

Kristin Vogel, Ugur Ozturk, Adrian Riemer, Jonas Laudan, Tobias Sieg, Dadiyorto Wendi, Ankit Agarwal, Viktor Rözer, Oliver Korup und Annegret Thieken

Die Sturzflut von Braunsbach am 29. Mai 2016 – Entstehung, Ablauf und Schäden eines „Jahrhundertereignisses“.

Teil 2: Geomorphologische Prozesse und Schadensanalyse

The Braunsbach Flashflood of Mai 29th, 2016 – Origin, Pathways and Impacts of an Extreme Hydro-Meteorological Event.

Part 2: Geomorphological Processes and Damage Analysis

Am Abend des 29. Mai 2016 wurde der Ort Braunsbach im Landkreis Schwäbisch-Hall (Baden-Württemberg) von einer Sturzflut getroffen, bei der mehrere Häuser stark beschädigt oder zerstört wurden. Die Sturzflut war eine der Unwetterfolgen, die im Frühsommer 2016 vom Tiefdruckgebiet Elvira ausgelöst wurden. Der vorliegende Bericht ist der zweite Teil einer Doppelveröffentlichung, welche die Ergebnisse zur Untersuchung des Sturzflutereignisses im Rahmen des DFG-Graduiertenkollegs „Naturgefahren und Risiken in einer sich verändernden Welt“ (NatRiskChange, GRK 2043/1) der Universität Potsdam präsentiert. Während Teil 1 die meteorologischen und hydrologischen Ereignisse analysiert, fokussiert Teil 2 auf die geomorphologischen Prozesse und die verursachten Gebäudeschäden. Dazu wurden Ursprung und Ausmaß des während des Sturzflutereignisses mobilisierten und in den Ort getragenen Materials untersucht. Des Weiteren wurden zu 96 betroffenen Gebäuden Daten zum Schadensgrad sowie Prozess- und Gebäudecharakteristika aufgenommen und ausgewertet. Die Untersuchungen zeigen, dass bei der Betrachtung von Hochwassergefährdung die Berücksichtigung von Sturzfluten und ihrer speziellen Charakteristika, wie hoher Feststofftransport und sprunghaftes Verhalten insbesondere in bebautem Gelände, wesentlich ist, um effektive Schutzmaßnahmen ergreifen zu können.

Schlagwörter: Sturzflut, Hochwassergefährdung, Schadensprozesse, Erosion, Hangrutschungen, Braunsbach

A severe flash flood event hit the town of Braunsbach (Baden-Württemberg, Germany) on the evening of May 29, 2016, heavily damaging and destroying several dozens of buildings. It was only one of several disastrous events in Central Europe caused by the low-pressure system „Elvira“. The DFG Graduate School „Natural hazards and risks in a changing world“ (NatRiskChange, GRK 2043/1) at the University of Potsdam investigated the Braunsbach flash flood as a recent showcase for catastrophic events triggered by severe weather. This contribution is part two of a back-to-back publication on the results of this storm event. While part 1 analyses the meteorological and hydrological situation, part 2 concentrates on the geomorphological aspects and damage to buildings. The study outlines the origin and amount of material that was mobilized and transported into the town by the flood, and analyses damage data collected for 96 affected buildings, describing the degree of impact, underlying processes, and building characteristics. Due to the potentially high sediment load of flash floods and their non-steady and non-uniform flow especially in built-up areas, the damaging processes differ from those of clear water floods. The results underline the need to consider flash floods and their specific behaviour in flood hazard assessments.

Keywords: flash flood, flood risk, damaging processes, debris flow, erosion, landslides, Braunsbach

1 Einleitung

Etwa 82 Prozent der durch Naturgefahren verursachten wirtschaftlichen Schäden in den Mitgliedsländern der European Environmental Agency lassen sich auf klimatische und meteorologische Extremereignisse (z. B. Stürme, Hochwasser, Extremniederschläge, Kälte-/Hitzewellen, Trockenperioden und Waldbrände) zurückführen. Dabei sind die durchschnittlichen Schäden pro Jahr (inflationsbereinigt), trotz Vorsorge- und Schutzmaßnahmen, über die letzten drei Jahrzehnte gestiegen: 7,6 Mrd. in den 1980er-, 13 Mrd. in den 1990er- und 13,7 Mrd. in den 2000er-Jahren (EEA, 2017). Dies ist vor allem auf die gestiegenen Bevölkerungszahlen und gestiegenem Wohlstand zurück zu führen. Jedoch ist auch ein Einfluss durch den Anstieg von Extremniederschlägen in einigen Teilen Europas nicht auszuschließen (IPPC, 2012; Casanueva et al., 2014).

Im aktuellen Jahrzehnt gehören, neben dem Juni-Hochwasser und Sommerunwettern im Jahr 2013, die Unwetter im Frühsommer 2016 zu den schadensträchtigsten Ereignissen in Deutschland (GDV, 2016b).

1.1 Der „Unwetter-Frühsommer 2016“

In den Tagen vom 26. Mai bis 7. Juni 2016 verursachten die Tiefdruckgebiete Elvira und Friederike schwere Unwetter in Mitteleuropa, wobei insbesondere Süddeutschland, aber auch Nord- und Westdeutschland besonders heftig von Sturmböen, Hagelschauern, Starkregen, Überschwemmungen und Erdbeben betroffen wurde (GDV, 2016a). Im Landkreis Schwäbisch Hall (Baden-Württemberg) wurden am 29. Mai mehrere Ortschaften (u. a. Schwäbisch Gmünd und Künzelsau) überflutet. Dabei kamen vier Menschen ums Leben. Nur drei Tage später starben fünf Menschen bei einer Sturzflut in Simbach (Bayern) nach

dem Durchbruch eines Straßendamms (SZ 9. Juni 2016). Am gleichen Tag (1. Juni) bedeckten nach heftigen Hagelschauern bis zu 50 cm hohe Eisschichten die Straßen im Erzgebirge. Am 4. Juni lief im kleinen Ort Nierendorf (Rheinland-Pfalz) das neu gebaute Regenrückhaltebecken über, woraufhin die Anwohner per Hubschrauber aus dem überfluteten Ort evakuiert wurden. In Hamburg deckte am 7. Juni ein Tornado mehrere Hausdächer ab und hinterließ große Schäden (GDV, 2016a). Insgesamt verloren bei diesen Unwettern elf Menschen ihr Leben. Nach Angaben der Munich Re (2017) entstanden Gesamtschäden von 2,6 Mrd. Euro, wovon 1,2 Mrd. Euro versichert waren.

Besonders schwer wurde am Abend des 29. Mai die Ortschaft Braunsbach von einer Sturzflut getroffen. Insbesondere im Bereich des durch den Ortskern fließenden Orlacher Bachs und des Schlossbachs wurden Wassermassen sowie mobilisiertes Sediment, Schwemmholz und Geschiebe durch den Ort gespült und große Schäden an Gebäuden, Fahrzeugen und Infrastruktur verursacht. Dieses Ereignis wird in der vorliegenden zweiteiligen Veröffentlichung exemplarisch für die im „Unwetter-Frühsommer 2016“ ausgelösten Sturzflutereignisse analysiert.

1.2 Ergebnisse aus Teil 1 – Meteorologische und hydrologische Analyse der Sturzflut von Braunsbach

Im ersten Teil betrachten Bronstert et al. (2016) vorrangig die meteorologischen und hydrologischen Prozesse des Ereignisses. Darin wird auf die lang andauernde Großwetterlage „Tief Mitteleuropa“ (6 Tage) und die dadurch ausgelösten konvektiven hochintensiven Starkregenereignisse verwiesen. In der ca. 10 km nordöstlich von Braunsbach gelegenen Niederschlagsstation Langenburg-Atzenrod wurde eine Tagessumme von 105 mm gemessen (von 7:50 Uhr am 29. Mai 2016 bis 7:50 Uhr am 30. Mai 2016). Dies entspricht einer durchschnittlichen Wiederkehrrate von über 100 Jahren. Radarmessungen zeigen das Zentrum der Gewitterzelle um 19:50 Uhr direkt über dem Einzugsgebiet des Orlacher Bachs und deuten darauf hin, dass die Niederschlagswerte hier noch deutlich höher waren. Allein für den Zeitraum zwischen 18:45 bis 20:00 Uhr wird eine Niederschlagssumme von 100 mm und mehr als realistisch erachtet. Basierend auf unterschiedlichen und unabhängigen Datengrundlagen, nämlich aufgrund der Effektivniederschlagsmengen sowie andererseits nach den geschätzten maximalen Fließquerschnitten und Fließgeschwindigkeiten, schätzen Bronstert et al. (2016) den Spitzenabfluss des Orlacher Bachs am Gebietsauslass. Diese beiden Abschätzungen liegen im ähnlichen Größenbereich von $125 \text{ m}^3/\text{s} \pm 50 \text{ m}^3/\text{s}$ und werden durch Abflussmessungen am Hauptfluss Kocher ober- und unterhalb der Einmündung des Orlacher Bachs bestätigt.

Durch Starkregen und erhöhte Abflusswerte können eine Reihe geomorphologischer Prozesse ausgelöst werden, wodurch sich der Feststoffgehalt des Oberflächenabflusses und damit auch dessen Schadenspotential erhöht. Im vorliegenden zweiten Teil der Sturzflutanalyse von Braunsbach werden die dort ausgelösten geomorphologischen Prozesse beschrieben und die im Ort dokumentierten Gebäudeschäden analysiert.

1.3 Hydrologisch ausgelöste geomorphologische Prozesse

Durch Regentropfen zerkleinerte und aufgewirbelte Bodenteilchen verstopfen bei Starkregen die Bodenporen und setzen so die Infiltrationskapazität des Oberbodens durch Verschlämmung herab. Bei Infiltrations- oder Sättigungsüberschuss des Bodens werden Bodenbestandteile durch Oberflächenabfluss abgetra-

gen und in nahe gelegene Gewässer gespült (Toy et al., 2002; Blume et al., 2010). Als Grenzwert für erosionsverursachende Niederschlagsintensitäten gelten Intensitäten von $> 20 \text{ mm/h}$ oder $> 0,3 \text{ mm/min}$ (Müller & Pfister, 2011). Neben Menge und Intensität des Niederschlages beeinflussen aber auch Bodeneigenschaften, Relief und Landnutzung das Ausmaß der Erosion, da Ackerbauflächen im Jahresverlauf nicht immer durch Vegetation geschützt sind (BGR, 2014).

Bei steigenden Wasserständen in Fließgewässern, zum Beispiel in Folge von intensiven Niederschlägen, nehmen auch die Schubkraft des Wassers und die Fließgeschwindigkeit zu. Die erhöhte kinetische Energie des Wassers verstärkt Sediment- und Geschiebetransport. Es kommt zu Sohl- und Ufererosion. Weiterhin ermöglicht die reduzierte Scherfestigkeit durchnässter Böden den Kollaps von Böschungen, der durch Unterspülung von hochwasserführenden Gewässern noch weiter begünstigt wird (Prinz & Strauss, 2012).

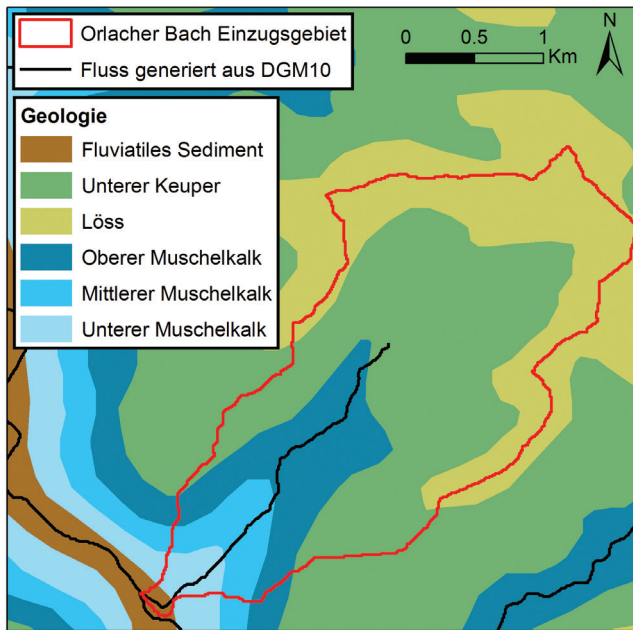
Insbesondere an steilen Hängen im Uferbereich werden zudem Massenbewegungen wie Erdrutsche oder Murgänge begünstigt, die nebst Boden auch Grobmaterial und Gesteinsfragmente mobilisieren. Murgänge entstehen bevorzugt dann, wenn wenig festestiges Lockermaterial auf steilen Hängen durch anhaltende oder starke Regenfälle wasserübersättigt wird und schließlich in einem Strom aus Schlamm und größerem Gesteinsmaterial talabwärts fließt. Die Fließeigenschaften können dabei je nach Wasseranteil, Sedimentgröße und -sortierung variieren (Costa, 1984).

Sturzfluten werden dementsprechend häufig von Gerölltransport begleitet und durch diesen in ihrer Zerstörungskraft verstärkt. Die Ereignisse von Braunsbach im Frühjahr 2016 verdeutlichen diese in deutschen Mittelgebirgen selten beobachteten Prozesse, da große Mengen an Geschiebe und Schwemmholz in den Ort getragen wurden und erheblich zum Schadensbild beitrugen. In Abschnitt 2 werden die geomorphologischen Prozesse im Einzugsgebiet des Orlacher Bachs, durch den ein Großteil des verfrachteten Materials in den Ort getragen wurde, im Detail betrachtet.

1.4 Schadenserfassung nach Hochwasserereignissen

Die hohen Schäden welche in den letzten Jahrzehnten durch Hochwasser verursacht wurden (EAA, 2012), haben zu einer stetigen Entwicklung von Hochwasserschadensmodellen geführt, welche über eine einfache Regression zwischen Wasserstand und Gebäudeschaden hinaus gehen (Gerl et al., 2016). Dabei finden nicht mehr nur Hochwassercharakteristika, sondern auch die Vulnerabilität der betroffenen Objekte Beachtung. Dennoch sind die Schadensprozesse und Einflüsse der einzelnen schadenstreibenden/-reduzierenden Faktoren bisher nur unzureichend verstanden und die Schätzungen mit großen Unsicherheiten behaftet (Merz et al., 2010).

Für die (Weiter-)Entwicklung von aussagekräftigen Schadensmodellen ist es wichtig aus bisherigen Ereignissen zu lernen. Dazu ist eine umfassende, verständliche und standardisierte Datenerfassung entscheidend (Thieken et al., 2009). Molinari et al. (2014) entwickelten in enger Zusammenarbeit mit Entscheidungsträgern einen Fragebogen zur Datenerfassung nach einem Hochwasserereignis. Dieser wurde beispielsweise nach dem Hochwasserereignis in Umbrien (Italien), welches durch heftige Unwetter im November 2012 ausgelöst wurde, angewendet. Dabei wurden neben Hochwassercharakteristika und Gebäude-

**Abbildung 1**

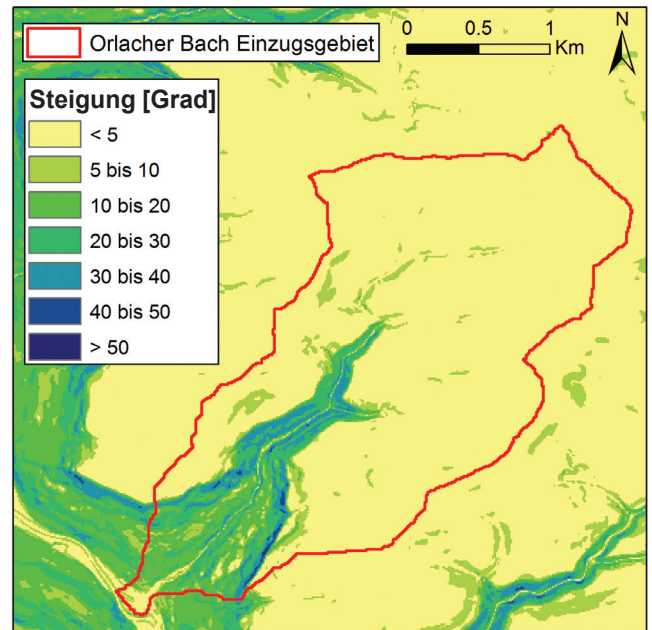
Geologische Karte des Einzugsgebiets des Orlacher Bachs. Datenquelle: Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau - LGRB (<http://maps.lgrb-bw.de/>).

Geologic map of the Orlacher Bach catchment. Source: LGRB (<http://maps.lgrb-bw.de/>).

schäden auch Gebäudeeigenschaften aufgenommen, um deren Schadensauswirkungen zu analysieren.

In Deutschland wurden nach Hochwassern in den Jahren 2002, 2005, 2006, 2010, 2011 und 2013 mit Telefonbefragungen von betroffenen Haushalten oder Vor-Ort-Erhebungen umfassende Datensätze erhoben und zur Entwicklung von Schadensmodellen genutzt (z. B. Thieken et al., 2005; Schwarz & Maiwald, 2007; Thieken et al., 2008; Kreibich et al., 2016). Während sich jedoch Schadensmodelle für Deutschland hauptsächlich auf Flusshochwasser beziehen (Gerl et al., 2016), ist die Wahrnehmung der Gefährdung durch Oberflächenabfluss erst in den letzten Jahren gestiegen (z. B. Rözer et al., 2016). Wesentliche Unterschiede von Sturzfluten zu Flusshochwassern sind hohe Fließgeschwindigkeiten, ein hoher Sedimentgehalt und kurze bis keine Vorwarnzeiten. Hier bestehen Gemeinsamkeiten mit Murgängen und Hangrutschungen, zu denen es im alpinen Raum bereits Untersuchungen zur Vulnerabilität von und Schadenswirkung an Gebäuden gibt (Papathoma-Köhle, 2016), die auch für Sturzfluten als Orientierung dienen können. Papathoma-Köhle et al. (2015) zeigen die Anwendung eines eigens entwickelten Softwarepakets zur schnellen und intuitiven Schadensdokumentation an Gebäuden nach einer Reihe von Murgängen im Jahr 2012, welche durch heftige Regenfälle in der Provinz Bozen (Süd-Tirol, Italien) ausgelöst wurden. Neben der Schadensdokumentation kann die Software zur Vulnerabilitätsaufnahme von Gebäuden und zur Schadensabschätzung von potentiellen, zukünftigen Ereignissen genutzt werden. Eine ähnliche Vorgehensweise wäre auch für Sturzfluten denkbar.

Die Schadensaufnahme der von der Sturzflut in Braunsbach betroffenen Gebäude wird in Abschnitt 3 beschrieben. Zudem werden die beobachteten Schäden im Zusammenhang mit

**Abbildung 2**

Steigung im Einzugsgebiet des Orlacher Bachs abgeleitet aus DGM10. Datenquelle: Geoinformationen © Vermessungsverwaltungen der Bundesländer und BKG (www.bkg.bund.de).

Slope in Orlacher Bach catchment delineated from DGM10 of BKG (www.bkg.bund.de).

verschiedenen Einflussfaktoren untersucht. Die Ergebnisse und Schlussfolgerungen werden in Abschnitt 4 diskutiert.

2 Analyse der geomorphologischen Prozesse

Die Gesteinsschichten im Einzugsgebiet bestehen überwiegend aus Oberem und Mittlerem Muschelkalk (Abb. 1), also Gesteinsformationen, die sich in der Trias aus marinen Sedimentablagerungen bildeten. Die teils sehr verwitterungsbeständigen Kalksteinbänke formen im Tal des Orlacher Bachs steile Geländestufen, die zur flachen Hochebene von Orlach hinaufführen. Das Kerbtal des Orlacher Bachs (Orlacher Klinge) ist durch steile Hänge geprägt.

**Abbildung 3**

Abgelagertes Geröll im Bereich der Orlacher Straße mit GPS-Empfänger (ca. 2 m lang). Aufnahme vom 04.06.2016 (B. Boessenkool, Universität Potsdam).

Debris deposited at the street "Orlacher Straße" with GPS receiver (approx. 2 m long). Picture taken on 04/06/2016 by B. Boessenkool, University of Potsdam.

Aus einem digitalen Geländemodell (DGM10 der Vermessungsverwaltungen der Bundesländer und BKG, www.bkg.bund.de) wurden Steigungen mit 50° und mehr abgeleitet (Abb. 2). Die Ortschaft Braunsbach liegt unterhalb des Kerbtals an der Mündung des Orlacher Baches in den Kocher (siehe Bronstert et al., 2016 für weitere Details zur Gebiets- und Reliefbeschreibung).

Das in der Ortschaft abgelagerte Geröll (Abb. 3) wurde im Wesentlichen durch die Gerinne des Orlacher Baches und des Schlossbachs eingetragen, wobei der Großteil davon aus dem Einzugsgebiet des Orlacher Baches stammt. Nach Angaben eines mit der Räumung beauftragten Fuhrunternehmens wurden nach der Sturzflut 42.000 m³ Geröll aus dem vom Orlacher Bach überfluteten Bereich entfernt. Dies umfasst neben Material aus Gebiets- und Gewässererosion auch Schwemmh Holz, Bauschutt, Asphaltchollen sowie Schrott.

2.1 Methodisches Vorgehen zur Analyse der geomorphologischen Prozesse

Die Analyse der geomorphologischen Prozesse konzentriert sich auf das Einzugsgebiet des Orlacher Baches. Bei der Begehung der Orlacher Klinge im Zeitraum vom 21. bis 23. Juni 2016 (23 bis 25 Tage nach dem Hochwasserereignis) wurde das Ausmaß der Bachbett- und Ufererosion untersucht. Hierfür wurde die Höhe der durch das Wasser erodierten Hangabschnitte (unterer Hangteil) über der Bachsohle gemessen und deren durch die Abtragung verursachte Verteilung mit den ursprünglichen,

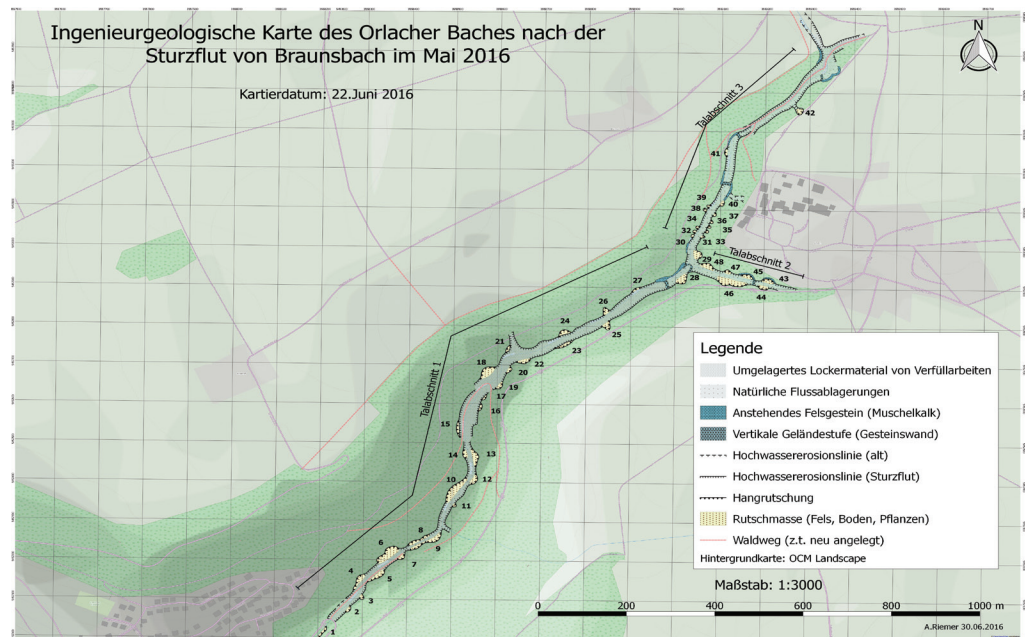


Abbildung 4

Ingenieurgeologische Karte vom 22. Juni 2016 mit den kartierten Hangrutschungen und Erosionsmarken am Orlacher Bach (Talabschnitt 1 und 3) und Kräuchelbach (Talabschnitt 2). Hintergrundkarte: OCM Landscape. *Engineering geological map showing the landslides and the traces of erosion mapped on June 22, 2016 in the valley of the Orlacher Bach (valley section 1 and 3) and the Kräuchelbach (valley section 3). Background map: OCM Landscape.*

weniger steilen Böschungswinkeln nicht betroffener Hangabschnitte (oberer Hangteil) verglichen. Zur lokalen Beurteilung der Bachbetterosion wurde der Höhenunterschied zwischen den Überresten alter Bachterrassen und dem neuen, tiefer liegenden Bachbett gemessen. Zudem wurden insgesamt 48 Erdrutsche dokumentiert und eingemessen, um deren Materialeintrag in den Orlacher Bach abzuschätzen. Zur Beschreibung der Ergebnisse wird der Orlacher Bach und sein Zufluss aus dem Kräuchelbach in drei Talabschnitte unterteilt (Abb. 4).

2.2 Erosion im Einzugsgebiet

Wie zuvor erwähnt berichten Bronstert et al. (2016) von Niederschlägen mit Tageswerten von teilweise über 100 mm an den nächstgelegenen Stationen bei Braunsbach. Direkt im Einzugsgebiet des Orlacher Baches selbst gehen sie auf Basis von Regen-



Abbildung 5

Ackerflächen auf der Hochebene des Einzugsgebiets mit erkennbaren Erosionsspuren (links) und Bodensättigung (rechts) fünf Tage nach der Sturzflut. Aufnahmen vom 03.06.2016 (links: B. Boessenkool, rechts: A. Agarwal, beide Universität Potsdam). *Traces of soil erosion (left) and visibly saturated soil (right) at agricultural crop land on the plateau of the catchment five days after the flash flood. Pictures taken on 03/06/2016 by B. Boessenkool (left) and A. Agarwal (right), both University of Potsdam.*

radaranalysen sogar von Spitzenwerten von 140 mm/Tag und Spitzenintensitäten von 100 mm/h aus, was weit über dem genannten Grenzwert für Bodenerosion (20 mm/h) liegt. Auch fünf Tage nach der Sturzflut waren die Böden noch sichtlich gesättigt und deutliche Erosionsspuren erkennbar (Abb. 5).

Eine genaue Erosionsrate auf der Ebene oberhalb der Orlacher Klinge lässt sich schwer bestimmen, da sie neben der Niederschlagsintensität stark von den Bodeneigenschaften und insbesondere der Landnutzung abhängt. Geht man von einer durchschnittlichen Erosionsrate von 2 bis 3 mm auf der ca. 5 km² großen Ebene im Einzugsgebiet des Orlacher Bachs aus, so ergibt sich ein Abtrag von suspendiertem Sediment von ca. 10.000 bis 15.000 m³. Da es sich hierbei um feines, suspendiertes Sediment handelt, ist davon auszugehen, dass dies praktisch vollständig in den Kocher gespült und nicht im Ort angelagert wurde.

Zusätzlich zu dem auf der Ebene mobilisierten Sediment wurde im steilen Bereich der Orlacher Klinge der Oberflächenabfluss konzentriert und erreichte dadurch sehr hohe Schubkräfte. Dies führte zum vermehrten Eintrag von Pflanzenmaterial und zur Mobilisierung der dort bereits als Talfüllung vorhandenen Verwitterungsprodukte, bestehend aus Bodenmaterial, Kies und Felsbrocken. Auf diese Weise wurden Abflüsse mit besonders hohem Feststoffanteil verursacht (Abb. 6).

2.3 Erosion der Gewässersohle

Durch die hohen Fließgeschwindigkeiten und Abflussmengen während der Sturzflut (siehe Bronstert et al., 2016) wurde Sediment von Hängen und Gerinne aus dem Orlacher Bach ausgeräumt. Nahezu im gesamten Talabschnitt 1 waren im Bachbett Erosionsmarken der Sturzflut deutlich erkennbar (Abb. 4). Die abtragende Wirkung des Abflusses wurde in diesem Bereich durch das mitgeführte Geschiebe aus den oberen Talabschnitten verstärkt. Zum Zeitpunkt der Kartierung fanden hier bereits Erd-



Abbildung 6

Murgang-ähnliche Ablagerungen in der Wolfsklinge; in Abb. 4 Zufluss zwischen Hangrutsch 9 und 11. Aufnahme vom 23.06.2016 (A. Agarwal, Universität Potsdam).

Deposited debris flow like material at the tributary Wolfsklinge; in fig. 4 between landslide 9 and 11. Picture taken on 23/06/2016 by A. Agarwal, University of Potsdam.

arbeiten von lokalen Bauunternehmen statt, die im Auftrag des Krisenstabs das durch die Erosion vertiefte Bachbett mit den Geröllablagerungen aus dem Ort Braunsbach wieder auffüllten. Ziel dieser Maßnahme war es, die ursprüngliche Form des Tals wiederherzustellen, die darin verlaufenden Waldwege neu anzulegen und weitere Hangrutschungen durch die Wiederherstellung einer stabilen Böschung zu verhindern. Nach Angaben der hierfür eingesetzten Arbeiter wurden stellenweise Überflutungssedimente bis zu einer Höhe von 4 m erneut in das Tal eingebracht.

Der Zufluss Kräuchelbach (Talabschnitt 2) durchläuft unterhalb von Orlach einen natürlichen Knickpunkt mit steilen Böschungswinkeln. Hier ist das Wasser mit hoher Strömungsenergie in den Talabschnitt eingeflossen. Felswände und das künstlich angelegte Bachsohlenpflaster wurden knapp unterhalb des Höhengsprungs um einige Meter unterspült und zurückverlagert, sodass eine parallel zum Tal verlaufende Straße wegen der bis an den Straßenrand vorgerückten Hangrutschungen und Felswände gesperrt werden musste. Nach Aussagen von Anwohnern waren die in diesem Bereich nun freistehenden Felswände vor der Sturzflut nicht sichtbar, was nahe legt, dass eine große Menge der mobilisierten Kies- und Felsmassen sowie Bäume und Pflanzenmaterial aus diesem Bereich stammen.

Talabschnitt 3 war, nach Beobachtungen im Gelände, ebenfalls eine wichtige Quelle für den Materialeintrag. Der Muschelkalk ist in diesem Bereich mehrfach aufgeschlossen und in einigen Bereichen wurde die vollständige, über 2 m mächtige Talfüllung während der Sturzflut ausgeräumt (Abb. 7). Diese Schätzung basiert auf der vorigen Höhe des Bachbettes bis zum anstehenden Fels, der durch die Sturzflut freigelegt wurde.

Die Geländeaufnahmen legen nahe, dass ein Großteil der 42.000 m³ des bei Aufräumarbeiten aus dem Ort entfernten groben Materials durch Erosionsprozesse in den untersuchten drei Talabschnitten in den Ort gespült wurde. Der genaue Anteil ließ sich jedoch nicht bestimmen, da die ursprüngliche Form des Bachbettes mit seinen Bachterrassen nicht über den gesamten Bachverlauf rekonstruierbar war und zudem das ausgespülte Bachbett streckenweise bereits durch weiträumige Geländearbeiten zugeschüttet war. Nimmt man über alle drei Talabschnitte hinweg (ca. 2 km) eine durchschnittliche Erosionstiefe von 2 m auf einer Breite von 5 m - 10 m an, so ergibt sich ein Volumen von 20.000 m³ - 40.000 m³.

2.4 Hangrutschungen

Weitere Geröllmassen wurden durch mehrere Hangrutschungen im Mai 2016 in die Orlacher Klinge und mit der Flutwelle in den Ort Braunsbach getragen. Die harten Kalksteine des Muschelkalks bilden abschnittsweise ein steiles Relief mit schroffen Hängen und flachgründigen Böden. Solche Böden sind nach Starkregen schnell wassergesättigt und in ihrer Scherfestigkeit vermindert, was an steilen Hängen zu Rutschungen führen kann. Zudem wurden Uferböschungen stark unterspült und weitere Hangrutschungen ausgelöst. Aufgrund des schnellen Wassereintritts und der enormen Umverteilung von Lockersedimenten und Geröll im oberen Bereich der Orlacher Klinge sowie des Vorhandenseins einiger Engstellen und Kurven im unteren Bachverlauf ist anzunehmen, dass durch die Hangrutschungen zeitweise mehrere natürliche Dämme in den Gerinnen gebildet wurden. Beim Durchbruch dieser Dämme floss das bis dahin angestaute



Abbildung 7

Oberer Teil des Talabschnitts 3 (vgl. Abb. 4). Kalk-Mergel-Bänke des Oberen Muschelkalks wurden im Bereich des Bachbetts freigelegt. Bachbettabtragungen wurden bis zu einer Höhe von über 2 m abgetragen. Aufnahmen vom 22.06.2016 (oben links und unten: A. Riemer; oben rechts: A. Agarwal, beide Universität Potsdam).

Upper part of valley section 3 (see fig. 4), showing the river bed incision of up to 2 m caused by the flash flood. Pictures taken on 22/06/2016 by A. Riemer (upper left and bottom) and A. Agarwal (upper right), both University of Potsdam.

Wasser schlagartig mit erhöhter Energie und Erosionswirkung ab und löste weitere Erosionen und Massenbewegungen aus.

Entlang des Orlacher Bachs und des Kräuchelbachs wurden 48 flachgründige Hangrutschungen (nach Varnes, 1978) mit einem Volumen von ca. 10 m^3 bis 1.350 m^3 kartiert (Abb. 4). Dabei wurden u. a. die Höhe der Abrisskante über dem Bachbett, die Länge der Abrisskante, die Breite der Oberkante und der Basis der Rutschmasse sowie Winkel und Entfernungen vom Messpunkt zur Abrisskante, Oberkante und Basis der Rutschmasse gemessen. Die Rutschungen traten nahezu alle vollständig innerhalb eines 50 m breiten Bands, etwa je 25 m zu beiden Seiten des Bachlaufs, auf. Etwa 8 % dieses Korridors waren von Hangrutschungen betroffen. Für das Volumen des durch Hangrutschungen in den Bachlauf eingebrachten Materials wird basierend auf den genannten Messungen eine Minimalabschätzung vorgenommen, bei der von geraden Abrisskanten ausgegangen wird. Dabei wird angenommen, dass die Form des minimal abgetragenen Materials einer schiefen Pyramide entspricht, woraus sich für alle dokumentierten Hangrutschungen ein Gesamtvolumen von 6.400 m^3 ergibt. Da die Abrisskanten in der Regel konvex gekrümmt sind, ist insgesamt jedoch von einem größeren Volumen auszugehen. Zudem wird die Volumenberechnung durch Messungenauigkeiten beeinflusst, da die Abgrenzung der Rutschflächen unscharf ist. Zur Fehlerabschätzung werden die direkt gemessenen Höhen der Abrisskanten mit der trigonometrischen Berechnung der Höhe aus gemessenen Winkeln verglichen. Zur Vereinfachung

wird angenommen, dass beide Höhenbestimmungen unabhängig voneinander sind, die gleiche Fehleranfälligkeit haben und der prozentuale Fehler (Messfehler im Verhältnis zur Höhe) Normalverteilt mit $N(0, \sigma^2)$ ist. Die prozentuale Differenz beider Höhenmessungen (Differenz der Messungen im Verhältnis zur Höhe) ist dann Normalverteilt mit $N(0, 2\sigma^2)$. Für die dokumentierten Hangrutschungen beträgt die Standardabweichung für die Differenz beider Höhenbestimmungen $\sim 17 \%$ der jeweiligen Höhe (entspricht $\sqrt{2} \cdot \sigma$). Die Standardabweichung des Messfehlers (σ) beträgt somit $\sim 12 \%$. Wir nehmen an, dass dies eine realistische Abweichung für die Messungen in allen drei Dimensionen ist. In der Fehlerabschätzung für die Berechnung des Volumens einer Rutschung gehen die Fehler aus allen drei Dimensionen annähernd linear ein ($f(x) - f(x+\Delta x) \approx f'(x) \cdot |\Delta x|$) und führen zu einer Standardabweichung von ca. 36 %. Für die Summe der Volumina aller 48 Rutschungen ist die Standardabweichung kleiner, da sich einige Fehler gegenseitig aufheben. Wären alle Hangrutschungen gleich groß, würde die Standardabweichung bei $36 \% / \sqrt{48} \approx 5 \%$ liegen. Da die einzelnen Volumina jedoch unterschiedlich groß sind, ist die tatsächliche Standardabweichung größer und nicht trivial berechenbar.

3 Schadensanalyse

Die hohen Fließgeschwindigkeiten und großen Mengen an mitgeführtem Material verursachten enorme Schäden in der Ortschaft Braunsbach. Die kleine, 2.350 Einwohner zählende

Gemeinde Braunsbach hat mit 104 Mio. Euro über 90 % des auf etwa 112 Mio. € geschätzten Gesamtschadens, der im Landkreis Schwäbisch Hall durch die Unwetter im Frühsommer 2016 verursacht wurde, zu tragen (Landrat- samt Schwäbisch Hall, 2016). Auch wenn diese Zahlen auf groben Schätzungen beruhen, verdeutlichen sie das lokale Ausmaß der Zerstörung.

Um einen genaueren Eindruck über die Schäden zu bekommen sowie Schadensprozesse bei Sturzfluten allgemein besser verstehen zu können, wurden am 7. und 8. Juni 2016, d. h. neun bzw. zehn Tage nach dem Sturzflutereignis, äußerlich erkennbare Gebäudeschäden sowie weitere Informationen zu den Gebäuden und zur Überflutung systematisch aufgenommen. Um die Privatsphäre der Anwohner nicht zu verletzen und die voranschreitenden Aufräumarbeiten nicht zu behindern, wurden keine Schäden am Inventar oder im Innenbereich der Gebäude dokumentiert. Weiterhin mussten Schäden an Infrastruktur und Fahrzeugen sowie Art und Ausmaß der Gebäudekontamination in einigen Fällen zum Zeitpunkt der Schadensaufnahme unbeobachtet bleiben.

3.1 Methodisches Vorgehen zur Datenaufnahme

Zur Datenaufnahme wurde die OpenSource Software „KoBoCollect“ (www.kobotoolbox.org/) verwendet, die von

Tabelle 1 Definition von Schadensgraden unter Hochwassereinwirkung nach Schwarz & Maiwald (2007). <i>Definition of damage grades caused by flood action according to Schwarz & Maiwald (2007).</i>		
Schadensgrad	Schaden	Beschreibung
D1	sehr gering	kein struktureller Schaden leichter nichtstruktureller Schaden reiner Durchfeuchtungsschaden Verschmutzungen
D2	gering	kein bis leichter struktureller Schaden moderater nichtstruktureller Schaden geringfügige Risse, eingedrückte Türen und Fenster Kontaminationen Austausch von Ausbauteilen erforderlich
D3	mittel	moderater struktureller Schaden schwerer nichtstruktureller Schaden größere Risse an tragenden Wänden, Unterspülungen der Fundamente, Verformungen in Decken, Setzungen Austausch von nichttragenden Bauteilen erforderlich
D4	schwer	schwerer struktureller Schaden sehr schwerer nichtstruktureller Schaden Einsturz von tragenden Wänden, Decken Austausch von tragenden Bauteilen erforderlich
D5	sehr schwer	sehr schwerer struktureller Schaden Kollaps bzw. Einsturz von größeren Gebäudeteilen Abriss erforderlich

der Harvard Humanitarian Initiative entwickelt wurde, um eine schnelle und einfache Datenaufnahme und -auswertung in Krisengebieten, z. B. nach Naturkatastrophen, zu ermöglichen. Dazu wurde ein Fragebogen für die Schadenserhebung erstellt und für den Zugriff von mehreren mobilen Endgeräten aus vorbereitet. Die inhaltliche Konzeption des Fragebogens orientiert sich größtenteils an bereits durchgeführten Untersuchungen zu Schäden aus anderen Hochwasserereignissen (Thieken et al., 2009; Molinari et al., 2014). Bei Bedarf kann die Datenaufnahme offline erfolgen sowie mit GPS-Koordinaten und Bildmaterial ergänzt werden. Molinari et al. (2014) nennen die Entwicklung einer geeigneten Software zur Daten Sammlung, Speicherung und Auswertung als wichtigen Schritt in der Hochwasserschadensforschung. KoBoCollect

konnte hier Dank seiner intuitiven Handhabung und freien Zugänglichkeit als Grundlage dienen. Die von Papathoma-Köhle et al. (2015) entwickelte Software zur Schadenserfassung bei Hangrutschungen und Murgängen bietet ebenfalls gute Orientierungspunkte. Insbesondere die graphische Benutzeroberfläche ist sehr intuitiv und anwenderfreundlich. Eine abgewandelte Version könnte die Datenerfassung für künftige Hochwasserereignisse weiter vereinfachen.



Abbildung 8

Wärmebildaufnahmen (oben) und RGB-Normalaufnahmen (unten) von betroffenen Gebäuden zur Abschätzung des Wasserstands und zur Identifikation der Bausubstanz (z. B. Mitte: verputztes Fachwerk). Aufnahmen vom 08.06.2016 (J. Laudan, Universität Potsdam).

Thermal images (top) and rgb images (bottom) of affected buildings to support the water level assessment and identify building structures (e.g. middle: plastered timbered house). Pictures taken on 08/06/2016 by J. Laudan, University of Potsdam.

Insgesamt wurden in Braunsbach 96 betroffene Einzelgebäude erfasst. Da die Schadensbetrachtung meist nur von außerhalb der Gebäude möglich und die Schäden auf Anhieb nur grob zu bezif-

fern waren, wurden - wie von Thieken et al. (2009) empfohlen - die äußerlich erkennbaren strukturellen Schäden quantitativ beschrieben und in einer Ordinalskala in fünf Klassen unterteilt (Tab. 1). Die Unterteilung erfolgte nach dem Schema von Schwarz & Maiwald (2007), um eine Vergleichbarkeit mit ähnlichen Studien zu ermöglichen.

Neben den Schadensklassen wurden Anprallschäden an Gebäuden und erkennbare Kontamination durch Öl oder Schlamm dokumentiert. Wie bereits in Papathoma-Köhle et al. (2015) beschrieben, ist die Rekonstruktion der Intensität des Prozesses (z. B. Fließgeschwindigkeit und Viskosität) an den einzelnen Gebäuden schwierig und muss mit Hilfe von Anhaltspunkten (z. B. Fließspuren und Angriffsfläche) abgeschätzt werden. Zur Rekonstruktion der Sturzflut in Braunsbach wurde der Wasserstand an den Gebäuden anhand von Fließspuren, Schlammkontamination und Durchfeuchtung der Außenwände abgeschätzt. Unterstützt wurden mit einer Wärmebildkamera Temperaturunterschiede in den Hauswänden abgebildet (Abb. 8). Die Wärmebildaufnahmen halfen zudem bei der Zuordnung der Bausubstanz. Weitere Felddaten zu den betroffenen Gebäuden umfassten Unterkellerung, Etagenanzahl, Art der Nutzung, Alter, Zustand, erkennbare Vorsorgemaßnahmen sowie eine Charakterisierung der unmittelbaren Gebäudeumgebung, z. B. Versiegelung und Exposition des Gebäudes zur Fließrichtung.

3.2 Ergebnisse

Abbildung 9 zeigt die geschätzten Wasserstände für die von der Sturzflut betroffenen Bereiche in Braunsbach. Dazu wurden die an den Gebäuden abgeschätzten Wasserstände als Grundlage genommen. Für die Räume zwischen den Gebäuden wird ein nach Entfernung gewichtetes Mittel aus den Wasserständen an den Gebäuden im 30 m Umkreis genutzt. Für Bereiche, die mehr als 25 m vom dichtesten Messpunkt entfernt liegen, wird ein Wasserstand von Null angenommen, da häufig nur die erste Häuserreihe von der Sturzflut betroffen war, während benachbarte höher gelegenen Häuser nicht erreicht wurden. Dieses Vorgehen führt allerdings dazu, dass im oberen Bereich der Orlacher Straße, in dem keine Häuser stehen, kein Wasserstand verzeichnet wurde, obwohl dieser Bereich überflutet war.

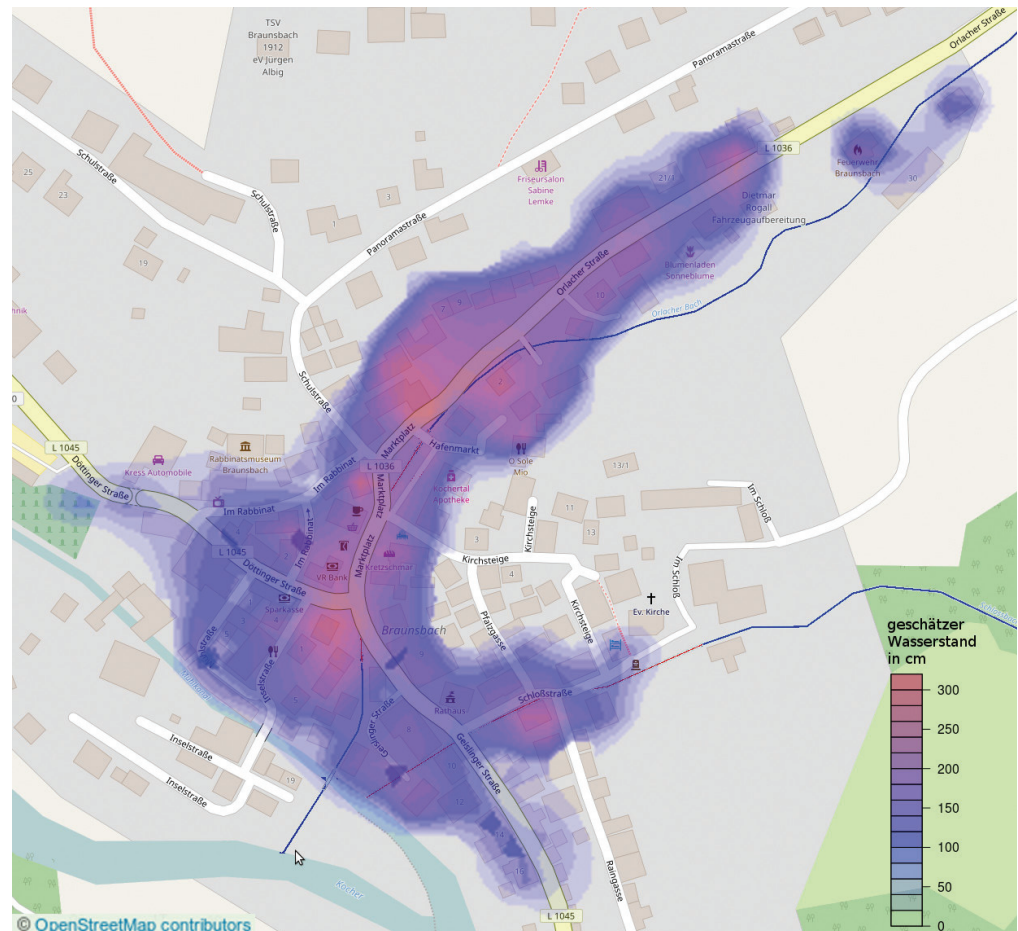


Abbildung 9

Abschätzungen des Wasserstands an den von der Sturzflut betroffenen Gebäuden in Braunsbach in cm über der Geländeoberfläche. Der Orlacher Bach (parallel zur Orlacher Str. und Marktplatz) und der Schloßbach (parallel zur Schloßstr.) sind in dunkelblau dargestellt bzw. die verdolten Abschnitte in dunkelrot.

Estimated water levels at the buildings in Braunsbach affected by the flash flood in cm above terrain surface. The Orlacher Bach (parallel to the Orlacher Str. and Marktplatz) and the Schloßbach (parallel to the Schloßstr.) are marked in dark blue or for the sections that flow through canalizations in dark red.

Der Orlacher Bach wird vor dem Ortseingang nach Braunsbach von der Landesstraße L1036 (ab Ortseingang Orlacher Straße) überquert, die ab hier parallel zum Bach verläuft. In diesem Bereich wird der Bachlauf eingefasst und durch einen schmalen Brückendurchlauf geführt (Abb. 10). Hier wurde der Durchlass durch die anströmenden Wasser- und Geschiebemengen überlastet, so dass diese über die Ufer traten, Brücke und Straße überspülten und entlang der Orlacher Straße flossen. Aufgrund der Tallage der Orlacher Straße war der schnelle Abfluss in diesem Bereich stark kanalisiert mit Abflusshöhen von 2,0 bis 3,5 m (Abb. 9). Spuren von Spritzwasser und mitgeführtem Material waren auch deutlich höher erkennbar. Im Bereich des Marktplatzes fächernten sich die Fließwege dann auf und trafen Häuser entlang der Straßen Hafenmarkt, Marktplatz, Im Rabbinat, Döttinger Straße, Mülhstraße, Inselstraße und Geislinger Straße.

Weitere Wasser- und Geröllmassen wurden durch den Schloßbach eingetragen. Ab Höhe des Schlosses verläuft der Schloßbach verdolt. Als die Dole anströmendes Wasser und Geschiebe nicht mehr aufnehmen konnte, wurden alternative Fließwege entlang der Schloßstraße hinunter zur Geislinger Straße genutzt, wo die Abflüsse aus beiden Bächen zusammentrafen (Abb. 9).

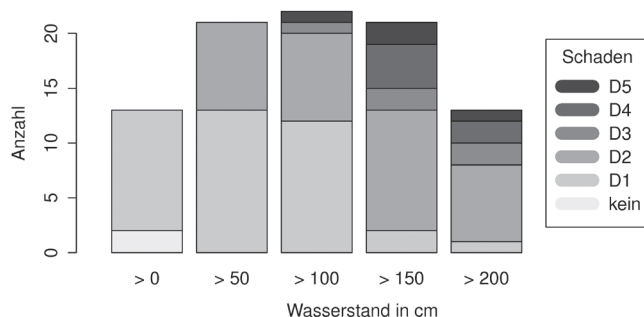
**Abbildung 10**

Brücke der L1036 über den Orlacher Bach zehn Tage nach der Sturzflut. Aufnahmen vom 08.06.2016 (K. Vogel, Universität Potsdam).
Bridge of the L1036 over the Orlacher Bach ten days after the flash flood. Picture taken on 08/06/2016 by K. Vogel, University of Potsdam..

Entlang der neu gebildeten Fließwege wurden mehrere Häuser durch anprallendes Geröll, Schwemmholtz, mobilisierte Fahrzeuge, etc. stark beschädigt. Weitere Schäden entstanden durch Unterspülung der Fundamente; Fenster und Türen wurden eingedrückt; Außenwände wurden weggerissen. Bei nahezu allen aufgenommenen Gebäuden trat Wasser und Schlamm in Keller oder Wohntagen ein und verursachte Schäden an Inventar und Bausubstanz. Durch einen beschädigten Öltank in der Orlacher Straße wurde die Bausubstanz mehrerer Gebäude mit Öl kontaminiert. Die schwersten Schäden traten im Bereich von Orlacher Straße, Marktplatz, Mühlstraße und Inselstraße auf, also in der Nähe des ursprünglichen Verlaufs des Orlacher Bachs. Hier erreichte die Sturzflut die höchsten Wasserstände und Fließgeschwindigkeiten.

Abbildung 11 zeigt die ermittelten Wasserstände an den aufgenommenen Gebäuden und die entsprechenden Schadensstufen. Schwere strukturelle Schäden (D3 oder größer) sind vornehmlich bei Wasserständen von über 1 m aufgetreten und liegen im Bereich des ursprünglichen Bachverlaufs (fünf Häuser mit D3, sechs Häuser mit D4 sowie fünf Häuser mit D5).

Auffällig ist, dass auch bei sehr hohen Wasserständen vergleichsweise viele Gebäude mit Schadensstufen D1 und D2 aufgenommen

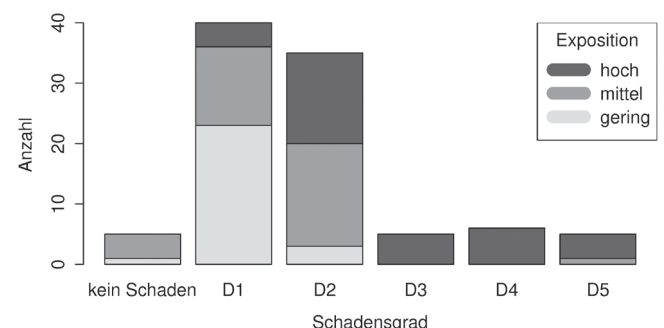
**Abbildung 11**

Verteilung des Wasserstands an den aufgenommenen Gebäuden in cm über Geländeoberfläche mit Unterscheidung der Schadensklassen, entsprechend Tabelle 1.
Distribution of the estimated water levels at the buildings in cm above terrain surface and amount of recorded damage classes (according to table 1) for similar water levels.

wurden. Oft standen schwer geschädigte Gebäude neben solchen, die nur geringe strukturelle Schäden hatten. Dies lag häufig an der Ausrichtung der Gebäude zur Fließrichtung und somit der Angriffsfläche des Wassers. Nahezu alle Gebäude mit Schadensgrad D3 oder höher hatten eine hohe Exposition zur Fließrichtung, d. h. mindestens eine Außenwand wurde von den Wassermassen direkt angeströmt (Abb. 12). Lediglich eins der 16 Gebäude wies nur eine mittlere Exposition auf, d. h. nur Teile der Außenwände wurden von den Wassermassen direkt getroffen. In diesem Fall handelte es sich um ein altes, leerstehendes Fachwerkhaus mit maroder Bausubstanz. Gebäude, die trotz hoher Wasserstände nur geringe strukturelle Schäden davon getragen haben, waren meist durch benachbarte Gebäude geschützt, so dass sie weniger Schäden durch mitgeführtes Geröll, Baumstämme und Autos erlitten und mit geringeren Fließgeschwindigkeiten getroffen wurden.

4 Diskussion und Schlussfolgerungen

Das steile Kerbtal des Orlacher Bachs ist eine typische Erosionsform der Kocher-Jagst-Ebenen. Die Zuflüsse von Kocher und Jagst graben tiefe Täler durch die Schichten des Muschelkalks und bilden die regionstypischen Klingen. Das schroffe Relief dieser Täler lässt auf weitere Hochwasserereignisse in der Ver-

**Abbildung 12**

Anzahl der Gebäude je Schadenklasse, wobei nach Exposition der Gebäude zur Fließrichtung unterschieden wird.
Distribution of the damage class of the recorded buildings and exposure of the buildings per damage class.

gangenheit schließen. In Braunsbach selbst, so berichten einige Anwohner, sei nichts über ein ähnliches Ereignis im Ort bekannt. Allerdings zeugen Fotos aus dem Jahre 1927 (Abb. 13) von einem heftigen Sturzflutereignis im 5 km südöstlich gelegenen Cröffelbach, welches unterhalb der Lochklinge und Wirtsklinge liegt. Das Einzugsgebiet beider Klingen zusammen beträgt ca. 2 km² und ist damit deutlich kleiner als das Einzugsgebiet des Orlacher Bachs. Damals wurden offensichtlich große Mengen an Geröll und Pflanzenmaterial mobilisiert und Häuser im Ort mit zerstörerischer Wucht getroffen. Nach Angaben einer Anwohnerin kam die historische Sturzflut im Wesentlichen über die Lochklinge. Diese wurde nach dem Ereignis durch einen hohen künstlichen Damm abgesperrt, welcher den Hochwasserabfluss durch den Ort im Mai 2016 reduzierte.

Die tiefen Kerbtäler der Region sowie die Aufnahmen aus Cröffelbach deuten darauf hin, dass Sturzflutereignisse wie in Braunsbach zwar selten, auf mehrere Jahrzehnte bezogen jedoch kein Einzelfall sind und besonders für Siedlungen, die bevorzugt auf Schwemmfächern im Kochertal gelegen sind, eine seltene, aber ernstzunehmende Gefährdung darstellen. Ein Vergleich der Hochwassergefährdungskarte (HWGK, Abb. 14) der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, LUBW, mit den von der Sturzflut betroffenen Gebieten verdeutlicht die Vernachlässigung dieser Gefährdung bei der Umsetzung der europäischen Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie 2007/60/EG.

Große Teile der von der Sturzflut betroffenen Grundstücke, insbesondere entlang der Orlacher Straße, werden gemäß der Gefährdungskarte weder von den Abflussmengen, wie sie statistisch gesehen einmal in 100 Jahren auftreten, noch bei einem Extremereignis beeinträchtigt. Der Begriff „Extremereignis“ beschreibt hierbei ein sehr seltenes Ereignis, das nach Vorgabe der HWGK statistisch gesehen einmal in 1.000 Jahren auftritt, lokal kann der entsprechende Abfluss aber auch bei kleineren Ereignissen, z. B. durch Verklausung, auftreten (LUBW, 2013). Allerdings wird bei HWGK lediglich die Gefahr, welche von Oberflächengewässern ausgeht, dargestellt. Wild abfließendes Oberflächenwasser wird beispielsweise nicht berücksichtigt. Durch die komplexe Verketzung verschiedener Prozesse, wie möglicherweise durch Geröll und Schwemmholtz blockierte Engstellen, Geschiebetransport und Verlagerungen im Flusslauf, ist das örtlich konkrete Verhalten von Sturzfluten, insbesondere im bebauten Gelände, nur bedingt vorhersehbar. Die Geländebefunde in der Orlacher Klinge deuten jedenfalls auf einen stark sedimentbelasteten Abfluss hin, der mitunter für Murgänge charakteristisch ist. Zwar existieren bereits Modelle wie LISFLOOD (van der Knijff et al., 2010), um den Oberflächenabfluss bei Niederschlagsereignissen zu simulieren. Allerdings birgt die Mobilisierung von Geröll bei solchen Modellierungen erhebliche Unsicherheiten, so dass sich der Einsatz von Modellen empfiehlt, die Abflüsse unter hohem Feststoffanteil simulieren, wie etwa das Softwarepaket RAMMS (Rapid Mass Movement Simulation, Christen et al., 2012). Insbesondere lässt diese Software die Berücksichtigung von geplanten oder gebauten Schutzmaßnahmen sowie Umgebungseinflüsse, wie Geländeformen und Wald, zu (<http://ramms.slf.ch/ramms/>).

Die Untersuchungen zeigen, dass die Schäden in Braunsbach nicht nur auf die großen Niederschlagsmengen in der Region zurückzuführen sind, sondern vielmehr durch eine Kaskade von ineinandergreifenden Prozessen, welche die Wirkung der Sturz-



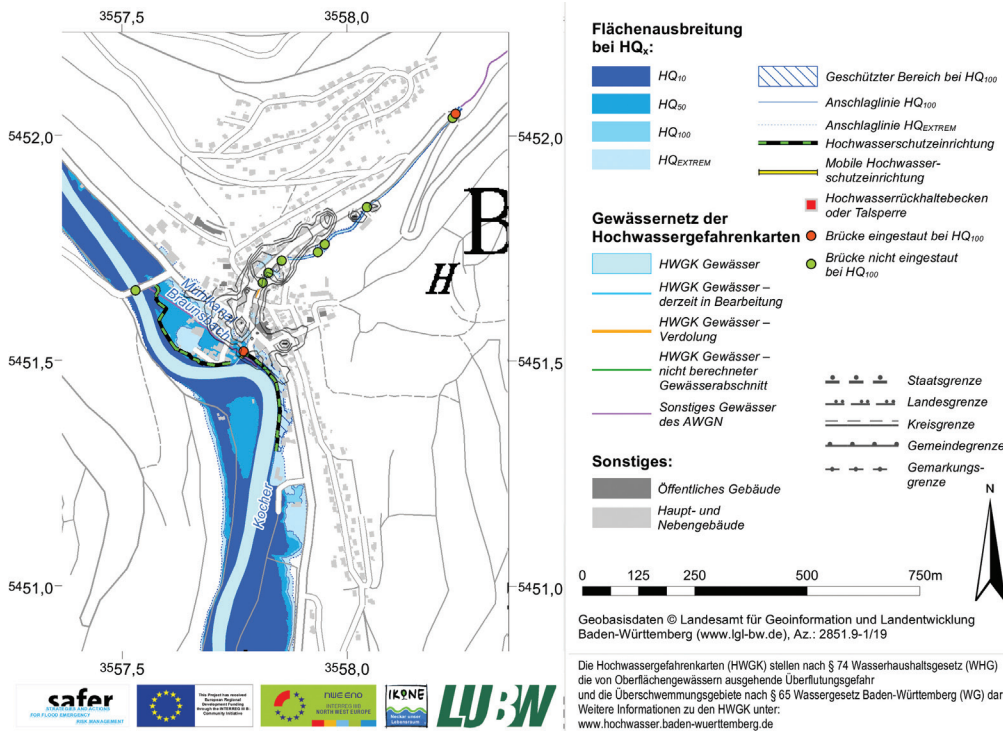
Abbildung 13

Aufnahmen der Familie Karsch nach einem Sturzflutereignis 1927 in Cröffelbach.

Pictures taken by the Karsch family after the flash flood in Cröffelbach in 1927.

flut erhöhten. Das markante Relief im Einzugsgebiet des Orlacher Bachs begünstigt eine schnelle Abflusskonzentration bei starken Niederschlagsereignissen und somit Ufer- und Sohlerosion bei extremen Abflüssen. Durch eingetragenes Hangmaterial bilden sich Verengungen und möglicherweise temporäre Blockaden im Bachlauf, die das Wasser zeitweise aufstauen. Spontane Flusslaufverlagerungen, wie vor dem Ortseingang von Braunsbach, sind weitere Folgen stoßartiger Wasser- und Geröllüberlastung der Gerinnequerschnitte.

Im Ortsbereich nahmen die Sturzfluten zudem Autos, Asphalt-schollen, Fassadenteile, etc. mit auf und beschädigten zusammen mit dem aus der Orlacher Klinge stammenden Geschiebe zahl-

**Abbildung 14**

Hochwassergefährdungskarte der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, LUBW: <http://udo.lubw.baden-wuerttemberg.de/>. Der von der Sturzflut betroffene Bereich ist ergänzend durch Profillinien gekennzeichnet (vgl. Abb. 9).

Ein HQ_x ist ein Hochwasserabfluss, der statistisch gesehen einmal in X Jahren erreicht oder überschritten wird.

Ein HQ_{EXTREM} ist statistisch gesehen ein sehr seltenes Ereignis. In den HWGK wird der Abfluss eines statistisch gesehen 1.000-jährlichen Hochwasser-Ereignisses zugrunde gelegt. Lokal kann es aber auch bei kleineren Ereignissen durch Verklauung an Brücken oder anderen Engstellen eintreten (LUBW 2013).

Flood hazard map provided by the State Institute for the Environment, Measurements and Conservation in Baden Württemberg, LUBW: <http://udo.lubw.baden-wuerttemberg.de/>. The area affected by the flash flood is marked by contour lines (compare Fig. 9).

HQ_x marks the flood runoff that is statistically reached or exceeded once every X years. HQ_{EXTREM} marks a very rare event and corresponds here to the flood runoff that is statistically exceeded once every 1,000 years, but could occur locally during smaller events, if e.g. accompanied by log jams at bridges and other bottlenecks.

reiche Häuser. Diese zusätzliche Mobilisierung anthropogener „Sedimente“ ändert zusammen mit der heterogenen Bebauung des Schwemmfächers des Orlacher Bachs eine Reihe von hydraulischen und rheologischen Abflussparametern und erschwert die computergestützte Modellierung und damit auch Vorhersagen von lokalen Überflutungshöhen und Schäden. Wertvolle Hinweise können hier direkte und detaillierte Begehungen vor Ort liefern. Die an den Gebäuden verursachten Schäden lassen sich nicht nur auf die Höhe des Wasserstands am Gebäude zurückführen, sondern auch auf die Exposition des Gebäudes zur Hauptfließrichtung. Nahezu alle stark geschädigten Gebäude boten den anströmenden Wasser- und Geröllmassen eine große Angriffsfläche. Dies verdeutlicht, dass bei Sturzfluten, anders als bei Flusshochwassern, neben dem Wasserstand auch Fließgeschwindigkeit und Geschiebetransport den Schaden wesentlich bestimmen (Laudan et al., 2016).

Strukturelle Vorsorgemaßnahmen an den Gebäuden, wie ein erhöhtes Erdgeschossniveau, unterschiedliche Bausubstanz von Erdgeschoss und Obergeschoss oder verstärkte und verdichtete Fenster und Türen, können bei einem Ereignis des beobachteten Ausmaßes nur bedingt vor Schaden schützen. Ziel sollte es daher sein, die Gefährdung durch solche Extre-

mereignisse möglichst zu minimieren. Dazu ist bei baulichen Maßnahmen, wie Brücken und Dolen, darauf zu achten, Engstellen, die die Abflusskapazität des Gewässers verringern, möglichst zu vermeiden bzw. ausreichend zu dimensionieren. Häufig sind Verklauungen solcher Engstellen eine wesentliche Ursache für Rückstau und lokale Überschwemmungen. So wird beispielsweise im Zusammenhang mit der Überflutung von Simbach am 1. Juni 2016 (drei Tage nach der Braunsbacher Sturzflut) der Einfluss einer verstopften Straßenunterführung diskutiert (SZ 9. und 10. Juni 2016). Das drei Meter hohe und vier Meter breite Durchlassrohr wurde durch Bäume und Sträucher verstopft, sodass sich vor der aufgeschütteten Straße ein Stausee bildete, bis die Straßenaufschüttung schließlich brach.

Auf der HWGK des LUBW (Abb. 14) wird die Brücke der L1036 vor dem Ortseingang nach Braunsbach für ein 100-jährliches Hochwasser als „eingestaut“ bezeichnet. Dies bedeutet, dass das Wasser selbst ohne Verklauung der Brücke nicht mehr

ungehindert abfließen kann und sich hinter der Brücke anstaut. Inwiefern ein größerer Brückendurchlass das Abflussverhalten der Sturzflut verändert hätte, wurde jedoch im Rahmen unserer Forschung nicht untersucht. Weiterhin wird die Verdolung des Orlacher Bachs im Ortskern als nicht wesentlich für den Ereignisablauf erachtet, da der Bach bereits weit oberhalb des verdolten Abschnitts auf andere Fließwege ausgewichen ist und auch ein unverdolter Bach die Extremabflüsse nicht hätte ableiten können. Jedoch ist es denkbar, dass bei kleineren Hochwasserereignissen die benannte Engstelle ein Abfließen durch den Bachlauf behindert und zu Veränderungen der Fließwege führt.

Hochwasserabflüsse lassen sich auch durch bauliche Schutzmaßnahmen wie Rückhaltebecken oder Entlastungskanäle reduzieren. Jedoch sind solche Baumaßnahmen nicht beliebig umsetzbar. In alpinen Regionen, bei denen Sturzfluten meist mit größeren Mengen an transportiertem Gesteinsmaterial verbunden sind, werden häufig Sperren im Bachlauf eingesetzt (StMUV, 2015). Konsolidierungssperren verhindern die Mobilisierung von lockerem Gestein an den Ufern. Geschieberückhalte- oder Filtersperren halten das vom Wasser transportierte Material zurück. Jedoch besteht besonders bei Extremereignissen die Gefahr, dass Schutzmaßnahmen versagen (Rückhaltebecken strömen über,

Rückhaltesperren brechen) und dadurch noch zu einer plötzlichen Verstärkung des Hochwasserabflusses beitragen. So wurde im Mai/Juni 2016 bspw. die Überflutung eines Gewerbegebiets durch einen drohenden Deichbruch in Hamminkeln (Nordrhein-Westfalen) befürchtet. Zeitgleich konnte das neu gebaute Rückhaltebecken bei Nierendorf (Rheinland-Pfalz) die Wassermassen nicht mehr aufnehmen und strömte am 4. Juni über (GDV, 2016).

Schutzmaßnahmen müssen auch finanzierbar sein und in einem sowohl effektiven als auch effizienten Verhältnis zur drohenden Gefährdung stehen. Daher sind die systematische Analyse und Bewertung der Gefahren sowie die Planung von Managementmaßnahmen, die bei Flusshochwasser Anwendung finden, auch auf Starkregen und Sturzfluten, besonders solcher mit hoher Feststoffbelastung, auszuweiten. Dies stellt durchaus neue methodische Herausforderungen an die Wissenschaft und die Wasserwirtschaft. So gibt es bislang erst wenige Ansätze, um Gefährdungs- und Risikokarten für Starkregen und Sturzfluten zu erstellen, bzw. bestehende Karten zu aktualisieren. Im Zuge der Untersuchungen in Braunsbach wurden Daten und Erkenntnisse generiert, die für die Entwicklung von Modellkomponenten, z. B. von Schadensmodellen, wichtig sind. Mitarbeitende der DFG Graduiertenschule „NatRiskChange“ werten hierzu noch weitere Daten aus, um möglichen Schwachstellen oder Wissenslücken bezüglich solcher Extremereignisse mit modernen Lösungsansätzen zu begegnen. Schließlich demonstrieren die hohen Schäden im Mai und Juni 2016, dass diese Gefahren in Deutschland bislang unterschätzt wurden und ein Umdenken nötig ist.

Zusammenfassung

Die Sturzflut in Braunsbach am 29. Mai 2016 wurde durch eine Reihe erosiver Prozesse begleitet und verstärkt. Auf der hauptsächlich landwirtschaftlich genutzten Hochebene des Einzugsgebietes kam es vieler Orts zu Bodenerosion durch Oberflächenabfluss. Die steilen Hänge der Orlacher Klinge begünstigten zudem Abflüsse mit hohem Feststoffanteil (Kies, Geröll, Pflanzenmaterial). Die Begehung der Orlacher Klinge und die dort dokumentierten Erosionsspuren legen nahe, dass der Hauptanteil des während der Sturzflut mobilisierten Materials auf Bachbettersion zurückzuführen ist. Weiterer Materialeintrag entstand durch Hangrutschungen in der Orlacher Klinge. Dessen Volumen wird auf über ein Siebentel der 42.000 m³ des nach der Sturzflut aus dem Überflutungsbereich des Orlacher Bachs entfernten Materials geschätzt. Fluss- und Geschiebefracht blockierten Engstellen im Bachlauf und begünstigten dadurch plötzliche Verlagerungen der Fließwege. Zudem wurde die Schadenswirkung der Sturzflut durch die transportierten Feststoffe verstärkt. Bei einem Großteil der betroffenen Gebäude drang Sediment in Keller und Wohnräume ein. An mehreren Gebäuden waren zudem heftige Anprallschäden erkennbar. So spielen bei Sturzfluten neben dem Wasserstand, einer wichtigen Größe in der Hochwasserschadensmodellierung, die Exposition der Gebäude und die Fließgeschwindigkeiten eine wesentliche Rolle bei der Schadensbildung. Dementsprechend ist die Einbeziehung von Starkregen und Sturzfluten wesentlich bei Hochwassergefährdungsanalysen, insbesondere für Siedlungsgebiete auf Schwemmfächern, wie unterhalb der Orlacher Klinge. Dies beinhaltet auch die Berücksichtigung der spezifischen Eigenschaften des jeweiligen Hochwassertyps. Beispielsweise werden die Folgen von Sturzfluten stark vom Sedimentgehalt, Fließgeschwindigkeiten und der Oberflächenrauigkeit im bebauten Gelände beeinflusst.

Summary

The flash flood in Braunsbach on May 29, 2016, was accompanied and intensified by various erosion processes. Traces of soil erosion caused by surface runoff were observed at the plateau of the catchment, which is mainly used for agriculture. The steep slopes of the Orlacher Klinge (German for a small, steep, gully-like tributary) promote the episodic supply of gravel, debris and organic material. Yet, the documented scars of river erosion along the creek indicate that most of the material carried by the flash flood was due to stream erosion. The volume of material mobilized by landslides is estimated to be at least one-seventh of the 42,000 m³ of material that was removed after the flash flood from the area flooded by the Orlacher Bach. Bottlenecks that were partly blocked by bedload caused a displacement of flow paths and changed the local flow dynamics. The transported material increased the damage caused to buildings, e. g. sediment was transported into and deposited in buildings and several buildings suffered heavy damage caused by the impact of rocks, trees and cars. Hence, damage caused by flash floods is driven not only by water depth, a common variable in estimating flood damage, but also by flow velocity and building exposure. Consequently a consideration of pluvial flooding and flash floods is recommended in flood risk assessments, especially for settlements on alluvial fans, such as the one below the Orlacher Klinge. This includes not only the source of flooding, but also its specific flooding characteristics. For instance, the effects of flash floods are strongly affected by the sediment load, flow velocities and flow roughness elements that abound in the built-up areas.

Danksagung

Wir danken den Bürgerinnen und Bürgern sowie dem Bürgermeister der Gemeinde Braunsbach für die Unterstützung und dem freundlichen Entgegenkommen bei den Vor-Ort-Erhebungen. Weiterer Dank gilt Brigitte Blum-Karsch und Manfred Karsch für Informationen zu den Sturzfluten in Cröffelbach und der Überlassung von Bildmaterial. Für die Unterstützung bei der Schadensdokumentation danken wir Benjamin Winter (alpS GmbH in Innsbruck) sowie Melanie Eckle, Benjamin Herfort, Carolin Klonner und Chiao-Ling Kuo (Universität Heidelberg). Wir danken zudem Irene Hahn (Universität Potsdam) und Ana Lucia Vela (Universität Tübingen) für ihre Unterstützung bei den Feldbegehungen und fruchtbare fachliche Diskussionen. Für die Bereitstellung des DGM10 danken wir den Vermessungsverwaltungen der Bundesländer und dem Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG). Dem Bundesministerium für Bildung und Forschung danken wir für die Förderung von Viktor Rözer im Rahmen des Projekts EVUS „Echtzeitvorhersage für urbane Sturzfluten und damit verbundene Wasserkontamination“ (BMBF, 03G0846B). Schließlich danken wir der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung des Graduiertenkollegs „Natural Hazards and Risks in a Changing World“ (NatRiskChange; GRK 2043/1).

Anschriften der Verfasser:

Dr. Kristin Vogel
M.Sc. Ugur Ozturk
Dipl.-Geol. Adrian Riemer
M.Sc. Jonas Laudan
Prof. PhD. Oliver Korup
Prof. Dr. Annegret Thieken
Universität Potsdam

Institut für Erd- und Umweltwissenschaften
Karl-Liebknecht-Str. 24-25, 14476 Potsdam
kvog@geo.uni-potsdam.de

M.Sc. Tobias Sieg
Universität Potsdam, Institut für Erd- und Umweltwissenschaften,
Potsdam
Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

M.Sc. Ankit Agarwal
M.Sc. Dadiyorto Wendi
Universität Potsdam, Institut für Erd- und Umweltwissenschaften,
Potsdam
Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, Potsdam
Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

M.Sc. Viktor Rözer
Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

Literaturverzeichnis

- BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2014): Potentielle Erosionsgefährdung der Ackerböden durch Wasser in Deutschland
- BLUME, H.-P., G.W. BRÜMMER, R. HORN, E. KANDELER, I. KÖGEL-KNABNER, R. KRETZSCHMAR, K. STAHR, & B.-M. WILKE, (2010): Scheffer/Schachtschabel: Lehrbuch der Bodenkunde – Springer-Verlag
- BRONSTERT, A., A. AGARWAL, B. BOESSENKOOL, M. FISCHER, M. HEISTERMANN, L. KÖHN, T. MORAN & D. WENDI (2016): Die Sturzflut von Braunsbach am 29. Mai 2016 - Entstehung, Ablauf und Schäden eines „Jahrhundertereignisses“. Teil 1: Meteorologische und Hydrologische Analysen – Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, diese Ausgabe
- CASANUEVA, A., C. RODRÍGUEZ-PUEBLA, M.D. FRÍAS & N. GONZÁLEZ-REVIRIEGO (2014): Variability of extreme precipitation over Europe and its relationships with teleconnection patterns – Hydrology and Earth System Sciences, 18(2), 709-725
- CHRISTEN, M., W. GERBER, CH. GRAF, Y. BÜHLER, P. BARTELT, J. GLOVER, B. MCARDELL, T. FEISTL & W. STEINKÖGLER (2012): Numerische Simulation von gravitativen Naturgefahren mit „RAMMS“ (Rapid Mass Movements) – Zeitschrift für Wildbach-, Lawinen-, Erosions- und Steinschlagschutz, 169, 282-293.
- COSTA, J.E. (1984): Physical Geomorphology of Debris Flows – Developments and Applications of Geomorphology, Springer Berlin Heidelberg, 268-317.
- EEA – European Environment Agency (2017): Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016, EEA Report No 1/2017
- 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), 1-22.
- GDV - Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. (2016a): Naturgefahrenreport 2016, Die Schaden-Chronik der deutschen Versicherer in Zahlen, Stimmen und Ereignissen
- GDV - Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. (2016b): Serviceteil zum Naturgefahrenreport 2016 - Tabellen, Grafiken und Karten
- IPCC (2012): Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change – Cambridge University Press, Cambridge.
- KREIBICH, H., A. BOTTO, B. MERZ, & K. SCHRÖTER (2016). Probabilistic, Multivariable Flood Loss Modeling on the Mesoscale with BT-FLEMO – Risk Analysis, doi:10.1111/risa.12650.
- LANDRATSAMT SCHWÄBISCH HALL (2016): Unwetter-Schadensliste Landkreis Schwäbisch Hall, [http://www.lrasha.de/index.php?id=302?&id=302&publish\[id\]=457120](http://www.lrasha.de/index.php?id=302?&id=302&publish[id]=457120), erschienen am 08.06.2016
- LAUDAN, J., V. RÖZER, T. SIEG, K. VOGEL & A.H. THIEKEN (2016): Brief communication: On-site data collection of damage caused by flash floods: Experiences from Braunsbach, Germany, in May/June 2016 – Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions, DOI:10.5194/nhess-2016-387.
- LUBW - Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (2013): Lesehilfe für die Hochwassergefahrenkarte Baden-Württemberg – <http://udo.lubw.baden-wuerttemberg.de/>
- MERZ, B., H. KREIBICH, R. SCHWARZE & A.H. THIEKEN (2010). Review article "Assessment of economic flood damage." – Natural Hazards and Earth System Science, 10(8), 1697-1724.
- MOLINARI, D., S. MENONI, G. ARONICA, F. BALLIO, N. BERNI, C. PANDOLFO, M. STELLUTI & G. MINUCCI (2014): Ex post damage assessment: an Italian experience. – Natural Hazards and Earth System Sciences, 14(4), 901-916.
- MUNICH RE (2017): Topics 2016. Munich
- MÜLLER, E.N. & A. PFISTER (2011): Increasing occurrence of high-intensity rainstorm events relevant for the generation of soil erosion in a temperate lowland region in Central Europe. – Journal of Hydrology, 411, 266-278.
- PAPATHOMA-KÖHLE M., A. ZISCHG, S. FUCHS, T. GLADE & M. KEILER (2015): Loss estimation for landslides in mountain areas - An integrated toolbox for vulnerability assessment and damage documentation. – Environmental Modelling and Software, 63, 156-169.
- PAPATHOMA-KÖHLE, M. (2016): Vulnerability curves vs. vulnerability indicators: application of an indicator-based methodology for debris-flow hazards. – Natural Hazards and Earth System Sciences, 16(8), 1771-1790.
- PRINZ, H., & R. STRAUSS (2012): Ingenieurgeologie – Springer-Verlag.
- RÖZER V, M. MÜLLER, P. BUBECK, S. KIENZLER, A.H. THIEKEN, I. PECH, K. SCHRÖTER, O. BUCHHOLZ, H. KREIBICH (2016) Coping with Pluvial Floods by Private Households. – Water, 8(7), 304.
- SCHWARZ, J. & H. MAIWALD (2007): Prognose der Bauwerksschädigung unter Hochwassereinwirkung – Bautechnik, 84(7), 450-464.
- StMUV - Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (2015): Wildbachbericht Bayern – Teil 1 – Grundlagen-Gefahren-Herausforderungen
- SZ - SÜDDEUTSCHE ZEITUNG (09.06.2016): Rohr löste offenbar Flutwelle in Simbach aus; <http://www.sueddeutsche.de/bayern/hochwasserkatastrophe-rohr-loeste-offenbar-flutwelle-in-simbach-aus-1.3027211>
- SZ - SÜDDEUTSCHE ZEITUNG (10.06.2016): Simbach diskutiert über das verstopfte Rohr; <http://www.sueddeutsche.de/bayern/hochwasser-simbach-diskutiert-ueber-das-verstopfte-rohr-1.3028970>
- 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.H., 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., I. SEIFERT, F. ELMER, H. MAIWALD, S. HAUBROCK, J. SCHWARZ, M. MÜLLER & J. SEIFERT (2009). Standardisierte Erfassung und Bewertung von Hochwasserschäden – Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 53(3), 198-207.
- TOY, J.T., G.R. FORSTER & K.G. RENARD (2002): Soil erosion: processes, prediction, measurement, and control. – John Wiley & Sons
- VAN DER KNIJFF, J.M., J. YOUNIS & A.P.J. DE ROO (2010): LISFLOOD: a GIS-based distributed model for river basin scale water balance and flood simulation. – International Journal of Geographical Information Science, 24(2), 189-212.
- VARNES, D.J. (1978): Slope movement types and processes – Transportation Research Board Special Report, 176.