

Julia Krumm, Ingo Haag, Katharina Teltscher, Andreas Hänsler, Hannes Leistert, Max Schmit, Andreas Steinbrich & Markus Weiler

Der Sturzflutindex (SFI) und seine Anwendung auf rezente Überflutungsereignisse in vier Bundesländern

The Pluvial Flood Index (PFI) and its application to recent inundation events in four federal states

Bei pluvialen Sturzfluten geht die Hauptgefahr, anders als bei klassischen fluvialen Hochwassern, primär von wild abfließendem Wasser abseits von Gewässern aus. Weder existierende Modellsysteme und Klassifikationsschemata für Flusshochwasser noch reine Niederschlagsanalysen wie der Starkregenindex (SRI) eignen sich, um die hieraus resultierende Gefahr zu ermitteln und differenziert davor zu warnen. Der in dieser Studie dargestellte und exemplarisch angewendete Sturzflutindex (SFI) schließt diese Lücke, indem er sich auf die Gefahrenquelle wild abfließendes Wasser bezieht und neben dem Niederschlag auch die hydrologischen und hydraulischen Faktoren berücksichtigt, die Sturzfluten beeinflussen.

Der SFI basiert auf der räumlichen Ausdehnung von Sturzflutgefahrenflächen (SFGF), auf denen Fußgänger und Fahrzeuge gefährdet sind, weil Wasserstand, Fließgeschwindigkeit und/oder der spezifische Abfluss kritische Grenzwerte überschreiten. Anhand von Schwellenwerten für den relativen Anteil der SFGF an einer definierten Bezugsfläche werden vier SFI-Klassen von „0 – keine bis geringe Gefahr“ bis „3 – sehr große Gefahr“ definiert. Der SFI ist somit eine robuste, dimensionslose Kennzahl, die verwendet werden kann, um die breite Öffentlichkeit über das voraussichtliche Auftreten einer pluvialen Sturzflut und das damit verbundene Ausmaß der Gefahr zu informieren.

Um die Praxistauglichkeit des SFI und seiner Ermittlung zu analysieren, wird in dieser Studie die Methodik für vier abgelaufene Ereignisse in vier Bundesländern angewandt. Anschließend erfolgt eine qualitative Bewertung der resultierenden SFI anhand von Schadensberichten und z. T. anhand gemessener Abflussdaten. Zur Ermittlung der SFGF und SFI dient in einem ersten Schritt das hydrologische Modell LARSIM (Large Area Runoff Simulation Model), um die flächenhafte Oberflächenabflussbildung zu berechnen. In einem zweiten Schritt kommt das vereinfachte hydraulische Modell AccRo (Accumulated Runoff Model) zum Einsatz, um die Oberflächenabflussakkumulation mit den resultierenden maximalen Wassertiefen, Fließgeschwindigkeiten und spezifischen Abflüssen zu simulieren.

Die mit dieser Methodik ermittelten SFI sind für alle vier Ereignisse plausibel. Dabei veranschaulichen die Ergebnisse den Mehrwert des SFI gegenüber einem reinen Starkregenindex. Es wird auch deutlich, dass es möglich und empfehlenswert ist, potenzielle SFI-basierte Warnungen mit klassischen Hochwasservorhersagen zu kombinieren, um adäquat vor Ereignissen zu warnen, die gleichzeitig Charakteristika von pluvialen Sturzfluten und von Flusshochwassern aufweisen. Die hier genutzten Modelle LARSIM und AccRo sind nach den Ergebnissen dieser Studie hinreichend genau für die SFI-Ermittlung und zugleich sehr recheneffizient, so dass mit ihnen perspektivisch auch eine operationelle Echtzeit-Vorhersage möglich erscheint. Wenngleich im Detail noch Forschungs- und Optimierungsbedarf besteht, stellen der SFI und die hier angewendeten Werkzeuge eine geeignete Grundlage für eine effiziente und differenzierte operationelle Warnung vor pluvialen Sturzfluten dar.

Schlagwörter: Sturzflutindex, Sturzflut, pluviale Hochwasser, Sturzflutwarnung, LARSIM

In contrast to fluvial floods, the key hazard posed by pluvial flash floods is unconfined overland flow, which occurs away from rivers. Therefore, neither the existing classification schemes for fluvial floods nor a simple analysis of precipitation, e.g. according to the heavy rain index (HRI), are appropriate to assess the hazard posed by pluvial flash floods or to issue warnings for flash floods. The pluvial flood index (PFI) presented and applied in this study addresses this problem, as it refers to the hazard of unconfined overland flow and accounts for hydrological and hydraulic factors influencing pluvial floods.

The PFI is based on pluvial flood hazard areas (PFHA), defined as areas in which pedestrians or vehicles are exposed to a hazard because the water level, flow velocity and/or the discharge surpasses the critical limits. The relative share of PFHA in a reference area is classified by threshold values into four classes of PFI ranging from “0 – no to minor hazard” to “3 – very great hazard”. The PFI is therefore a robust, dimensionless metric, which can be used to inform the general public about the potential occurrence and magnitude of a pluvial flash flood.

To analyse the practical applicability of the PFI and its calculation, this study applies the methodology to four past events in four different federal states of Germany and evaluates the resulting PFI on a qualitative basis by means of damage reports and in part by discharge records. In the first step, the hydrological model LARSIM (Large Area Runoff Simulation Model) serves to determine the spatially nuanced surface runoff generation. In a second step, the simplified hydraulic model AccRo (Accumulated Runoff Model) is applied to simulate the overland flow accumulation and determine the resultant maximum water levels, flow velocities and specific discharges.

The PFI derived on this basis for all four events is plausible. The results also illustrate the additional benefit of the PFI in comparison with the sole application of the heavy rain index. It furthermore becomes clear that it is possible and recommended to combine PFI-based

warnings with fluvial flood warnings for events, which possess characteristics of both pluvial flash floods and fluvial river flooding. The two models used in the present study, LARSIM and AccRo, are adequately accurate for determining the PFI for the analysed events. At the same time, they are very computationally efficient, making an operational real-time forecast possible in the future. Even though there remains a need for further research on this topic and an optimisation of the details, the PFI and the applied tools provide a reasonable basis for a nuanced operational pluvial flash flood warning.

Keywords: pluvial flood index, flash flood, pluvial flood, pluvial flash flood warning, LARSIM

1 Einleitung

Pluviale Sturzfluten, die in der Folge von Starkregen auftreten können, haben eine sehr kurze Entstehungs- und Vorwarnzeit und sind in der Regel relativ kleinräumig (BORG et al., 2011; HONG et al., 2013; ARCHER & FOWLER, 2018). Solche Ereignisse sind in den letzten Jahren in Deutschland und Mitteleuropa vermehrt aufgetreten und haben dabei immense Schäden verursacht und in Extremfällen zu Todesopfern geführt (BBK, 2015; LFU BY, 2017; PIPER et al., 2016; BRONSTERT et al., 2017). Die Gefährdung durch pluviale Sturzfluten wird durch den Klimawandel und die damit einhergehende Intensivierung von Starkregen sowie durch den wachsenden Flächennutzungsdruck zukünftig voraussichtlich sogar noch zunehmen (KLIWA, 2019; FOWLER et al., 2021; BBK, 2021).

Im Gegensatz zu Flusshochwassern, sogenannten fluvialen Hochwassern, geht die Hauptgefahr bei pluvialen Sturzfluten nicht nur von den Gewässerläufen aus, sondern vor allem von wild abfließendem Oberflächenabfluss, auch abseits von Gewässern (BORG et al., 2011; HONG et al., 2013). Aufgrund dieser Gefährdung durch wild abfließendes Wasser sowie der Kleinräumigkeit von Sturzfluten sind die für Flusshochwasser üblichen, auf Pegelzeitreihen basierenden Wahrscheinlichkeiten bzw. Hochwasserjährlichkeiten nicht für die Kategorisierung von und Warnung vor Sturzfluten geeignet (KRUMM et al., 2024). Andererseits reicht auch die alleinige Angabe der Jährlichkeit des auslösenden Niederschlags bzw. des Starkregenindex (SRI) nicht aus, um eine Sturzflut adäquat einzuordnen. Vielmehr wird das Auftreten und Ausmaß einer pluvialen Sturzflut neben dem Niederschlag unter anderem auch maßgeblich vom Versiegelungsgrad, den Infiltrationseigenschaften und der Vorfeuchte der Böden, dem aktuellen Bedeckungsgrad mit Pflanzen sowie dem Relief bestimmt (BORG et al., 2011; HENGST, 2019; RIES et al., 2020).

Im Gegensatz zu Starkregen und fluvialen Hochwassern existiert bislang also keine geeignete Systematik für die Einordnung von pluvialen Sturzfluten, die z. B. auch für eine Sturzflutwarnung genutzt werden kann (HAAG et al., 2022a). Um diese Lücke zu schließen, wurde im Rahmen des Verbundprojekts „AVOSS“ (Auswirkungsbasierte Vorhersage von Starkregen und Sturzfluten auf verschiedenen Skalen: Potentiale, Unsicherheiten und Grenzen), das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), inzwischen Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR), gefördert wird, der Sturzflutindex (SFI) konzipiert (KRUMM et al., 2024; WEILER et al., 2025). Ziel des vorliegenden Artikels ist es, die praktische Anwendung des SFI anhand von vier unterschiedlichen pluvialen Sturzfluten in vier Bundesländern zu veranschaulichen.

2 Der Sturzflutindex (SFI)

Der Sturzflutindex (SFI) soll als dimensionslose Kennzahl primär der klaren, möglichst einfachen Kommunikation mit der brei-

ten Öffentlichkeit dienen. Er ist daher als robuster Index konzipiert, der klassifizierte Aussagen dazu macht, ob eine Sturzflut zu erwarten ist und wie schwerwiegend diese voraussichtlich wird. Es handelt sich um einen reinen Gefahrenindex, bei dem Vulnerabilität und Risiko zunächst nicht berücksichtigt werden. Er dient einer großräumigen Klassifizierung und Warnung in einer räumlichen Auflösung von wenigen Quadratkilometern und soll explizit keine Detailaussagen zu lokalen Gefahren und Risiken machen, da die Vorhersage von realen Starkregeneignissen und daraus resultierenden pluvialen Sturzfluten mit hohen Unsicherheiten behaftet ist, insbesondere bezüglich der räumlichen Details. Der SFI erlaubt vielmehr absichtlich eine räumliche Unschärfe, um z. B. die räumliche Unsicherheit insbesondere des vorhergesagten Niederschlags zu maskieren und keine Genauigkeit vorzutäuschen, die in Realität nicht gegeben ist. Allerdings lässt sich der Index lokal mit Detailinformationen wie Starkregengefahren- oder Sturzfluthinweiskarten und Risikoanalysen verknüpfen, sodass die örtlichen Expertinnen und Experten, die im Idealfall mehr Erfahrung im Umgang mit unsicheren Informationen haben als die breite Öffentlichkeit, den SFI in Alarm- und Einsatzplänen nutzen können (KRUMM et al., 2024).

Der SFI bezieht sich primär auf die Gefahr, die von wild abfließendem Oberflächenabfluss und dem resultierenden Abfluss entlang kleinerer Gräben und Gewässer ausgeht. Daher muss er neben dem Niederschlag alle hierfür relevanten hydrologischen und hydraulischen Prozesse mit geeigneten Modellansätzen erfassen. Da der Index perspektivisch auch zur operativen Warnung einsetzbar sein soll, ist es erforderlich, dass die eingesetzten Modelle extrem recheneffizient sind. Abbildung 1 zeigt, welche Schritte notwendig sind, um den SFI zu ermitteln.

Zunächst wird ausgehend vom Niederschlag unter Berücksichtigung der örtlichen Bedingungen wie Versiegelung, Bodenart und Landnutzung sowie anhand der aktuellen Vorbedingungen, z. B. Bodenfeuchte, Verschlammung und Zustand der Vegetation, die Bildung von Oberflächenabfluss auf versiegelten Flächen, Sättigungsflächen und durch Infiltrationsüberschuss ermittelt. Hierzu ist ein geeignetes, physikalisch basiertes hydrologisches Modell notwendig, das die relevanten Einflussfaktoren und Prozesse in ausreichender räumlicher und zeitlicher Auflösung abbildet. Die vorliegende Studie nutzt hierfür das Wasserhaushaltsmodell LARSIM (Large Area Runoff Simulation Model) in der von HAAG et al. (2022b) beschriebenen Konfiguration (Kap. 3).

Der nächste Schritt ist dann, die Fließakkumulation des Oberflächenabflusses mithilfe eines geeigneten hydraulischen Ansatzes zu ermitteln. Die Zielgrößen hierbei sind die maximale Wassertiefe [m], die maximale Fließgeschwindigkeit [m/s] und der maximale spezifische Abfluss [m³/s/m] in ausreichender räumlicher Auflösung. Im vorliegenden Fall berechnet diese das

Modell AccRo (Accumulated Runoff Model) (LEISTERT et al., 2025; Kap. 3). Grundsätzlich lässt sich der SFI je nach Zielsetzung basierend auf hydrologischen und hydraulischen Modellergebnissen unterschiedlicher räumlicher und zeitlicher Auflösung ermitteln. Im vorliegenden Fall werden Modellergebnisse mit einer räumlichen Auflösung von 5 x 5 m und einer zeitlichen Auflösung von 5 Minuten genutzt (Kap. 3).

Auf Basis der Ergebnisse der kombinierten hydrologisch-hydraulischen Berechnungen werden sogenannte Sturzflutgefahrenflächen (SFGF) ermittelt. Dabei handelt es sich um jene Flächen, auf denen die Standsicherheit insbesondere von vulnerablen Fußgängern oder kleinen Fahrzeugen durch oberflächlich abfließendes Wasser gefährdet ist (KRUMM et al., 2024). Die zur Abgrenzung der SFGF notwendigen Schwellenwerte wurden

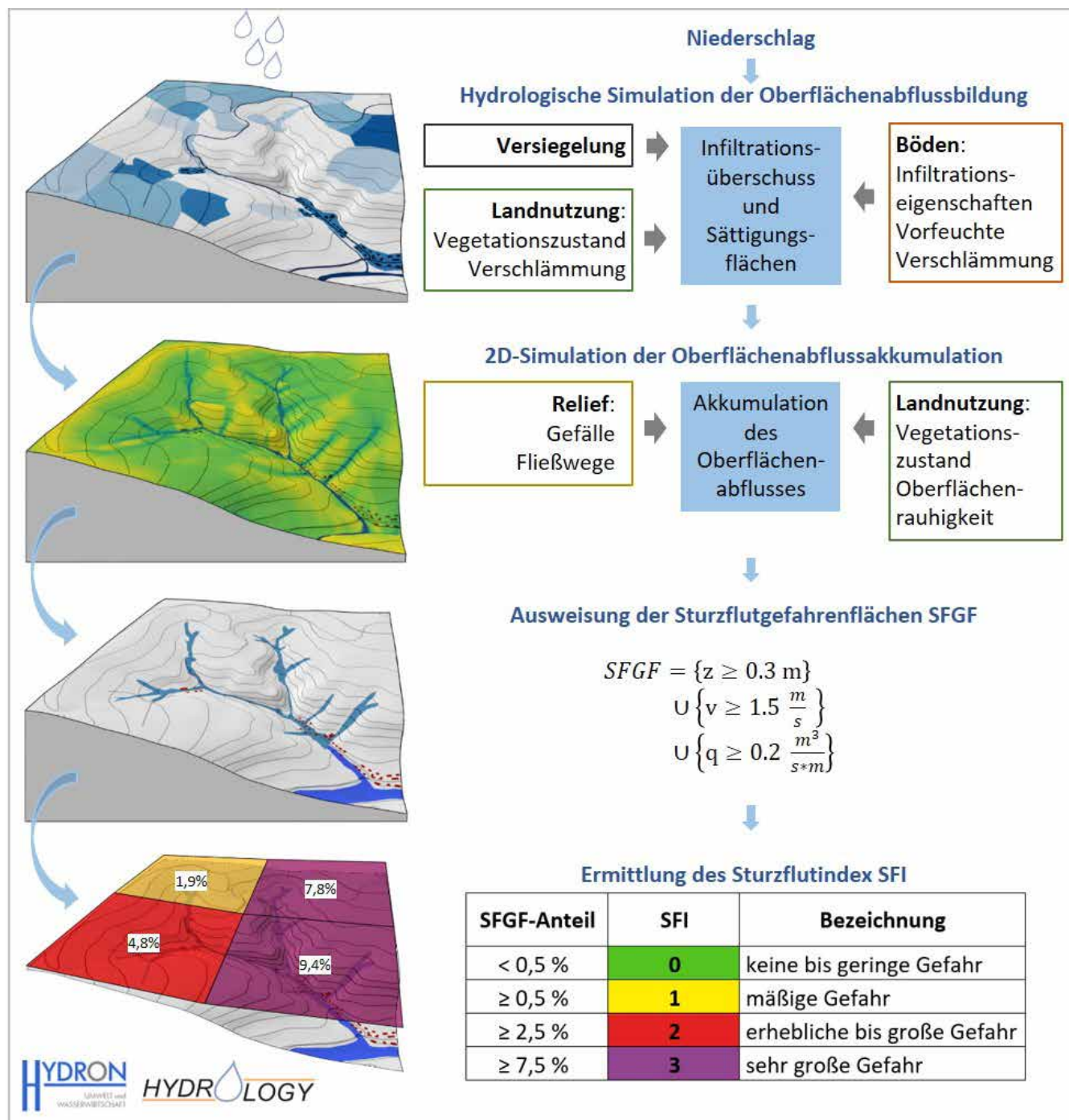


Abbildung 1

Zusammenfassung der Definition und des Vorgehens zur Ermittlung des SFI (z = Überflutungstiefe, v = Fließgeschwindigkeit, q = spezifischer Durchfluss; verändert nach Krumm et al. (2024)).

Summary of the definition of the PFI and the methodology to derive it (z = water depth, v = flow velocity, q = specific discharge; based on Krumm et al. (2024), modified).

auf der Basis entsprechender Literaturübersichten festgelegt (MARTÍNEZ-GOMARIZ et al., 2016; 2018). Eine SFGF liegt vor, wenn die Wassertiefe über 0,3 m, die Fließgeschwindigkeit über 1,5 m/s, oder der spezifische Abfluss über 0,2 m³/s/m liegt (KRUMM et al. 2024; Abb. 1).

Der SFI ergibt sich schließlich aus dem relativen Anteil von SFGF an einer definierten Bezugsfläche. Hierfür wird der SFI anhand von drei Schwellenwerten für den relativen SFGF-Anteil in vier Klassen kategorisiert (Abb. 1). Im Vergleich zu KRUMM et al. (2024) nimmt diese Studie auf der Grundlage von zusätzlichen Tests und Analysen Veränderungen an den Bezugsflächen und Schwellenwerten für die SFGF-Anteile vor: In Abweichung von der ursprünglichen rasterbasierten Ausweisung des SFI dienen hier räumlich gleitende Kreise mit einer Fläche von 2 km² bzw. einem Radius von ca. 798 m als Bezugsfläche.

Die Verwendung räumlich gleitender Kreise verringert im Vergleich zu Rastern mit fester Position ungewollte Randeffekte an den Übergängen von einem Raster zum nächsten. Die Kreismittelpunkte werden schrittweise über die Auswertungsraster, hier 5 x 5 m, verschoben und für jeden Kreis wird der Flächenanteil der SFGF ermittelt. Aus den SFGF-Anteilen des jeweiligen Kreises lässt sich dann anhand der in Abbildung 1 enthaltenen Schwellenwerte der SFI ermitteln, der dann für die gesamte Kreisfläche gilt. Für jede 5 x 5 m messende Rasterzelle wird der maximale SFI-Wert aller mit der Rasterzelle überlappenden Kreise weiterverwendet.

Die Schwellenwerte wurden auf der Basis von bislang neun untersuchten Ereignissen, inkl. der vier hier dargestellten, und zahlreichen Szenarien festgelegt. Dabei handelt es sich um eine vorläufige Festlegung, die anhand weiterer Ereignisse und Szenarien zu überprüfen und ggf. anzupassen ist.

Eine ausführlichere Beschreibung des Sturzflutindex mit Hintergründen und möglichen Anwendungsbereichen findet sich in KRUMM et al. (2024).

3 Methodik und untersuchte Ereignisse

3.1 Methodik

Die hydrologischen Vorbedingungen der hier analysierten Ereignisse wurden mit stundenwertbasierten LARSIM-Modellen unter Verwendung von meteorologischen Stationsdaten berechnet. Die Modelle stellten die beteiligten Bundesländer zur Verfügung. Die Ereignisse selbst wurden mit Artefakt-korrigierten und an Stationsdaten kalibrierten Radarniederschlägen mit einer zeitlichen Auflösung von 5 Minuten und einer räumlichen Auflösung von ca. 700 x 700 m simuliert. Diese Radar-Reanalyse-Daten wurden im Rahmen des BMBF-Verbundprojekts AVOSS erzeugt und bereitgestellt. Das Verfahren der Kalibrierung ist in WEILER et al. (2019) dargestellt.

Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM (BREMICKER, 2000; LEG, 2024), wurde für die Ermittlung der Vorbedingungen in Stundenschritten wie auch für die hydrologische Berechnung der Ereignisse verwendet. Die Berechnung der Ereignisse erfolgte mit LARSIM unter Nutzung eines Infiltrationsansatzes, der aus dem Niederschlag-Abflussmodell RoGer (Runoff Generation Research) stammt (STEINBRICH et al., 2016), mit der von HAAG et al. (2022b) beschriebenen Modellkonfiguration in Zeitschrit-

ten von fünf Minuten. Einerseits wurde dabei das gesamte Abflussgeschehen inklusive Abflusskonzentration und Wellenablauf in den Gerinnen berechnet, um den simulierten Abfluss mit den Messwerten an Pegeln vergleichen zu können. Andererseits diente LARSIM auch dazu, nur die Bildung von Oberflächenabfluss zu ermitteln.

Dabei ist zu beachten, dass LARSIM-Modelle in Teilgebiete (TGB) aufgeteilt sind, welche ihrerseits wiederum räumlich feiner in Hydrotope bzw. Unterteilgebiete mit einheitlicher Landnutzung und Bodencharakteristik unterteilt werden. Die TGB können dabei entweder Raster sein, z. B. in Baden-Württemberg, oder reale hydrologische Teileinzugsgebiete abbilden, wie in allen anderen hier verwendeten Modellen (Abb. 3). Der Niederschlag wird jeweils auf den Teilgebietsschwerpunkt interpoliert und ist für das gesamte TGB identisch. Insbesondere bei kleinräumigen Starkregenzellen limitiert die Teilgebietsgröße somit die räumliche Auflösung der Niederschlagsverteilung. In den baden-württembergischen Raster-Modellen umfassen die TGB 1 km²; in den hier verwendeten Ausschnitten der Modelle mit hydrologischen TGB beträgt die durchschnittliche Größe für Rheinland-Pfalz und Bayern je ca. 1,5 km² und im Modell für Hessen ca. 4,9 km².

Bei den Hydrotopen handelt es sich um wesentlich kleinräumigere Polygone, wobei der versiegelte Anteil eines Teilgebiets als ein eigenes Hydrotop betrachtet wird. Neben anderen Prozessen simuliert das Modell auch die Bildung von Oberflächenabfluss hydrotopspezifisch. Im letzten Schritt wird der je Hydrotop gebildete Oberflächenabfluss unter Berücksichtigung des Versiegelungsgrads in das 5-x-5-m-Raster des für die Fließakkumulation verwendeten digitalen Geländemodells (DGM) überführt. Als Endergebnis der hydrologischen Simulation liegt der gebildete Gesamtoberflächenabfluss also in einer zeitlichen Auflösung von 5 Minuten und einer räumlichen Auflösung von 5 x 5 m vor.

Die Berechnung der Fließakkumulation des Oberflächenabflusses erfolgte mithilfe des Modells AccRo (Accumulated Runoff Model), das an der Professur für Hydrologie der Universität Freiburg entwickelt wurde und eine vereinfachte, sehr recheneffiziente Abbildung der 2D-Hydrodynamik ermöglicht (LEISTERT et al., 2025). Im vorliegenden Fall erfolgte die Berechnung auf Basis eines 5-m-DGM, wobei die zugewiesenen Rauigkeiten in allen vier Gebieten auf den Vorgaben des Leitfadens für das kommunale Starkregenisikomanagement in Baden-Württemberg beruhen (LUBW, 2016). Der mit LARSIM zuvor in derselben räumlichen Auflösung ermittelte Oberflächenabfluss ging als oberflächenabflusswirksamer Effektivniederschlag in die Berechnung ein. Als Endergebnis der Modellkette resultieren, in einer räumlichen Auflösung von 5 x 5 m, die ereignisspezifischen maximalen Werte der Wassertiefe, der Fließgeschwindigkeit und des spezifischen Abflusses, die sich zur Ermittlung der SFGF einsetzen lassen.

3.2 Untersuchte Ereignisse

Eine Übersichtskarte mit der Lage der hier untersuchten Ereignisse findet sich in Abbildung 2. Damit sich die Beispiel-Sturzfluten und ihre Folgen qualitativ einordnen lassen, werden diese im Folgenden kurz beschrieben.

3.2.1 Rudersberg (Baden-Württemberg) – 2. Juni 2024

Die zweite Maihälfte 2024 war in Teilen Süddeutschlands sehr niederschlagsreich (MOHR et al., 2024). Vom 31. Mai bis 1. Juni 2024 fiel im Rems-Murr-Kreis dann noch einmal sehr ergiebiger

Dauerregen (LANDTAG BW, 2024). Im Rems-Einzugsgebiet bildete sich folglich eine Hochwasserlage aus. Am 2. Juni 2024, bei nachlassender Hochwasserlage und extrem feuchten Vorbedingungen, trat im Einzugsgebiet des Rems-Zuflusses Wieslauf über einen Zeitraum von ca. 5 Stunden zusätzlich ein extremes Starkregenereignis auf. Die Niederschlagssummen betrugen für einzelne Dauern fast das doppelte des 100-jährlichen Niederschlags. Insbesondere die Gemeinde Rudersberg war in Folge des Starkregens von katastrophalen Schäden durch wild abfließendes Wasser betroffen. In Tallagen traten zusätzlich Überflutungen entlang der Gewässer auf. Die Schäden in Rudersberg wurden auf mehr als 120 Mill. € geschätzt. Ungefähr 1.000 Haushalte und die Hälfte der öffentlichen Einrichtungen der Gemeinde waren betroffen. Es ereigneten sich ca. 30 Hangrutsche, und 20 Brücken im Gemeindegebiet waren beeinträchtigt (SZ, 2024).

3.2.2 Stadallendorf (Hessen) – 11. August 2020

Von ca. 10. bis ca. 14. August 2020 stand Westdeutschland unter dem Einfluss von heiß-feuchter Luft aus dem Mittelmeerraum. Über einen Zeitraum von mehreren Tagen kam es zu zahlreichen Gewittern, die lokale Überschwemmungen mit sich brachten. Am 11. August 2020 ereignete sich in Stadallendorf im Landkreis Marburg-Biedenkopf, mit Niederschlagsmaxima über dem Ortsteil Erksdorf, ein Niederschlagsereignis mit ca. 2 Stunden Dauer und ca. 100 Jahren Wiederkehrintervall. Infolgedessen strömte

wild abfließendes Wasser abseits des Erksdorfer Bachs durch den Ortsteil Erksdorf. Wasserhöhen bis ca. 40 cm auf einer Straße sind dokumentiert.

3.2.3 Herrstein (Rheinland-Pfalz) – 27. Mai 2018

In der zweiten Maihälfte 2018 stand Rheinland-Pfalz bedingt durch die Wetterlage Tief Mitteleuropa unter dem Einfluss von feuchter, subtropischer Luft. Dadurch entwickelten sich gehäuft Gefahrenlagen für Gewitter- und Starkregenereignisse (LFU RLP, 2018). Am 27. Mai 2018 trat am Oberlauf des Fischbachs im Hunsrück ein ca. 2,5 Stunden andauerndes Niederschlagsereignis mit extremen Intensitäten auf. Die Niederschlagssummen erreichten hier für mehrere Dauerstufen ca. das Doppelte eines 100-jährlichen Niederschlags. Die Bodenfeuchten vor Ereignisbeginn waren laut Modellberechnungen überdurchschnittlich, aber nicht extrem feucht. Schwere Schäden traten aufgrund der enormen Hochwasserwelle im Fischbach v. a. in den am Unterlauf des Gewässers liegenden Gemeinden Herrstein, Niederwörresbach und Fischbach auf. Es wurden hunderte von Gebäuden beschädigt und mehr als 50 PKWs weggespült. Wild abfließendes Wasser und Geröll beschädigten in der Gemeinde Herrstein abseits des Fischbachs die Integrierte Gesamtschule schwer. In der Verbandsgemeinde Herrstein wurde der Gesamtschaden auf einen mehrstelligen Millionenbetrag geschätzt (BADISCHE ZEITUNG, 2018).

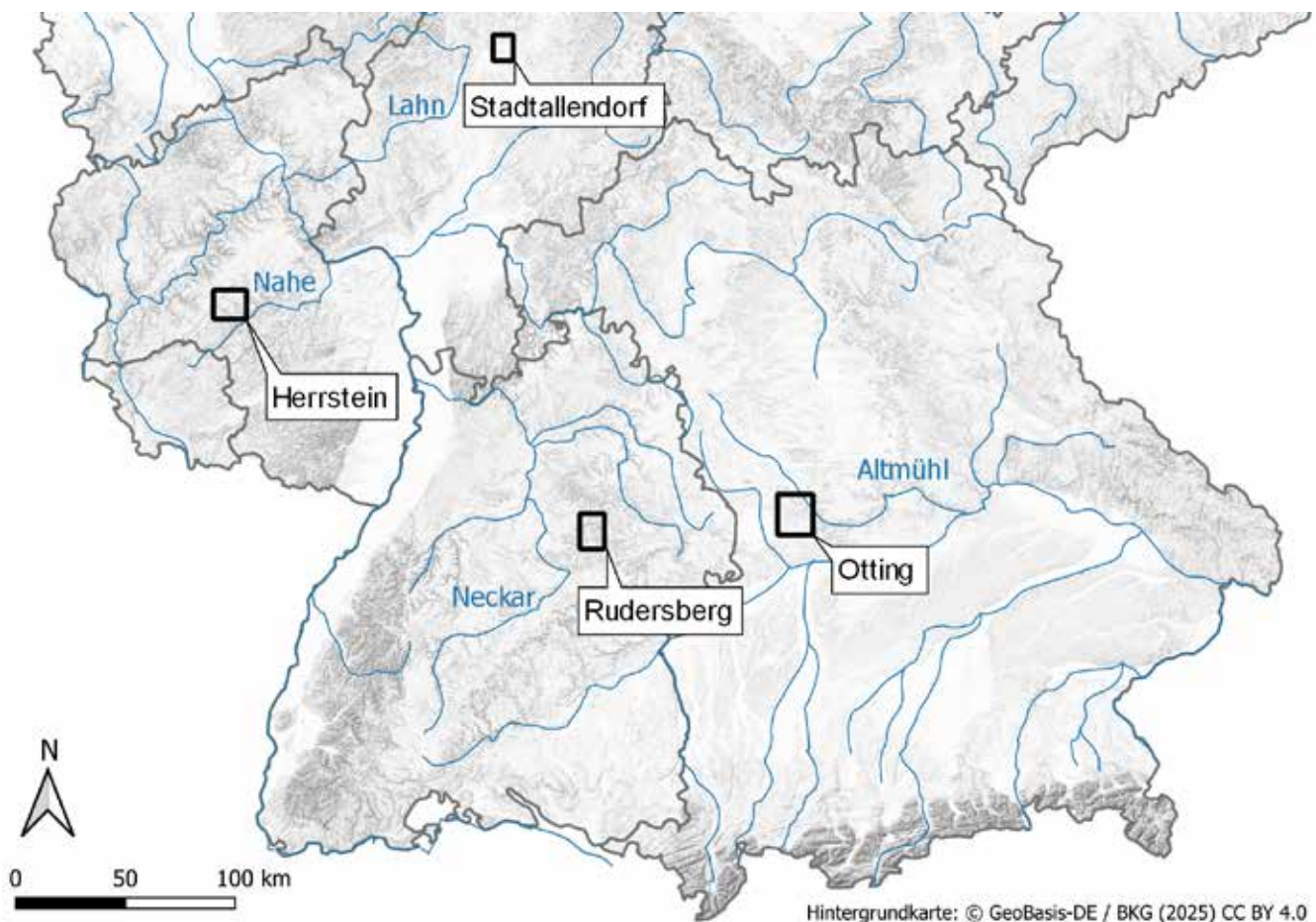


Abbildung 2

Übersichtskarte der Lage der vier untersuchten pluvialen Sturzflut-Ereignisse in Baden-Württemberg, Hessen, Rheinland-Pfalz und Bayern.

Overview map depicting the locations of the four pluvial flood events under analysis, in Baden-Württemberg, Hesse, Rhineland-Palatinate and Bavaria.

3.2.4 Otting (Bayern) – 15. August 2017

Am 15. August 2017 trat ein ca. 2,5 Stunden andauerndes Starkregenereignis über der Gemeinde Otting im Landkreis Donau-Ries auf, wobei die Niederschlagssummen eines 100-jährlichen Ereignisses ca. um das 1,5-fache überschritten wurden. Die Bodenfeuchten vor Ereignisbeginn lagen laut Modellberechnungen nur leicht über den Durchschnittswerten für das Sommerhalbjahr. Der Niederschlag strömte großräumig als wild abfließendes Wasser über die überwiegend landwirtschaftlich genutzten Hänge in die Gemeinde. Der Abfluss konzentrierte sich auf den Straßen und letztendlich auf der Hauptstraße sowie im und um den Möhrenbach. Die Schäden an ca. 80 privaten und einigen öffentlichen Gebäuden und Infrastruktur wurden auf ca. 3 Mill. € geschätzt (DONAU-RIES-AKTUELL, 2017a; DONAU-RIES-AKTUELL, 2017b).

4 Ergebnisse und Diskussion

Tabelle 1 gibt einen quantitativen Überblick zu Niederschlägen und Abflüssen der vier Ereignisse. Die räumliche Verteilung von Niederschlag, simuliertem Oberflächenabfluss, Sturzflutgefahrenflächen (SFGF) und abgeleitetem Sturzflutindex (SFI) für die Ereignisse ist in Abbildung 3 dargestellt.

4.1 Rudersberg (Baden-Württemberg) – 2. Juni 2024

Die Radarniederschläge für das Ereignis in Rudersberg wurden für eine Dauer von 5 Stunden ausgewertet. Die Niederschlagszelle zog in diesem Zeitraum von Nordosten Richtung Südwesten über das Wieslauf-Einzugsgebiet. Für Dauerstufen zwischen 2 und 4 Stunden wurde dabei ein Starkregenindex von 10 erreicht (SRI nach SCHMITT et al., 2018, auf der Basis der koordinierten Starkniederschlagsregionalisierung und -auswertung des Deutschen Wetterdienstes, KOSTRA 2020). Die maximale Niederschlagssumme für ein LARSIM-Teilgebiet liegt bei 132 mm (Abb. 3a). Aufgrund der hohen Intensitäten und auch bedingt durch die hohe Vorfeuchte werden extrem große Mengen an Oberflächenabfluss, nicht nur auf versiegelten Flächen, simuliert (Abb. 3b).

Es resultieren ausgedehnte SFGF sowohl entlang der Wieslauf, insbesondere entlang des Mittellaufs, als auch in den wesentlich kleineren Zufluss-Einzugsgebieten wie z. B. dem Einzugsgebiet des Lindenbächle. Entlang des Wieslauf-Mittellaufes und in Teilen der dortigen Zufluss-Einzugsgebiete ergibt sich damit großflächig ein $SFI = 3$ (Abb. 3c). Umliegende und die Mündung in die Rems umfassende Flächen erreichen $SFI = 2$. Lediglich einige Oberläufe nördlich und südlich der maximalen Niederschläge liegen innerhalb von Flächen mit $SFI = 0$. Bezüglich der SFI-Darstellung ist zu beachten, dass es jeweils an den Grenzen des ausgewerteten Gebietes und bei hydrologisch nicht vollständig abgebildeten Einzugsgebieten Randeffekte geben kann, da nicht dargestellte Flächen vereinfachend mit $SFGF = 0$ angenommen wurden. Aufgrund der Schwere des Ereignisses in der Gemeinde Rudersberg erscheint die großflächige Einordnung mit $SFI = 3$ (sehr große Gefahr) sinnvoll.

Das Ereignis wurde am Pegel Haubersbronn/Wieslauf erfasst. Die Abflussmessung (Abb. 4a) ist im hohen Abflussbereich mit erheblicher Unsicherheit behaftet, da der Wasserstand die vorliegende Wasserstands-Abfluss-Beziehung überstieg. Die mit dem Modell LARSIM berechneten Oberflächenabflüsse wurden neben der Ausgabe für AccRo auch in LARSIM weiterverwendet, um in Kombination mit den zugehörigen langsamen Abflusskomponenten den Gesamtabfluss am Pegelstandort zu simulieren. Dabei ergibt sich die in Abbildung 4a dargestellte Ganglinie. Es ist zunächst festzuhalten, dass das in Realität aufgetretene Extremereignis ($HQ_{5.000}$) durch das Modell korrekt identifiziert wurde. Die Form der simulierten Ganglinie weicht hingegen deutlich von der Messung ab, sodass der Scheitel klar überschätzt wird. Das Abflussvolumen wird mit einer Überschätzung um 13 % simuliert.

Neben den Unsicherheiten bei Abflussmessung und Niederschlag sind die Abweichungen zwischen Simulation und Messung sicher auch darauf zurückzuführen, dass bei einem solchen Extremereignis auch Prozesse auftreten, die im hydrologischen

Tabelle 1

Quantitative Ereignis-Beschreibung (TGB = LARSIM-Teilgebiet, SRI = Starkregenindex, OA = Oberflächenabfluss, SFGF = Sturzflutgefahrenfläche, SFI = Sturzflutindex).

Quantitative description of events (TGB=spatial sub-unit of LARSIM, SRI = heavy rain index, OA = surface runoff, SFGF = pluvial flood hazard area, SFI = pluvial flood index).

Ort	Rudersberg	Stadtallendorf	Herrstein	Otting
Datum	2. Juni 2024	11. August 2020	27. Mai 2018	15. August 2017
ausgewertete Dauer [min]	300	130	145	145
max. Niederschlag TGB [mm]	132	51	110	75
max. SRI [-] (maßgebl. Dauer)	10 (120 – 240 min)	7 (45 – 90 min)	10 (45 – 120 min)	9 (60 – 120 min)
max. OA [mm]	120	45	106	70
max. Ant. SFGF [%]	17	5	5	7
max. SFI	3	2	2	2
Abflusspegel	Haubersbronn	–	Gerach	–
Gewässer	Wieslauf	–	Fischbach	–
Abflussjährlichkeit Messung	~ $HQ_{5.000}^*$	–	> HQ_{100}	–
Abflussjährlichkeit Simulation	> $HQ_{5.000}$	–	> HQ_{100}	–
Abflussvolumen Simulation Messung	1.13	–	0.96	–

* Abflussscheitel unsicher

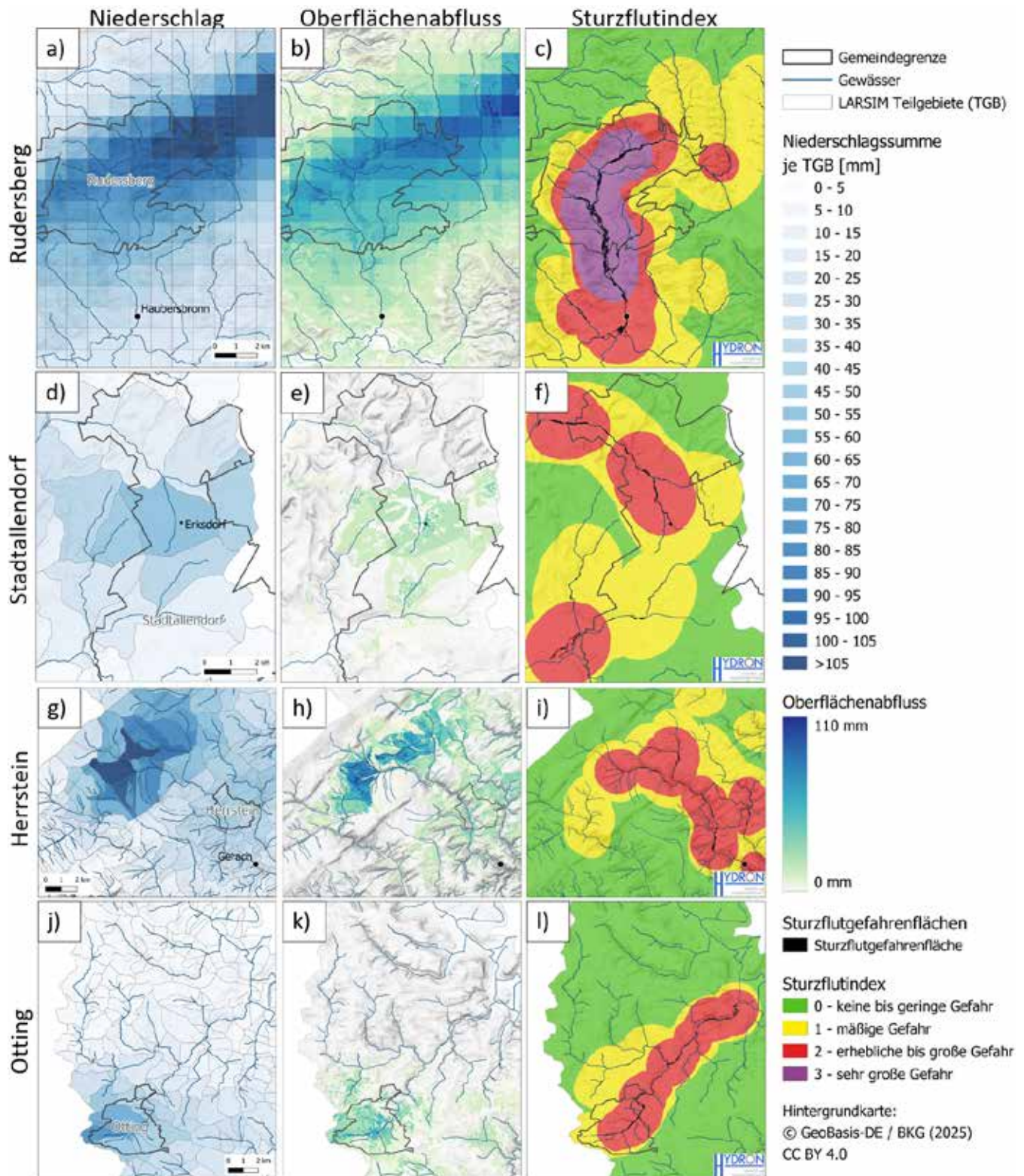


Abbildung 3

Räumliche Verteilung von Niederschlag je LARSIM-TGB (links), Oberflächenabfluss je 5-x-5-m-Raster (Mitte), Sturzflutgefahrenflächen je 5-x-5-m-Raster und Sturzflutindex (beide rechts) für die vier untersuchten Ereignisse. Weiße Flächen sind durch das jeweilige Modell nicht abgedeckt.

Spatial distribution of precipitation per LARSIM spatial sub-unit (left), surface runoff per 5 x 5 m grid (centre), pluvial flood hazard areas per 5 x 5 m grid and pluvial flood index (both right) for the four analysed events. White areas are not included in the respective model.

Modell nicht abgebildet sind. Hierzu zählt unter anderem der signifikante dauerhafte Rückhalt von Wasser im Überschwemmungsgebiet, z. B. in Straßen und Kellern. Vor diesem Hintergrund erscheint die hydrologische Simulation des Ereignisses und insbesondere des Abflussvolumens zufriedenstellend. Entsprechend kann auch das Oberflächenabflussvolumen aus LARSIM, welches in die SFGF- und SFI-Berechnung einging, als plausibel angesehen werden.

4.2 Stadtallendorf (Hessen) – 11. August 2020

In Stadtallendorf dauerte das ausgewertete Starkregenereignis laut Radardaten 130 Minuten. Für Dauerstufen zwischen 45 und 90 Minuten wurde SRI = 7 erreicht. Es fielen in Summe maximal 51 mm Niederschlag in dem LARSIM-Teilgebiet im Bereich von Erksdorf. Auch Oberläufe des südlich benachbarten Einzugsgebiets waren von starken Niederschlägen betroffen (Abb. 3d). Oberflächenabfluss wird laut Simulation v. a. räumlich begrenzt in diesen Gebieten und im Vergleich zu Rudersberg in erheblich geringerem Ausmaß gebildet (Abb. 3e). SFGF abseits der Gewässer ergeben sich v. a. in Erksdorf und in unbebautem Gebiet ganz im Südwesten des dargestellten Ausschnitts (Abb. 3f). Die SFGF in Erksdorf stimmen mit der dokumentierten Straßenüberflutung mit Wassertiefen von wenigen Dezimetern überein. Weitere Schadensmeldungen sind nicht bekannt. Dies könnte möglicherweise auch darauf zurückzuführen sein, dass ansonsten vorrangig Gebiete außerhalb von Siedlungsflächen betroffen waren. Die Einordnung mit einem maximalen SFI = 2 (erhebliche bis große Gefahr) scheint für den Ortsteil Erksdorf daher realistisch. Die darüberhinausgehend mit SFI = 2 bewerteten Bereiche umfassen überwiegend unbebaute Flächen, für die keine Daten zur Plausibilisierung vorliegen.

4.3 Herrstein (Rheinland-Pfalz) – 27. Mai 2018

Der Niederschlag im Fischbach-Einzugsgebiet dauerte knapp 2,5 Stunden und fiel zunächst primär im Oberlauf. Dort wurde bei einer maximalen Niederschlagssumme von 110 mm für Dauerstufen zwischen 45 Minuten und zwei Stunden SRI = 10 erreicht. Die Region um Herrstein war mit geringem zeitlichem Versatz von einer zweiten Zelle betroffen, die laut Radardaten in weniger als 1,5 Stunden ca. 40 mm Niederschlag ergab (Abb. 3g). Oberflächenabfluss wird laut Simulation primär im Bereich der maximalen Niederschläge gebildet, wobei die maximalen Abflusshöhen fast die Höhe der Werte an der Wieslauf erreichen. Aber auch in der Region um Herrstein wird relativ großflächig Oberflächenabfluss simuliert, wenngleich in geringeren Mengen (Abb. 3h). SFGF konzentrieren sich in den stark betroffenen Oberläufen sowie entlang des Fischbachs, v. a. im Mittel- und Unterlauf, sodass großräumig entlang des Fischbachs SFI = 2 berechnet wird (Abb. 3i). Inwieweit aufgrund der Schwere des Ereignisses im Bereich von Herrstein hier möglicherweise eine Einordnung in SFI = 3 (sehr große Gefahr) besser gepasst hätte als die erfolgte Einordnung in SFI = 2 (erhebliche bis große Gefahr), wird in Kapitel 4.5 diskutiert.

Der am Pegel Gerach gemessene und mit LARSIM simulierte Abfluss ist in Abbildung 4b dargestellt. Auch hier liegen dieselben Unsicherheiten sowie unberücksichtigten Einflussfaktoren und Prozesse vor, die bereits für Haubersbronn aufgeführt sind. Zudem hat sich der Gerinnequerschnitt während des Ereignisses verändert und der Pegel wurde umflossen (LfU RLP, 2018). Sowohl das Volumen (-4 %) wie auch der Scheitel der Pegelmessung (HQ_{100}) werden durch das Modell ungeachtet dessen sehr

gut getroffen, wenngleich die simulierte Ganglinie der gemessenen um gut eine Stunde voraneilt. Insbesondere aus der sehr guten Nachbildung des Abflussvolumens am Pegel lässt sich folgern, dass das Oberflächenabflussvolumen, welches der SFI-Berechnung zugrunde liegt, realistisch ist.

4.4 Otting (Bayern) – 15. August 2017

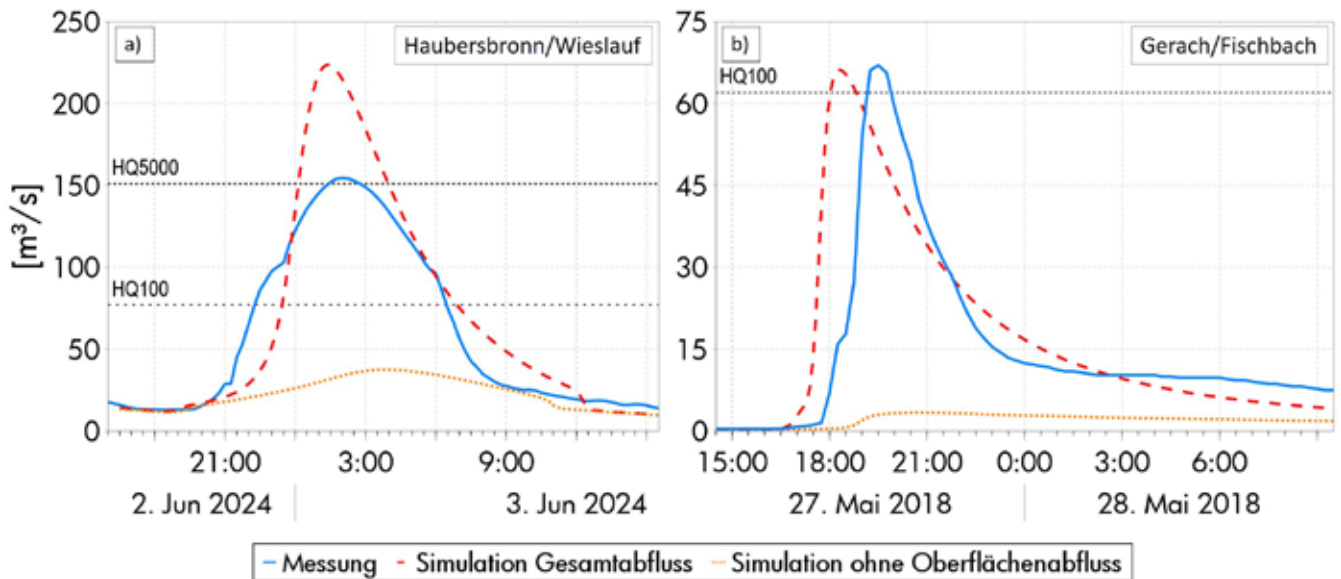
Das Ereignis in Otting dauerte laut Radardaten knapp 2,5 Stunden. Es fielen maximal 75 mm Regen, wobei die höchsten Niederschläge räumlich konzentriert direkt über dem Gemeindegebiet und damit dem Oberlauf des Möhrenbachs niedergingen (Abb. 3j). Für die Dauer von 1 bis 2 Stunden wurde dort SRI = 9 erreicht. Auf den landwirtschaftlichen Flächen rund um die Gemeinde, in den Tallagen sowie in der Ortschaft berechnet LARSIM Oberflächenabfluss (Abb. 3k). Dieser erreicht mit maximal 70 mm höhere Werte als in Stadtallendorf, aber deutlich geringere Werte als in Rudersberg. Aus der Akkumulation ergeben sich schon oberhalb von Otting sowie im Bereich der Gemeinde und entlang des Möhrenbachs SFGF. In Otting und entlang des Möhrenbachs liegt SFI = 2 vor (Abb. 3l). Aufgrund des bekannten Abflussgeschehens in Otting, mit aus drei Richtungen auf den Ort zufließendem Hangwasser und moderaten Schäden, scheint die Einordnung in SFI = 2 (erhebliche bis große Gefahr) realistisch. Im unterhalb gelegenen Bereich des Möhrenbachs sind überwiegend unbebaute Flächen von SFGF betroffen, sodass hier keine Angaben zu Schäden vorliegen und die SFI-Klassifikation nicht bewertet werden kann.

4.5 Ereignisübergreifende Diskussion der Ergebnisse

Die Simulationsergebnisse sind ein weiterer Beleg dafür, dass das Wasserhaushaltsmodell LARSIM mit dem aus dem Niederschlag-Abflussmodell RoGeR (Runoff Generation Research) übertragenen dynamischen Infiltrationsmodul gut geeignet ist, um pluviale Sturzfluten zu simulieren (STEINBRICH et al., 2016; HAAG et al., 2022b). Dies wurde zunächst für mehrere Ereignisse in Baden-Württemberg belegt (HAAG et al., 2019). Weitere Forschung zeigte dann, dass der Ansatz auch für Luxemburg und Nordrhein-Westfalen mit den dort verfügbaren Daten parametrisiert und angewandt werden kann (HAAG et al., 2022b). In der vorliegenden Studie wird nun deutlich, dass der Ansatz auch für Rheinland-Pfalz, Hessen und Bayern mit den länderspezifischen Datengrundlagen einsetzbar ist.

Hinsichtlich der Bewertung der Ergebnisse ist hervorzuheben, dass der SFI wie oben erläutert als robuster, großräumiger Gefahrenindex zu verstehen ist, der operationelle Aussagen dazu ermöglicht, ob eine pluviale Sturzflut auftritt und wie ausgeprägt diese voraussichtlich ist. Fachpersonal kann den SFI oder exaktere Angaben zum SFGF-Anteil mit Detailinformationen aus Starkregen- bzw. Sturzfluthinweiskarten und Risikoanalysen verknüpfen und damit genauere Aussagen hinsichtlich der erforderlichen Maßnahmen in den Kommunen ableiten (KRUMM et al., 2024).

Wie vor allem die Beispiele Stadtallendorf und Otting verdeutlichen, werden mit dem Gefahrenindex SFI auch unbesiedelte Gebiete mit Warnungen versehen, für die sich die korrekte SFI-Einordnung naturgemäß nicht anhand von Schadensmeldungen überprüfen lässt. Die Warnung für diese unbebauten Gebiete mit dem SFI ist aber gewünscht, da auch dort Menschen z. B. auf Rad oder Wanderwegen und auf landwirtschaftlichen Grundstücken gefährdet sein können.

**Abbildung 4**

Gemessene und mit LARSIM simulierte Abflussganglinien an den Pegeln Haubersbronn/Wieslauf (a) und Gerach/Fischbach (b). Dargestellte Abflussmessungen sind an beiden Pegeln in hohen Abflussbereichen mit Unsicherheit behaftet.

Time series of measured and simulated discharge at the gauges Haubersbronn/Wieslauf (a) and Gerach/Fischbach (b). Depicted measured discharge contains considerable uncertainty in high discharge range for both gauges.

Aus dem Vergleich der SFI-Werte mit den qualitativen Angaben zur Schwere der Ereignisse ergibt sich eine überwiegend realistische und somit sinnvolle Klassifizierung der Ereignisse. Lediglich für das Ereignis in Herrstein wäre zu diskutieren, ob hier möglicherweise ein $SFI = 3$ (sehr große Gefahr) besser gepasst hätte als $SFI = 2$ (erhebliche bis große Gefahr). Dabei ist allerdings zu beachten, dass die Gefährdung in diesem Fall primär durch Überschwemmungen aus dem Gewässer heraus resultierte, während wild abfließendes Wasser in der Gemeinde Herrstein, mit Ausnahme der Integrierten Gesamtschule, offenbar eine geringere Rolle spielte. Der SFI und das hier verwendete sehr recheneffiziente und ggf. auch großräumig in Echtzeit einsetzbare Akkumulationsverfahren sind nicht dafür ausgelegt, das Abfluss- und Überflutungsgeschehen eines Flussschlauchs detailliert abzubilden.

Das Beispiel verdeutlicht somit die Problematik des Übergangs zwischen der Simulation bzw. Vorhersage einer pluvialen Sturzflut und eines fluvialen Hochwassers. Eine Möglichkeit, dieses Problem anzugehen, ist die Kombination der herkömmlichen Hochwasservorhersage mit dem SFI. Im vorliegenden Fall wäre mit dem operationellen LARSIM bei Vorliegen der entsprechenden Niederschlagsdaten ein HQ_{100} am Pegel Gerach vorhergesagt worden (Abb. 4b), was zu einer entsprechenden Warnung für ein Flusshochwasser geführt hätte. Aus der Kombination beider Klassifikationen, pluviale Sturzflut und Flusshochwasser, wäre deutlich geworden, dass sowohl große Gefahr durch wild abfließendes Wasser ($SFI = 2$) wie auch durch Überflutung aus dem Gewässer (HQ_{100}) besteht.

Die in zwei der vier Gebiete verfügbaren Pegelmessungen stellen eine zusätzliche Datenquelle zur Grobplausibilisierung des in LARSIM berechneten Gesamtabflussvolumens dar. Die Unsicherheit der Pegelmessungen im extremen Abflussbereich ist bei der Seltenheit der Ereignisse (insbesondere Pegel Haubersbronn/

Wieslauf) nicht ungewöhnlich. Unter Berücksichtigung der Messungenauigkeiten und der Ungenauigkeiten der Abbildung der Fließwege in LARSIM bei solchen Extremereignissen wird das simulierte Volumen an beiden Pegeln als plausibel eingeschätzt. Im Gegensatz zu den Gebieten mit Abflussmessung zeigen die Beispiele Stadtallendorf und Otting, dass auch lokale pluviale Sturzfluten auftreten, die nicht durch Pegel im Gewässer erfasst werden und teilweise auch nicht zu signifikanten Flusshochwassern führen. Mit der hier vorgestellten Methodik des SFI können diese pluvialen Ereignisse trotzdem adäquat erfasst und ggf. vorhergesagt werden.

In der Literatur ist klar belegt, dass es Starkregen gibt, die zu keiner pluvialen Sturzflut führen (HENGST, 2019), sodass der SFI auf jeden Fall einen Mehrwert gegenüber dem gebräuchlichen Starkregenindex SRI hat. Um die Anwendung des SFI zu verdeutlichen, wurden in der vorliegenden Studie nur Niederschlagsereignisse analysiert, die auch zu pluvialen Sturzfluten führten. Trotzdem ergeben sich auch hier Hinweise auf den Mehrwert des SFI gegenüber dem SRI. Die Ergebnisse zeigen, dass Flächen mit hohem SFI nicht unbedingt den Flächen mit hohem Niederschlag und hoher Abflussbildung entsprechen. Vielmehr ergibt sich die Sturzflutgefahr durch das Zusammenwirken von Niederschlag, Abflussbildung und Abflussakkumulation.

Außerdem wird deutlich, dass ein $SRI = 7$ (N_{100}) in Stadtallendorf-Erksdorf zu ähnlich gravierenden Gefahren wie ein $SRI = 9$ ($\sim 1,5 * N_{100}$) in Otting führt, die beide qualitativ korrekt mit einem $SFI = 2$ klassifiziert wurden. In Rudersberg führte ein $SRI = 10$ großräumig zu Gefahren durch wild abfließendes Wasser sowie Flusshochwasser, die korrekt mit einem großräumigen $SFI = 3$ klassifiziert wurden. Diese sehr große Gefahr ist aber neben der extremen Intensität bzw. Menge des Niederschlags auch durch die Großräumigkeit des Niederschlags, dessen Zugrichtung und vor allem die hohe Vorfeuchte beeinflusst. All diese zusätzlichen

Aspekte berücksichtigt der SFI, nicht aber der SRI. Bislang wurden mit der SFI-Methodik aber kaum Starkregen untersucht, die zu keinen Sturzfluten geführt haben. Um den Mehrwert des SFI gegenüber dem SRI zu untermauern und die Wahrscheinlichkeit von „Fehlalarmen“ zu quantifizieren, empfiehlt es sich, zukünftig auch solche Niederschlagsereignisse zu analysieren.

5 Folgerungen und Ausblick

Die hier dargestellten Beispiele veranschaulichen die praktische Anwendung des neu entwickelten Sturzflutindex (SFI) anhand von vier unterschiedlichen Ereignissen in vier Bundesländern. Es wird deutlich, dass der SFI grundsätzlich als großräumiger, robuster Gefahrenindex geeignet ist, um pluviale Sturzfluten sinnvoll zu klassifizieren. Durch die Ermittlung von Sturzflutgefahrenflächen (SFGF) und den Bezug auf diese hat der SFI einen klaren Mehrwert gegenüber dem Starkregenindex (SRI), der hydrologische und hydraulische Aspekte nicht berücksichtigt.

Die hier untersuchten Ereignisse mit unterschiedlichen Charakteristika konnten mithilfe der festgelegten Schwellenwerte für die SFGF-Anteile und anhand einer 2 km² großen Bezugsfläche qualitativ weitgehend korrekt in SFI-Klassen eingeordnet werden. Nichtsdestotrotz findet derzeit anhand weiterer Ereignisse und Szenarien eine Prüfung und ggf. weitere Optimierung der SFGF-Schwellenwerte und der Größe bzw. Form der verwendeten Bezugsflächen statt. Auch die in dieser Studie verwendete Visualisierung des SFI ist Gegenstand weiterer Untersuchungen und wird weiter verfeinert.

Mit Blick auf eine mögliche zukünftige operationelle Vorhersage und Warnung vor pluvialen Sturzfluten ist das in der Hochwasservorhersage bereits umfassend eingesetzte Modell LARSIM sowohl aufgrund des Modellkonzepts als auch aufgrund der Recheneffizienz ein geeigneter Modellbaustein zur Ermittlung des in der Fläche gebildeten Oberflächenabflusses. Da LARSIM in den Vorhersagezentralen der Bundesländer, in welchen die hier untersuchten Gebiete liegen, operationell für die Hochwasservorhersage eingesetzt wird, ist zudem eine Übernahme der jeweils in der Hochwasservorhersage aktuell berechneten Vorbedingungen, z. B. Bodenfeuchte, in Modellläufe mit der für die SFI-Ermittlung benötigten Konfiguration möglich. Als weitere operationelle Eingangsgröße werden nur noch räumlich und zeitlich hoch aufgelöste Niederschlagsvorhersagen benötigt, wie sie die Vorhersagezentralen im Rahmen der Datenflüsse für die Hochwasservorhersage bereits operationell prozessieren.

Für das Ereignis im größten hier ausgewerteten Gebiet, Otting, das ca. 300 km² umfasst, liegt die Rechenzeit für Ermittlung und Postprozessierung der Oberflächenabflüsse auf einem handelsüblichen PC bei rund einer Minute. Auch unter Berücksichtigung der kurzen Vorwarnzeiten bei Sturzfluten lässt dies eine operationelle Anwendung möglich erscheinen. Die Abflussakkumulation kann, wie hier gezeigt, mit dem vereinfachten und dadurch sehr recheneffizienten Modell AccRo abgebildet werden. Mit Rechenzeiten von wenigen Minuten für 300 km² ist AccRo im Vergleich zu hochaufgelösten, klassischen hydraulischen Modellen extrem schnell. Für die großräumige, operationelle Verarbeitung einer Vielzahl von Ensemble-Vorhersagen ist dennoch eine weitere Verringerung der Rechenzeit wünschenswert. Optimierungen von AccRo finden im Rahmen von AVOSS derzeit noch statt.

Um zu möglichst verlässlichen und frühzeitigen Sturzflutwarnungen zu gelangen, sind aber auch weiterführende Arbeiten zur Verbesserung kurzfristiger Niederschlagsvorhersagen erforderlich. Zudem muss die resultierende Unsicherheit in der Sturzflutvorhersage in geeigneter Weise berücksichtigt und kommuniziert werden.

Wie die hier dargestellten Beispiele in Herrstein und Rudersberg, aber auch das verheerende Ahrhochwasser von 2021 zeigen, ist häufig keine klare Abgrenzung möglich zwischen pluvialen Sturzfluten, bei denen wild abfließendes Wasser die Hauptgefahrenquelle darstellt, und Flusshochwassern, bei denen die Hauptgefahr durch Überschwemmungen aus dem Gewässer resultiert. Für solche Ereignisse empfiehlt es sich, die SFI-basierte Sturzflutwarnung mit der herkömmlichen Hochwasserwarnung zu kombinieren. Eine geeignete Kommunikation der Warnungen bei solchen gemischten Ereignissen verdeutlicht dann, dass die Gefahr nicht nur von den Gewässern ausgeht, sondern auch von wild abfließendem Wasser abseits der Gewässer.

Wenngleich zweifellos noch Forschungs- und Optimierungsbedarf besteht, ist mit dem SFI und der hier angewandten Kombination der Modelle LARSIM und AccRo ein wichtiger Grundstein für eine sinnvolle operationelle Warnung vor Sturzfluten gelegt. Darüber hinaus bietet der SFI noch Anwendungsmöglichkeiten für weitere Fragestellungen wie z. B. für die großräumige Einordnung der Sturzflutanfälligkeit von Regionen (KRUMM et al., 2024).

Conclusion and outlook

The four different pluvial flash floods in four federal states of Germany that serve as examples in this discussion demonstrate the practical application of the newly-developed pluvial flood index (PFI). The study shows that the PFI is suitable for use as a large-scale, robust hazard index to reasonably classify pluvial flash floods with respect to the expected hazard. As the PFI builds on the quantification of pluvial flood hazard areas (PFHA), it provides additional benefits compared with the heavy rain index, which neglects hydrological and hydraulic factors.

It proved possible for the four events with different characteristics to be classified correctly into PFI classes using a reference area of 2 km² and the threshold values for the relative share of PFHA. The size and form of the reference area as well as the threshold values are currently being analysed further on the basis of additional events and scenarios, however, and may be adapted according to this larger database if necessary. The visualisation of the PFI used in the study is also being developed further and will undergo further refinement.

Aiming at a potential operational pluvial flash flood warning, the LARSIM water balance model is suitable for simulating spatially distributed surface runoff generation due to its model concept and computational efficiency. Moreover, the LARSIM model is already widely used for the real-time operational forecasting of fluvial floods by the flood prediction agencies in various federal states in Germany. It would therefore be possible to use the respective current preconditions such as soil moisture from the fluvial flood forecast sequences as an initial condition for PFI forecasting with the LARSIM model. In addition, it would only be necessary to have precipitation forecasts in high spatial and temporal resolution as the operational input for a real-time PFI-based

warning. Such precipitation forecast data is already routinely processed by the flood prediction agencies for fluvial flood forecasting and is therefore operationally available.

The computation time for the simulation and post-processing of the surface runoff generation for the event in Otting, which was the largest site under analysis here, encompassing an area of approx. 300 km², is approximately one minute using an ordinary PC. Taking the short warning time associated with flash flood warnings into account, an operational application therefore seems feasible. The surface runoff accumulation can be computed with the simplified and therefore very efficient AccRo model. AccRo needs a few minutes for the simulation of 300 km², which is extremely fast in comparison with conventional hydraulic models with high spatial resolution. A further optimisation of the computation time remains preferable for the large-scale operational processing of multiple ensemble members, however. Optimisations of AccRo are currently taking place as part of the AVOSS project.

To achieve reliable and early pluvial flash flood warnings, there can also be no doubt that it is necessary to further improve the short-term precipitation forecasts. Moreover, the resulting uncertainties within the scope of the flash flood forecasts must be considered and communicated appropriately.

The events in Herrstein and Rudersberg, but also the devastating flood in the Ahr catchment in the year 2021, demonstrated that a gradual transition from a pluvial to a fluvial flood is a common occurrence. Mixed events of this kind include hazards stemming from overland flow as well as hazards due to flooding emanating from rivers. In such cases, a PFI-based pluvial flash flood warning should be combined with the existing fluvial flood warning systems. Suitable communication can make it clear that a hazard not only exists due to river flooding but also due to overland flow, which is unconnected to water bodies.

Although further research and optimisations are doubtlessly needed, the PFI and the applied model combination consisting of LARSIM and AccRo are an important cornerstone for a meaningful operational pluvial flash flood warning. Moreover, the PFI is also suitable for addressing other issues, such as the large-scale assessment and comparison of regional susceptibility to pluvial flash floods (KRUMM et al., 2024).

Hinweis zur Datenverfügbarkeit

Die verwendeten LARSIM-Modelle sind Eigentum der jeweiligen Landesbehörden und werden durch die Autoren daher nicht öffentlich zugänglich gemacht. Die im Rahmen der Studie erzeugten Modellergebnisse können auf Anfrage bei den Verfassern und mit Zustimmung der jeweiligen Landesbehörden zur Verfügung gestellt werden.

Danksagung

Die Arbeiten zur Entwicklung des Sturzflutindex im Projekt AVOSS (Auswirkungsbasierte Vorhersage von Starkregen und Sturzfluten auf verschiedenen Skalen: Potenziale, Unsicherheiten und Grenzen, www.avoss.uni-freiburg.de) erhielt im Rahmen der Fördermaßnahme Wasser-Extremereignisse (WaX) Förderung durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), inzwischen Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR). Die verwendeten LARSIM-Modelle

wurden von den assoziierten AVOSS-Projektpartnern zur Verfügung gestellt, wofür die Autoren sich bedanken. Im Detail waren das die Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW), das Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz (LfU RLP), das Bayerische Landesamt für Umwelt (LfU BY) und das Hessische Landesamt für Natur, Umwelt und Geologie (HLNUG). Zusätzlicher Dank gilt J. Zimmer für die Bereitstellung der als Input verwendeten Niederschlagsradardaten sowie allen anderen Kolleginnen und Kollegen im Verbundprojekt AVOSS für die konstruktive Zusammenarbeit.

Anschriften der Verfasser

Julia Krumm
Dr. Ingo Haag
Katharina Teltscher
HYDRON Ingenieurgesellschaft für
Umwelt und Wasserwirtschaft mbH
Ritterstraße 9, 76137 Karlsruhe
julia.krumm@hydrongmbh.de
ingo.haag@hydrongmbh.de
katharina.teltscher@hydrongmbh.de

Dr. Andreas Hänsler
Hannes Leister
Max Schmit
Andreas Steinbrich
Prof. Dr. Markus Weiler
Professur für Hydrologie der Universität Freiburg
Friedrichstraße 39, 79098 Freiburg
andreas.haensler@hydrology.uni-freiburg.de
hannes.leister@hydrology.uni-freiburg.de
max.schmit@hydrology.uni-freiburg.de
andreas.steinbrich@hydrology.uni-freiburg.de
markus.weiler@hydrology.uni-freiburg.de

Literaturverzeichnis

- ARCHER, D.R. & H.J. FOWLER (2018): Characterising flash flood response to intense rainfall and impacts using historical information and gauged data in Britain. – *Journal of Flood Risk Management*, 11, 121-133.
- BADISCHE ZEITUNG (2018): Überflutungen nach Gewitter richten in Rheinland-Pfalz Millionenschäden an. <https://www.badische-zeitung.de/ueberflutungen-nach-gewitter-richten-in-rheinland-pfalz-millionenschaeden-an>, zuletzt abgerufen am 12.02.2025.
- BBK, BUNDESAMT FÜR BEVÖLKERUNGSSCHUTZ UND KATASTROPHENHILFE (2015): Die unterschätzten Risiken „Starkregen“ und „Sturzfluten“. Ein Handbuch für Bürger und Kommunen.
- BBK, BUNDESAMT FÜR BEVÖLKERUNGSSCHUTZ UND KATASTROPHENHILFE (2021): Klassifikation meteorologischer Extremereignisse zur Risikoversorge gegenüber Starkregen für den Bevölkerungsschutz und die Stadtentwicklung. Projekt der Strategischen Behördenallianz „Anpassung an den Klimawandel“. Abschlussbericht.
- BORGA M., E.N. ANAGNOSTOU, G. BLÖSCHL & J.-D. CREUTIN (2011): Flash flood forecasting, warning and risk management: the HYDRATE project. – *Environmental Science & Policy*, 14 (7), 835-844. DOI: 10.1016/j.envsci.2011.05.017.
- BREMICKER, M. (2000): Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM – Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele. Freiburger Schriften zur Hydrologie, 11. Institut für Hydrologie der Universität Freiburg.

- BRONSTERT, A., A. AGARWAL, B. BOESSENKOOL, M. FISCHER, M. HEISTERMANN, L. KÖHN-REICH, T. MORAN & D. WENDI (2017): Die Sturzflut von Braunsbach am 29. Mai 2016 – Entstehung, Ablauf und Schäden eines „Jahrhundertereignisses“. Teil 1: Meteorologische und hydrologische Analyse. – *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 61(3), 150-162.
- DONAU-RIES-AKTUELL (2017a): Pressekonferenz zur Überschwemmung in Otting. <https://www.donau-ries-aktuell.de/mehrfachzuordnung/pressekonferenz-zur-ueberschwemmung-otting-wemding-35183>, zuletzt abgerufen am 12.02.2025.
- DONAU-RIES-AKTUELL (2017b): Hochwasser in Otting: Wie geht es weiter? <https://www.donau-ries-aktuell.de/allgemein/hochwasser-otting-wie-geht-es-weiter-otting-35275>, zuletzt abgerufen am 12.02.2025.
- FOWLER, H.J., G. LENDERINK, A.F. PREIN, S. WESTRA, R.P. ALLAN, ... X. ZHANG (2021): Anthropogenic intensification of short-duration rainfall extremes. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2, 107-122. DOI: 10.1038/s43017-020-00128-6.
- HAAG, I., D. AIGNER, J. KRUMM, J. REGENAUER, A. STEINBRICH, M. WEILER, A. SIEBER & M. BREMICKER (2019): Simulation von Hochwassern in der Folge von Starkregen mit LARSIM – ein Beispiel für die zieleitende Nutzung vorhandener Bodendaten. *Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 41.19.
- HAAG, I., J. KRUMM, D. AIGNER, A. STEINBRICH & M. WEILER (2022a): Hydrologische Vorhersagen – ein wichtiger Beitrag zum Schutz der Bevölkerung. – *Hydrologie & Wasserbewirtschaftung*, 66(1), 4-5.
- HAAG, I., J. KRUMM, D. AIGNER, A. STEINBRICH & M. WEILER (2022b): Simulation von Hochwasserereignissen in Folge lokaler Starkregen mit dem Wasserhaushaltsmodell LARSIM. – *Hydrologie & Wasserbewirtschaftung*, 66(1), 6-27. DOI: 10.5675/HyWa_2022.1_1.
- HENGST, A. (2019): Vergleich und Analyse vergangener Sturzflutereignisse und Starkregenniederschläge in Baden-Württemberg. Masterarbeit an der Professur für Hydrologie, Universität Freiburg.
- HONG, Y., P. ADHIKARI & J.J. GOURLEY (2013): Flash Flood. – Bobrowsky, P.T. (Hrsg.): *Encyclopedia of Natural Hazards. Encyclopedia of Earth Sciences Series*. Springer, 324-325. DOI: 10.1007/978-1-4020-4399-4_136.
- KLIWA, KLIMAVERÄNDERUNGEN UND KONSEQUENZEN FÜR DIE WASSERWIRTSCHAFT (2019): Starkniederschläge – Entwicklungen in Vergangenheit und Zukunft. Kurzbericht. https://www.kliwa.de/_download/KLIWA-Kurzbericht_Starkregen.pdf.
- KRUMM, J., I. HAAG, H. LEISTERT, A. HÄNSLER, A. STEINBRICH, M. SCHMIT & M. WEILER (2024): Konzeption, Ermittlung und Anwendungsmöglichkeiten des Sturzflutindex (SFI). DOI: 10.6094/UNIFR/246016.
- LANDTAG BW, LANDTAG BADEN-WÜRTTEMBERG (2024): Kleine Anfrage und Antwort zu Schäden durch Hochwasser und Starkregen im Rems-Murr-Kreis. https://www.landtag-bw.de/resource/blob/266880/b2558a15b221b074deafec7a59ab0893/17_6981_D.pdf.
- LEG, LARSIM ENTWICKLERGEMEINSCHAFT (2024): Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM – Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele. <http://www.larsim.info/dokumentation/LARSIM-Dokumentation.pdf>.
- LEISTERT, H., A. HÄNSLER, M. SCHMIT, A. STEINBRICH & M. WEILER (2025): AccRo – ein recheneffizientes, quasi-hydraulisches Modell zur Ermittlung von gefährdeten Gebieten bei Sturzfluten. Posterbeitrag zum Tag der Hydrologie 2025 in Augsburg.
- LFU BY, BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (2017): Sturzfluten- und Hochwasserereignisse Mai/Juni 2016. Wasserwirtschaftlicher Bericht.
- LFU RLP, LANDESAMT FÜR UMWELT RHEINLAND-PFALZ (2018): Starkregen und Hochwasser im Mai / Juni 2018. Bericht. https://www.hochwasser.rlp.de/static/shared/documents/bericht_juni_2018.pdf.
- LUBW, LANDESANSTALT FÜR UMWELT, MESSUNGEN UND NATURSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG (2016): Leitfaden Kommunales Starkregenisikomanagement in Baden-Württemberg. <https://pudi.lubw.de/detailseite/-/publication/47871>.
- MARTÍNEZ-GOMARIZ, E., M. GÓMEZ & B. RUSSO (2016): Experimental study of the stability of pedestrians exposed to urban pluvial flooding. – *Natural Hazards*, 82(2), 1259-1278. DOI: 10.1007/s11069-016-2242-z.
- MARTÍNEZ-GOMARIZ, E., M. GÓMEZ, B. RUSSO, & S. DJORDJEVIĆ (2018): Stability criteria for flooded vehicles: A state-of-the-art review. – *Journal of Flood Risk Management*, 11, 817-826. DOI: 10.1111/jfr3.12262.
- MOHR, S., J. DANIELL, U. EHRET, K. KÜPFER, P. LUDWIG, B. MÜHR, S. ROSENBERG, A. SCHÄFER, J. WILHELM & M. KUNZ (2024): Außergewöhnliche Niederschläge und Hochwasser in Süddeutschland im Juni 2024. CEDIM Forensic Disaster Analysis (FDA) Group, Bericht 1, Stand: 06.06.2024, DOI: 10.5445/IR/1000171441.
- PIPER, D., M. KUNZ, F. EHMELE, S. MOHR, B. MÜHR, A. KRON, & J. DANIELL (2016): Exceptional sequence of severe thunderstorms and related flash floods in May and June 2016 in Germany – Part 1: Meteorological background. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16(12), 2835-2850.
- RIES, F., L. KIRN & M. WEILER (2020): Experimentelle Untersuchung der Abflussbildung bei Starkregen. – *Hydrologie & Wasserbewirtschaftung*, 64(5), 221-236. DOI: 10.5675/HyWa_2020.5_1.
- SCHMITT, T.G., M. KRÜGER, A. PFISTER, M. BECKER, C. MUDERSBACH, L. FUCHS, H. HOPPE & I. LAKES (2018): Einheitliches Konzept zur Bewertung von Starkregenereignissen mittels Starkregenindex. – *Korrespondenz Abwasser Abfall*, 65(2), 113-120. DOI: 10.3242/kae2018.02.002.
- SZ, SÜDDEUTSCHE ZEITUNG (2024): Rudersberg: Schaden von über 120 Millionen Euro nach Flut. <https://www.sueddeutsche.de/panorama/hochwasser-rudersberg-schaden-von-ueber-120-millionen-euro-nach-flut-dpa.urn-newsml-dpa-com-20090101-240702-930-161431>, zuletzt abgerufen am 09.07.2025.
- STEINBRICH, A., H. LEISTERT & M. WEILER (2016): Model-based quantification of runoff generation processes at high spatial and temporal resolution. *Environmental Earth Sciences*, 75, 1423. DOI: 10.1007/s12665-016-6234-9.
- WEILER, M., A. HAENSLE, J. ZIMMER & M. MOSER (2019): Nutzung von Radardaten im Starkregenisikomanagement in Baden-Württemberg. – *Wasserwirtschaft*, 109, 63-67. DOI: 10.1007/s35147-019-0311-4.
- WEILER, M., J. KRUMM, I. HAAG, H. LEISTERT, M. SCHMIT, A. STEINBRICH & A. HÄNSLER (2025): The Pluvial Flood Index (PFI): A new instrument for evaluating flash flood hazards and facilitating real-time warning. *EGU sphere*, preprint. DOI: 10.5194/egusphere-2025-1519.