

Linus Neitzke, Guilherme Samprogna Mohor & Tobias Sieg

Vergleichende Hochwasserschadensschätzungen anhand von Vor-Ort-Erhebungen und frei zugänglichen Daten nach dem Hochwasser 2021 an der Wupper

Comparative flood damage estimates based on on-site surveys and freely available data after the 2021 flood on the Wupper river

Die Schätzung monetärer Schäden nach Hochwasserereignissen beinhaltet noch viele Unsicherheiten. Einerseits sind die Schadensprozesse komplex und von mehreren Faktoren jenseits der Hochwasserstärke abhängig, andererseits ist die Verfügbarkeit von notwendigen Eingangsdaten oft gering, was eine weitere Unsicherheit darstellt. Daher untersucht dieser Beitrag den Einfluss verschiedener Datengrundlagen auf die Hochwasserschadenschätzung am Beispiel betroffener Gebiete in Wuppertal. Im Einzelnen werden die folgenden Daten angewendet und verglichen: Eine Übertragung der Ergebnisse von Befragungen aus vergangenen Ereignissen in Deutschland, die Verschneidung von Hochwassergefahrenkarten mit Katasterdaten aus OpenStreetMap, und Vor-Ort-Erhebungen als genaueste Datenquelle. Die Ergebnisse zeigen, dass die Anzahl betroffener Gebäude die wichtigste Information für die Hochwasserschadensabschätzung ist. Entscheidend dafür sind wiederum eine gute Abgrenzung der überfluteten Bereiche und aktuelle Katasterdaten.

Schlagwörter: Hochwasserschadensmodell, Gefahrenkarte, Datenerhebung, OpenStreetMap, Gebäudeschäden

The estimation of monetary damages after flood events still contains many uncertainties. On the one hand, damage processes are complex and depend on several factors beyond flood intensity; on the other hand, the availability of necessary input data is often low, which constitutes a further uncertainty. Therefore, this paper investigates the influence of different data bases on flood damage estimation using the example of affected areas in Wuppertal. In detail, the following data sets are applied and compared: survey data from past events in Germany, the intersection of flood hazard maps with cadastral data (OpenStreetMap), and on-site surveys as the most accurate data source. The results show that the number of affected buildings is the most important information for flood damage estimation. Good delineation of flooded areas and up-to-date cadastral data are therefore critical.

Keywords: Flood damage model, Hazard map, Data collection, OpenStreetMap, Building damage

1 Einleitung

Von allen Naturkatastrophen verursachen Hochwasser den größten ökonomischen Schaden in Europa (EEA, 2010). In den Jahren von 2000 bis 2019 forderten Hochwasserereignisse in Europa über 1.000 Menschenleben und verursachten Schäden von über 100 Mrd. € (PETRUCCI et al., 2019; EM-DAT 2024). Davon entfielen 20 Mrd. € allein auf das Hochwasser im Jahr 2002 (EEA, 2010). Auch in Deutschland sind die durch Hochwasser verursachten Schäden signifikant, denn es sind oft eine Vielzahl von Wohngebäuden betroffen: Fast ein Viertel der durch das Hochwasser im Juni 2013 in Deutschland verursachten Schäden von 6,67 Mrd. € ist dem privaten Wohnsektor zuzuordnen (BMI, 2013).

Das Hochwasserrisiko wird durch die drei Komponenten Gefahr, Exposition und Vulnerabilität beschrieben. In diesem Kontext umfasst die Komponente Gefahr die Charakteristika des Hochwassers, wie zum Beispiel die Überflutungsfläche, Überflutungshöhe oder Überflutungsdauer. Die Komponente Exposition bezieht sich auf alle Elemente, welche von dem Hochwasser betroffen sein könnten. Dies können zum Beispiel Personen, Gebäude oder Infrastrukturen sein. Die Komponente Vulnerabilität beschreibt die Anfälligkeit der exponierten Elemente. Diese Anfälligkeit wird mit Hilfe von Hochwasserschadensmodellen geschätzt (WARD et al., 2020).

Hochwasserschäden können in direkte und indirekte Schäden unterteilt werden. Direkte Schäden entstehen durch den physischen Kontakt mit dem Hochwasser, indirekte Schäden liegen räumlich oder zeitlich außerhalb des Hochwasserereignisses, werden aber durch das Hochwasser ausgelöst. Weiterhin können beide Schadensarten in tangible (monetär bewertbare) und intangible Schäden unterteilt werden (THIEKEN, 2008).

Abbildung 1 zeigt den schematischen Prozess von der Modellierung des Hochwasserrisikos bis zur Entscheidungsfindung. Das Ziel ist die Bereitstellung von Informationen für Entscheidungsträger und somit die Förderung einer resilienten Gesellschaft. Ein effizientes Hochwasserrisikomanagement benötigt verlässliche Risikoanalysen, die neben der Simulation der Gefährdung auch eine Abschätzung der zu erwartenden Schäden berücksichtigen, z. B. um direkt nach dem Ereignis finanzielle Mittel für den Wiederaufbau bereitzustellen.

Mit Hilfe von Hochwasserschadensmodellen wird der Zusammenhang zwischen den Eigenschaften des Hochwasserereignisses und dem potenziellen Schadensgrad beschrieben (GERL et al., 2016). Der Mechanismus hinter der Entstehung von Hochwasserschäden ist komplex und hängt von verschiedenen Einflussfaktoren ab (KELMAN & SPENCE, 2004). Nach THIEKEN et al. (2005) kann der Schadensprozess als Zusammenspiel von schadensverursachenden Faktoren und Widerstandsfaktoren

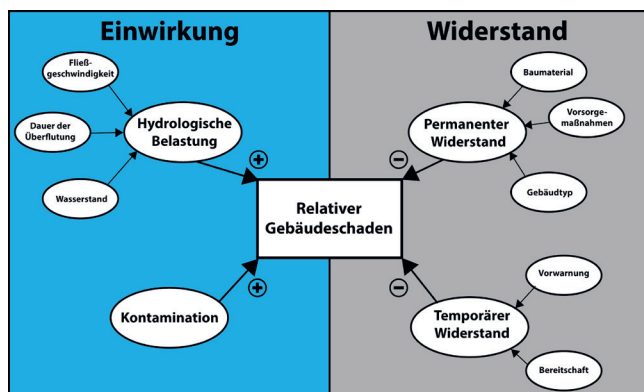
**Abbildung 1**

Prozessschema des Hochwasserrisikomanagements, basierend auf STEINHAUSEN (2022).

Process diagram of flood risk management, based on STEINHAUSEN (2022).

verstanden werden. Abbildung 2 zeigt die physikalischen Eigenschaften des Hochwassers, die physikalischen Eigenschaften der betroffenen Gebäude und die sozioökonomischen Umstände als Einflussfaktoren auf den relativen Schaden. Die Entwicklung eines Hochwasserschadensmodells, das alle Einflussfaktoren berücksichtigt, stellt eine große Herausforderung dar, besonders aufgrund von Wissenslücken im Bereich der Einflussfaktoren und deren Interaktion sowie aufgrund einer limitierten Datenverfügbarkeit (MERZ et al., 2010).

Neben dem angewendeten Hochwasserschadensmodell spielt die genutzte Datengrundlage eine wichtige Rolle. Vor-Ort-Erhebungen liefern detaillierte Informationen über das Hochwasserereignis. Diese Art der Aufnahme ist jedoch kosten- und zeitintensiv (LAUDAN et al., 2017). Datengrundlagen, die auf Fernerkundungsdaten und/oder hydrologischen Modellen basieren, sind oft mit großen Ungenauigkeiten verbunden, besonders auf der Mikro- und Mesoskala (SIEG & THIEKEN, 2022). Eine weitere mögliche Grundlage stellen Befragungsdaten über vergangenen Hochwasserereignisse dar. Zuletzt ist es auch eine Option, frei verfügbare Daten einzubeziehen, um die Risikokomponenten darzustellen. Beispielsweise können aufgrund fehlender Pegel und/oder nicht zur Verfügung stehender hydrologischer und hydraulischer Modelle, die eine Echtzeitvorhersage oder eine unmittelbare Simulation des Ereignisses liefern könnten, Hochwassergefahrenkarten (HWGK) als Proxy für die Gefahr benutzt werden. Daraus lässt sich dann eine erste Schätzung ableiten, falls die HWGK eine plausible Überflutungsfläche ausweist. Das ist eine wichtige Grundlage für die Risikokommunikation und Warnungen.

**Abbildung 2**

Einflussfaktoren auf den relativen Gebäudeschaden, basierend auf THIEKEN et al. (2005).

Influencing factors for relative building damage, based on THIEKEN et al. (2005).

Daneben kann das freie Geoinformationssystem „OpenStreet-Map“ (OSM CONTRIBUTORS, 2022) als Quelle für Katasterdaten dienen und Expositions- und Vulnerabilitätsmerkmale liefern. Es enthält eine zuverlässige Geodatenbank mit Gebäudegeometrien, die für die zivile Nutzung frei zugänglich ist (BARRINGTON-LEIGH & MILLARD-BALL, 2017) und die schon erfolgreich für die Hochwasserschadenabschätzung eingesetzt wurde (CERRI et al., 2021). Darüber hinaus sind darin neben Gebäudegeometrien auch Landnutzungsinformationen enthalten, die eine Differenzierung von Wohngebäuden und anderen Nutzungsformen, wie zum Beispiel Industriebauwerken, ermöglichen.

Der Einfluss der Datengrundlagen auf den geschätzten Schaden wurde bisher wenig untersucht (SIEG & THIEKEN, 2022). Insbesondere die Bedeutung der Datenerhebung vor Ort war für die Schadensschätzung weitgehend unklar. Das Ziel dieser Studie ist daher die Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Datensätze auf den modellierten Hochwasserschaden an Wohngebäuden. Dazu kommen Random-Forest-Modelle zum Einsatz, um Schadensschätzungen an Wohngebäuden in zwei Stadtteilen von Wuppertal, Beyenburg und Kohlfurth, für das Hochwasser im Juli 2021 zu berechnen. Die hierfür notwendigen Datensätze wurden mit unterschiedlichen Ansätzen wie Ortsbegehungen nach dem Ereignis, Hochwassergefahrenkarten und Befragungsdaten erstellt. Ein anschließender Vergleich der geschätzten Schäden und der identifizierten betroffenen Gebäude zeigt die Unterschiede der Ansätze.

2 Das Hochwasser im Juli 2021

Im Juli 2021 verursachte das Tiefdruckgebiet „Bernd“ eine Hochwasserkatastrophe in Belgien, Deutschland, Luxemburg und den Niederlanden. In Mitteleuropa starben über 240 Menschen, davon 190 in Deutschland. Es entstand ein Schaden von mehr als 40 Mrd. € (MUNICH RE, 2022). Gemessen an der Opferzahl ist das Hochwasser nach der Sturmflut von 1962 die schwerste nationale Naturkatastrophe in Deutschland (SCHNEIDER & GEBAUER, 2021).

In der Nacht vom 13. auf den 14. Juli 2021 lag ein quer durch Deutschland verlaufender Tiefdruckkomplex vor und sorgte für starke Gewitter und enorme Niederschlagsmengen. Die Bundesländer Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz waren besonders betroffen. So konnte im Einzugsgebiet der Wupper für den 12. bis 14. Juli 2021 eine gesamte Niederschlagssumme von 143,7 mm gemessen werden (JUNGHÄNEL et al., 2021). In nur wenigen Tagen fiel damit deutlich mehr als der durchschnittliche Juli-Gesamtniederschlag, der – bezogen auf die Referenzperiode 1991 bis 2020 – bei 100,7 mm liegt (JUNGHÄNEL et al., 2021). In Verbindung mit den durch die vorherige Wetterlage annähernd gesättigten Böden führten diese extremen Niederschläge an

vielen Flüssen zu heftigen Überflutungen (SCHÄFER et al., 2021). In Nordrhein-Westfalen gehörte Wuppertal zu den stark betroffenen Städten, ausgelöst durch die Ausuferungen der Wupper (WUPPERVERBAND, 2021).

Die Wupper entspringt an der Grenze zwischen dem Bergischen Land und dem Sauerland und mündet nach 117 km in den Rhein. Das 827 km² große Einzugsgebiet ist geprägt durch einen hohen Siedlungsdruck. Der Flussverlauf ist an vielen Stellen eingengt (HOBUS et al., 2005) und bietet wenig Retentionsflächen für den Hochwasserschutz. Abbildung 3 stellt die Hotspots der Schadensmeldungen in Wuppertal dar. Es handelt sich dabei um eine quantitative Betrachtung, d. h. die Karte basiert auf der Anzahl an Schäden, die dem Wuppertalverband gemeldet wurden. Neben einigen Hotspots in der Wuppertaler Innenstadt liegt der Schwerpunkt der Schadensmeldungen in den Stadtteilen Beyenburg und Kohlfurth. Beide betroffenen Untersuchungsgebiete sind unmittelbar an der Wupper gelegen.

Beyenburg ist ein östlicher Stadtteil von Wuppertal. Die vom Hochwasser betroffene Altstadt liegt in einer Fluss Schleife unterhalb des Beyenburger Stausees. Der historische Ortskern in der Wupperschleife ist geprägt von vielen denkmalgeschützten Wohngebäuden im bergischen Baustil. Die ersten Überschwem-

mungen traten am 14. Juli 2021 gegen 18:00 Uhr auf. Innerhalb kurzer Zeit verschärfte sich die Lage, sodass kurz nach Mitternacht die maximale Fluthöhe erreicht wurde. Diese Situation bestand bis zum späten Nachmittag des folgenden Tages. Ab diesem Zeitpunkt begann der Wasserstand langsam zu sinken.

Am Mittag des 16. Juli 2021 war das Wasser überwiegend aus den betroffenen Gebäuden abgeflossen (WUPPERVERBAND, 2022c). Der beschriebene Hochwasserverlauf spiegelt sich auch in der Abflussmessung am Beyenburger Stausee wider (Abb. 4). Ab dem 14. Juli 2021, 11:30 Uhr stieg der gemessene Abfluss stark an und erreichte am 15. Juli 2021 um 00:30 Uhr den gemessenen Höchstwert von 174,01 m³/s. Etwa 12 Stunden später fing der gemessene Abfluss an, deutlich zu sinken, und erreichte am Nachmittag des 17. Juli 2021 die vor dem Hochwasserereignis herrschende Ausgangssituation.

Der Stadtteil Kohlfurth liegt auf der linken Seite der Wupper im Südwesten von Wuppertal. Das Stadtbild ist geprägt von einer Mischung aus Wohn- und Industriegebäuden. In Kohlfurth verlief das Hochwasserereignis ähnlich wie in Beyenburg. Die ersten massiven Überflutungen traten am 14. Juli 2021 gegen 19:30 Uhr auf. Nach circa 40 Stunden war das Wasser wieder abgeflossen (WUPPERVERBAND, 2022c).

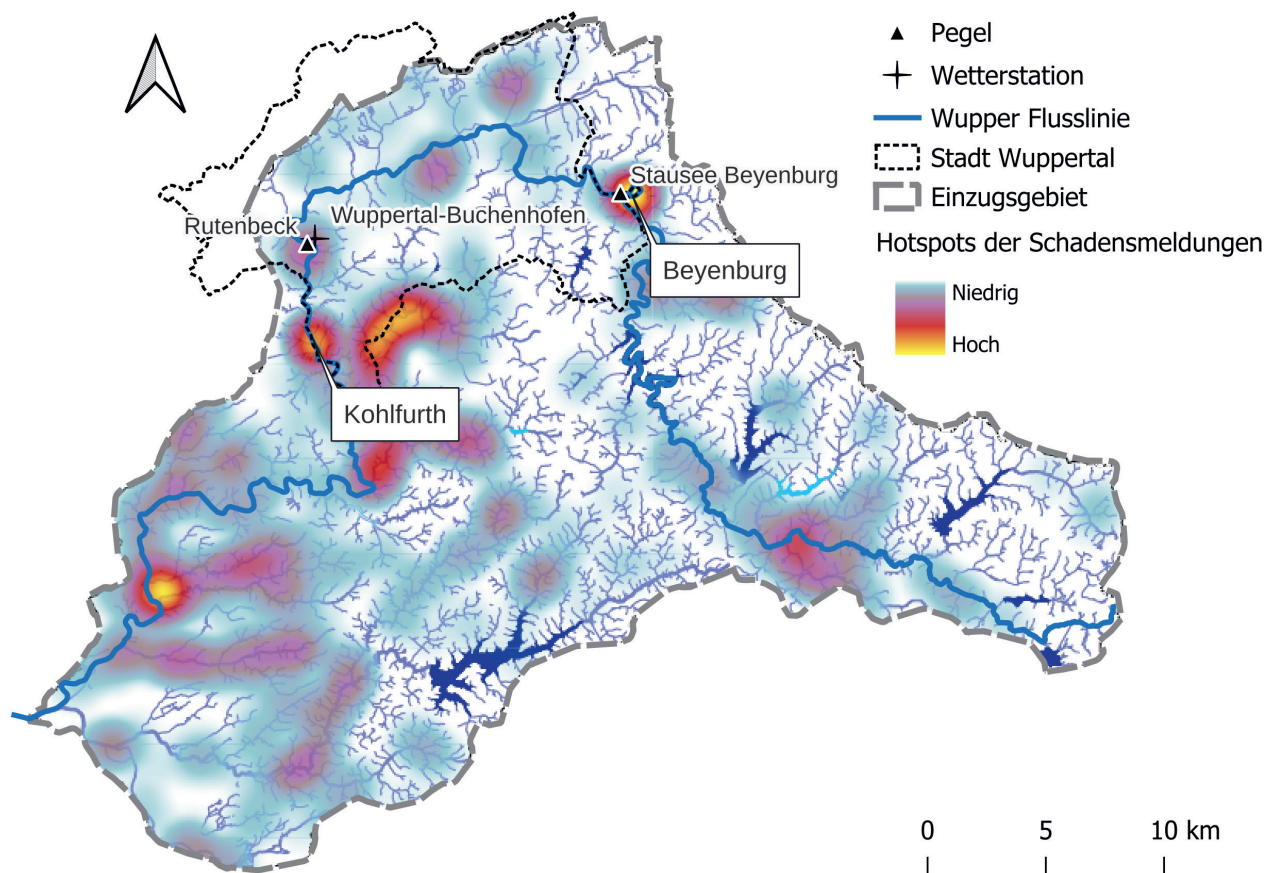
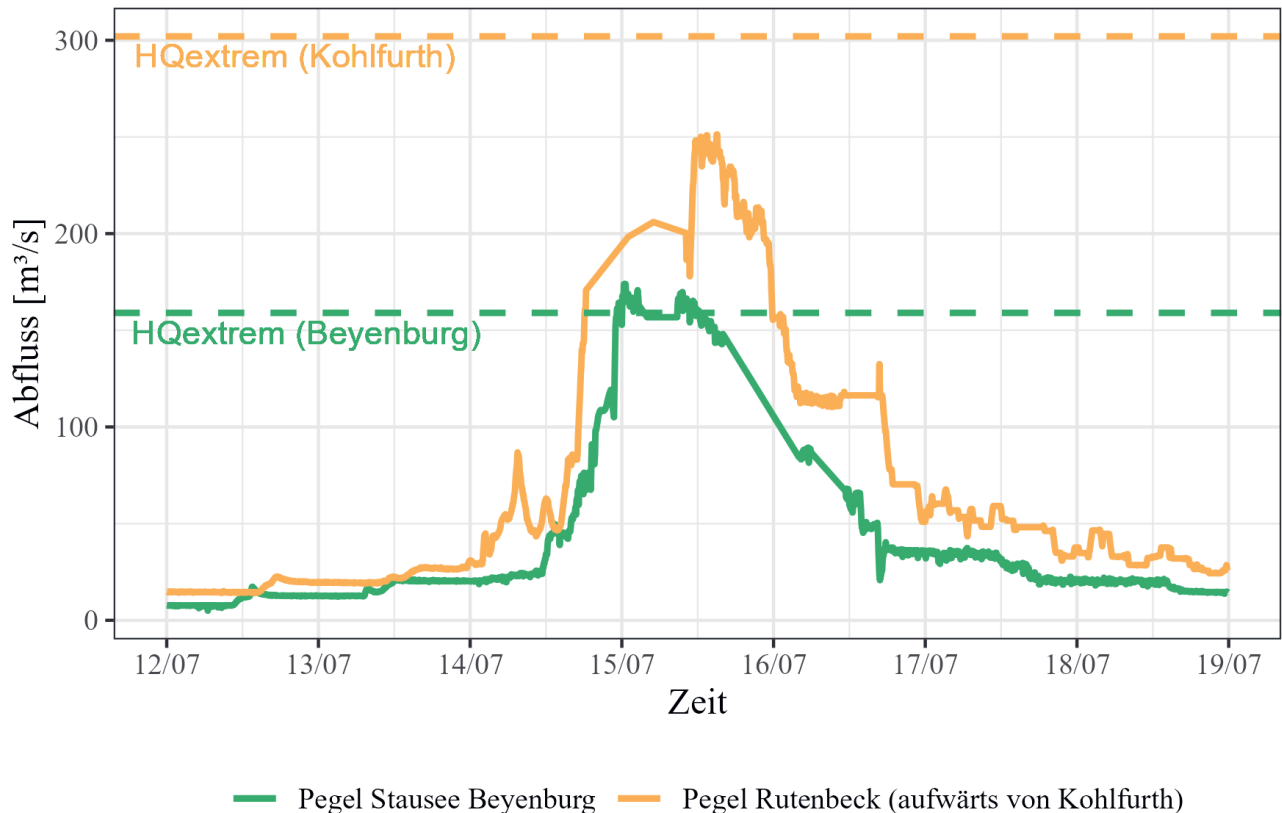


Abbildung 3

Hotspots der Schadensmeldungen in Wuppertal, basierend auf Wuppertalverband (2022a). Weitere Datenquellen: Einzugsgebietsgrenzen: Hydrologischer Atlas von Deutschland (BfG, 2018). Verwaltungsgebiete: GeoBasis-DE/BKG 2021. Fließgewässer: GEOPortal.NRW, 2022. Pegel: WMS Wuppertalverband, 2023. Wetterstation: DWD, 2023.

Hotspots of damage reports in Wuppertal, based on WUPPERVERBAND (2022a).

**Abbildung 4**

Abfluss der Wupper, gemessen am Pegel Stausee Beyenburg und Pegel Rutenbeck (circa fünf Kilometer flussaufwärts von Kohlfurth). Basierend auf Wupperverband (2022b).

Discharge measurements for the river Wupper at stations Stausee Beyenburg and Rutenbeck (ca. 5 km upstream from Kohlfurth). Based on Wupperverband (2022b).

3 Daten und Methoden

Eine Erhebung der betroffenen Gebäude ermöglicht in Kombination mit einem Hochwasserschadensmodell eine Abschätzung der direkten, tangiblen Schäden an Wohngebäuden. Für diese Untersuchung werden drei auf unterschiedlichen Datengrundlagen basierende Datensätze erstellt. Nach einer Erläuterung des theoretischen Hintergrundes für die Schadensschätzung über mathematisch-statistische Modelle erfolgt als nächstes die detaillierte Beschreibung des Random-Forest-Schadensmodells und seiner Anwendung in Wuppertal.

3.1 Methoden der Schadensschätzung

In der Literatur findet sich eine Vielzahl von unterschiedlichen Modellen zur Schätzung von Hochwasserschäden. Einen Überblick über verschiedene Modelle gibt GERL et al. (2016). Die Modellart ist dabei ein wichtiges Unterscheidungsmerkmal; unterschieden werden empirische und synthetische Modelle (KRON, 2007). Empirische Modelle basieren auf gesammelten Daten nach Hochwasserereignissen (MERZ et al., 2004), synthetische Modelle hingegen nutzen Expertenwissen auf Basis von „Was-wäre-wenn“-Analysen (PENNING-ROWSELL et al., 2005). Ein Großteil der Schadensmodelle ist empirisch. Synthetische Modelle finden vor allem bei einer limitierten Datenverfügbarkeit Anwendung (GERL et al., 2016).

Das Modellkonzept ist ein weiteres Merkmal zur Differenzierung von Hochwasserschadensmodellen. Hierbei wird zwischen deterministischen und probabilistischen Modellen unterschieden. Während deterministische Modelle eine Punktschätzung des Schadens bereitstellen, liefern probabilistische Schadensmodelle neben der Schadensschätzung auch eine Quantifizierung der Unsicherheit und damit die Möglichkeit, einem geschätzten Schaden eine Auftretswahrscheinlichkeit zuzuordnen (STEINHAUSEN et al., 2020). Die Anzahl an berücksichtigten Variablen ist ein weiteres, wichtiges Kriterium für Hochwasserschadensmodelle. Univariable Modelle basieren auf der Annahme, dass der entstandene Schaden nur von einer Variablen abhängt. Das ist in der Regel die Höhe der Überflutung, d. h. der Wasserstand am oder im Gebäude: die sogenannte Über- bzw. Einstauhöhe. Dagegen berücksichtigen multivariable Modelle eine Vielzahl von Variablen, beispielsweise Überflutungshöhe, Überflutungsdauer und Kontaminationen.

Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal ist die Metrik des geschätzten Schadens. Die Zielvariable wird entweder als relativer oder als absoluter Schaden angegeben. Eine Unterscheidung nach Anwendungssektoren, zum Beispiel private Haushalte, Industrie oder Landwirtschaft, ist ebenso möglich wie eine Unterscheidung nach der räumlichen Auflösung (GERL et al., 2016). Auf der Mikroskala werden einzelne Gebäude betrachtet. Die Mesoskala arbeitet mit aggregierten Einheiten wie Landnutzungsklasse oder Region (MERZ et al., 2010).

Weit verbreitet sind Wasserstand-Schadens-Funktionen (MEYER et al., 2013); dies sind in der Regel univariate Modelle, die den Wasserstand einen (relativen oder absoluten) Schaden zuweisen. Solche Schätzungen sind jedoch mit großen Unsicherheiten verbunden (MERZ et al., 2004). Zudem haben THIEKEN et al. (2005) gezeigt (Abb. 2), dass der Hochwasserschaden neben der Überflutungshöhe von einer Vielzahl an Variablen abhängig ist. Andere Größen, wie beispielsweise Überflutungsdauer, Kontamination, Vorsorge und der exponierte Gebäudetyp, müssen für eine genauere Schätzung berücksichtigt werden. Daher wurden in den vergangenen Jahren multivariable Modelle entwickelt, die eine Reihe von verschiedenen Variablen berücksichtigen. Sie liefern eine genauere Schadensschätzung, sofern eine entsprechend detaillierte Datengrundlage verfügbar ist (THIEKEN et al., 2008; SCHRÖTER et al., 2014).

Mittlerweile gibt es eine Vielzahl multivariable Modellansätze, die für die Hochwasserschadenschätzung verwendet werden. Probabilistische Modelle wie Bayessche Netze (SCHRÖTER et al., 2014; SCHOPPA et al., 2020) oder Bayessche Regressionsmodelle (SAIRAM et al., 2019; MOHOR et al., 2021) werden beispielsweise verwendet, um inhärente Unsicherheiten zu betrachten. Eine weitere Möglichkeit sind Modelle, die auf Entscheidungsbaum-basieren (SCHRÖTER et al., 2014; MERZ et al., 2013). Diese Modelle können ebenfalls mehrere Eingangsvariablen verwenden und liefern in der Regel robuste Schadensschätzungen (MERZ et al., 2013).

In dieser Studie wurden Random-Forest-Modelle verwendet, um die Schäden an Wohngebäuden in Beyenburg und Kohlfurth zu berechnen. Random Forests sind Algorithmen des maschinellen Lernens zur Lösung von Klassifizierungs- und Regressionsproblemen (BREIMAN, 2001). Ein solcher Algorithmus ist mit geringem

Rechenaufwand in der Lage, große Datenmengen, komplexe und hochdimensionale Datenstrukturen sowie korrelierte Kovariablen zu verarbeiten (CUTLER et al., 2012; SCORNET et al., 2015). In der wissenschaftlichen Literatur finden sich einige Anwendungen von Random Forests zur Hochwasserschadenschätzung (SIEG et al., 2017; MERZ et al., 2013; SCHOPPA et al., 2020).

Der Algorithmus erzeugt unter zuvor festgelegten Hyperparametern eine Vielzahl von nicht-korrelierten Entscheidungsbäumen. Diese werden auf Basis von Bootstrap-Stichproben, d. h. Ziehen mit Zurücklegen, aus dem Trainingsdatensatz gebildet, wobei für jeden Split in jedem Entscheidungsbaum eine zufällige Variablenselektion verwendet wird. Dieser Parameter wird modellintern „mtry“ genannt. So reduziert sich die Korrelation zwischen den einzelnen Bäumen, ohne dass die Varianz des gemittelten Schätzers stark ansteigt; das verbessert die Schätzgenauigkeit. Im Regressionsfall ergibt sich die metrische Zielvariable aus dem Mittelwert der einzelnen Entscheidungsbäume. Bei Klassifikationen wird der Beobachtung jene Klasse zugeordnet, die am häufigsten unter allen Entscheidungsbäumen auftritt (HASTIE et al., 2009). Jeder Entscheidungsbaum entspricht somit einem kleinen eigenständigen Modell und liefert damit einen Beitrag zur Gesamtentscheidung. Dadurch wäre es im Prinzip möglich, eine Verteilung der Schadensmodelle abzuleiten und so ihre Auftrittswahrscheinlichkeit zu bestimmen.

Eine Besonderheit des Random Forests stellen die Out-of-Bag (OOB) Beobachtungen dar. Nur etwa zwei Drittel der Trainingsdaten werden für die Konstruktion eines Baumes verwendet (In-the-Bag), etwa ein Drittel bleibt ungenutzt. Mit diesen OOB-Prädiktoren ist es im Anschluss möglich, den OOB-Fehler des Random Forests sowie eine Variablenwichtigkeit zu bestimmen (HASTIE et al., 2009). Abbildung 5 zeigt eine schematische Dar-

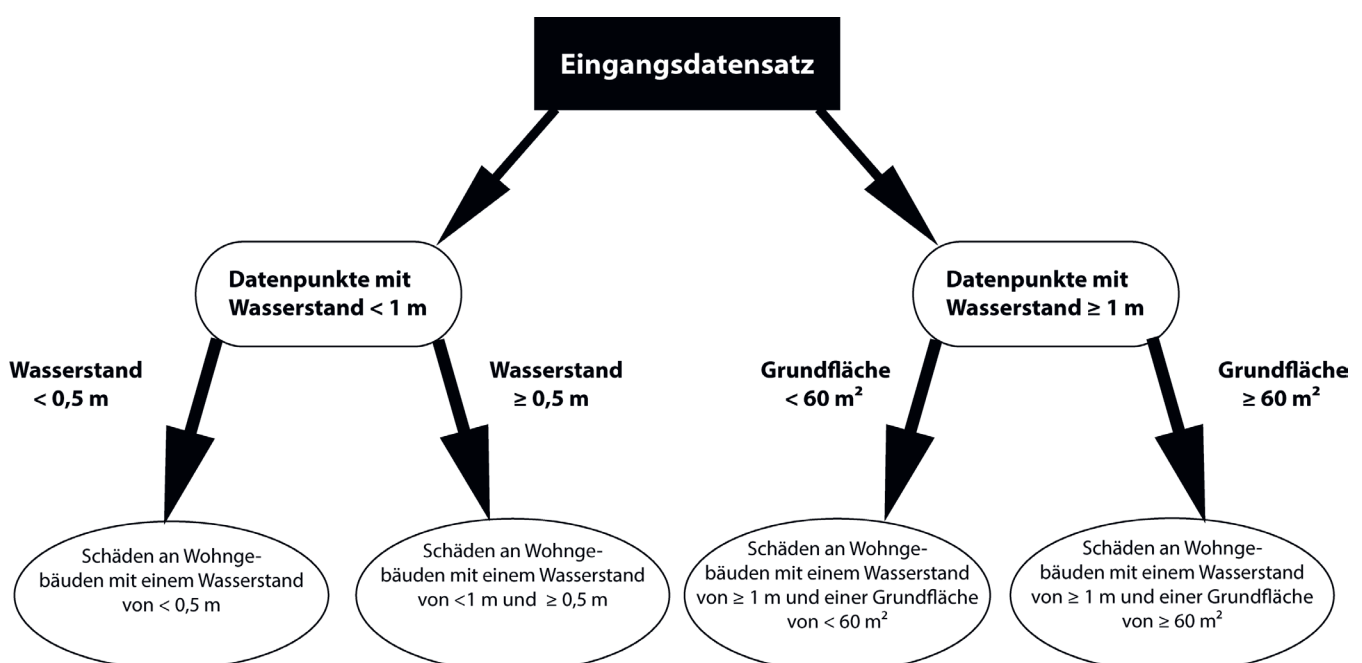


Abbildung 5
Schematische Darstellung eines Entscheidungsbaumes, verändert nach SIEG et al. (2017).
Illustration of a decision tree, modified from SIEG et al. (2017).

stellung eines Entscheidungsbaumes im Kontext einer Hochwasserschadensschätzung. Die Zielvariable „relativer Schaden“ wird hier mit Hilfe der Prädiktorvariablen „Wasserstand“ und „Gebäudegrundfläche“ geschätzt.

In der vorliegenden Studie dienten Befragungsdaten von Betroffenen nach Hochwasserereignissen in den Jahren 2002 und 2013 als Trainingsdatensatz für die Ableitung des Entscheidungsbaums (KREIBICH et al., 2005; THIEKEN et al., 2016). Für die Bildung der Entscheidungsbäume finden sich in der Literatur unterschiedliche Algorithmen, unter anderem die häufig verwendeten Algorithmen CART (Classification and Regression Trees) und CIT (Conditional Inference Tree) (WEI et al., 2015). In dieser Arbeit wurde der Algorithmus CIT verwendet, da dieser besonders für Datensätze mit Variablen unterschiedlicher Skalen und Splitmöglichkeiten geeignet ist (SIEG et al., 2017). Alle Analysen erfolgten mit der statistischen Software R, Version 4.2.1 (R CORE TEAM,

2022). Das R-Package party (Version 1.3) wurde zur Berechnung des Random Forest genutzt (HOTHORN et al., 2010). Jeder Random Forest besteht aus 500 Bäumen ($n_{tree} = 500$), drei Variablen werden innerhalb eines Baumes als Splitkandidaten berücksichtigt ($m_{try} = 3$).

3.2 Datengrundlage und -verarbeitung

Die Auswahl der verwendeten Variablen orientiert sich an Abbildung 2. Tabelle 1 führt die für die Schadensschätzung genutzten Variablen auf. Die Intensität des Hochwassers wird im Modell durch die Ereignisvariablen Wasserstand, Dauer der Überflutung und Kontamination beschrieben. Merkmale der exponierten Gebäude, wie Gebäudegrundfläche und private Vorsorgemaßnahmen, die hier als „Expositions- und Vulnerabilitätsvariablen“ zugeordnet werden, beschreiben die Widerstandsfähigkeit betroffener Wohngebäude gegenüber Hochwasser (STEINHAUSEN et al., 2020).

Tabelle 1 Übersicht der für die Schadensschätzung genutzten Variablen. <i>Overview of predictor variables for the damage estimation.</i>				
Energievariablen	Ausprägung ^a	Ansatz ^b	Datensatz	Verteilung
Wasserstand	S: 30 – 120 cm O: 1 – 5 ⁱ S: 0 – 960 cm	VO HWGK Sample	Vor-Ort-Erhebung HWGK HQextrem Befragungsdaten	Gamma
Dauer der Überflutung	S: 36 – 72 h S: 0 – 1.140 h S: 0 – 1.140 h	VO HWGK Sample	Vor-Ort-Erhebung Befragungsdaten Befragungsdaten	Gamma Gamma
Kontamination ^c	O: 0 O: 0 – 2 O: 0 – 2	VO HWGK Sample	Vor-Ort-Erhebung Befragungsdaten Befragungsdaten	Multinomial Multinomial
Expositions- und Vulnerabilitätsvariablen				
Private Vorsorgemaßnahmen ^d	O: 0 – 1 O: 0 – 48 O: 0 – 48	VO HWGK Sample	Vor-Ort-Erhebung Befragungsdaten Befragungsdaten	Multinomial Multinomial
Brutto-Grundfläche	S: 10 – 331 m ² S: 0 – 969 m ² S: 129 – 969 m ²	VO HWGK Sample	OpenStreetMap OpenStreetMap Offizielle Statistik	Multinomial
Gebäudetyp ^e	N: 1 – 3 N: 1 – 3 N: 1 – 3	VO HWGK Sample	Vor-Ort-Erhebung Offizielle Statistik Offizielle Statistik	Multinomial Multinomial
Ausbaustufe ^f	N: 1 – 11 N: 1 – 12 N: 1 – 12	VO HWGK Sample	Vor-Ort-Erhebung Mittelwert NHK ^h Mittelwert NHK	
Standardstufe ^g	O: 2 – 4 O: 1 – 5 O: 1 – 5	VO HWGK Sample	Vor-Ort-Erhebung Mittelwert NHK Mittelwert NHK	

^a S: Stetig, N: Nominal, O: Ordinal.

^b VO: Vor-Ort-Erhebung, HWGK: Hochwassergefahrenkarte.

^c 0 = keine Kontamination, 1 = Abwasser, 2 = Heizöl oder Benzin.

^d 0 = keine Vorsorgemaßnahmen bis 48 = viele, verschiedene und effektive Maßnahmen (THIEKEN et al., 2008).

^e 1 = freistehendes Einfamilienhaus, 2 = Doppel- und Reihenendhaus, 3 = Reihemittelhaus.

^f NHK 2010 (Anlage 4 der ImmoWertV, 2021).

^g 1 = unzeitgemäß, 2 = einfach, 3 = mittel, 4 = gehoben, 5 = stark gehoben.

^h NHK: Normalherstellungskosten.

ⁱ Wasserstandsklassen 1 = 0 – 50 cm; 2 = 50 – 100 cm; 3 = 100 – 200 cm; 4 = 200 – 400 cm; 5 = > 400 cm.

Die Schadensschätzung wurde auf Basis von drei unterschiedlichen Ansätzen zur Schaffung der Datengrundlagen durchgeführt. Der erste Ansatz basiert auf einer Vor-Ort-Begutachtung der exponierten Wohngebäude in den Untersuchungsgebieten Beyenburg und Kohlfurth (genannt Vor-Ort-Erhebung, VO). Der zweite Ansatz wurde mit Hilfe der entsprechenden Hochwassergefahrenkarten (HWGK) für das HQextrem erstellt. Bereits durchgeführte Befragungen zu vergangenen Hochwassern dienten als Basis für den dritten Ansatz, bei dem ein sekundär abgeleiteter Datensatz, genannt „Sample“, zum Einsatz kam.

Um den Hochwasserschaden monetär angeben zu können, muss der relative Schaden mit dem Wert des exponierten Wohngebäudes multipliziert werden. Auf Basis der Expositions- und Vulnerabilitätsvariablen Brutto-Gebäudegrundfläche, Gebäudetyp, Ausbaustufe und Standardstufe wird mit Hilfe der Normalherstellungskosten (NHK 2010; Anlage 4 der IMMOWERTV, 2021) der Gebäudewert ermittelt. Ausbaustufe bezieht sich dabei auf die Gebäudeart unter Berücksichtigung der Gebäudemerkmale, z. B. ausgebauter Dachstuhl oder Keller, Standardstufe auf die Qualität und Art der verwendeten Materialien und Ausstattungen. Die Normalherstellungskosten veröffentlicht das Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV); sie dienen zur Bestimmung des Sachwerts eines Wohngebäudes und enthalten für unterschiedliche Gebäudetypen standardisierte Baukosten, die in €/Quadratmeter für die Brutto-Gebäudegrundfläche angegeben werden. Die Brutto-Grundfläche ist die Summe der nutzbaren Grundflächen aller Grundrissebenen eines Bauwerks.

Für die Unterscheidung einer Vielzahl von Gebäudetypen werden Eigenschaften wie die Anzahl an Stockwerken oder das Vorkommen von Kellern und Dachgeschossausbauten berücksichtigt. Zusätzlich fließen der allgemeine Zustand und die Ausstattung des Wohngebäudes in die Berechnung ein. Der Wert des Wohngebäudes basiert auf den Wiederherstellungskosten für das Jahr 2010 und wird mit Hilfe des Baupreisindex auf das entsprechende Ereignisjahr angepasst. Die Baunebenkosten und die Umsatzsteuer sind in den Normalherstellungskosten enthalten (KLEIST et al., 2006).

3.2.1 Vor-Ort-Erhebungen

Die Datenerhebungen erfolgten am 7. September 2021 in Beyenburg und am 14. September 2021 in Kohlfurth. Sie lagen damit

55 bzw. 62 Tage nach dem Hochwasserereignis. Zur Vorbereitung der Erhebung diente detailliertes, spezifisch dafür erstelltes Kartenmaterial der Untersuchungsgebiete. Die in Tabelle 1 dargestellten Variablen wurden für jedes vom Hochwasser betroffene Wohngebäude systematisch erfasst. In beiden Gemeinden konnte der Wasserstand für einen Großteil der betroffenen Wohngebäude anhand von Wasserkennlinien (Abb. 6a) oder bereits vorhandenen Markierungen der Fluthöhe am Gebäude (Abb. 6b) aufgenommen werden. Nur wenige exponierte Wohngebäude verfügten über keines der genannten Merkmale (Abb. 6c). Hier war es nötig, den Wasserstand im Gespräch mit den betroffenen Bewohnern zu erfassen. Die Überflutungsdauer und das Auftreten von Kontaminationen ergaben sich ebenfalls aus Gesprächen mit Anwohnern. Die gebäudespezifischen Merkmale Gebäudetyp, Ausbaustufe und Standardstufe wurden durch eine äußerliche Sichtung der betroffenen Wohngebäude ermittelt. Um die Grundfläche zu bestimmen, kamen im Anschluss QGIS und OpenStreetMap zum Einsatz. Anschließend wurde mit Hilfe der Ausbaustufe die Brutto-Grundfläche berechnet.

3.2.2 Hochwassergefahrenkarten

Die europäische Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie verpflichtet Mitgliedsstaaten zur Erstellung von Hochwassergefahrenkarten (HWGK). In Deutschland werden die öffentlich zugänglichen HWGK von den Bezirksregierungen erstellt und mindestens alle sechs Jahre aktualisiert. Die Karten stellen das zu erwartende Ausmaß eines Hochwasserereignisses für drei abgestufte Häufigkeits-Szenarien dar, wobei in Deutschland die Stufen je nach Bundesland unterschiedlich sind. In Nordrhein-Westfalen (NRW) werden folgende Szenarien berücksichtigt: a) ein Hochwasser, das im Mittel alle 10 bis 20 Jahre auftritt (HQhäufig), b) ein Hochwasser, das im Mittel alle 100 Jahre vorkommt (HQ100) und c) ein Extremhochwasser mit einer mittleren Auftretswahrscheinlichkeit von deutlich über 100 Jahren (HQextrem) (MUDERSBACH et al., 2016).

Das HQextrem wird in NRW über den Ansatz $HQ100 \cdot 1,5$ ermittelt (BEZIRKSREGIERUNG DÜSSELDORF, 2010). In Beyenburg liegt das HQ100 bei einem Abfluss von $106,2 \text{ m}^3/\text{s}$ (WUPPERVERBAND, 2022c) und das HQextrem entsprechend bei $159 \text{ m}^3/\text{s}$. In Kohlfurth wurde als HQextrem das HQ1.000 angenommen und daher



Abbildung 6

Verschiedene Aufnahmen der Vor-Ort-Erhebungen. (a) Wohngebäude mit Wasserstandkennlinie, (b) Wohngebäude mit Markierung der maximalen Fluthöhe, (c) Wohngebäude ohne Markierung.

Photographs of the on-site survey. (a) Residential building with water level line, (b) residential building with maximum flood elevation marker, (c) residential building without visual markers.

mit einem Abfluss von $302 \text{ m}^3/\text{s}$ gerechnet (pers. Mitteilung: Bezirksregierung Düsseldorf, 2023).

Um die Datengrundlage zu erstellen, kam für beide Gemeinden die Hochwassergefahrenkarte HQextrem zum Einsatz, da die gemessenen Abflusswerte für das Hochwasser des Jahres 2021 die Abflusswerte für HQextrem übersteigen oder sich an diese annähern. Die Karten wurden mit OpenStreetMap-Daten georeferenziert und verschnitten, um so die exponierten Wohngebäude zu identifizieren. Zusätzlich erfolgte eine Unterscheidung zwischen Wohngebäuden und Garagen. Die kombinierte Nutzung von Hochwassergefahrenkarten und OpenStreetMap stellt Informationen über die Höhe der Überflutung, die Nutzungsart und die Grundfläche der betroffenen Gebäude bereit. Für die Bestimmung der Brutto-Grundfläche wurde die Annahme getroffen, dass diese der doppelten Gebäudegrundfläche entspricht. Da in den Untersuchungsgebieten vor allem Einfamilienhäuser zu finden waren, ist dies ein realistischer Ansatz. Die für die Schadensschätzung fehlenden Variablen wurden aus Umfragedaten zu Hochwasserereignissen sowie Gebäude- und Wohnungszählungen des Zensus 2011 (STATISTISCHE ÄMTER DES BUNDES UND DER LÄNDER, 2014) ergänzt.

3.2.3 Befragungsdaten vergangener Ereignisse in Deutschland

Als Datengrundlage für das Training der Schadensmodelle sowie für die Schätzung der unbekannten Gebäudevariablen dienten Daten aus Befragungen nach Hochwasserereignissen im Jahr 2013. In einer computergestützten Telefonumfrage machten 1.652 Bewohner von betroffenen Wohngebäuden Angaben zu Hochwassererfahrungen, vorrangig aus den Einzugsgebieten von Elbe und Donau. Ein Ziel dieser Umfrage war die Untersuchung von Einflüssen verschiedener Hochwassercharakteristika auf den entstandenen monetären Schaden. Zu den aufgenommenen Daten gehören solche zur Überflutungshöhe, Überflutungsdauer, Kontamination und privaten Vorsorgemaßnahmen (THIEKEN et al., 2016).

Um den Datensatz für die Schadensmodelle zu generieren, wurden auf Basis der Befragungsdaten für die stetigen Variablen Überflutungshöhe und Überflutungsdauer Gammaverteilungen, für die ordinalen Variablen Kontamination und private Vorsorgemaßnahmen Multinomialverteilungen erstellt. Die Variablen, welche die Gebäudecharakteristika beschreiben, beruhen auf offiziellen Statistiken. Für die Variable Brutto-Grundfläche wurde auf Basis des Datensatzes „Fortsschreibung Wohngebäude- und Wohnungsbestand“ (Code 31231, Stichtag 31. Dezember 2020) des Statistischen Bundesamts (2021) eine Multinomialverteilung erzeugt. Eine Befragung zum Gebäude-

und Wohnungsbestand, durchgeführt im Rahmen des Zensus 2011, diente als Grundlage einer Multinomialverteilung zur Darstellung der Variable Gebäudetyp. Anschließend wurde mit diesen Verteilungen für jedes exponierte Wohngebäude ein zufälliger Wert ermittelt, entsprechend der Auftrittswahrscheinlichkeit der Variable. Für die gebäudespezifischen Variablen Ausbaustufe und Standardstufe ließ sich keine statistische Verteilung finden, daher wurde ein gemittelter Wert eingesetzt. Die Anzahl der exponierten Wohngebäude wurde aus der Vor-Ort-Erhebungen übernommen, ohne Garagen zu berücksichtigen.

3.3 Schadensschätzung auf Basis der drei Datensätze

Auf Basis des Datensatzes „Vor-Ort-Erhebung“ erfolgte für jedes betroffene Wohngebäude eine einzelne Schätzung des Schadens. Für die Datensätze „Hochwassergefahrenkarte“ (HWGK) und „Sample“ wurden einige Variablen, die in den verwendeten Datengrundlagen nicht vorhanden waren, mit Hilfe von Befragungsdaten und offiziellen Statistiken (vgl. Kap. 3.2.3) geschätzt. Um die damit verbundene Unsicherheit darstellen zu können, wurden diese Datensätze 1.000 Mal randomisiert zusammengestellt; anschließend folgte die Schadensschätzung. Das Ergebnis ist eine Verteilung von 1.000 Schadensschätzungen für jedes betroffene Wohngebäude.

4 Ergebnisse

Dieser Abschnitt stellt die Ergebnisse der Hochwasserschadenschätzungen vor. Zunächst werden die Ergebnisse der Identifizierung der betroffenen (exponierten) Wohngebäude auf Basis der Vor-Ort-Erhebung und Hochwassergefahrenkarten beschrieben. Kapitel 4.2 erläutert die Ergebnisse der Schadensschätzung unter der Verwendung der drei Datensätze „Vor-Ort-Erhebung“, „Hochwassergefahrenkarte“ und „Sample“.

4.1 Identifikation der betroffenen Gebäude

Abbildung 7a weist die vom Hochwasser betroffenen Wohngebäude und Garagen in Beyenburg aus, die durch die Hochwassergefahrenkarte (HWGK) identifiziert und durch die Vor-Ort-Erhebung überprüft wurden. Insgesamt waren 50 Wohngebäude und 20 Garagen betroffen. Abbildung 7b zeigt die exponierten Gebäude, die durch die Nutzung der HWGK und OpenStreetMap erfasst werden konnten, das sind insgesamt 47 Wohngebäude und vier Garagen. Der Vergleich mit den Ergebnissen der Vor-Ort-Erhebung zeigt, dass 18 betroffene Wohngebäude und drei Garagen nicht identifiziert werden konnten. Zusätzlich wurden zwei Industriegebäude und 13 Garagen falsch als Wohngebäude klassifiziert. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse ist in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2 Ergebnis der Identifizierung betroffener Wohngebäude auf Basis der Vor-Ort-Erhebung und Hochwassergefahrenkarten. <i>Results of the identification of affected residential buildings based on the on-site survey and flood hazard maps.</i>				
Gemeinde	Datengrundlage	exponierte Wohngebäude/Garagen	nicht identifizierte, exponierte Wohngebäude/Garagen	falsch klassifizierte Gebäude (Industrie/Garagen)
Beyenburg	Vor-Ort-Erhebung	50/20	0	0
	HWGK	47/4	18/3	15 (2/13)
Kohlfurth	Vor-Ort-Erhebung	34/19	0	0
	HWGK	62/8	0	29 (18/11)

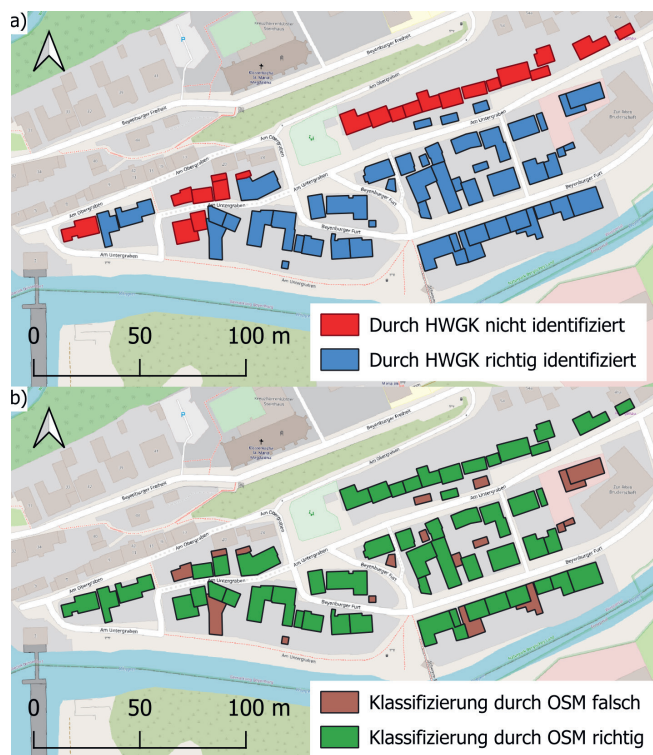


Abbildung 7

a) Durch die Hochwassergefahrenkarte (BEZIRKSREGIERUNG DÜSSELDORF, 2010) identifizierte und b) durch die OSM-Attribute (OSM CONTRIBUTORS, 2022) klassifizierte, exponierte Gebäude in Beyenburg.

Affected buildings in Beyenburg identified via a) flood hazard map (BEZIRKSREGIERUNG DÜSSELDORF, 2010) and b) OSM attributes (OSM CONTRIBUTORS, 2022).

Die durch die Vor-Ort-Erhebung identifizierten Wohngebäude und Garagen in Kohlfurth zeigt Abbildung 8. Es konnten 34 Wohngebäude und 19 Garagen aufgenommen werden, die vom Hochwasser betroffen waren. Durch die Verwendung der HWGK und OpenStreetMap ergaben sich 62 Wohngebäude und acht Garagen als betroffen (Abb. 8b). Der Vergleich mit den Daten der Vor-Ort-Erhebung zeigt, dass alle betroffenen Wohngebäude und Garagen erkannt wurden (Abb. 8a). Jedoch erfolgte auch hier eine Fehlklassifikation von 18 Industriegebäuden und elf Garagen als Wohngebäude (Abb. 8b).

4.2 Ergebnisse der Schadensschätzung

Abbildung 9 stellt die Wahrscheinlichkeitsverteilungen für Schäden an Wohngebäuden für Beyenburg dar. Die farbigen Bereiche zeigen das 90-Prozent-Intervall. Nach dieser Schätzung liegt für Beyenburg der ökonomische Schaden auf Basis der Hochwassergefahrenkarten mit einer 90-prozentigen Wahrscheinlichkeit im Bereich von 0,74 bis 0,94 Mill. € und auf Basis der Umfragedaten im Bereich von 1,32 bis 1,72 Mill. €. Die schwarz gestrichelten Linien zeigen die laut Modell wahrscheinlichsten Schadenswerte; diese betragen jeweils etwa 0,84 und 1,49 Mill. €. Zum Vergleich repräsentiert die rot gestrichelte Linie den auf Basis der Vor-Ort-Erhebung geschätzten Schaden von 1,56 Mill. €.

Abbildung 10 stellt die Wahrscheinlichkeitsverteilungen für Schäden an Wohngebäuden für Kohlfurth dar. Nach dieser Schätzung liegt der ökonomische Schaden auf Basis der Hoch-

wassergefahrenkarten für Kohlfurth mit einer 90-prozentigen Wahrscheinlichkeit im Bereich von 1,68 bis 2,05 Mill. € und auf Basis der Befragungsdaten im Bereich von 0,87 bis 1,19 Mill. €. Die schwarz gestrichelten Linien zeigen die wahrscheinlichsten Schadenswerte, diese betragen jeweils etwa 1,86 und 1,01 Mill. €. Zum Vergleich stellt die rot gestrichelte Linie den auf Basis der Vor-Ort-Erhebung geschätzten Schaden von 0,98 Mill. € dar.

Für Beyenburg wird der absolute Schaden unter Verwendung der Daten der Vor-Ort-Erhebung am höchsten geschätzt. Die Schadensschätzung auf Basis der Befragungsdaten weicht davon nur gering ab, um -4,42 %. Dagegen führt die Nutzung der Hochwassergefahrenkarte mit einer Abweichung von -45,89 % zu einer deutlich geringeren Schätzung (Abb. 9). Anders stellt sich die Situation für Kohlfurth dar. Hier wird der Schaden auf Basis der Vor-Ort-Erhebung am niedrigsten geschätzt. Mit einer geringen Abweichung von +3,96 % folgt die Schätzung unter der Verwendung der Befragungsdaten. Deutlich höher wird der Schaden auf Basis der Hochwassergefahrenkarte geschätzt. Hier beträgt die Abweichung +90,61 % (Abb. 10).

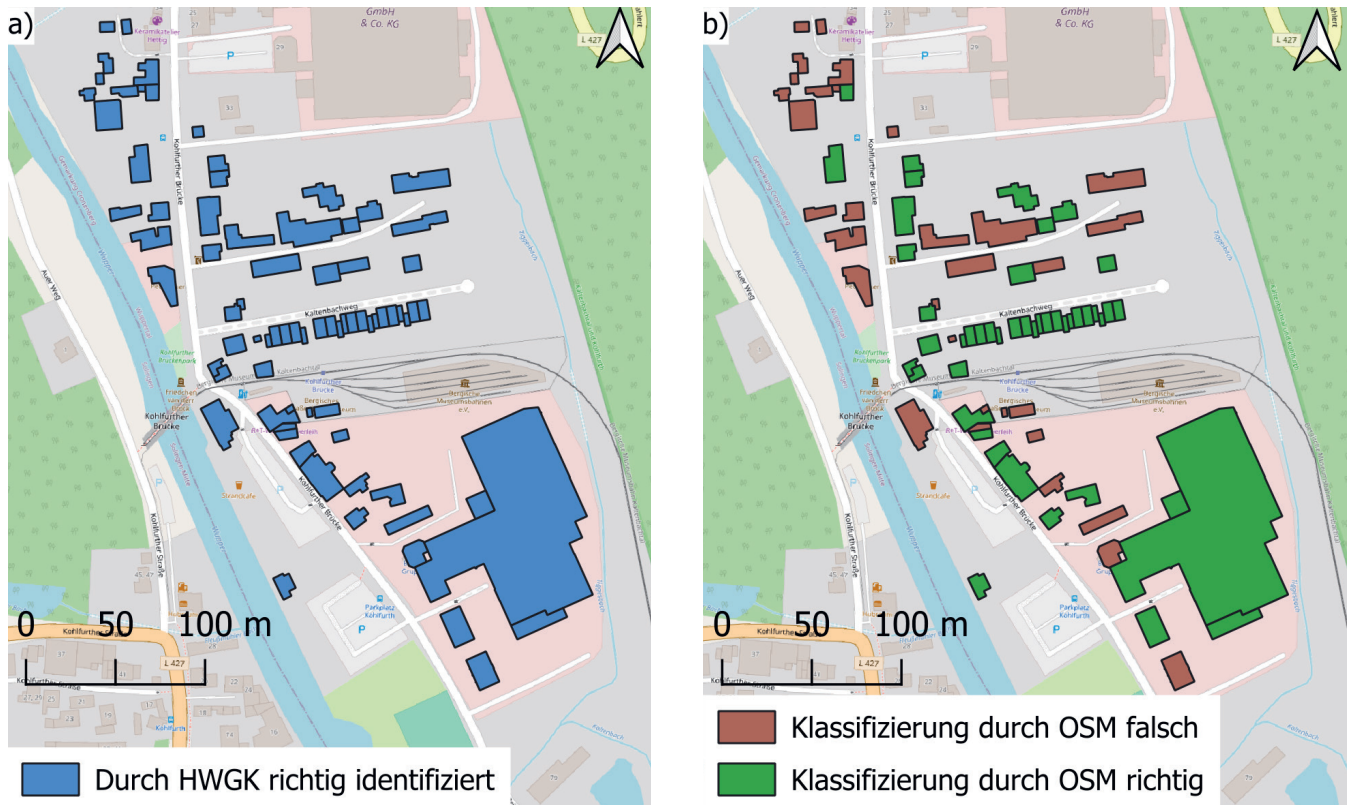
5 Diskussion

5.1 Identifizierung von betroffenen Wohngebäuden

In Beyenburg und Kohlfurth wurden in ca. je 10 Arbeitsstunden die vom Hochwasser betroffenen Wohngebäude und Garagen erfasst und die für die Schadensschätzung nötigen Ereignis-, Expositions- und Vulnerabilitätsvariablen dokumentiert. Trotz des Zeitraums von 55 bzw. 62 Tagen nach dem Hochwasserereignis konnten die exponierten Gebäude erkannt werden. Viele betroffene Gebäude zeigten noch Beschädigungen, Verunreinigung oder Markierungen der Fluthöhe an Außenfassaden. Zusätzlich waren häufig Objekte der Sanierung wie Bauschutt, Trocknungsgeräte und Werkzeug als weitere Indikatoren vorhanden. Die Vollständigkeit der Kartierung wurde durch Luftbilddaufnahmen und Gespräche mit den Bewohnern bestätigt.

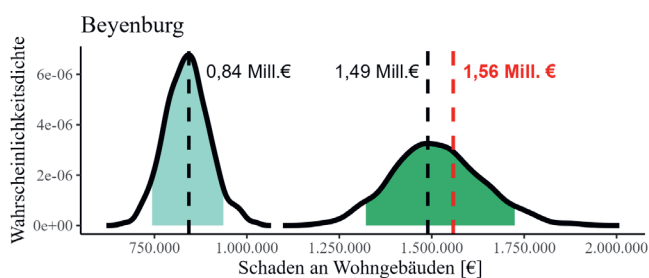
Zwei Wohngebäude in Beyenburg und ein Wohngebäude in Kohlfurth, wie beispielhaft in Abbildung 6c zu sehen, konnten durch eine äußerliche Betrachtung nicht direkt als betroffen identifiziert werden. Durch zur Trocknung geöffnete Fenster und Haustüren war aber auch bei diesen drei Wohngebäuden ein Hochwasserschaden erkennbar. Zusätzlich stellten sich ungeplante Gespräche mit betroffenen Anwohnern als wertvolle Informationsquelle heraus. Neben Beschreibungen des Hochwasserverlaufs, die vor allem für die Bestimmung der Überflutungsdauer nötig sind, konnten detaillierte Informationen über das betroffene Wohngebäude sowie die der Nachbarschaft zur Bestätigung der durchgeführten Datenerhebung gewonnen werden. Besonders die für die Schadensschätzung benötigten Informationen über eventuelle Kontaminationen sowie nicht von außen sichtbare private Vorsorgemaßnahmen waren nur im Gespräch zu ermitteln. Auch das Auftreten von Kontaminationen durch Öl oder Abwasser war zum Zeitpunkt der Aufnahme durch äußerliche Betrachtung der Gebäude nicht mehr abschätzbar. Ähnliche Erfahrungen machten auch LAUDAN et al. (2017) in einer vergleichbaren Studie.

Insgesamt ist die Methodik der durchgeführten Vor-Ort-Erhebung zur Erstellung einer Datengrundlage zur Hochwasserschadenschätzung geeignet. Inwieweit sich diese Erfahrungen auf andere Untersuchungsgebiete übertragen lassen, ist jedoch

**Abbildung 8**

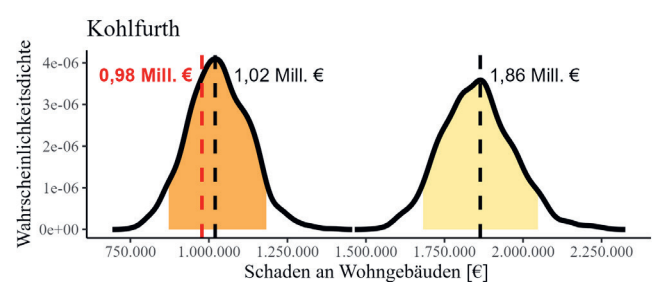
a) Durch die Hochwassergefahrenkarte (BEZIRKSREGIERUNG DÜSSELDORF, 2010) identifizierte und b) durch die OSM-Attribute (OSM CONTRIBUTORS, 2022) klassifizierte, exponierte Gebäude in Kohlforth.

Affected buildings in Kohlforth identified via a) flood hazard map (BEZIRKSREGIERUNG DÜSSELDORF, 2010) and b) OSM attributes (OSM CONTRIBUTORS, 2022).

**Abbildung 9**

Verteilung der auf Basis der Hochwassergefahrenkarten (hellgrün) oder der Umfragedaten (dunkelgrün) geschätzten Schäden an Wohngebäuden in Beyenburg. Die rote gestrichelte Linie zeigt den bei der Vor-Ort-Erhebung abgeschätzten Schaden.

Distribution of damage estimates in Beyenburg based on flood hazard map (light green) or previous survey data (dark green). The red dashed line shows the estimate with on-site survey data.

**Abbildung 10**

Verteilung der auf Basis der Hochwassergefahrenkarten (hellorange) oder der Umfragedaten (dunkelorange) geschätzten Schäden an Wohngebäuden in Kohlforth. Die rote gestrichelte Linie zeigt den bei der Vor-Ort-Erhebung abgeschätzten Schaden.

Distribution of damage estimates in Kohlforth based on flood hazard map (light orange) or previous survey data (dark orange). Red dashed line shows the estimate with on-site survey data.

fraglich. Beyenburg und Kohlforth sind kleine Gemeinden mit entsprechend wenigen Gebäuden und Anwohnern. In einer Großstadtumgebung mit der damit verbundenen Anonymität ist diese Art der Informationsquelle wahrscheinlich deutlich schwerer zugänglich.

Der Vergleich der Ergebnisse der Identifizierung betroffener Gebäude auf Basis der Vor-Ort-Erhebung und der HWGK zeigt

deutliche Unterschiede. Die Schätzung auf Grundlage der HWGK HQextrem liegt deutlich unterhalb der durch die Vor-Ort-Erhebung identifizierte Gebäude in Beyenburg. Dadurch wurden 18 betroffene Wohngebäude und drei betroffene Garagen nicht identifiziert. Der höchste Abfluss im Juli 2021 wurde in Beyenburg mit 173,01 m³/s gemessen (WUPPERVERBAND, 2022b) und übersteigt das HQextrem von 159 m³/s (Abb. 4); dies erklärt die beobachtete Unterschätzung auf Basis der HWGK (Abb. 9). Die

Hochwasserstatistik, die den offiziellen Gefahrenkarten zugrunde liegt, beinhaltet lückenlose Messreihen oft erst seit den 1950er Jahren. Dadurch fehlen Informationen zu historischen Ereignissen, wodurch es oft zu einer Unterschätzung für das 100-jährliche und das extreme Hochwasserszenario kommt (VOROGUSHYN et al. 2022). Für Kohlfurth stellt sich die Situation anders dar. Hier konnten alle betroffenen Gebäude mit Hilfe der HWGK identifiziert werden, da der größte im Juli 2021 gemessene Abfluss von 251 m³/s (WUPPERVERBAND, 2022b) geringer war als das HQextrem von 302 m³/s (Abb. 4).

Es wurden zusätzlich andere Fernerkundungsdaten auf die Eignung zur Identifizierung der exponierten Wohngebäude in Beyenburg und Kohlfurth untersucht. So ergab sich, dass weder der für das Hochwasser im Juli 2021 bereitgestellte Datensatz „EMSR517: Flood in Western Germany“ des Copernicus Emergency Management Service (CEMS) noch die Hochwassermasken P02, P06, P16 und P17 des Zentrums für satellitengestützte Kriseninformation (ZKI), einer Einrichtung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR), eine Überflutung in Beyenburg oder Kohlfurth ausweisen (CEMS, 2021; ZKI/DLR, 2021), obwohl dies die am stärksten betroffenen Stadtteile Wuppertals sind. Eine Schadensschätzung auf Basis dieser Datenquellen würde die beiden Stadtteile daher auslassen.

Einige Studien verwenden Social Media Daten zur Abschätzung von Hochwasserauswirkungen (BROUWER et al., 2017, CHAUDHARY et al., 2019, FOHRINGER et al., 2015). Im Fall von Beyenburg und Kohlfurth waren in den sozialen Medien einige Aufnahmen des Hochwasserereignisses verfügbar, die zur Verbesserung der Schadensschätzung genutzt werden könnten. Zum Beispiel bestätigt eine private Drohnenaufnahme von Beyenburg (YOUTUBE, 2021) die festgestellte Unterschätzung der Identifikation betroffener Wohngebäude auf Basis der HWGK. Allerdings fehlen bei solchen privaten Aufnahmen oft detaillierte Ort- und Zeitangaben. Ohne eine genaue Ortskenntnis, wie sie durch die Vor-Ort-Erhebung erlangt wurde, sind diese Informationen nur schwer interpretierbar. Zusätzlich besteht keine Garantie, dass derartige Aufnahmen existieren und auch öffentlich zugänglich sind. So konnte zum Beispiel für Kohlfurth keine Luftaufnahme gefunden werden.

Neben der Feststellung der vom Hochwasser betroffenen Gebäude stellt auch die Unterscheidung von Wohngebäuden, Garagen und Industriegebäuden eine große Herausforderung dar. Die Ergebnisse zeigen, dass auf Basis der kombinierten Nutzung von HWGK und OpenStreetMap in Beyenburg dreizehn Garagen und zwei industriell genutzte Gebäude fälschlicherweise als Wohngebäude identifiziert wurden. In Kohlfurth wurden elf Garagen und 18 Industriegebäude fälschlich als Wohngebäude ausgewiesen. Hier liegt das Überschwemmungsgebiet zu großen Teilen in einem Mischgebiet. Dies erweist sich als ein Grund für die große Anzahl an falsch identifizierten Industriegebäuden.

OpenStreetMap ist eine von den Nutzern erstellte und gepflegte Datenbank. Dadurch kommt es teilweise zu Ungenauigkeiten und Unvollständigkeiten (HECHT et al., 2013). Zusätzlich stellen LÜDTKE et al. (2019) in einem statistischen Vergleich von aus OpenStreetMap extrahierten Daten und Umfragedaten nach einem Hochwasserereignis fest, dass die OpenStreetMap-Geometrien, im Mittel über 25 NUTS-3-Regionen, 18 m² kleiner

sind. Diese Fehler in Gebäudegeometrie und Landnutzungsdaten nehmen Einfluss auf die Hochwasserschadensschätzung. Als Wohngebäude identifizierte Garagen bewirken eine erhöhte Schadensschätzung, da nach den Normalherstellungskosten der durchschnittliche Gebäudewert für Wohngebäude mit 820 €/m² deutlich über den durchschnittlichen Wert von Garagen mit 245 €/m² liegt. Fälschlicherweise als Wohnhäuser identifizierte Industriegebäude sorgen ebenfalls für eine erhöhte Schätzung des summierten Schadens an Wohngebäuden, besonders durch die oft große Gebäudefläche von Industriebauten und den damit verbundenen hohen geschätzten Wert des Objektes.

Ein Lösungsansatz zur Verbesserung der Differenzierung von Wohngebäuden und anderen Nutzungsformen ist die Einbeziehung weiterer Informationsquellen, wie beispielsweise je nach Verfügbarkeit der Karten des Amtlich Topographisch Kartographischen Informationssystems (ATKIS). Allerdings steht dieser Datensatz nicht in allen Bundesländern kostenfrei zur Verfügung. Zudem ist auch dabei die Verlässlichkeit der Informationen unklar. Weitere Beispiele sind Kartendienste wie Google Maps und Apple Maps, anhand derer einige der in Kohlfurth falsch identifizierten Industriegebäude erkannt werden können. Im Gegensatz zur automatischen Abfrage der OpenStreetMap-Datenbank muss dieser Abgleich jedoch manuell erfolgen, was entsprechend aufwendig ist. Zusätzlich können diese Datenquellen auch in einigen Fällen zur Unterscheidung von Wohngebäuden und Garagen sowie zur Bestimmung des Gebäudetyps genutzt werden. Weiterhin wäre der Einsatz eines Größenfilters denkbar, um die Qualität der Eingangsdaten zu verbessern, da Garagen in der Regel eine deutlich kleinere Grundfläche als Wohngebäude besitzen.

5.2 Schadensschätzung auf Basis unterschiedlicher Datengrundlagen

Um die Ergebnisse der Schätzungen des absoluten Schadens zu interpretieren, wird die Schadensschätzung auf Basis der Vor-Ort-Erhebung als Vergleichsgröße herangezogen. Auf Grund der Datenqualität und -quantität ist es hier möglich, von der Hochwasserschadensschätzung mit der vergleichsweise höchsten Genauigkeit auszugehen. Die dargestellten Wahrscheinlichkeiten geben einen Bereich an möglichen Schäden an und ergeben sich aus zum Beispiel unbekannten Wassertiefen, Überflutungszeiten oder Gebäudewerten, je nachdem, welche Information in der genutzten Datengrundlage zur Verfügung stand. Daher ist es möglich, die Wahrscheinlichkeitsdichte auch als ein Maß der Unsicherheit für die Schadensschätzung mit den verfügbaren Informationen zu interpretieren.

Auf Basis der Hochwassergefahrenkarten wird der Schaden für Beyenburg deutlich niedriger, für Kohlfurth deutlich höher geschätzt. Der Hauptgrund dafür liegt in der Identifizierung exponierter Gebäude. In Beyenburg werden durch die Verschneidung der Wassermaske der Hochwassergefahrenkarten (HWGK) mit den OpenStreetMap-Daten 18 betroffene Wohngebäude und drei Garagen nicht als betroffen erkannt, was 36 Prozent aller betroffenen Wohngebäude entspricht. Im Durchschnitt beträgt in Beyenburg auf Basis der Vor-Ort-Erhebung der absolute Schaden pro Wohnhaus ca. 30.000 €; in der Summe ergibt sich aus den nicht erkannten Gebäuden daher eine Unterschätzung von fast 550.000 €.

Ein weiterer Grund für mögliche Unterschätzungen sind Unterschiede in den berechneten Brutto-Gebäudegrundflächen. Da die Nutzung von OpenStreetMap nur die Gebäudegrundfläche bereitstellt, wurde diese verdoppelt, um die Brutto-Gebäudegrundfläche zu erhalten. Durchschnittlich beträgt die Brutto-Gebäudegrundfläche betroffener Objekte in Beyenburg 259 m², auf Basis der HWGK jedoch nur 155 m². Diese Unterschätzung beeinflusst den Gebäudewert und damit auch den absoluten Schaden. Wie bereits erwähnt, kommen in Beyenburg viele oft denkmalgeschützte alte Wohngebäude vor. Diese Art von Gebäude zeichnet sich häufig durch eine relativ kleine Grundfläche in Verbindung mit mehreren Stockwerken aus. Zusätzlich sorgt der bereits beschriebene kleinere relative Schaden für eine niedrigere Schätzung. Die Tatsache, dass dreizehn Garagen und zwei Industriegebäude falsch als Wohngebäude identifiziert wurden, schwächt die beschriebene Unterschätzung ab.

In Kohlfurth verursachen die 18 falsch identifizierten Industriegebäude eine deutlich erhöhte Schätzung des absoluten Schadens. Die kumulierte Brutto-Grundfläche aller betroffenen Gebäude beträgt auf Basis der Vor-Ort-Erhebung etwa 12.000 m², unter der Verwendung der HWGK und OpenStreet-Map etwa 16.000 m². Dies wird vorwiegend durch die oft sehr großen Grundflächen der Industriegebäude verursacht. Ein weiterer Grund für die erhöhte Schadensschätzung ist die Identifizierung von elf Garagen als Wohngebäude, drei davon mit einer außergewöhnlich großen Grundfläche. Zusätzlich sorgt der erhöhte durchschnittliche relative Schaden für eine höhere Schadensschätzung. Dies ist besonders dann der Fall, wenn ein hoher relativer Schaden, zum Beispiel ausgelöst durch eine zufällig bestimmte Kontamination, auf eines der oft vorkommenden Gebäude mit großer Brutto-Grundfläche trifft.

Auf Basis der Befragungsdaten zeigt der absolute Schaden nur eine geringe Abweichung von -4,42 % für Beyenburg und 3,96 % für Kohlfurth. Wie bereits erwähnt, wurden für diese Schadensschätzungen Garagen nicht berücksichtigt. Die Ergebnisse zeigen, dass diese Nichtberücksichtigung nur einen geringen Einfluss auf den absoluten Schaden hat. Dies wird auch bei der Betrachtung von Schadenswerten von Garagen deutlich. Auf Basis der Vor-Ort-Erhebung beträgt der geschätzte Schaden für alle betroffenen Garagen in Beyenburg ca. 35.000 €, in Kohlfurth ca. 40.000 €. Dies entspricht etwa dem durchschnittlichen geschätzten Schaden eines Wohngebäudes.

Die Ergebnisse zeigen die Bedeutung der korrekten Identifikation von exponierten Gebäuden sowie der zutreffenden Differenzierung von Wohn- und Industriegebäuden. Trotz der geringen Abweichung der Schadensschätzung wird deutlich, dass auf Basis der Befragungsdaten einige Variablen deutlich unterschätzt bzw. überschätzt werden. Die Unterschätzung der Exposition gleicht teilweise den Fehler aus, der durch die Überschätzung des relativen Schadens entsteht. Hierdurch wird die Verlässlichkeit allerdings nicht erhöht, da diese Kompensation in einem anderen Fall ausbleiben könnte. Andere Schadensmodelle reagieren zudem unterschiedlich sensitiv auf die Eingabevariablen, was die Ergebnisse beeinflussen kann.

6 Fazit und Empfehlungen

Die Analysen zeigen, dass eine verlässliche Hochwasserschadensschätzung nur auf Basis einer korrekten Identifizierung von

exponierten Wohngebäuden möglich ist. Bezogen auf die Hochwasserschadensmodellierung ist die wertvollste Information, die mittels Vor-Ort-Erhebung in Beyenburg und Kohlfurth gewonnen werden konnte, die Anzahl der betroffenen Gebäude. Jede weitere Information führt nicht zu einer starken Änderung der geschätzten Hochwasserschäden und kann ebenso aus anderen Datenquellen, wie Befragungen oder offiziellen Statistiken, abgeleitet werden. Des Weiteren ergab sich, dass die Verwendung der Hochwassergefahrenkarten (HWGK), im Vergleich zu Schätzungen basierend auf Vor-Ort-Erhebungen, zu starken Über- und Unterschätzungen führen kann. Auch bei den OSM-Daten kommt es vor, dass sie – beispielweise durch fehlende oder falsch zugewiesene Gebäude – Ungenauigkeiten in die Berechnungen bringen, die zu Über- oder Unterschätzungen führen.

Eine Empfehlung an betroffene Gemeinden ist demnach, die Anzahl der beschädigten Wohngebäude schon kurz nach dem Hochwasser aufzunehmen, da dies die wichtigste Information für die Hochwasserschadensschätzung darstellt. Steht diese Informationsquelle nicht zu Verfügung, sollten für die Erfassung von betroffenen Wohngebäuden möglichst viele verschiedene Quellen kombiniert genutzt werden, um die Ungenauigkeit einzelner Informationsquellen zu kompensieren. In der Praxis ließe sich dies beispielsweise durch eine kombinierte Nutzung von Hochwassergefahrenkarten und verschiedenen Befliegungssystemen erreichen. Eine weitere mögliche Methode stellt eine Vor-Ort-Erhebung zur Identifikation betroffener Wohngebäude dar. Diese Angaben können im Anschluss mit Daten zu Charakteristiken der Gebäude aus offiziellen Statistiken oder Angaben von vergangenen Hochwassern ergänzt werden, um eine Schadensschätzung durchzuführen. Ein solches Vorgehen beschleunigt die arbeitsintensive Vor-Ort-Erhebung deutlich, da einzelne Variablen nicht für jedes Gebäude aufgenommen werden müssen. Dadurch können in kürzerer Zeit mehr betroffene Gebäude erfasst werden. Somit trägt eine schnelle und verlässliche Hochwasserschadensschätzung nach Hochwassern potentiell dazu bei, das Ausmaß des Schadens festzustellen und beispielsweise einen ersten Rahmen für die Dimensionierung von Sofort-Hilfeprogrammen bereitzustellen.

6 Conclusion and recommendations

The analyses show that reliable flood damage estimates are only possible when exposed residential buildings are identified correctly. In terms of flood damage modelling, the most valuable information obtained through fieldwork in Beyenburg and Kohlfurth is the number of affected buildings. Any further information did not lead to a strong change in the estimated flood damage and can also be derived from other data sources, such as surveys or official statistics. Furthermore, it was found that the use of hazard maps, compared to estimates based on on-site surveys, can lead to large over- and underestimations. The OSM data can also introduce inaccuracies into the calculations, for example due to missing or incorrectly assigned buildings, which lead to over- or underestimations.

A recommendation to affected municipalities is therefore to record the number of affected residential buildings shortly after the flood, as this is the most important information for flood damage estimation. If this source of information is not available, different sources should be combined to determine the number of affected residential buildings. This approach can reduce the

inaccuracy of individual sources of information. In practice, the municipality could, for example, combine flood hazard maps with different aerial systems. Another possible method is an on-site survey to identify affected residential buildings. This information can then be supplemented with data on the characteristics of the buildings from official statistics or information from past floods, in order to carry out a damage estimate. Such a method significantly speeds up the labour-intensive field work phase, as individual variables do not have to be recorded for each building. As a result, more affected buildings can be recorded in a shorter time. Thus, a fast and reliable flood damage estimate after floods can help to determine the extent of the damage and provide, for example, a first framework for the dimensioning of emergency relief programmes.

Datenverfügbarkeit

Die während der aktuellen Studie erzeugten und/oder analysierten Datensätze sind aus Gründen des Datenschutzes nicht öffentlich zugänglich, stehen jedoch auf ordnungsgemäße Anfrage beim jeweiligen Verfasser zur Verfügung.

Danksagung

Diese Arbeit wurde vom BMBF-geförderten Projekt KAHR (Förderkennzeichen 01LR21021) unterstützt.

Anschriften der Verfasser

Linus Neitzke, M.Sc.
Dr.-Ing. Guilherme Samprognia Mohor
Dr. Tobias Sieg
Universität Potsdam
Institut für Umweltwissenschaften und Geographie
Karl-Liebknecht-Str. 24 – 25, 14476 Potsdam
linusneitzke@googlemail.com
guilherme.samprognia.mohor@uni-potsdam.de
tobias.sieg@posteo.de

Literaturverzeichnis

- BARRINGTON-LEIGH, C. & A. MILLARD-BALL (2017): The world's user-generated road map is more than 80 % complete. *PLoS one*, 12(8), e0180698.
- BEZIRKSREGIERUNG DÜSSELDORF (2010): Überschwemmungsgebiet HQ100 Wupper. https://www.brd.nrw.de/system/files/media/document/2022-07/20121122_5_54_Umwelt_Hochwasser_UeSchG_Wupper_Erlauterungsbericht.pdf, zuletzt abgerufen am 11.11.2022.
- BEZIRKSREGIERUNG DÜSSELDORF (2023): Abflusswert Wupper Hochwassergefahrenkarte HQextrem, persönliche Mitteilung per Mail von Herrn Meyer, Dezernat 54, 19.05.2023, Düsseldorf.
- BREIMAN, L. (2001): Random forests. – *Machine learning*, 45(1), 5–32.
- BROUWER, T., D. EILANDER, A. VAN LOENEN, M.J. BOOIJ, K.M. WIJNBERG, J. S. VERKADE & J. WAGEMAKER (2017): Probabilistic flood extent estimates from social media flood observations. – *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 17(5), 735–747.
- BfG, Bundesanstalt für Gewässerkunde (2018): Einzugsgebietsgrenzen-DE. Hydrologischer Atlas von Deutschland. Online verfügbar unter <https://geoportal.bafg.de/smartfinderClient/js/apps/portal-integration/index.html?lang=en#/datasets/iso/c21d4842-39b0-469d-9828-956a583213e2>, zuletzt abgerufen am 05.05.2024.
- BMI, Bundesministerium des Innern (2013): Bericht zur Flutkatastrophe 2013: Katastrophenhilfe, Entschädigung, Wiederaufbau.
- CERRI, M., M. STEINHAUSEN, H. KREIBICH & K. SCHRÖTER (2021): Are OpenStreetMap building data useful for flood vulnerability modeling? *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 21(2), 643–662, DOI:10.5194/nhess-21-643-2021.
- CHAUDHARY, P., S. D'ARONCO, M. MOY DE VITRY, J.P. LEITÃO & J.D. WEGNER (2019): Flood-water level estimation from social media images. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 4(2/W5), 5–12.
- CEMS, Copernicus Emergency Management Service (2021). © 2021 European Union, EMSR517. <https://emergency.copernicus.eu/data/>, zuletzt abgerufen am 11.11.2021.
- CUTLER, A., D.R. CUTLER, & J.R. STEVENS (2012): Random forests. – Zhang, C. & Y. Ma (Hrsg): *Ensemble machine learning: methods and applications*, Springer, 157–175.
- DWD, Deutsche Wetterdienst (2023): DWD Climate Data Center (CDC): Stündliche Stationsmessungen der Niederschlagshöhe in mm für Deutschland, Version v21.3, zuletzt abgerufen am 05.05.2024.
- EEA, European Environment Agency (2010): Mapping the impacts of recent natural disasters and technological accidents in Europe. Publications Office of the European Union. EM-DAT (2024): The international disaster database. CRED, UCLouvain. Brussels, Belgium. <https://www.emdat.be>, zuletzt abgerufen am 10.07.2024.
- GeoBasis-DE/BKG, Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (2021): Verwaltungsgebiete 1 : 250 000. Online verfügbar unter <https://gdz.bkg.bund.de/index.php/default/digitale-geodaten/verwaltungsgebiete.html>, zuletzt abgerufen am 29.09.2021.
- GEOPortal.NRW (2022). Fließgewässertypen NRW und LAWA. Online verfügbar unter <https://www.govdata.de/daten/-/details/flieessgewassertypen-nrw-und-lawa>, zuletzt abgerufen am 05.05.2024.
- FOHRINGER, J., D. DRANSCH, H. KREIBICH, & K. SCHRÖTER (2015): Social media as an information source for rapid flood inundation mapping. – *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15(12), 2725–2738.
- GERL, T., H. KREIBICH, G. FRANCO, D. MARECHAL, & K. SCHRÖTER (2016). A review of flood loss models as basis for harmonization and benchmarking. *PLoS one*, 11(7), e0159791.
- HASTIE, T., R. TIBSHIRANI, & J. FRIEDMAN (2009): Random forests. – Hastie, T., R. Tibshirani & J. Friedman (Hrsg): *The elements of statistical learning: Data mining, inference, and prediction*, Springer, 587–604.
- HECHT, R., C. KUNZE, & S. HAHMANN (2013): Measuring completeness of building footprints in OpenStreetMap over space and time. – *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2(4), 1066–1091.
- HOBUS, I., A. HOFFMAN, G. HOFMANN, S. HASENCLEVER, U. KOENZEN et al. (2005): Forschungsvorhaben Handlungsbedarf und Abwägungskriterien bei der Umsetzung der EU-WRRRL am Beispiel der Kühlwassernutzung der Unteren Wupper. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben AZ 54.173/25-5232.
- HOTHORN, T., K. HORNIK, C. STROBL, & A. ZEILEIS (2010): Party: A laboratory for recursive partytioning. <https://party.r-forge.r-project.org>.
- ImmowertV, Immobilienwertermittlungsverordnung vom 14.07.2021 (BGBl. I S. 2805), Anlage 4. https://www.gesetze-im-internet.de/immowertv_2022/index.html, zuletzt abgerufen am 03.07.2024.
- JUNGHÄNEL, T., P. BISSOLLI, J. DASSLER, R. FLECKENSTEIN, F. IMBERY ... E. WEIGL (2021): Hydro-klimatologische Einordnung der Stark- und Dauerniederschläge in Teilen Deutschlands im Zusammenhang mit dem Tiefdruckgebiet „Bernd“ vom 12. bis 19.07.2021. Herausgegeben vom Deutschen Wetterdienst, https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/niederschlag/20210721_bericht_starkniederschlaege_tief_bernd.html.
- KELMAN, I. & R. SPENCE (2004): An overview of flood actions on buildings. – *Engineering Geology*, 73(3–4), 297–309.

- KLEIST, L., A. H. THIEKEN, P. KÖHLER, M. MÜLLER, I. SEIFERT, D. BORST & U. WERNER (2006): Estimation of the regional stock of residential buildings as a basis for a comparative risk assessment in Germany. – *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 6(4), 541–552.
- KREIBICH, H., A. THIEKEN, B. MERZ & M. MÜLLER (2005): Private precautionary measures reduce flood losses of households and companies: Insights from the 2002 flood in Saxony, Germany. – Van Beek, E. & M. Taal (Hrsg.): *Floods, from Defence to Management*, Taylor & Francis, 851–859.
- KRON, A. (2007): Flood damage estimation and flood risk mapping. – Ashley, R., S. Garvin, E. Pasche, A. Vassilopoulos & C. Zevenbergen (Hrsg.): *Advances in Urban Flood Management*, CRC Press, 225–248.
- LAUDAN, J., V. RÖZER, T. SIEG, K. VOGEL & A.H. THIEKEN (2017): Damage assessment in Braunsbach 2016: Data collection and analysis for an improved understanding of damaging processes during flash floods. – *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 17(12), 2163–2179.
- LÜDTKE, S., K. SCHRÖTER, M. STEINHAUSEN, L. WEISE, R. FIGUEIREDO & H. KREIBICH (2019): A consistent approach for probabilistic residential flood loss modeling in Europe. – *Water Resources Research*, 55(12), 10616–10635.
- MERZ, B., H. KREIBICH, A. THIEKEN & R. SCHMIDTKE (2004): Estimation uncertainty of direct monetary flood damage to buildings. – *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 4(1), 153–163.
- MERZ, B., H. KREIBICH, R. SCHWARZE & A. THIEKEN (2010): Review article: Assessment of economic flood damage. – *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10(8), 1697–1724.
- MERZ, B., H. KREIBICH & U. LALL (2013): Multi-variate flood damage assessment: A tree-based data-mining approach. – *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(1), 53–64.
- MEYER, V., N. BECKER, V. MARKANTONIS, R. SCHWARZE, J. C. J. M. VAN DEN BERGH ... C. VIATTENE (2013): Assessing the costs of natural hazards—state of the art and knowledge gaps. – *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(5), 1351–1373. DOI:10.5194/nhess-13-1351-2013.
- MOHOR, G.S., A.H. THIEKEN, & O. KORUP (2021): Residential flood loss estimated from Bayesian multilevel models. – *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 21, 1599–1614.
- MUDERSBACH, C., A. BEUTLING & I. SCHWERTNER (2016): Wie geeignet sind Hochwassergefahrenkarten zur Festsetzung von gesetzlichen Überschwemmungsgebieten. *KW-Korrespondenz Wasserwirtschaft*, 9(3), 165–169.
- MUNICH RE (2022): Hurrikane, Kältewellen, Tornados: Wetterkatastrophen in USA dominieren Naturkatastrophen-Schadenstatistik 2021. <https://www.munichre.com/de/unternehmen/media-relations/medieninformationen-und-unternnehmensnachrichten/medieninformationen/2022/bilanz-naturkatastrophen-2021.html>, zuletzt abgerufen am 10.02.2022.
- OSM (OpenStreetMap) contributors (2022): OpenStreetMap. <https://www.openstreetmap.org>.
- PENNING-ROWSELL, E., C. JOHNSON, S. TUNSTALL, S. TAPSELL, J. MORRIS, J. CHATTERTON & C. GREEN (2005): The benefits of flood and coastal risk management: A handbook of assessment techniques. Flood Hazard Research Centre, Middlesex University.
- PETRUCCI, O., L. ACETO, V. BIANCHI, V. BIGOT, R. BRÁZDIL ... J.L. ZÉZERE (2019): Flood fatalities in Europe, 1980–2018: Variability, features, and lessons to learn. – *Water*, 11(8), 1682.
- R CORE TEAM (2022): R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing.
- SAIRAM, N., K. SCHRÖTER, V. RÖZER, B. MERZ & H. KREIBICH (2019): Hierarchical Bayesian approach for modeling spatiotemporal variability in flood damage processes. – *Water Resources Research*, 55(10), 8223–8237, DOI: 10.1029/2019WR025068.
- SCHÄFER, A., B. MÜHR, J. DANIELL, U. EHRET, F. EHMELE ... M. KUNZ (2021): Hochwasser Mitteleuropa, Juli 2021 (Deutschland): 21. Juli 2021 – Bericht Nr. 1 „Nordrheinwestfalen & Rheinland-Pfalz“. CEDIM Forensic Disaster Analysis (FDA) Group - Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- SCHNEIDER, D. & P. GEBAUER (2021): Die Flutkatastrophe im Juli 2021 in Mitteleuropa aus meteorologischer Sicht. Beiträge zur Berliner Wetterkarte, Verein Berliner Wetterkarte eV zur Förderung der meteorologischen Wissenschaft.
- SCHOPPA, L., T. SIEG, K. VOGEL, G. ZÖLLER & H. KREIBICH (2020): Probabilistic flood loss models for companies. – *Water Resources Research*, 56(9), e2020WR027649.
- SCHRÖTER, K., H. KREIBICH, K. VOGEL, C. RIGGELSEN, F. SCHERBAUM & B. MERZ (2014): How useful are complex flood damage models? – *Water Resources Research*, 50(4), 3378–3395.
- SCORNET, E., G. BIAU & J.-P. VERT (2015): Consistency of random forests. – *The Annals of Statistics*, 43(4), 1716–1741.
- SIEG, T. & A.H. THIEKEN (2022): Improving flood impact estimations. – *Environmental Research Letters*, 17(6), 064007.
- SIEG, T., K. VOGEL, B. MERZ & H. KREIBICH (2017): Tree-based flood damage modeling of companies: Damage processes and model performance. – *Water Resources Research*, 53(7), 6050–6068.
- STATISTISCHES BUNDESAMT (Destatis) (2021): Fortschreibung Wohngebäude- und Wohnungsbestand, Code: 31231, Stichtag: 31.12.2020.
- STATISTISCHE ÄMTER DES BUNDES UND DER LÄNDER (2014): Gebäude und Wohnungsbestand in Deutschland. Erste Ergebnisse der Gebäude- und Wohnungszählung 2011.
- STEINHAUSEN, M. (2022): Probabilistic flood loss modelling for residential buildings. PhD Thesis, Humboldt-Universität zu Berlin.
- STEINHAUSEN, M., S. LÜDTKE, K. SCHRÖTER, R. FIGUEIREDO & H. KREIBICH (2020): Das probabilistische Hochwasserschadensmodell für Wohngebäude: BN-FLEMOps. – *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 64(4), 188–199.
- THIEKEN, A. (2008): Neue Modelle zur Abschätzung von Hochwasserschäden. – *Ökologisches Wirtschaften-Fachzeitschrift*, 23(3), 30–34.
- THIEKEN, A.H., M. MÜLLER, H. KREIBICH & B. MERZ (2005): Flood damage and influencing factors: New insights from the August 2002 flood in Germany. – *Water Resources Research*, 41(12).
- THIEKEN, A., A. OLSCHESKI, H. KREIBICH, S. KOBSCHE & B. MERZ (2008): Development and evaluation of FLEMOps: A new flood loss estimation model for the private sector. – *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 118, 315–324.
- THIEKEN, A.H., T. BESSEL, S. KIENZLER, H. KREIBICH, M. MÜLLER, S. PISI & K. SCHRÖTER (2016): The flood of June 2013 in Germany: How much do we know about its impacts? – *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16(6), 1519–1540.
- VOROGUSHYN, S., H. APEL, M. KEMTER & A.H. THIEKEN (2022): Analyse der Hochwassergefährdung im Ahrtal unter Berücksichtigung historischer Hochwasser. – *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 66(5), 244–254. DOI: https://doi.org/10.5675/HYWA_2022.5_2.
- WARD, P.J., V. BLAUHUT, N. BLOEMENDAAL, J.E. DANIELL, M.C. DE RUITER ... H.C. WINSEMIUS (2020): Natural hazard risk assessments at the global scale. – *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(4), 1069–1096.

WEI, P., Z. LU & J. SONG (2015): Variable importance analysis: A comprehensive review. – Reliability Engineering & System Safety, 142, 399–432.

WUPPERVERBAND (2021): Extremereignis traf das gesamte Wuppergebiet. <https://www.wupperverband.de/meldung/pressemitteilungen/2021/07/extremereignis-traf-das-gesamte-wuppergebiet>, zuletzt abgerufen am 07.11.2021.

WUPPERVERBAND (2022a): Hotspots der Schadensmeldungen im Wupperverbandsgebiet. https://fluggs.wupperverband.de/dokumente/Hochwasser/HotSpots/HotSpots-Verbandsgebiet_beschriftet.pdf, zuletzt abgerufen am 11.12.2022.

WUPPERVERBAND (2022b): FLUGGS Zeitreihen Dienst V3. <http://fluggs.wupperverband.de>, zuletzt abgerufen am 11.12.2022.

WUPPERVERBAND (2022c): Statusbericht zum Hochwasserereignis vom 14. und 15.07.2021 im Wupperverbandsgebiet. [https://www.wupperverband.de/internet/mediendb.nsf/gfx/411FA3F1EBD426ABC1258813004D90D2/\\$file/20220321_Statusbericht_Hochwasser.pdf](https://www.wupperverband.de/internet/mediendb.nsf/gfx/411FA3F1EBD426ABC1258813004D90D2/$file/20220321_Statusbericht_Hochwasser.pdf), zuletzt abgerufen am 07.12.2022.

WUPPERVERBAND (2023). Pegel Bestand. Bauwerke im Gewässer und Messstellen des Wupperverbandes. Web Map Services (WMS) des Wupperverbandes. Online verfügbar unter https://fluggs.wupperverband.de/WMS_WV_Bauwerke_im_Gewaesser_Messstellen, zuletzt abgerufen am 05.05.2024.

YOUTUBE (2021): Ursache und Wirkung: Aufnahmen aus Wuppertal Beyenburg. Kanal „Jay Guevara“, <https://www.youtube.com/watch?v=9B7awgQdCvg>, zuletzt abgerufen am 11.11.2022.

ZKI, Zentrum für satellitengestützte Kriseninformation / DLR, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (2021). Unwetter in Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz, Deutschland. <https://activations.zki.dlr.de/en/activations/items/ACT152.html>, zuletzt abgerufen am 11.11.2021.