatalog des Katastrophenschutzes (Katastrophenalarmplan) abgelöst [17].

In Abhängigkeit von der Ereignisgröße können verschiedene Einsatzkräfte zum Hochwassereinsatz kommen, die dafür die entsprechenden Lagebilder benötigen. Den Hauptakteuren sind unterschiedliche Aufgaben, Einsatzvoraussetzungen und -zeitpunkte (Bild 10) zuzuordnen.

Die *Feuerwehren* sind bei unmittelbar drohendem Notstand oder bei Erreichen der öffentlichen Notstandschwelle, d. h. bei Eintritt einer Gefährdungslage gemäß dem Wassergesetz in Verbindung mit dem Feuerwehrgesetz, zur Hilfeleistung verpflichtet [23]. Berufsfeuerwehren haben die Aufgabe der Abwehr akuter Gefahren. Dazu gehören die Alarmierung und Führung der beteiligten Hilfsorganisationen, die Deichverteidigung (Füllen von Sandsäcken etc.), die Koordination der Gefahrenabwehr, allgemeine Pump- und Bergungsarbeiten, Sicherungsmaßnahmen bei Einsturzgefahr sowie die Evakuierung von Gebäuden.

Die *Polizei* hat im Katastrophenfall die Aufgabe, Gefahren für die öffentliche Sicherheit und Ordnung abzuwehren [23]. Dazu gehören die Durchsetzung von Evakuierungsmaßnahmen, Verkehrsregelungsmaßnahmen, Absperrungen und der Schutz von Leben, Gesundheit und Sachwerten.

Die *Bundeswehr* kann im Katastrophenfall durch ein formelles Hilfeersuchen vom Leiter der Katastrophenschutzbehörde angefordert werden [23]. Sie ist durch ihre Personalstärke und die technischen Möglichkeiten eine wesentliche Stütze bei der Gefahrenabwehr und bei der Katastrophenbeseitigung, wie sich schon in der Vergangenheit bei der Bewältigung der Hochwasserkatastro-

phen an der Oder (1997) und Elbe (2002) gezeigt hat. Beim Hochwasser 2021 kamen mehr als 2300 Soldatinnen und Soldaten zum Einsatz [24]. Dabei wurden mit schwerer Technik die Straßen und Flussbette freigeräumt, Behelfsbrücken errichtet und personelle Unterstützung bei der Beräumung von Gebäuden gegeben. Den Lagezentren wurden während und nach dem Hochwasser Luftaufnahmen aus Aufklärungsflügen bereitgestellt.

Auch das *Technische Hilfswerk* (THW) wird üblicherweise vom Leiter der Katastrophenschutzbehörde angefordert [23]. Das THW ist die operativ-taktische Organisation für den Zivilschutz des Bundes, welche dem Bundesministerium des Innern und für Heimat (BMI) untersteht [25]. Die spezialisierten und gut ausgebildeten Einsatzkräfte des THW sind in technischen Zügen organisiert. Beim Hochwasser 2021 war das THW seit dem 15. Juli 2021 mit bis zu 4000 Einsatzkräften im Einsatz. Mit Bezug auf die 2,3 Mio. geleisteten Einsatzstunden handelte es sich dabei um den bisher größten Einsatz seiner Geschichte [25]. Nahezu alle Fachkompetenzen des THW kamen zum Einsatz. Dazu gehörten die Rettung von Menschenleben, die Deichverteidigung, Pumparbeiten, Baufachberatung, der Brückenbau sowie die Strom- und Wasserversorgung in den betroffenen Gebieten.

Wie aus dem Workshop „Synopse der Prozesse und Verfahrensweisen zum Hochwasser Juli 2021“ [3] abzuleiten war, gibt es ein unterschiedliches Verständnis, was unter *Lagebildern* eigentlich zu verstehen und von diesen abzuverlangen ist. Eine Ursache dafür kann in der zeitlichen Abfolge und dem unterschiedlich prädestinierten Auftreten der Hauptakteure gesehen werden.

Bestätigt und ergänzt wird diese Erfahrung durch erste Auswertungen eines nach dem Workshop verteilten Fragenkatalogs [4]. Im Zeitalter der 3D-Erfassung müssen unter einem Lagebild auch die verfügbaren räumlichen Informationen verstanden werden.

Im Ergebnis der beiden Workshops konnten (hier auszugsweise wiedergegebene) Schlussfolgerungen und Empfehlungen für fünf Schwerpunkte abgeleitet und ein Schema zu den zeitlichen und inhaltlichen Anforderungen an die *Lagebilder* präzisiert werden:

(1) Datenerhebung: Als effizient, und dem gegenwärtigen Stand entsprechend, ist die Kombination verschiedener Erhebungsformen zu sehen. Dies betrifft vornehmlich die aus Befliegung gewonnenen 3D-Daten, die ungeachtet der bildlichen Auflösung grundsätzlich aussagefähige Datenergänzungen in den betroffenen Gebieten ermöglichen. So können Schadensfälle bewertet werden, die bei den Vor-Ort-Aufnahmen bereits stark beräumt bzw. zum Teil schon abgerissen waren. Die sichere Steuerung der Flugsysteme über größere Distanzen erlaubt auch die Aufnahme von Details unter komplexen Einsatzbedingungen. Die erzeugten Bild- und Videodaten können direkt zur Vervollständigung des aktuellen Lagebilds genutzt werden und im Zuge einer fotogrammetrischen 3D-Rekonstruktion wertvolle räumliche und ggf. hoch detaillierte Zustandsinformationen liefern. Ein Zeitgewinn entsteht, wenn Strukturen für den Drohneneinsatz und Flugrouten für die Aufnahme potenzieller Katastrophengebiete vorbereitet vorliegen und damit direkt eine automatisierte Bilddatengenerierung erfolgen kann.

(2) Schadensbeschreibung: Der Schadensgrad [11] ist – aus Ingenieursicht – der *entscheidungsrelevante Parameter* zur Beschreibung der (beobachtbaren) Bauwerksschäden. Mit den durch die EDAC-Schadensmodelle prognostizierten Schäden ist ein direkter Bezug zu den vom THW verwendeten Schadensklassen SK [26] gegeben.

In den Szenarien wären künftig stärker die hauptbetroffenen Gebiete und in Abhängigkeit vom Schadensgrad auch No-go-Areas zu kennzeichnen. Dies kann an den Beispielen der erhobenen Ortschaften in Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz überprüft und anhand der entwickelten Schadensmodelle nachgestellt werden. Wesentliche Zielstellungen der Arbeiten zu einer drohnenbasierten Lagebilderstellung werden in der digitalen Kennzeichnung der Gebäudekonturen und zeitnahen Zuordnung der Schadensbeschreibung (Bilder 8, 9) gesehen, vornehmlich der höheren Schadensgrade und Hotspots zur Koordinierung der Einsatzkräfte bzw. Priorisierung der Einsatzgebiete.

(3) Schadensmodelle: Das EDAC-Hochwasserschadensmodell [27] konnte im Rahmen des BMBF-Vorhabens INNOVARU auf extreme dynamische Hochwassereinwirkungen, wie Sturzfluten, erweitert werden [14, 15], sodass die im Hochwassergebiet 2021 generierbaren Daten dazu beitragen, Prognosemodelle für künftige Ereignisse bereitzustellen, die nicht nur den Wasserstand, sondern auch die bei Sturzfluten relevanten hohen Fließgeschwindigkeiten berücksichtigen. Da sich infolge Abriss und anderer Folgemaßnahmen wesentliche Veränderungen an der Bestandsbebauung ergeben, sollten leistungsfähige Schadensmodelle einen längeren Zeithorizont antizipieren, wenn sie längerfristig belastbare Planungsentscheidungen unterstützen sollen.

(4) Strukturelle Optimierung beim Einsatz von Informationssystemen: Effiziente Informationssysteme setzen den einfachen Datenaustausch und die Konzentration auf entscheidungsrelevante Parameter voraus. Bild 10 unternimmt den Versuch, Zusammenhänge zwischen der Größe des Betrachtungsgebiets, der Zeitachse und dem Grad der Detaillierung und damit Indikator für die Vertrauenswürdigkeit von Lagebildern herzustellen. Es kann als konzeptionelle Grundlage für die Optimierung der Datenflüsse und Informationsketten herangezogen werden.

„Basis i“ bedeutet in diesem Zusammenhang das Vorhalten/die Vorbereitung von Daten zu Topografie und Bebauung, wobei diese einen möglichst hohen Detaillierungsgrad erreichen sollten, um vertrauenswürdige Schadensszenarien erstellen zu können.

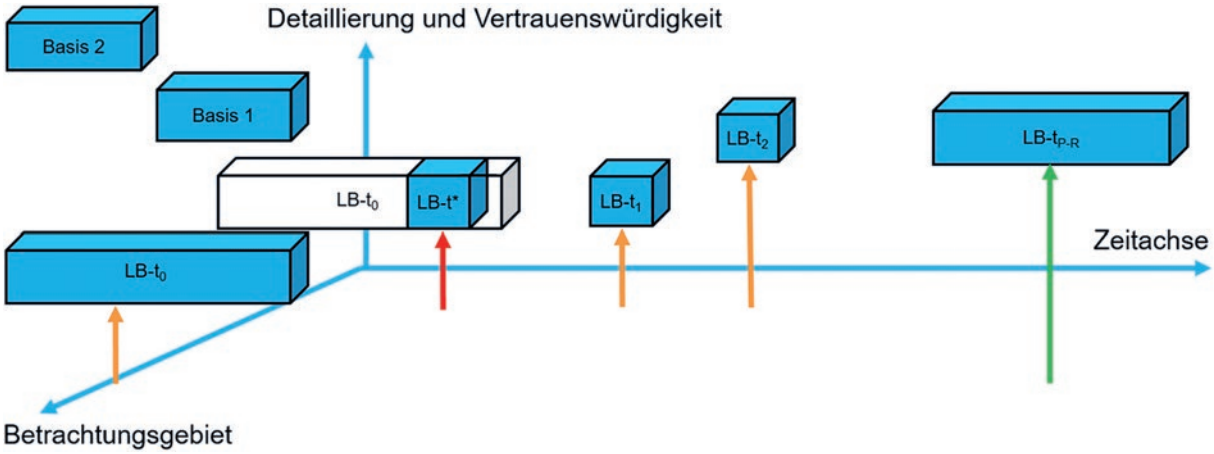


Bild 10 Konzeption für zeitabhängige Generierung von Lagebildern
Conception for the time-dependent assessment and reporting of disaster situation

LB-t_i bezeichnet Lagebilder (LB) zu unterschiedlichen Zeitpunkten t_i des Ereignisses: i = 0: vor, i = 1: während, i = 2: (unmittelbar und mittelbar danach) short und midterm, i = 3: longterm. Die Lage der LB-t_i-Boxen kennzeichnet den Grad der Detaillierung und die Größe des Betrachtungsgebiets und kann entweder in Abhängigkeit von den Erfordernissen spezifiziert werden bzw. generiert sich anhand der jeweiligen Datenverfügbarkeit.

Basisdaten für die zeitnahe Generierung von Lagebildern sind in Form der hydraulischen Berechnungsdaten der Hochwassergefahrenkarten (Basis 1) sowie in der Kennzeichnung der Bestandsbebauung und ihrer Verletzbarkeit (Basis 2) inkl. exponierter Lagen zu sehen. Die Basisdaten sind in einem Tool zusammenzuführen und die Lagebilder anwenderspezifisch bereitzustellen. Wichtig ist dabei die Steuerung der Informationsfülle. Wie geschlussfolgert werden kann, sind noch nicht alle Akteure mit ihren Datenerhebungen (wie z. B. Befliegung) in die Informationsketten eingebunden und der Datenaustausch gewährleistet oder zumindest rein konzeptionell geklärt.

Die Anforderung der Unterstützung durch andere Bundesländer folgt aus dem solidarischen Agieren im Sinne des Allgemeinwohls, ist aber derzeit über die Landesgrenzen hinausgehend noch nicht geregelt.

Dies betrifft auch die Einbindung der Expertise von wissenschaftlichen Einrichtungen, wie sie z. B. im Rahmen der Task Force Erdbeben erstmals beim Waldkirch-Erdbeben 2004 [28] angefordert und problemlos integriert werden konnte (s. a. Empfehlungen zur Risikostudie Erdbeben des BBK [29]).

(5) Eine dezentrale und auf verschiedene Stakeholder verteilbare Datenerhebung und -auswertung sollte das Rückgrat des Einsatzes digitaler Verfahren bilden und die kontinuierliche Fortschreibung und Verfeinerung von Modellen sowie die Anreicherung mit Zustandsdaten ermöglichen. Für eine zentralisierte und technisch leicht zugängliche Informationsbereitstellung sowie Lagevisualisierung haben sich Cloud- und Webtechnologien wie INFRA//TWIN bewährt.

5 Erste Szenarien für die (Re-)Interpretation

5.1 Reinterpretation des Einwirkungsszenarios

Die Reinterpretation der komplexen Einwirkungsbedingungen des Hochwassers 2021 entlang der Ahr ist derzeit Thema verschiedener Aktivitäten [1, 30] und noch nicht abgeschlossen. Die den Untersuchungen in [30] zugrunde liegenden Ergebnisse der hydraulischen Berechnungen wurden vom LfURLP für eine erste Reinterpretation der Schäden in den Untersuchungsgebieten Altenburg und Altenahr zur Verfügung gestellt. Den einzelnen detailliert erfassten Bauwerken [7] konnten damit Wasserstände und Fließgeschwindigkeiten zugewiesen werden.

Für die Erft im Bereich der historischen Altstadt von Bad Münstereifel ließen sich anhand der gemessenen Wasserstände an ca. 200 Gebäuden durch Verschneidung mit dem digitalen Geländemodell DGM 1 die Wasserstände an den anderen Gebäuden näherungsweise rekonstruieren. Eine Berücksichtigung der Fließgeschwindigkeit bleibt künftigen Untersuchungen vorbehalten.

5.2 Reinterpretation der Schäden

Die Bilder 11, 12 stellen die ersten Ergebnisse der Reinterpretation der strukturellen Schäden im Vergleich zu den tatsächlich beobachteten Schäden dar. Die Bilder 11a, 12a zeigen die beobachteten Schadensgrade, wie sie bei der Schadenserhebung unmittelbar nach dem Hochwasser vorgefunden wurden (Stand Juli 2021). Für die Untersuchungsgebiete entlang der Ahr wurden im Nachgang des Hochwassers die bis März 2022 notwendigen Abrisse dokumentiert [7]. Dem Bild 11b ist ebendies für das Untersuchungsgebiet Altenburg zu entnehmen. In der historischen Altstadt von Bad Münstereifel waren bis zu diesem Zeitpunkt keine Abrisse zu verzeichnen.

Für die Reinterpretation der Schäden wird die in [14] vorgestellte Methode zur Simulation von Hochwasserschäden angewendet. Für die Prognose der strukturellen Schäden werden jeweils 1000 Zufallsszenarien mit der Monte-Carlo-Methode ausgespielt. Die Berechnungsgrundlage bilden fragility functions, welche Wasserstand und Fließgeschwindigkeit sowie die zugewiesene Verletzbarkeitsklasse der einzelnen Bauwerke berücksichtigen [14]. Die simulative Methode erlaubt die Ausweisung der möglichen Streuung der strukturellen Schäden.

In den Bildern 11, 12 werden daher die 50 %- und 84 %-Fraktile der Schadensgrade dargestellt. Zusätzlich werden ein über alle betroffenen Gebäude gemittelter beobachteter Schadensgrad ($MD_{\mathrm{m,obs}}$) und ein gemittelter Schadensgrad für die Prognose ($MD_{\mathrm{m,calc}}$) für das jeweilige Untersuchungsgebiet angegeben. Die Abrisse in Bild 11b wurden nach [11] mit Schadensgrad D5 bewertet.

Die 50 %-Fraktil-Werte der berechneten Schadensgrade $MD_{\mathrm{m,calc}}$ (Bild 11c) zeigen eine überraschend gute Prognose der beobachteten Schadensgrade $MD_{\mathrm{m,obs}}$ (Bild 11a). Gebiete mit beobachteten Hotspots der Schädigung in Altenburg werden mit den 84 %-Fraktil-Werten (Bild 11d) noch deutlicher herausgestellt.

Auch die moderate strukturelle Schädigung in Bad Münstereifel lässt sich gut reinterpretieren (Bilder 12a–12c).

Die simulative Methode zur Schadensprognose ermöglicht auch die Ausweisung von finanziellen Verlustkenngrößen [14], die in künftigen Untersuchungen an den real beobachteten Schäden zu spiegeln wären, sobald belastbare offizielle Schadenstatistiken für die Untersuchungsgebiete verfügbar sind.

Derartige Szenarien lassen sich bei Vorhandensein der benötigten Daten (Bauwerksbestand und Einwirkungs-

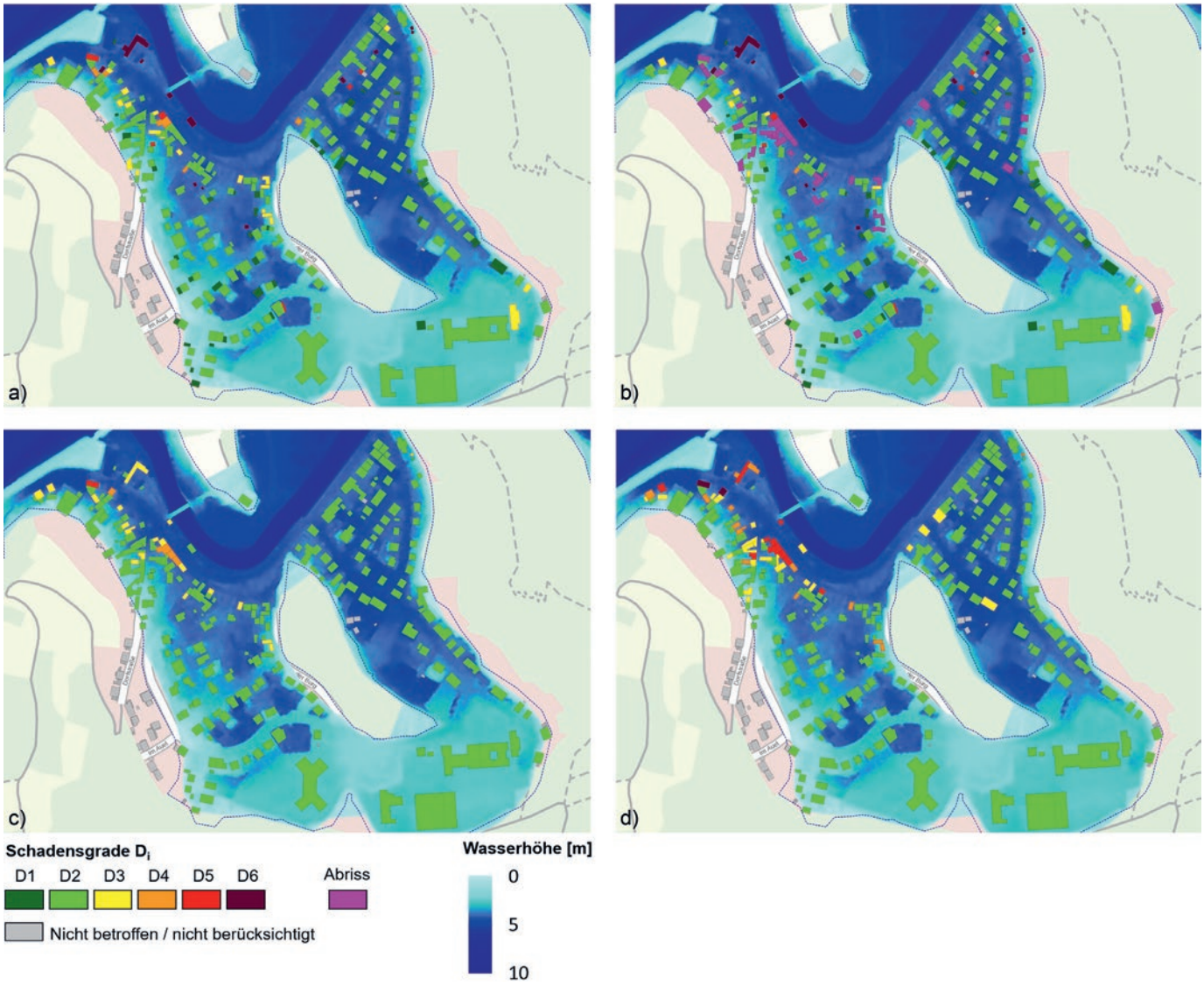


Bild 11 Vergleich der beobachteten und berechneten Schadensgrade für das Gebiet Altenburg: a) Beobachtung ($MD_{\mathrm{m,obs}}$ = 2,23), b) Beobachtung mit Abrissen – Stand März 2022 ($MD_{\mathrm{m,obs}}$ = 2,67), c) Simulation 50 %-Fraktile ($MD_{\mathrm{m,calc}}$ = 2,11), d) Simulation 84 %-Fraktile ($MD_{\mathrm{m,calc}}$ = 2,33)
Comparison of the observed and calculated damage grades for Altenburg: a) observation ($MD_{\mathrm{m,obs}}$ = 2.23), b) observation with demolitions – state Mar. 2022 ($MD_{\mathrm{m,obs}}$ = 2.67), c) simulation 50 % fractile ($MD_{\mathrm{m,calc}}$ = 2.11), d) simulation 84 % fractile ($MD_{\mathrm{m,calc}}$ = 2.33)

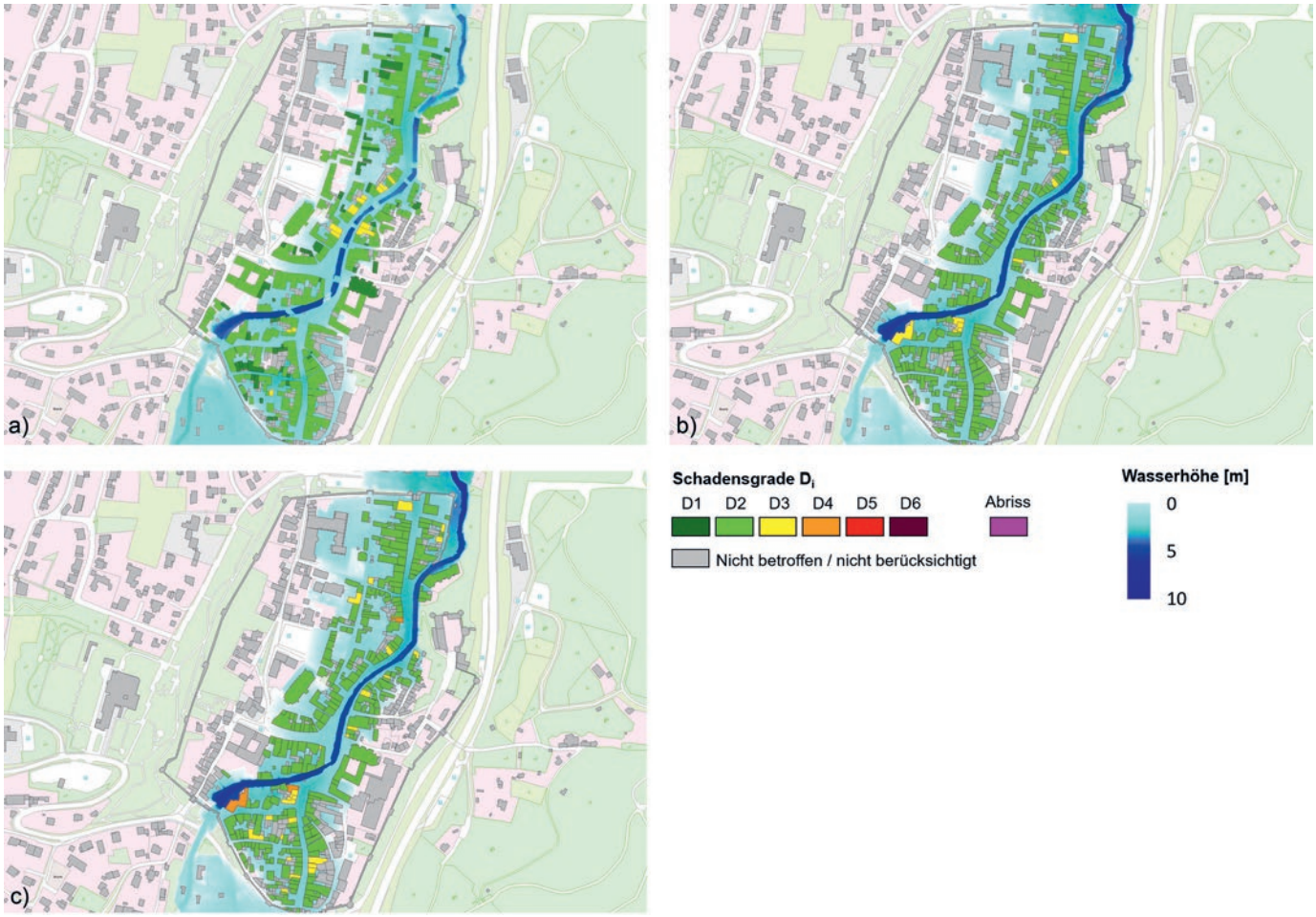


Bild 12 Vergleich der beobachteten und berechneten Schadensgrade für die historische Altstadt von Bad Münstereifel (Szenario: basierend auf den dokumentierten Hochwassermarken): a) Beobachtung ($MD_{m,obs}$ = 1,84), b) Simulation 50 %-Fraktile ($MD_{m,calc}$ = 1,95), c) Simulation 84 %-Fraktile ($MD_{m,calc}$ = 2,03)
Comparison of the observed and calculated damage grades for the historical old town of Bad Münstereifel: a) observation ($MD_{m,obs}$ = 1.84), b) simulation 50 % fractile ($MD_{m,calc}$ = 1.95), c) simulation 84 % fractile ($MD_{m,calc}$ = 2.03)

größen) erstellen. Die Erhebung der notwendigen Bestandsdaten und die Ermittlung realistischer Einwirkungsszenarien benötigen jedoch einen zeitlichen Aufwand, der eine Real-time-Erstellung von Lagebildern im Einsatzfall unrealistisch macht. Daher wären diese Daten schon im Vorfeld zu erheben. Das heißt, dass zu einem Zeitpunkt t_0 (Bild 10) die Bestandsdaten zur Bebauung bereitstehen müssen, ebenso wie ein Set passender Hochwasserszenarien, aus denen das realistischste anhand der beobachteten Wasserstände auszuwählen ist.

6 Schlussfolgerungen

In Spiegelung der nach einem Jahr vorliegenden Auswertungen wird Unterstützung benötigt, die Schnittstellen, Daten- und Informationskommunikation sowie Daten- und Informationsqualifikation (u. a. in Form von zeitabhängigen Lagebildern) zwischen Behörden und Einsatzkräften sicherzustellen und dabei aus dem konkreten Ereignis, den Abläufen und identifizierten Datenquellen kontrollierte (entscheidungsstützende) Daten- und Informationsströme herzustellen und diese letztlich (z. B. in einer Plattform digital) zu steuern.

Eine bisher unterschätzte oder als solche verdrängte Herausforderung besteht grundsätzlich in der Entwicklung einer Plattform-Strategie für Naturgefahren, die Kriterien für den Nachweis der Funktionsfähigkeit für das Zielereignis darstellen und auf den Einsatzfall zugeschnitten sein muss. Letzteres bedeutet, dass Betroffene und Einsatzkräfte unter Stresssituation aus Daten abgeleitete Informationen unkompliziert übermitteln und in ihrer Bearbeitung abrufen können. Gleichzeitig ist das erlangte Wissen für zukünftige Ereignisse zu bewahren bzw. für die Akteure verfügbar zu machen.

Organisations-, Arbeits- und Managementformen sollten am konkreten Extremereignis überprüft werden. Effiziente, zielorientierte Kommunikationswege unter Einsatz digitaler Medien sollten im Hinblick auf die Krisensituation im Ereignisfall identifiziert und in handlungs- und entscheidungstauglichen Plattformen (o. Ä.) integriert werden. Die Priorität des Bevölkerungsschutzes gilt uneingeschränkt und ist zu gewährleisten. Die Herausforderung besteht letztlich darin, der Komplexität der Aufgabenstellung durch einfache Lösungen gerecht zu werden. Eine wesentliche Zielstellung ist es, die verschiedenen Nutzergruppen (wie Behörden, Betriebe, Versorger und ggf. auch die Bevölkerung) zunächst auf eine Kommunika-

tionsebene zu bringen und anschließend die Interaktionen zwischen den verschiedenen Akteuren innerhalb der Ereignisphasen zu steuern bzw. überhaupt zu ermöglichen. Dies schließt neben der Gewährleistung der technischen Umsetzbarkeit ihre Etablierung und nicht zuletzt die Akzeptanz bei den intendierten Nutzergruppen ein.

Dank

Das Projekt „3D-Lageinformationen von durch Starkregen und Hochwasser betroffenen Gebieten“ wurde vom Ministerium für Heimat, Kommunales, Bau und Gleichstellung des Landes Nordrhein-Westfalen gefördert.

Besonderer Dank gilt M.Sc. Alexander Stanic, B.Sc. Florian Madeya von der Professur Modellierung und Simulation – Konstruktion sowie Marko Friedel von der Versuchstechnischen Einrichtung (VTE) der Bauhaus-Universität Weimar für die Drohnenbefliegungen und die Datenaufbereitung.

Die Autoren danken weiterhin den Teilnehmern der beiden im Rahmen des Projekts durchgeführten Workshops [3, 4] für ihre konstruktiven fachlichen Beiträge und das Engagement bei der weiteren Nachbereitung der diskutierten Fragestellungen.

Nachweis verwendeter Geodaten

- Copernicus Emergency Management Service, Mapping Activation ID EMSR517: Flood in Western Germany – Hydrology map. Daten: Copyright European Union (2021). http://emergency.copernicus.eu/mapping/list-of-components/EMSR517
- Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz (LfURLP), Geopackage mit den Layern (Wassertiefe, Fließgeschwindigkeit und Anschlaglinie für das Hochwasser 2021) für den Bereich Altenahr
- LVermGeoRP, dl-de/by-2-0, www.lvermgeo.rlp.de [Daten bearbeitet]
- OpenGeodata.NRW, 3D-Gebäudemodell NW LoD1, Datenlizenz Deutschland – Zero – Version 2.0
- OpenGeodata.NRW, ALKIS NW Grundrissdaten, Datenlizenz Deutschland – Zero – Version 2.0
- OpenStreetMap – veröffentlicht unter ODbL, Data Copyright 2021 Geofabrik GmbH
- WebAtlas RP – Amtlicher Internet-Kartendienst für Rheinland-Pfalz auf der Grundlage der Digitalen Landschaftsmodelle (ATKIS-DLM) und des Liegenschaftskatasters, Copyright GeoBasis-DE

Literatur

[1] KAHR (o. J.) *BMBF-Projekt KAHR für Rheinland-Pfalz und Nordrhein-Westfalen: Klima-Anpassung, Hochwasser und Resilienz* [online]. Aachen: RWTH Aachen Universität. https://hochwasser-kahr.de/index.php/de [Zugriff am: 22. Dez. 2022]

[2] SIFO – BMBF-Sicherheitsforschung (o. J.) *Schutz und Rettung von Menschen – Bewilligtes Projekt aus der Fördermaßnahme „Hochwasser 2021“* (HoWas2021: Governance und Kommunikation im Krisenfall des Hochwasserereignisses im Juli 2021) [online]. Bonn: Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF). https://www.sifo.de/sifo/de/projekte/schutz-und-rettung-von-menschen/howas-governance-undkommunikation/hochwasser_node.html [Zugriff am: 22. Aug. 2022]

[3] Bauhaus-Universität Weimar (2022) *3D-Lageinformationen von durch Starkregen und Hochwasser betroffenen Gebieten – Workshop: Synopse der Prozesse und Verfahrensweisen zum Hochwasser Juli 2021, 13. Januar 2022, Bornheim* [online]. Weimar: Bauhaus-Universität Weimar, Erdbebenzentrum. https://edac.biz/projekte/3d-lageinformationen-von-durch-starkregen-und-hochwasser-betroffenen-gebieten [Zugriff am: 22. Dez. 2022]

[4] Bauhaus-Universität Weimar (2022) *3D-Lageinformationen von durch Starkregen und Hochwasser betroffenen Gebieten – Workshop: Datenerhebung und Informationssysteme für ein erfolgreiches Hochwasserrisikomanagement, 9./10. November 2022, Bornheim* [online]. Weimar: Bauhaus-Universität Weimar, Erdbebenzentrum. https://edac.biz/projekte/3d-lageinformationen-von-durch-starkregen-und-hochwasser-betroffenen-gebieten [Zugriff am: 22. Dez. 2022]

[5] Europäische Kommission (o. J.) *Copernicus Emergency Management Service: Rapid Mapping* [online]. Brüssel: EU. https://emergency.copernicus.eu/mapping/ems/rapid-mapping-portfolio [Zugriff am: 22. Dez. 2022]

[6] Jacobs, C.; Iber, C. (2022) *Einsatz des Copernicus-EMS beim Hochwasser 2021 in Rheinland-Pfalz*. Berichtsreihe des Forums zum Hochwasserrisikomanagement, Band 13.

[7] Maiwald, H.; Schwarz, J.; Kaufmann, C.; Abrahamczyk, L. (2022) *Das Hochwasser 2021 – Ingenieuranalyse der Bauwerksschäden*. Bautechnik 99, H. 12, S. 878–890. https://doi.org/10.1002/bate.202200062

[8] Bezirksregierung Köln – Geobasis NRW, Dezernat 72 – Topographische Basisinformationen (2022) *Hochwasser21 Südwesten NRW*.

[9] Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt (2021) *Überschwemmungen in Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz Lageinformationen für die Rettungskräfte* [online]. Köln: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. https://www.dlr.de/content/de/artikel/news/2021/03/20210716_lageinformationen-fuer-die-rettungskraefte.html [Zugriff am: 22. Dez. 2022]

[10] GeoFly GmbH Magdeburg (o. J.) *Geofly. Focus the world* [online]. Magdeburg: Geofly GmbH. https://web.geofly.eu [Zugriff am: 22. Dez. 2022]

[11] Maiwald, H.; Schwarz, J. (2018) *Vereinheitlichte Schadensbeschreibung und Risikobewertung von Bauwerken unter extremen Naturgefahren*. Bautechnik 95, H. 10, S. 743–755. https://doi.org/10.1002/bate.201800009

[12] Maiwald, H.; Schwarz, J. (2014) *Schadensmodelle für extreme Hochwasser – Teil 1: Modellbildung und Validierung am Hochwasser 2002*. Bautechnik, 91, H. 3, S. 200–210. https://doi.org/10.1002/bate.201300101

[13] Maiwald, H.; Schwarz, J. (2020) *Simulative Erdbebenschadensmodellierung auf Grundlage der EMS-98 – Realitätsnähe und Prognosetauglichkeit*. Bautechnik 97, H. 4, S. 243–254, https://doi.org/10.1002/bate.201900064

[14] Maiwald, H.; Schwarz, J. (2022) *Simulative flood damage modelling taking into account inundation level and flow velocity: uncertainties and strategies for further refinement* in: Mambretti, S. [ed.] *Proceedings of the 8th International Conference on Flood and Urban Water Management*. FRIAR 2022 online, July 6–8, 2022. https://doi.org/10.2495/FRIAR220031

[15] Maiwald, H.; Schwarz, J.; Kaufmann, C.; Langhammer, T.; Golz, S.; Wehner, T. (2022) *Innovative Vulnerability and Risk Assessment of Urban Areas against Flood Events: Prognosis of Structural Damage with a New Approach Considering Flow Velocity*. Water 14, 2793. https://doi.org/10.3390/w14182793

[16] Morgenthal, G.; Rodehorst, V. (2021) *Digitale bildbasierte Zustandserfassung von Infrastrukturbauwerken – INFRA//TWIN, Deutscher Ingenieurpreis Straße und Verkehr 2021*. Straßenverkehrstechnik 65, H. 11, S. 851–853.

[17] Patt, H.; Jüpner, J. (2020) *Hochwasser-Handbuch*. Vieweg Wiesbaden: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-658-26743-8

[18] LfU; LUBW (o. J.) *LHP – Länderübergreifendes Hochwasser Portal. Klassifizierung der Hochwasser-Situation am Pegel* [online]. Augsburg: Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), Karlsruhe: Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW). https://www.hochwasserzentralen.de/info [Zugriff am: 17. Feb. 2023]

[19] LANUV (o. J.) *Pegeldaten online* [online]. Recklinghausen: Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen. https://www.lanuv.nrw.de/umwelt/wasser/wasserkreislauf/wasserstaende/pegeldaten-online [Zugriff am: 4. Aug. 2022]

[20] Hochwasserzentrum Sachsen (o. J.) *Alarmstufen und Hochwassermeldepegel* [online]. Dresden: Freistaat Sachsen. https://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/infosysteme/lhwz/hochwassermeldepegel-und-alarmstufen.html [Zugriff am: 4. Aug. 2022]

[21] BBK (o. J.) *Katastrophenschutzbehörde* [online]. Bonn: Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe. https://www.bbk.bund.de/SharedDocs/Glossareintraege/DE/K/katastrophenschutzbehoerde.html [Zugriff am: 5. Aug. 2022]

[22] Bundesland Sachsen (2005) *Verordnung des Sächsischen Staatsministeriums des Innern über den Katastrophenschutz im Freistaat Sachsen (Sächsische Katastrophenschutzverordnung – SächsKatSVO) vom 19.12.2005* [online]. Dresden: Sächsisches Staatsministerium. https://www.revosax.sachsen.de/vorschrift_gesamt/1315/26681.pdf [Zugriff am: 4. Aug. 2022]

[23] Jüpner, R. (2016) *Hochwassermanagement in der Einsatzphase. Hochwassermanagement II – Praxis des Hochwasserschutzes*. 4. Aufl. Weiterbildendes Studium Wasser und Umwelt, Bauhaus-Universität Weimar.

[24] Bundeswehr (2021) *Zwischenstand: Die Bundeswehr im Hochwasser-Katastropheneinsatz 2021* [online]. Berlin: Bundesministerium der Verteidigung. https://www.bundeswehr.de/de/aktuelles/meldungen/zwischenstand-bundeswehr-hochwasser-katastropheneinsatz-2021-5209064 [Zugriff am: 5. Aug. 2022]

[25] Röllecke, M.; Hoffmann, H. (2022) *Herausforderungen im Einsatz des THW bei der Bewältigung der Hochwasserkatastrophe 2021*. Berichtsreihe des Forums zum Hochwasserrisikomanagement, Band 13.

[26] Hohage, H. (2008) *Einsatztaktik bei Gebäudeschäden*. THW-Richtlinie.

[27] Maiwald, H.; Schwarz, J. (2022) *Ermittlung von Hochwasserschäden unter Berücksichtigung der Bauwerksverletzbarkeit, Erweitertes EDAC-Hochwasserschadensmodell*. scientific technical reports 01-22, Zentrum für die Ingenieuranalyse von Erdbebenschäden, Bauhaus-Universität Weimar. Weimar: Universitätsverlag.

[28] Schwarz, J.; Abrahamczyk, L.; Amstein, S.; Kaufmann, C.; Langhammer, T. (2006) *Das Waldkirch-Erdbeben (Baden-Württemberg) vom 5. Dezember 2004*. Bautechnik 83, H. 3, S. 202–208. https://doi.org/10.1002/bate.200610020

[29] BBK (2020) *Bericht zur Risikoanalyse im Bevölkerungsschutz 2019. Drucksache des Deutschen Bundstages 19/23825 vom 21.10.2020 mit dem Anhang Risikoanalyse Erdbeben*. Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe. Stand Feb. 2020.

[30] Bettmann, T. (2022) *Das Juli-Hochwasser 2021 in Rheinland-Pfalz*. Berichtsreihe des Forums zum Hochwasserrisikomanagement, Band 13.

Autor:innen

Dr.-Ing. Jochen Schwarz
schwarz@uni-weimar.de
Bauhaus-Universität Weimar
Zentrum für die Ingenieuranalyse von Erdbebenschäden
Marienstraße 13b
99421 Weimar

Dr.-Ing. Holger Maiwald (Korrespondenzautor)
holger.maiwald@uni-weimar.de
Bauhaus-Universität Weimar
Zentrum für die Ingenieuranalyse von Erdbebenschäden
Marienstraße 13b
99421 Weimar

Jun.-Prof. Dr.-Ing. Lars Abrahamczyk
lars.abrahamczyk@uni-weimar.de
Bauhaus-Universität Weimar
Professur Komplexe Tragwerke
Marienstraße 7a
99421 Weimar

Dipl.-Ing. Norman Hallermann
norman.hallermann@uni-weimar.de
Bauhaus-Universität Weimar
Professur Modellierung und Simulation – Konstruktion
Marienstraße 13b
99421 Weimar

Prof. Dr. Guido Morgenthal
guido.morgenthal@uni-weimar.de
Bauhaus-Universität Weimar
Professur Modellierung und Simulation – Konstruktion
Marienstraße 13b
99421 Weimar

Zitieren Sie diesen Beitrag

Schwarz, J.; Maiwald, H.; Abrahamczyk, L.; Hallermann, N.; Morgenthal, G. (2023) *Methoden für digitale 3D-Lagebilder: Erfahrungen aus dem Hochwasser 2021*. Bautechnik 100, H. 7, S. 358–373. https://doi.org/10.1002/bate.202300003

Dieser Aufsatz wurde in einem Peer-Review-Verfahren begutachtet. Eingereicht: 17. Januar 2023; angenommen: 7. März 2023.

Bauhaus-Universität Weimar
Zentrum für die Ingenieuranalyse von Erdbebenschäden
Earthquake Damage Analysis Center (EDAC)
Institut für Konstruktiven Ingenieurbau
Dr.-Ing. Jochen Schwarz
Marienstraße 13 B
99423 Weimar

Telefon +49 3643 584583
Telefax +49 3643 584590
schwarz@uni-weimar.de
www.edac.biz