



Originally published as:

Bronstert, A., Agarwal, A., Boessenkool, B., Fischer, M., Heistermann, M., Köhn-Reich, L., Moran, T., Wendi, D. (2017): Die Sturzflut von Braunsbach am 29. Mai 2016 – Entstehung, Ablauf und Schäden eines „Jahrhundertereignisses“. Teil 1: Meteorologische und hydrologische Analyse. The Braunsbach Flashflood of Mai 29th, 2016 – Origin, Pathways and Impacts of an Extreme Hydro-Meteorological Event. Part 1: Meteorological and Hydrological Analysis. - *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 61, pp. 150–162.

DOI: [http://doi.org/10.5675/HyWa\\_2017,3\\_1](http://doi.org/10.5675/HyWa_2017,3_1)

Axel Bronstert, Ankit Agarwal, Berry Boessenkool, Madlen Fischer, Maik Heistermann, Lisei Köhn-Reich, Thomas Moran, Dadiyorto Wendi

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

## Teil 1: Meteorologische und hydrologische Analyse

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

### Part 1: Meteorological and Hydrological Analysis

Die Sturzflut in Braunsbach im Nordosten Baden-Württembergs stellt ein besonders prägnantes Ereignis der Hochwasserereignisse in Süddeutschland Ende Mai und Anfang Juni 2016 dar. Das extreme Abfluss- und Geschiebefrachtereignis führte zu immensen Schäden im Ort. In diesem Artikel wird retrospektiv das Ereignis in Hinblick auf Meteorologie und Hydrologie analysiert um Ursachen und Ablauf des Ereignisses quantitativ beurteilen zu können. Dafür wurden unter anderem Stationsniederschlagsdaten und Radardaten des Deutschen Wetterdienstes analysiert, Abschätzungen zum Maximalabfluss während des Ereignisses getroffen und Ganglinien von Abflusspegeln in der näheren und weiteren Umgebung ausgewertet. Die Analysen zeigen, dass es sich um ein sehr seltenes Niederschlagsereignis mit extremen Intensitäten handelte, welches wiederum, in Zusammenspiel mit den dortigen Gebietscharakteristika, zu einem extremen Abflussereignis führte. Aufgrund der komplexen, interagierenden Prozesse ist eine Einzelursache nicht identifizierbar, da erst ein Zusammenführen dieser zu einem solchen Ereignis führen konnte.

**Schlagwörter:** Sturzflut, Geschiebetransport, Niederschlagsanalyse, Abflussbildung, Extremereignis, forensische Hydrologie

The flash flood in Braunsbach in the north-eastern part of Baden-Wuerttemberg is a particularly concise example of the floods in southern Germany at the end of May/early June 2016. The extreme runoff event with great debris transport caused immense damage in the village. In this article, the event is analyzed retrospectively with regard to meteorology and hydrology in order to obtain a quantitative assessment of the processes and their development. For this purpose, rain station data and radar data from the German Weather Service have been analyzed, maximum discharge volumes during the event have been estimated and hydrographs of nearby gauging stations have been evaluated. The results show that this was a very rare rainfall event with extreme intensities, which in combination with catchment properties led to extreme runoff. Due to the complex processes and their interaction with each other, no single flood cause can be identified, since only an interplay of these can lead to such an event.

**Keywords:** flash flood, sediment transport, rainfall analysis, runoff processes, extreme event, forensic hydrology

## 1 Einleitung

### 1.1 Anlass

Am Abend des 29. Mai 2016 und in den nachfolgenden Tagen wurden verschiedene Regionen in Süddeutschland, aber auch in Thüringen, Sachsen und Nordrhein-Westfalen von kurzen aber sehr heftigen Starkniederschlagsereignissen getroffen. In vielen dieser betroffenen Gebiete schwellen daraufhin kleine Bäche zu reißenden Flüssen an. Diese hoch-intensiven Niederschläge und der dadurch in den Einzugsgebieten entstandene Oberflächenabfluss verursachten sehr hohe Bodenerosionsraten und mancherorts extreme Durchflussraten der Bäche. Nachfolgend entwickelten sich teils extremer Sediment- bzw. Geschiebetransport und Schwemmholzverfrachtungen, z. T. Hangrutschungen und die Mobilisierung der Gewässersohlen und Uferbereiche. Teile des mobilisierten Sediments und Schwemmholzes lagerten sich in Siedlungsbereichen ab, was dort zu hohen Schäden führte. Besonders stark betroffen war der Ort Braunsbach, welcher im Norden Württembergs, ca. 15 km nordöstlich von Schwäbisch-Hall liegt. Der Ort liegt etwas erhöht am Ufer des Kochers, einem Nebenfluss des Neckars. Durch den Ortskern fließt der „Orlacher Bach“, der kurz darauf in den Fluss Kocher mündet. Die Sturzflut

bewirkte ein extremes Abfluss- und Geschiebefrachtereignis im Orlacher Bach, welches Überschwemmungen und durch Aufprall und Ablagerungen von Geschiebe große Schäden im Ort verursachte.

In diesem Artikel wird das Ereignis in Braunsbach und dem Einzugsgebiet des Orlacher Bachs als exemplarisches und besonders prägnantes Beispiel für eine Sturzflut der Ereignisse Ende Mai 2016 analysiert. Es handelt es sich methodisch um eine sogenannte forensische Ereignisanalyse (IRDR, 2011), auch „Post-event“-Analyse genannt. Es wird retrospektiv versucht, das Ereignis zu rekonstruieren und dadurch die Ursachen und Mechanismen des Ereignisablaufs und der Schadensentstehung zu analysieren. Angesichts unvollständiger Beobachtungen während des Ereignisses, zielt der Begriff „forensisch“ auf eine systematische wissenschaftliche Datenerhebung, die ein möglichst umfassendes und stimmiges Bild des abgelaufenen Ereignisses zeichnen soll (Marchi et al., 2009; Burton, 2010; Keating et al., 2016; Fuentes-Andino et al., 2016). Methodisch beinhaltet dieser retrospektive Ansatz unterschiedliche Mess- und Modellierungsansätze und die Analyse von räumlich, zeitlich oder thematisch dem Ereignis verwandten Daten sowie die Interpretation der Er-

eignisauswirkungen. Das Graduiertenkolleg NatRiskChange der Universität Potsdam und ihrer Partnereinrichtungen ([www.uni-potsdam.de/natriskchange](http://www.uni-potsdam.de/natriskchange)) beinhaltet als Teil des strukturierten Ausbildungsprogramms für Doktoranden sogenannte Task-Force-Einsätze, bei denen die Promovierenden zeitlich begrenzt ein aktuelles Ereignis auswerten. Im Zuge dieser Aktivität wurde die Sturzflut vom 29. Mai 2016 in Braunsbach untersucht. Dieser Artikel beschreibt die meteorologischen und hydrologischen Aspekte dieses Ereignisses. In einem zweiten Teil der Analyse (Vogel et al., 2017) werden die geomorphologischen Aspekte und die durch das Ereignis verursachten Gebäudeschäden analysiert.

## 1.2 Hydrologische Spezifika von Sturzfluten

Bei dem Hochwasserereignis von Braunsbach – wie auch bei den Ereignissen an anderen Orten im Nordosten Baden-Württembergs an diesem Abend – handelte es sich um ein sog. Sturzflutereignis (engl.: „flash flood“). Sturzfluten sind plötzlich eintretende Hochwasserereignisse, die typischerweise durch kleinräumige, konvektive Starkregenereignisse ausgelöst werden. Hinsichtlich ihres hydrologischen Systemverhaltens unterscheiden sie sich gegenüber Hochwasser in größeren Flüssen besonders durch die charakteristisch kurze Reaktionszeit, also der Zeit zwischen dem auslösenden Niederschlagsereignis und dem Hochwasserscheitel (Borga et al., 2014). Von einer Sturzflut wird typischerweise bei einer Reaktionszeit von nicht mehr als sechs Stunden gesprochen (Borga et al., 2011). Sie werden durch hochintensive Regenfälle verursacht und gegebenenfalls durch Böden mit nur geringer Wasseraufnahmefähigkeit bzw. geringem Infiltrationsvermögen verstärkt. Solche infiltrationsreduzierenden Bedingungen können etwa durch hohe Bodenfeuchtwerte schon vor dem Beginn des Starkregens gegeben sein, oder auch durch Verschlämzung einer Bodenoberfläche infolge hoher kinetischer Energie des Regenereignisses und keiner oder nur geringer Pflanzenbedeckung verursacht werden. Zudem begünstigen geringe Oberflächenrauigkeiten und/oder Gebiete mit ausgeprägtem Relief eine rasche Abflusskonzentration und damit schnelle Überflutungsreaktion. Gleichwohl können Sturzfluten auch bei sehr flachem Gelände auftreten. Unter solchen Bedingungen treten dann relativ weit ausgedehnte Überschwemmungen aufgrund nicht-infiltrierenden Wassers auf, allerdings dann mit geringen Fließgeschwindigkeiten. Die typische Gefährdung, die von Sturzfluten ausgeht, wird durch folgende Merkmale verdeutlicht:

- Geringe Vorwarnzeit: Die Vorwarnzeit ist bei Sturzfluten sehr kurz, da die Reaktionszeit so gering ist. Eine Warnung wird aber nicht nur durch die rasche Reaktion des Abflusses erschwert, sondern auch durch Probleme bei der Erfassung und Vorhersage der auslösenden Niederschlagsereignisse. Damit sind die Handlungsoptionen zur Einleitung von direkten Gegenmaßnahmen während des Ereignisses begrenzt. Jonkman (2005) konnte zeigen, dass die Mortalitätsrate, berechnet aus der Zahl der Todesfälle geteilt durch die Zahl der Betroffenen, bei Sturzfluten deutlich größer ist als bei Flusshochwasserereignissen.
- Oftmals hohe Fließgeschwindigkeiten: Bei Quelleinzugsgebieten mit hoher Reliefenergie treten bei extremen Abflüssen nicht nur im Gerinne selbst, sondern auch in Überflutungsbereichen sehr hohen Fließgeschwindigkeiten auf. Die hohen Abflusswerte und –geschwindigkeiten führen z. T. zur Mobilisierung und Mitführung von Geröll und Geschiebe sowie zur Entwurzelung von Bäumen und Sträuchern und deren weite-

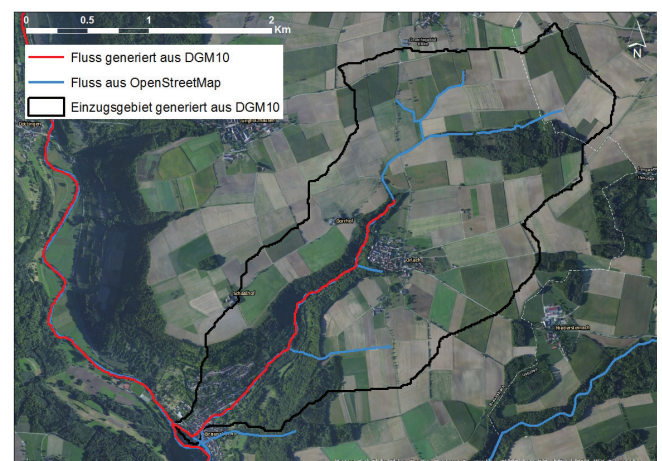
ren Transport als Schwemmholz und anderem Treibgut, was die potenziellen Schäden an Gebäuden und der Infrastruktur weiter verstärken kann.

- Singuläres bzw. spontanes Verhalten u. a. durch plötzliche Verlagerungen im Flusslauf, Ablagerungen von Geröll und Schwemmholz in Engstellen: Das Ausuferungs- und Überflutungsverhalten ist bei Sturzfluten schwer vorhersagbar und wird oft durch singuläre Gegebenheiten maßgeblich beeinflusst. Ein typisches Beispiel dafür sind fast spontane Verschlüsse der Fließgewässer („Verkläuserungen“) durch Treibgut und Geröll, etwa an Brücken oder anderen, auch natürlichen Verengungen des Flusslaufes. Je nach Menge und Beschaffenheit des mitgeführten Materials kann dies zu spontanem Rückstau und Änderungen der Fließwege, oder bei einem plötzlichen Durchbruch derartiger Hindernisse zu einer weiteren, massiven Verstärkung der Abflussspitzen führen.

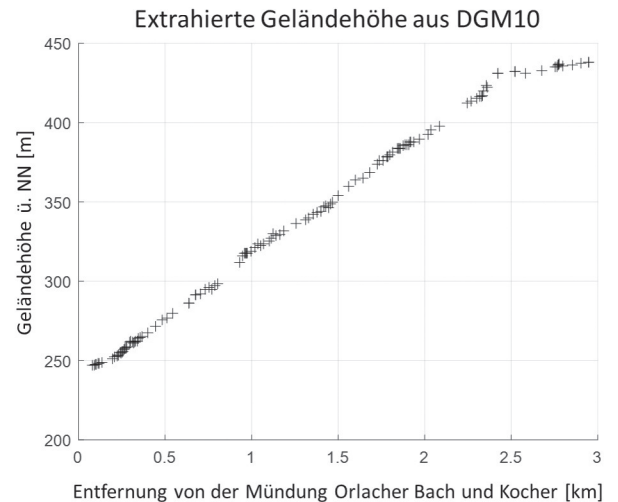
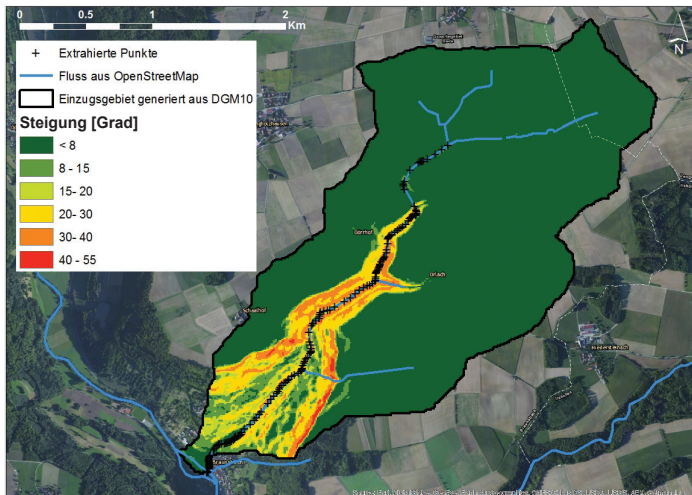
Diese Merkmale verdeutlichen, dass direkte Messungen bei Sturzfluten viel schwieriger zu bewerkstelligen sind als bei Flussüberschwemmungen. Insofern liegen nur wenige fundierte Aussagen zu einzelnen Sturzflutereignissen vor; ebenso ist es schwierig, quantitative Aussagen über örtlich konkrete Sturzflutgefährdung zu erhalten. Daher ist der o. g. forensische Ansatz für diese Art von Hochwasserereignissen prädestiniert, um eine retrospektive Analyse durchzuführen.

## 2 Gebietsbeschreibung

Der Orlacher Bach entspringt in einer überwiegend landwirtschaftlich genutzten Hochebene im Nordosten Baden-Württembergs (Teil der Südwestdeutschen Schichtstufenlandschaft) und fließt südwestlich durch ein steiles Kerbtal (Orlacher Klinge), bis er nach ungefähr 3 km in den deutlich größeren Kocher mündet. Direkt an der Mündung, wo sich die Orlacher Klinge zum Kochertal öffnet, liegt der Ort Braunsbach (siehe Abbildung 1). Die Hänge mit einer sehr hohen Neigung von 20 bis 40 % sind bewaldet, da eine landwirtschaftliche Nutzung dort nicht möglich ist. In



**Abbildung 1**  
Karte des Einzugsgebietes des Orlacher Bachs (6 km<sup>2</sup>). Datenquelle: Vermessungsverwaltungen der Bundesländer und Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG, [www.bkg.bund.de](http://www.bkg.bund.de)).  
Catchment of the Orlacher Creek (6 km<sup>2</sup>). Source: Vermessungsverwaltungen der Bundesländer und Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG, [www.bkg.bund.de](http://www.bkg.bund.de)).



**Abbildung 2**

Links: Geländeneigung im Orlicher Einzugsgebiet in Grad. Rechts: Höhenprofil entlang des Bachbettes. (Beides abgeleitet aus dem DGM10 der BKG).  
 Left: Slope in degree for the Orlicher catchment. Right: Elevation profile along the stream bed. (Both delineated from DGM10 of BKG, www.bkg.bund.de).

Abbildung 2 ist die hohe Steigung des Orlicher Talbodens und des Baches (7 m/100 m) zu sehen.

Die Kalksteinbänke in dieser Region formen im Tal des Orlicher Baches steile Geländestufen, die zur flachen Hochebene von Orlach hinaufführen, wo der Muschelkalk von einer mehreren Meter mächtigen Schicht des „Unteren Keupers“ bedeckt wird, welcher die regionale Geologie charakterisierende lithostratigraphische Einheit ist. Die Bodenkarte des Landesamts für Geologie, Bergbau und Rohstoffe Baden-Württemberg (maps.lgrb-bw.de/) gibt als dominierenden Bodentyp in den Talbereichen und den zugehörigen Hängen Rendzinen und Parabraunerden an, auf den Plateauflächen lehmige-tonige Substrate bzw. Pelosole und Parabraunerden. Bzgl. des Bodenwasserregimes wird eine eingeschränkte bis sehr geringe Wasserdurchlässigkeit angegeben. Die Mächtigkeit der Böden an den Hängen des Tales ist gering (< ca. 0,5 m), was während der Geländebegehungen bestätigt werden konnte.

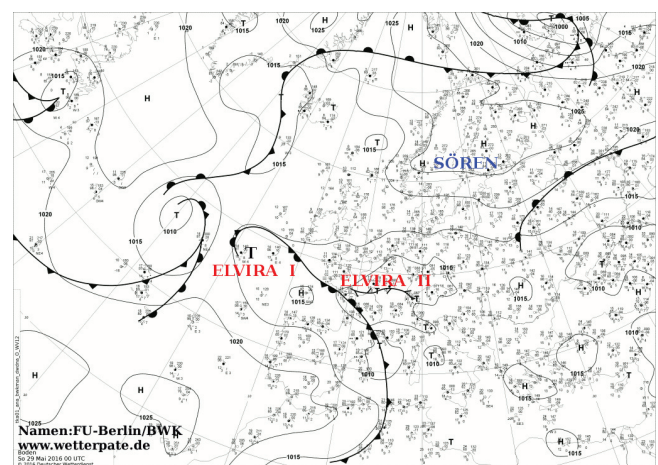
Vogel et al. (2017) geben ausführliche Angaben zu den geomorphologischen Gegebenheiten und den geomorphologischen Prozessen während dieses Hochwasserereignisses.

### 3 Meteorologische Situation und Niederschlagsanalyse

#### 3.1 Atmosphärische Bedingungen

Die atmosphärischen Bedingungen waren gekennzeichnet durch relativ lang andauernde Persistenz, also wenig Änderungen in Raum und Zeit. Die nach der subjektiven Wetterlagenklassifikation von Hess und Brezowsky (1977) identifizierte Großwetterlage „Tief Mitteleuropa (TM)“ dauerte sechs Tage an. Dieses Tief über Mitteleuropa wurde zudem durch das Hochdruckgebiet Sören (siehe Abbildung 3) über Skandinavien blockiert und blieb somit für mehrere Tage räumlich fast stationär. Durch diese Blockade konnten keine Luftmassen aus westlicher Richtung einströmen, sondern wurden aus südlicher bis südöstlicher Richtung aus dem Mittelmeerraum nach Mitteleuropa transportiert. Das dortige Zusammentreffen der feuchten, relativ warmen Luft vom Mittelmeer mit kalter Luft aus dem Norden führte zu deren Hebung

und somit verstärkter Gewitterzellenbildung. Weitere Informationen zu der Wetterlage vor bzw. nach der Sturzflut von Braunsbach sind in Ziese et al. (2016) zu finden. Obwohl die genannte Wetterlage TM in den letzten Jahren auch Auslöser anderer Hochwasserereignisse war (z. B. Donau- und Elbehochwasser von 2002 und 2013), weisen Piper et al. (2016) darauf hin, dass starke konvektive Niederschläge (Gewitter) nicht zwangsläufig typisch für TM sind. Daher wird von diesen Autoren die Wetterlagenklassifikation des DWD (Dittmann, 1995; Bissolli und Dittmann, 2001) herangezogen, ergänzt um besondere Berücksichtigung konvektiver Bedingungen. Auch damit wird eine hohe Persistenz (6 Tage) konstatiert, die zudem noch deutlich durch konvektionsauslösende Bedingungen charakterisiert ist. Die Persistenz führte zu geringen mittleren Windgeschwindigkeiten und damit zu einer nur langsamen seitlichen Fortbewegung der Gewitterzellen. Dadurch wurden lokale Spitzenwerte bzw. Extrema des Niederschlags bewirkt.



**Abbildung 3**

Boden-Wetterkarte vom 29. Mai 2016, 00:00 UTC. Quelle: „Berliner Wetterkarte“, FU Berlin.  
 Ground weather map for May 29th, 2016 at 00:00 UTC. Source: „Berliner Wetterkarte“, FU Berlin.



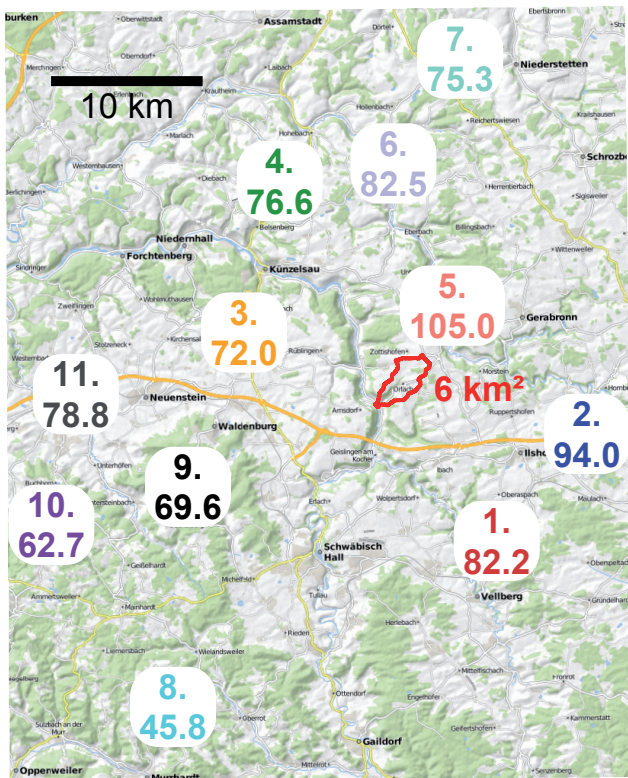
### 3.2 Niederschlagsinformationen aus Stationsmessungen in der Umgebung von Braunsbach

In Braunsbach oder dem Einzugsgebiet des Orlicher Baches gibt es keine Niederschlagsstation. Die nächstgelegene Station liegt in Langenburg-Atzenrod, ca. 10 km nordöstlich von Braunsbach (siehe Abbildung 4, links). Hier wurde am 29. Mai 2016 eine Niederschlagsmenge von 105 mm/Tag (von 7:50 Uhr am 29. Mai 2016 bis 7:50 Uhr am 30. Mai 2016) verzeichnet. Eine stündliche Auflösung ist für diese Station leider nicht verfügbar. Ein solch hoher Tageswert wurde an dieser seit 1931 existierenden Messstation (mit einer Messunterbrechung vom November 1990 bis Juni 2008) zuvor nicht beobachtet. So wurde das bisherige Maximum von 72,1 mm/Tag aus dem Jahr 1959 um mehr als das 1,4-fache überschritten. Eine extremwertstatistische Analyse (Anpassung einer allgemeinen Extremwertverteilung, GEV, für die täglichen Niederschlagssummen der verfügbaren Stationsdaten des DWD und der LUBW in der näheren Umgebung Braunsbachs) ergab, dass die Auftretenswahrscheinlichkeit für solch eine Niederschlagsmenge an dieser Station ohne Berücksichtigung dieses Wertes deutlich unter 0,1 %/Jahr lag, was bedeutet, dass das Ereignis als ein „Jahrtausendereignis“ bezeichnet werden könnte. Wird das Ereignis vom 29. Mai 2016 in die statistische Analyse

mit einbezogen, steigt zwar die Wahrscheinlichkeit um mehr als das 10-fache, liegt aber noch immer unter 1 %, was dann in etwa einem Jahrhundertereignis entspräche. Dies verdeutlicht zum einen, wie extrem bzw. selten die Niederschlagsmenge war, zum anderen auch, dass die abgeleiteten Auftretenswahrscheinlichkeiten extremer bzw. sehr seltener Ereignisse abhängig von der Länge der Datenzeitreihe sind.

In etwas entfernten Stationen, wie beispielsweise Kupferzell-Rechbach und Vellberg-Kleinaltdorf, wurden die lokalen Niederschläge auch in stündlicher Auflösung registriert. Für die dortigen geringeren Tageswerte von 72 bzw. 82,2 mm/Tag lässt sich auf Basis der KOSTRA-Werte des DWD eine Auftretenswahrscheinlichkeit von etwa 3 %/Jahr bzw. 1 %/Jahr ableiten. An beiden Stationen wurden mit 32,5 und 25,8 mm/h die höchsten stündlichen Intensitäten seit Beginn der Aufzeichnung der hochaufgelösten Niederschläge im Jahr 2005 bzw. 2006 aufgezeichnet. Die Auftretenswahrscheinlichkeit dieser stündlichen Stationswerte liegt bei ungefähr 10 %/Jahr in Kupferzell-Rechbach (entsprechend einer Jährlichkeit von 10 Jahren) und etwa 4 % in Vellberg-Kleinaltdorf (Jährlichkeit von 25 Jahren). Die höchste stündliche Niederschlagsmenge wurde an der Station Kirchberg/

DWD-Stationen bei Braunsbach



Niederschlagsverlauf

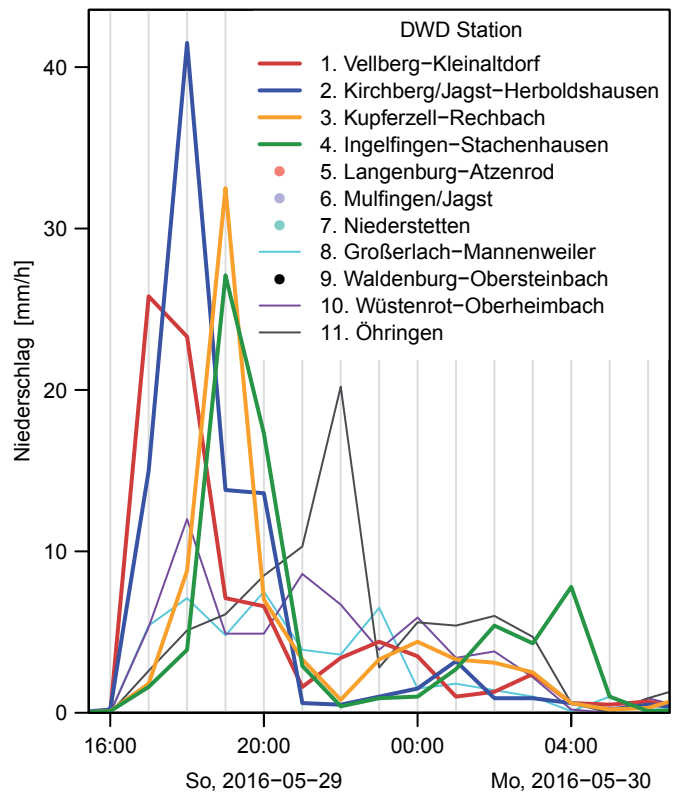


Abbildung 4

Links: Übersichtskarte der Niederschlagsmessstationen in der Nähe des Einzugsgebietes (rot umrandet) mit den täglichen Niederschlagssummen vom 29. Mai 2016 (24 Stunden bis 7:50 Uhr des Folgetages). Rechts: Stündlicher Niederschlagsverlauf in UTC, sofern verfügbar. Stationen, an denen nur Tagessummen zur Verfügung stehen, sind in der Legende mit einem Punkt gekennzeichnet. Die Sturzflut in Braunsbach erfolgte in etwa von 20:00 bis 22:00 Uhr Ortszeit (18:00 bis 20:00 UTC) mit dem Maximum zwischen 20:30 und 21:00 Uhr, was dem Zeitpunkt der Niederschlagsspitze zwischen Kirchberg und Kupferzell entspricht.

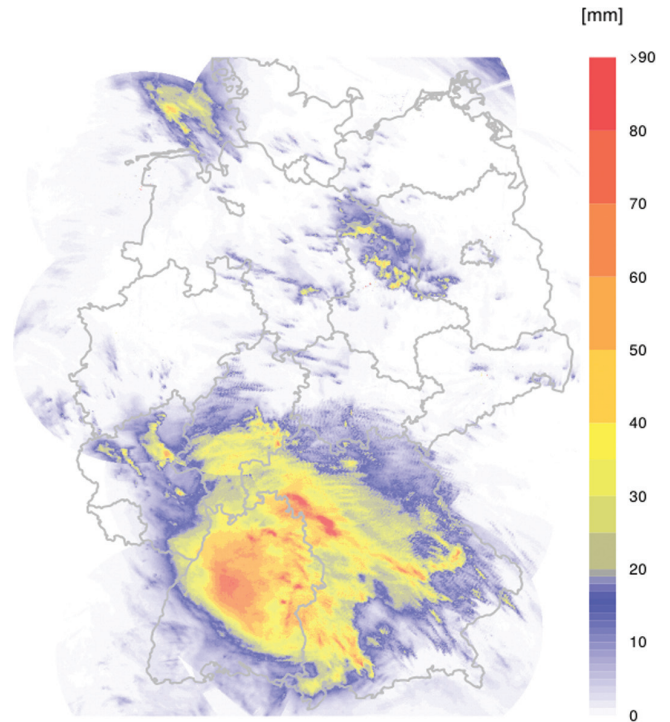
Left: Overview of rain gauge stations, which are close to the catchment (red outline) with precipitation sums for May 29th, 2016 (24 hours until 07:50 am of the following day). Right: Hourly precipitation in UTC, if available. Stations with only daily sums are marked with a dot in the legend. The flash flood occurred approx. 8:00 to 10:00 pm (18:00 to 20:00 UTC) with maximum discharge between 8:30 and 9:00 pm. This corresponds to the time between the rainfall peaks of Kirchberg and Kupferzell.

Jagst-Herboldshausen, ca. 15 km südöstlich von Braunsbach, mit 41,5 mm/h registriert, was dort einer Jährlichkeit von über 100 Jahren entspricht. Abbildung 4 (rechts) zeigt die stündlichen Intensitäten der benachbarten Messstationen. Gut erkennbar ist die Zugrichtung der Gewitterzelle von Südost nach Nordwest, da der extreme Niederschlag zuerst in Vellberg-Kleinaltdorf zwischen 16:00 und 17:00 UTC (zwischen 18:00 und 19:00 Uhr Ortszeit), anschließend in Kirchberg/Jagst-Herboldshausen und schließlich in Kupferzell-Rechbach zwischen 18:00 und 19:00 UTC (20:00 und 21:00 Uhr Ortszeit) einsetzte. Trotz dieser recht hohen Anzahl von Niederschlagsstation in der Umgebung des betroffenen Einzugsgebietes können die recht kleinräumigen Variationen der Niederschlagsraten dadurch nicht genügend beurteilt werden. Dafür bietet die Analyse von Niederschlagsradar-daten die Möglichkeit.

### 3.3 Niederschlagsinformationen aus Niederschlagsradar-daten

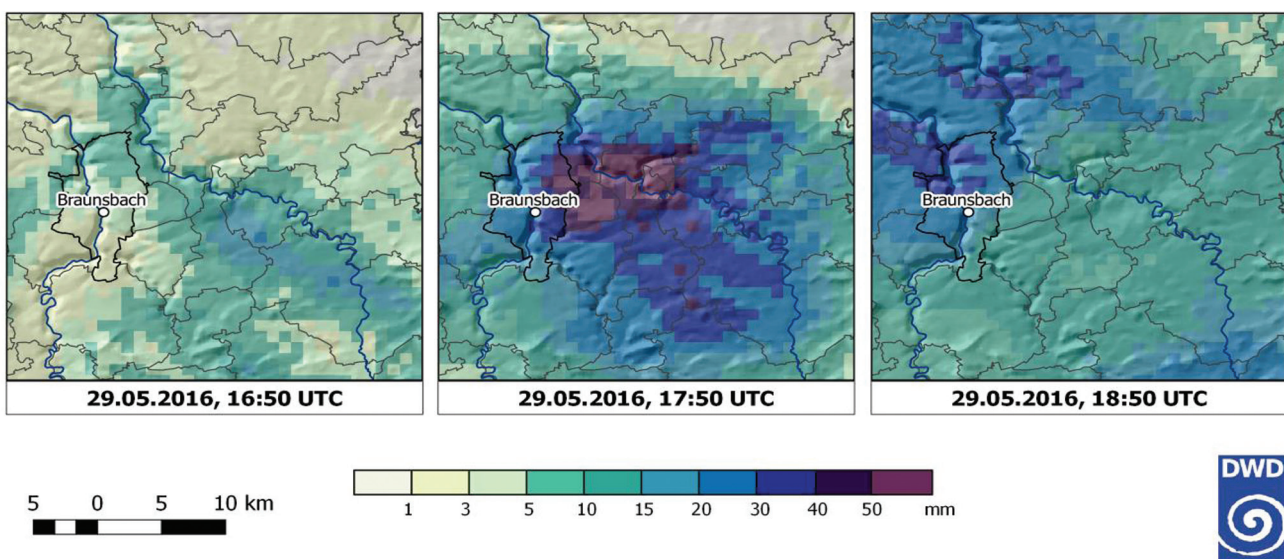
Ein Blick auf die Darstellung der räumlichen Variabilität der Niederschlagsbedingungen am 29. Mai 2016 von 15:00 bis 23:55 UTC für Deutschland in Abbildung 5 (abgeleitet aus den Radarstationen des DWD) zeigt, dass die kleinräumige Variabilität der Niederschläge zu diesem Zeitraum hoch war und zudem lokale Spitzenereignisse erkennbar sind. Dies entspricht den Erwartungen für konvektive Niederschlagsverhältnisse.

Daraus lässt sich schlussfolgern, dass eine lineare räumliche Interpolation der Stationsdaten selbst bei der hohen Stationsdichte in der Umgebung von Braunsbach geostatistisch nicht zulässig ist und somit nicht durch einfache Interpolation von diesen Stationsdaten auf die Werte im Gebiet selbst geschlossen werden kann. Eine Hinzunahme der Informationen über die räumliche Variabilität, abgeleitet aus den Niederschlagsradarinformationen kann daher gerade hier weitere wichtige Informationen bringen. In Teilen Baden-Württembergs und Bayerns zeigt diese Darstellung demnach in diesem Zeitintervall Niederschlagssummen von mehr als 90 mm. Es ist wichtig darauf hinzuweisen, dass die-



**Abbildung 5** Niederschlagssummen über Deutschland zwischen 15:00 und 23:55 UTC am 29. Mai 2016. Quelle: Eigene Analyse, basierend auf den RADOLAN-Daten des DWD.  
*Precipitation sums over Germany on May 29th, 2016 between 15:00 and 23:55 UTC. Source: Own Analysis, based on radar data provided by the German Weather Service, DWD.*

se vom DWD öffentlich bereit gestellten Daten keine Korrekturen der gerade bei Starkniederschlägen auftretenden Dämpfungen des Radarsignals beinhalten, was weiter unten noch näher analysiert wird. Abbildung 6 zeigt in einer kleinräumigeren Darstellung



**Abbildung 6** Stündliche Radarniederschläge (Radolan-ME-Produkt) des DWD bei Braunsbach in den drei intensivsten Stunden am 29. Mai 2016 (Quelle: DWD/Ziese et al., 2016).  
*Hourly precipitation from radar measurements (Radolan-ME-product) of DWD near Braunsbach during the most intensive three hours on May 29th, 2016 (Source: DWD/Ziese et al., 2016).*



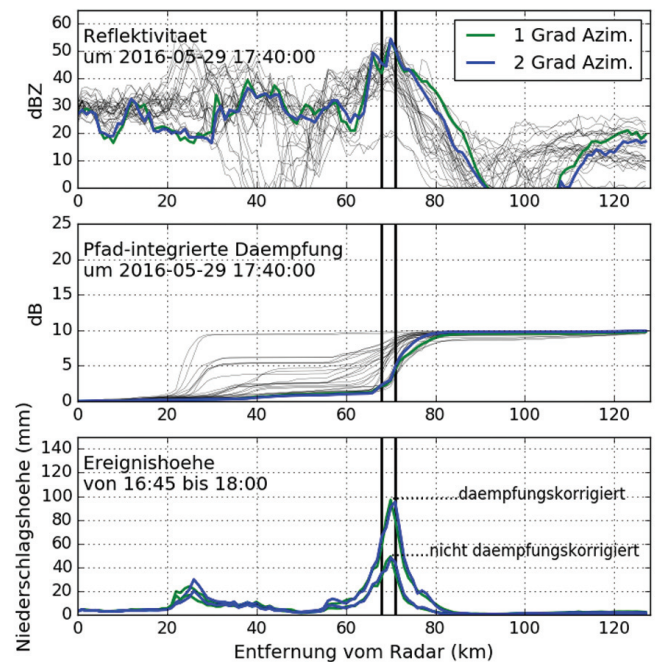
lung die Ergebnisse des stündlichen Radarproduktes des DWD (RADOLAN, ebenfalls ohne Dämpfungskorrektur) in der Region um Braunsbach in den drei intensivsten Stunden am 29. Mai 2016 (Ziese et al., 2016). Es wird deutlich, dass gerade im Einzugsgebiet des Orlacher Baches die größten Intensitäten auftraten.

Radardaten erlauben neben der hohen räumlichen auch eine hohe zeitliche Auflösung des Intensitätsverlaufes. Eine solche Analyse wurde mit den Daten der nächstgelegenen Radarstation „Türkheim“ des DWD, ca. 70 km südlich des Einzugsgebietes des Orlacher Baches gelegen, durchgeführt und ist in Abbildung 7 dargestellt. Es wird deutlich, dass der stärkste Niederschlag zwischen 19:00 und 20:00 Uhr Ortszeit fiel. Für diese Rohdaten („DX-Produkt“, in 5-Minuten Intervallen) wurde eine Dämpfungskorrektur vorgenommen, basierend auf der Methode von Jacobi und Heistermann (2016). Nach Anwendung dieser Methode ergibt sich allein für den Kernzeitraum von 18:45 bis 20:00 Uhr (16:45 bis 18:00 UTC) eine Niederschlagssumme von knapp 100 mm. Das ist noch eine vorsichtige Schätzung, da die Parameter des Verfahrens so gesetzt wurden, dass die Dämpfungseffekte relativ gering ausfallen. Wenn die Parameter so gesetzt werden, wie sie in Jacobi und Heistermann (2016) als wahrscheinlichste Schätzung veröffentlicht wurden, erhält man für diesen 75-Minuten-Zeitraum eine Niederschlagssumme von etwa 140 mm.

Abbildung 7 zeigt den Verlauf unterschiedlicher Größen entlang der beiden 1-Grad-Kreis-sektoren der Azimutwinkel 1 und 2 Grad des Radars Türkheim. Allein diese beiden Strahlen decken das Einzugsgebiet des Orlacher Baches ab. Die vertikalen schwarzen Linien veranschaulichen die Lage des Einzugsgebietes entlang der beiden Strahlen. Die obere Graphik stellt die beobachtete Reflektivität entlang des Strahls dar. Die dünnen schwarzen Linien zeigen alle Profile beider Strahlen im Betrachtungszeitraum (16:45 bis 18:00 UTC), die dicken farbigen Linien zeigen exemplarisch die Werte um 17:40 UTC, dem ungefähren Auftreten der maximalen Intensität. Die mittlere Graphik zeigt die auf dieser Basis berechnete Dämpfung entlang der beiden Strahlen in der Einheit „Dezibel“ (dB): 3 dB bedeutet, dass die „wahre“ Reflektivität im Verhältnis zur beobachteten Reflektivität um den Faktor 2 größer ist; 10 dB entspricht demnach einem Faktor 10, 20 dB einem Faktor 100.

In der unteren Graphik ist die Ereignishöhe des Niederschlags von 16:45 bis 18:00 UTC mit und ohne Dämpfungskorrektur dargestellt – wiederum entlang der beiden ausgewählten Azimutwinkel. Wie zuvor erklärt, variieren die Ergebnisse zwar entsprechend der Parametrisierung des Verfahrens, man erkennt aber deutlich, dass man ohne Dämpfungskorrektur mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit die Ereignishöhe stark unterschätzt (mind. um Faktor 2). Darüber hinaus zeigt die Abbildung auf eindrückliche Weise, dass das Einzugsgebiet des Orlacher Baches exakt im Spitzenbereich der lokal erreichten Niederschlagshöhen liegt.

Es lässt sich bezüglich der Niederschlagsbedingungen schlussfolgern, dass es sich um hochintensive und sehr seltene, „extreme“ (Jährlichkeit > 100 Jahre) Starkregenereignisse handelte. Sowohl die zeitliche als auch die räumliche Variabilität waren sehr ausgeprägt. Informationen über diese Variabilitäten sind aus den Stationsdaten nur bedingt erkennbar. Tatsächlich werden durch interpolierte Stationsdaten die lokalen Spitzenwerte unterschätzt. Die Hinzunahme der Radardaten gibt wichtige Informationen über die raum-zeitlichen Muster des Intensitätsverlaufes. Daraus



**Abbildung 7**

Effekte der Dämpfungskorrektur der Radardaten am Beispiel der Rohdaten (DX) des Radarstandorts Türkheim, bei konservativer Parameterwahl. Oben: Reflektivität entlang beider Strahlen im Betrachtungszeitraum, exemplarisch für 17:40 UTC dick gezeichnet. Mitte: Dämpfung in Dezibel. Unten: Niederschlagssumme mit und ohne Korrektur von 16:45 bis 18:00 UTC in Abhängigkeit von der Entfernung zum Radarstandort. Weitere Erklärungen im Text.

*Example of the effects of attenuation and attenuation correction with a conservative choice of parameters, using raw data (DX) from radar site Türkheim of the German Weather Service. Top: Reflectivity along both radar beams at 1 and 2 degrees; the black lines show all profiles of these two beams between 16:45 and 18:00 UTC, the colored lines demonstrate the profiles for 17:40 UTC. Middle: Attenuation in decibels, same coloring scheme as in top panel. Bottom: Precipitation sums with and without correction between 16:45 and 18:00 UTC, dependent on distance to radar site. More explanations in the text.*

wird erkenntlich, dass das Einzugsgebiet des Orlacher Baches im Zentrum des lokalen Gewittergeschehens lag. Eine Korrektur der Dämpfungseffekte der Reflektivität der Radarsignale ist essentiell um die gefallenen Niederschlagsintensitäten nicht zu unterschätzen. Die hier vorgenommene Dämpfungskorrektur resultierte mindestens in einer Verdopplung der Spitzenintensitäten, wobei die Unsicherheit dieser Korrektur erheblich ist, je nach Parametrisierung der Dämpfungskorrektur.

## 4 Hydrologische Analyse

### 4.1 Abflussbildungsprozesse

Infolge der hochintensiven Niederschläge kam es schnell und weitreichend, vermutlich großflächig im Einzugsgebiet, zu Oberflächenabfluss. Dabei trat sowohl Infiltrationsüberschuss, d. h. dass die Niederschlagsintensität größer als die Infiltrationskapazität der Bodenoberfläche war, als auch Sättigungsüberschuss, also Sättigung bis an die Bodenoberfläche, auf. Diese Erkenntnis beruht auf einer Ortsbegehung fünf Tage nach dem Ereignis. Dort wurden in vielen Bereichen der Hochfläche des Einzugsgebietes Fließ- und Erosionsspuren identifiziert, welche auf Infiltrationsüberschuss deuteten. Zudem war ersichtlich, dass der Boden in der Umgebung des Gewässernetzes häufig noch



**Abbildung 8**

Spuren von Oberflächenabflussbildung (links) und oberflächlicher Abflusskonzentration (rechts) auf der Hochfläche des Einzugsgebietes, aufgenommen am 3. Juni 2016 (Fotos: Lisei Köhn-Reich and Ankit Agarwal).  
*Traces of surface runoff generation (left) and of surface runoff concentration on the plateau area of the catchment (Photographs: Lisei Köhn-Reich and Ankit Agarwal)*

voll gesättigt war, was auf großflächigen Sättigungsüberschuss hindeutet, siehe auch Abbildung 8. Aus den Beobachtungen der Feldbegehungen kann qualitativ abgeleitet werden, dass der Infiltrationsüberschuss großflächig im gesamten Einzugsgebiet auftrat. Diese schnell entstandenen Abflussmengen sammelten sich dann in den Tiefenlinien des Geländes und flossen dem Gerinnenetz, insbesondere dem Orlacher Bach, zu.

Eine zentrale Frage für die Beurteilung der Abflussbedingungen stellt die Größe des Abflussbeiwertes dar. Bei den hier gefallen Niederschlägen (100 bis 140 mm in weniger als zwei Stunden) nehmen wir als erste Schätzung ein Rückhaltevermögen der Einzugsgebietsfläche (kurzfristige Speicherung im Boden bei mittlerer Vorbodenfeuchte, in Oberflächenmulden und auf der Vegetationsfläche) von ca. 30 mm an. Daraus folgt ein Abflussbeiwert  $\psi$  von etwa 75 % [ $\psi = (120 \text{ mm} - 30 \text{ mm}) / 120 \text{ mm}$ ], was auch in etwa dem Wert entspricht, der sich aus dem SCS-Curve-Number-Verfahren für Niederschläge solcher Größenordnung errechnen lässt. Der dortige Boden wird dabei dem „Bodentyp C“ des SCS-Verfahrens zugeordnet, die Landbedeckung als „gemischt aus Grünland, Acker und Wald“ angenommen (vgl. Maniak, 2016).

**4.2 Abflussanalyse**

→ aus Schätzungen des Fließquerschnittes und der Fließgeschwindigkeit

Bei der Feldbegehung am 3. und 4. Juni, also fünf Tage nach dem Hochwasserereignis, wurden folgende Größen erhoben:

- Maximalwasserstände aus Angaben von Anwohnern, Geschwemmsellinien und anderen Markern im Gelände
- Fließquerschnitte des „Gerinnes“ im Ort während des Hochwasserablaufs (unter Nutzung der genannten Wasserstände) und
- Fließgeschwindigkeiten (aus Angaben von Bewohnern und Schätzungen aus Videoanalysen).

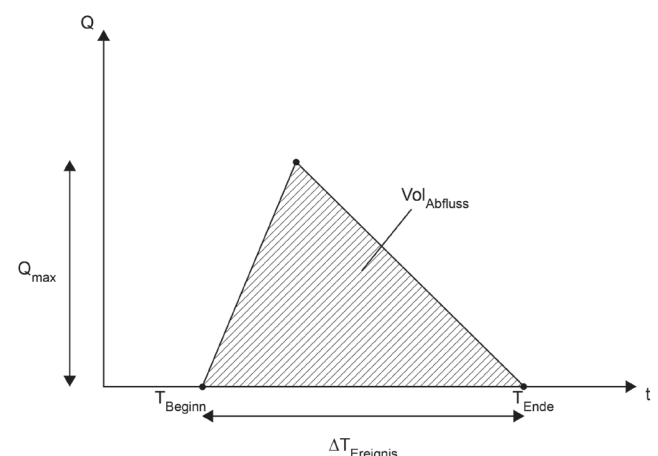
Daraus wurde durch einen probabilistischen Ansatz für die Fließgeschwindigkeit eine Wahrscheinlichkeitsverteilung des Maximalabflusses ermittelt, die im Ergebnis „wahrscheinliche maximale Durchflüsse“ des Orlacher Baches in Braunsbach von  $100 \text{ m}^3/\text{s} \pm 50 \text{ m}^3/\text{s}$  ergab. Näheres zu dieser Methode ist in TFFF (2016) enthalten.

An einer Stelle im Oberlauf in relativ flachem Gelände, deutlich vor Beginn des tief eingeschnittenen Tales des Orlacher Baches, wurde mit ähnlichen Methoden ein Wert zwischen 6 und 12  $\text{m}^3/\text{s}$  geschätzt. Bis zu dieser Stelle (siehe Abb. 1) beträgt das lokale Einzugsgebiet etwa 20 % des Gesamtgebietes. Dies würde bedeuten, dass die zu diesem Bereich gehörende Abflusspende um mindestens 50 % geringer ausfiel als im Rest des Gebietes. Andererseits ist diese Schätzung der Abflüsse im Oberlauf aufgrund der unklaren Geschwemmsellinie und unbekannter Fließgeschwindigkeit mit besonders hoher Unsicherheit behaftet.

→ aus Schätzungen der Abflusspende, Ereignisdauer und des Ereignisverlaufs

Der Wert des Abflusses am Gebietsauslass lässt sich durch eine vergleichende Abschätzung der Volumina des Abflusses am Gebietsauslass  $\text{Vol}_{\text{Abfluss}}$  und des Effektivniederschlags  $\text{Vol}_{\text{Neff}}$  über dem Gebiet plausibilisieren.

- Für die Schätzung des Abflusses am Gebietsauslass werden dafür folgende Annahmen zugrunde gelegt: Die Abflussganglinie sei dreiecksförmig und deren Dauer sei 2 Stunden (von ca. 20:00 bis 22:00 Uhr Ortszeit) siehe Abb. 9:



**Abbildung 9**

Annahmen über die Parameter der Ganglinie am Gebietsauslass zur Schätzung des Abflussvolumens.  
*Hydrograph parameter assumptions at the catchment outlet for estimation of the runoff volume.*



Mit der Vorgabe der Ereignisdauer und der Ganglinienform kann das Abflussvolumen als alleinige Funktion des Spitzenabflusses  $Q_{max}$  geschätzt werden:

$$Vol_{Abfluss} = \frac{1}{2} Q_{max} * \Delta T_{Ereignis}$$

- Für die Schätzung des Volumens des Effektivniederschlags  $Vol_{Neff}$  werden folgende Annahmen zugrunde gelegt: Größe des Einzugsgebietes  $A_E$ : 6 km<sup>2</sup>; Abflussbeiwert  $\psi$ : 75 %; mit diesen Annahmen berechnet sich das Volumen des Effektivniederschlags als alleinige Funktion des Freilandniederschlags  $N_{ges}$  über dem Gebiet:

$$Vol_{Neff} = N_{ges} * A_E * \psi$$

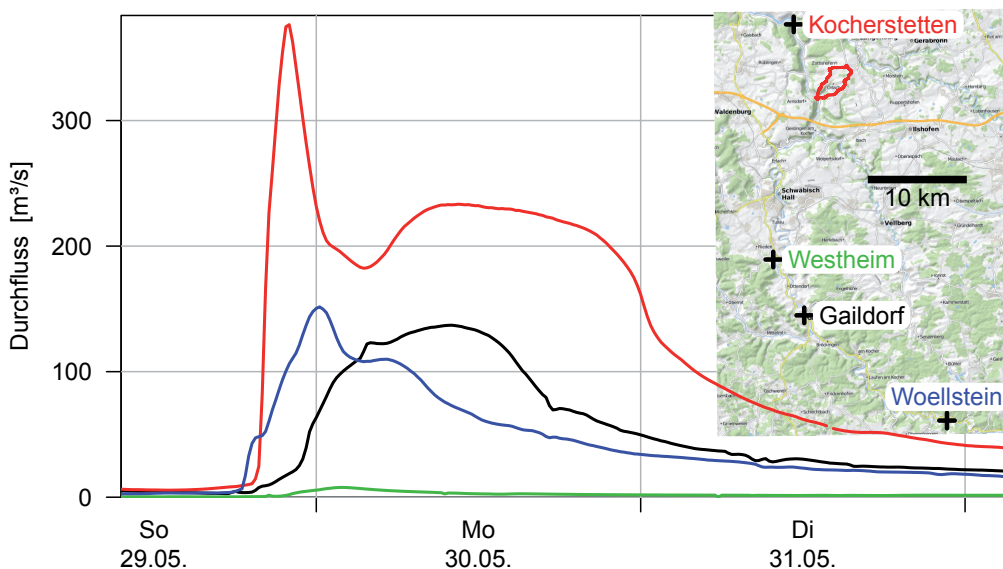
Die so mit unterschiedlichen Annahmen ermittelten Volumina sind in der nachfolgenden Tabelle dargestellt.

<b>Tabelle 1</b> Ermittelte Abflussvolumina aus plausiblen Annahmen zu Spitzendurchfluss und Gebietsniederschlag. <i>Runoff volumes, determined using plausible Assumptions of peak flow and areal precipitation.</i>	
<b>Angenommener Maximalwert des Durchflusses</b>	<b>berechnetes Abflussvolumen <math>Vol_{Abfluss}</math></b>
$Q_{max} = 50 \text{ m}^3/\text{s}$	180 000 m <sup>3</sup>
$Q_{max} = 100 \text{ m}^3/\text{s}$	360 000 m <sup>3</sup>
$Q_{max} = 150 \text{ m}^3/\text{s}$	540 000 m <sup>3</sup>
<b>Angenommener Wert des Gebietsniederschlags</b>	<b>berechnetes Volumen des Effektivniederschlags <math>Vol_{Neff}</math></b>
$N_{ges} = 80 \text{ mm}$	360 000 m <sup>3</sup>
$N_{ges} = 100 \text{ mm}$	450 000 m <sup>3</sup>
$N_{ges} = 120 \text{ mm}$	540 000 m <sup>3</sup>

Geht man von einem Gebietsniederschlag von 100 mm aus (siehe Kap. 3.3), dann entspräche das unter den zugrunde gelegten Annahmen einem Volumen des Effektivniederschlags von 450.000 m<sup>3</sup>. Setzt man diesen Wert dann für das Abflussvolumen an, ergibt sich letztlich ein Spitzenabflusswert von 125 m<sup>3</sup>/s.

→ aus Analysen der Abflussganglinien des Kochers, ober- und unterhalb der Einmündung des Orlacher Baches

In Abbildung 10 ist die Abflussganglinie für die Pegelstation Kocherstetten am Fluss Kocher zu sehen, welche ca. 8,5 km flussabwärts von Braunsbach bzw. der Einmündung des Orlacher Baches in den Kocher liegt. Bereits um 20:00 Uhr Ortszeit ist ein klarer Anstieg der Ganglinie zu erkennen, der schon nach 2 Stunden einen maximalen Abflusswert von 376 m<sup>3</sup>/s aufweist. Vergleicht man die Abflussganglinie am Pegel Kocherstetten mit denen an den Pegeln Gaildorf und Wöllstein, welche jeweils ca. 30 km bzw. 50 km flussaufwärts der Einmündung des Orlacher Baches in den Kocher liegen, wird klar, dass fast die gesamte erste Spitze des Kocherhochwassers – also über 300 m<sup>3</sup>/s – durch das Sturzflutereignis aus dem Teileinzugsgebiet des Kochers zwischen diesen Pegeln verursacht wurde. Zur Frage der genaueren örtlichen Lokalisation des Ursprungs dieser extremen ersten Abflusspitze hilft ein Blick auf die Ganglinie des kleinen Kocher-Zuflusses „Bibers“, Pegel Westheim (siehe Abb. 10). Aus diesem, ca. 25 km südlich von Braunsbach und 8 km nördlich/flussabwärts des Kocherpegels Gaildorf gelegenen und 62 km<sup>2</sup> großem Gebiet, ergab sich ein Spitzenabfluss von nur ca. 10 m<sup>3</sup>/s in den Kocher, was einer Jährlichkeit für den „Bibers“ von ca. 1 Jahr entspricht. Damit ist klar, dass der zuvor berichtete Abflusspeak von ca. 300 m<sup>3</sup>/s nicht aus diesem Bereich des Teilgebietes stammte. Er muss also weiter nördlich/Kocher-abwärts entstanden sein, d. h. im Bereich des Einzugsgebietes des Orlacher Baches und den direkt benachbarten Gebieten. Etwa ein Drittel dieser Abflussrate des Kochers entstammt aus dem Orlacher Bach.



**Abbildung 10**  
Abflussganglinien des Kochers an den Pegelstationen Kocherstetten (ca. 8,5 km flussabwärts von der Einmündung des Orlacher Baches) sowie Wöllstein und Gaildorf (30 km bzw. 50 km flussaufwärts der Einmündung). Zudem ist die Ganglinie des kleinen Kocherzuflusses „Bibers“, Pegel Westheim, gezeigt.  
*Observed hydrographs for the river Kocher at gauging stations Kocherstetten (approx. 8.5 km downstream of the Orlacher stream confluence), Wöllstein and Gaildorf (30 km and 50 km upstream of the Orlacher stream confluence). In addition the hydrograph of the small Kocher-tributary „Bibers“ is shown (gauging station Westheim).*

Der ca. 1,5 km südlich/stromaufwärts von Braunsbach in den Kocher mündende Grimm bach (Einzugsgebietsfläche ca. 22 km<sup>2</sup>), führte zur gleichen Zeit wie der Orlacher Bach ebenfalls sehr hohe Abflüsse. Da weder im Tal des Grimm baches noch an der Mündung dieses Baches nennenswerte Siedlungen liegen, wurden hier kaum Schäden an Gebäuden u. ä. verursacht. Gleichwohl gibt es auch hier Nachweise von extremen Abflüssen, besonders die sehr hohen Mengen an Schwemmholz, die vom Grimm bach während des Ereignisses mobilisiert und abtransportiert wurden und dann teilweise noch vor der Mündung in den Kocher abgelagert wurden (s. Abb. 11).

Ein weiterer Hinweis, dass die erste Abflusspitze im

**Abbildung 11**

Ablagerungen von Schwemmh Holz am Unterlauf des Grimmbachs kurz vor dessen Mündung in den Kocher (Bildquelle: Ana Lucia Vela, Univ. Tübingen).  
*Large wooden debris at the lower Grimmbach Creek, just before the Kocher confluence (Image Source: Ana Lucia Vela, Univ. Tübingen).*

Kocher von über  $300 \text{ m}^3/\text{s}$  aus dem Gebiet des Orlacher Baches und direkt angrenzenden Einzugsgebieten stammte, ist der Zeitpunkt der Abflussspitze am Pegel Kocherstetten. Diese wurde um 22:00 Uhr Ortszeit verzeichnet. Die ersten Videos aus Braunsbach wurden im Internet um 20:30 Uhr Ortszeit (18:30 UTC) hochgeladen. Die Entfernung von der Einmündung des Orlacher Baches in den Kocher zum Pegel Kocherstetten beträgt etwa 9,5 km. Bei einer Fließgeschwindigkeit der Hochwasserspitze im Kocher von etwa 2 m/s bis 3 m/s errechnen sich Fließzeiten für diese Strecke zwischen ca. 55 und 80 Minuten, was sehr gut zu dem zeitlich Versatz von ca. 1 Stunde passt.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die drei unabhängig voneinander durchgeführten Methoden (Schätzungen der Durchflüsse aufgrund von Abflussmarken; Schätzungen zu Abflussspende und -verlauf; Vergleich der Abflussraten im Kocher an Pegeln ober- und unterhalb der Einmündung des Orlacher Baches) zu sehr ähnlichen Ergebnissen kommen. Es ergeben sich Spitzenabflusswerte im Bereich von  $100 \text{ m}^3/\text{s}$ , vermutlich sogar darüber, bis  $150 \text{ m}^3/\text{s}$ . Wenn man bedenkt, dass laut Aussage der örtlichen Fachleute das Mittelwasser des Baches unter  $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$  liegt, dann waren die Spitzenabflussraten während der Sturzflut mindestens 500 bis 800 mal größer. Diese sehr hohen Unterschiede belegen sowohl den ausgesprochenen Sturzflutcharakter des Ereignisses als auch dessen extreme Ausprägung. Es ist offensichtlich, dass – in Ermangelung direkter Abflussmessungen während des Ereignisses – die hier präsentierte Analyse zu den Abflussraten mit erheblichen Unsicherheiten behaftet ist. Durch die unabhängig voneinander durchgeführten Ansätze und Verfahren lassen sich die Unsicherheiten aber eingrenzen und die ermittelte Spanne der Spitzenabflüsse kann als plausibler und quantitativ belegbarer Wertebereich gelten.

## 5 Aspekte anthropogener Eingriffe in Umwelt und Klima

Bei solch starken Hochwasserereignissen mit verheerenden Schäden kommt naturgemäß die Frage auf, inwieweit Eingriffe des Menschen in die Umwelt oder das Klimasystem (mit)verantwortlich sind. Solche Fragen lassen sich seriös nicht eindeutig beantworten. Einerseits ist klar, dass Änderungen im Klimasystem, und/oder der Landoberfläche und/oder am Gewässer eine Auswirkung auf den Wasserkreislauf haben und somit auch auf dessen Extreme, also auch auf Hochwasserereignisse. Die Frage ist aber nicht in erster Linie, ob menschliche Eingriffe Auswirkungen haben, sondern wie groß deren Auswirkungen sind, besonders im Vergleich zu Hochwasserereignissen ohne menschliche Einwirkungen. Solche Untersuchungen lassen sich nicht experimentell im Einzugsgebietsmaßstab durchführen, sondern bestenfalls

nur durch adäquate Simulationsexperimente. Die in Braunsbach stattgefundenen meteorologischen, hydrologischen, hydraulischen und geomorphologischen Prozesse lassen sich aber in ihrer Gesamtheit kaum so modellieren, dass eine Aussageschärfe ableitbar wäre, die eine quantitative und konkrete Beurteilung erlauben würde, welche Maßnahmen des Menschen letztlich welche Wirkungen verursachten. Besonders die geomorphologischen Prozesse wie Hangrutschungen, Entwurzelungen und Gerölltransport sind nicht adäquat modellierbar (Vogel et al., 2017). Gleichwohl wird nachfolgend zu drei wichtigen anthropogenen Effekten qualitativ Stellung bezogen.

### 5.1 Aspekte des Klimawandels

Bezüglich des Auftretens eines Sturzflutereignisses wie im Einzugsgebiet von Braunsbach ist im Zusammenhang mit dem Klimawandel von zentraler Bedeutung, ob durch die Erwärmung der Atmosphäre die Intensität von kurzen Starkregenereignissen zunimmt bzw. ob die Auftretenshäufigkeit von hochintensiven Starkregen zunimmt. D. h., es ist nicht die Frage, ob insgesamt mehr Niederschlag fällt, sondern ob die Niederschlagsereignisse mit hochintensiven Starkregen zunehmen. Dafür sind Analysen der Niederschläge in kurzen Zeitabschnitten, d. h. von Zeitschritten unter einer Stunde, bis zu wenigen Minuten, notwendig. Analysen von Tageswerten – wie in den vergangenen Jahren und Jahrzehnten in Klimaänderungsstudien meist geschehen – helfen hier nicht weiter.

Da für das Einzugsgebiet direkt bzw. für die Stationen in der Nähe des Gebietes keine Regendaten von ausreichender Dauer und in genügend hoher zeitlicher Auflösung vorliegen, sei hier auf die detaillierte Studie von Müller und Pfister (2011) verwiesen, die eine Analyse langer Niederschlagszeitreihen für acht Stationen im Emscher-Lippe Gebiet in Nordrhein-Westfalen in einer außergewöhnlich hohen zeitlichen Auflösung (1 min) für 70 Jahre (1940er-Jahre bis 2009) durchführten. Ereignisse über einem Schwellenwert der Niederschlagsintensität von  $0,3 \text{ mm}/\text{min}$  beziehungsweise  $> 20 \text{ mm}/\text{Std}$  wurden hinsichtlich Trends und Änderungen statistisch untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass für alle untersuchten Stationen die Anzahl dieser kurzandauernden Niederschlagsereignisse mit starken Intensitäten in den letzten Jahrzehnten zugenommen hat. Diese Trends haben sich in den letzten 35 Jahren noch ausgeprägter gezeigt als in der Zeit davor. Die Trendzunahme war besonders in den Sommermonaten von Juli bis September stark ausgeprägt. Diese hochintensiven Starkregen treten an diesen Stationen zwischen vier- und 15-mal im Jahr auf. Die von Müller und Pfister festgestellte Zunahme von bis zu 0,5 Ereignissen pro Jahr würde also eine Vervielfachung der Häufigkeit dieser Ereignisse in nur wenigen Jahrzehnten bedeuten. Diese Studie belegte zum ersten Mal

quantitativ, dass sich das Auftreten solcher hochintensiven Regenerereignisse zumindest an diesen Stationen deutlich verstärkt hat. Pfister (2016) empfiehlt daher auch Anpassungen der relevanten Bemessungs- und Bewirtschaftungsregeln.

Ein anderer Ansatz ist die Untersuchung der Abhängigkeit extremer Niederschlagsintensitäten von der Lufttemperatur während dieses Ereignisses. Bürger et al. (2014) zeigten anhand der Analyse von hochaufgelösten Niederschlagsdaten für Gebiete in Österreich, der Schweiz und in Nordrhein-Westfalen, sowie Boessenkool et al. (2016) für Stationen in ganz Deutschland, dass der Zusammenhang zwischen extremen lokalen Niederschlägen und der Lufttemperatur stark ausgeprägt und statistisch signifikant ist. Dies lässt sich physikalisch auch recht einleuchtend mit der Zunahme des Sättigungsdampfdrucks mit der Temperatur gemäß der Clausius-Clapeyron Beziehung (etwa 7 %/°C) erklären. Somit liegt zumindest nahe, dass Starkregenereignisse kurzer Dauer durch eine erwärmte Atmosphäre sowohl häufiger, als auch intensiver werden können.

### 5.2 Aspekte der Landnutzung

Die Landoberfläche weiter Teile Mitteleuropas hat in den vergangenen Jahrzehnten und Jahrhunderten bedeutende Änderungen erfahren, was einerseits die Besiedlung/Urbanisierung betrifft und andererseits die landwirtschaftliche Nutzung und Bewirtschaftung. Folgende Frage hat dabei in Bezug zum Ereignis in Braunsbach besondere Bedeutung: Wie stark ist der Einfluss von Landnutzungsänderungen auf die Bildung von Oberflächenabfluss infolge von Starkregenereignissen? Die Möglichkeit der Verschlammung der Bodenoberfläche ist bei Ackerbewirtschaftung dann von besonderer Relevanz, wenn die Vegetationsbedeckung noch gering ist, wie beim Beginn der Wachstumsphase, und der Boden lehmig und evtl. durch Bodenbearbeitung schon vorverdichtet ist. Unter solchen Bedingungen, wie es etwa bei Maiskulturen in der Jungentwicklungsphase der Fall ist, wirken hohe Niederschlagsintensitäten verschlammend, d. h. verstopfend für die Grobporen und auch für die Feinporen des Oberbodens, was die Infiltrationskapazität der Bodenoberfläche bedeutend herabsetzt und damit die Entstehung von Oberflächenabfluss verstärken kann (siehe die in Abb. 8 gezeigte Situation).

Niehoff (2002) und Bronstert et al. (2002) stellten zu diesen Fragen eine Simulationsstudie vor, in der gezeigt wurde, dass der Einfluss einer geänderten Landnutzung auf die Hochwasserentstehung in kleinen Einzugsgebieten ( $A_E < \text{ca. } 100 \text{ bis } 1000 \text{ km}^2$ ) für konvektive Ereignisse mit hohen Niederschlagsintensitäten wesentlich größer (in der Abflussspitze bis zu ca. 20 % Erhöhung des Abflusses) als für langanhaltende advektive Niederschlagsereignisse mit meist deutlich geringeren Niederschlagsintensitäten ist. Zudem wurde gezeigt, dass eine Verschlammung der Bodenoberfläche während hochintensiver Niederschläge stark auf die lokale Hochwasserentstehung wirkt. Die oben genannten Ergebnisse bezogen sich auf relativ häufige bis mittel-häufige Starkregen (Wiederkehrintervalle von ca. 1 bis 10 Jahren). In einer umfassenden europäischen Studie haben Salazar et al. (2012) gezeigt, dass der prozentuale Rückhalteanteil des Bodens eine Funktion der Niederschlagsmenge ist. Für häufige bis mittel-häufige Ereignisse kann dieser Rückhalt eine wichtige Rolle spielen, für sehr starke (also seltene) Ereignisse ist dessen relative Bedeutung aber eher klein. Somit sind vermutlich für extreme Niederschlagsereignisse auch Verschlammungsprozesse von geringerer relativer Bedeutung für die Bildung des Hochwasserabflusses im betroffenen Gebiet.

### 5.3 Aspekte des Gewässerbaus

Baumaßnahmen am Fließgewässer beeinflussen in erster Linie die Fließgeschwindigkeit, aber nicht die insgesamt abfließende Wassermenge. Im Falle der Anlage künstlicher Fließstrecken (Entlastungskanäle etc.) wird natürlich auch die Durchflussrate im ursprünglichen Gewässer reduziert.

Bei Baumaßnahmen zur Reduktion von Hochwasserabflüssen handelt es sich meist um die Anlage von Rückhaltebecken oder um Entlastungskanäle. Solche Baumaßnahmen sind also explizit zur Kappung von Spitzenabflüssen geplant. Im Fall von Braunsbach waren solche Maßnahmen bislang nicht erfolgt. Es ist auch fraglich, ob unter den örtlichen Bedingungen solche Maßnahmen überhaupt durchführbar und bezahlbar wären. Hinzu kommen zwei weitere Aspekte, die oft übersehen werden: a) Die Wirkung einer jeden Baumaßnahme ist per definitionem durch ihre Bemessung begrenzt, und damit auch ihre „Schutzwirkung“ vor Hochwasserabflüssen. Es bleibt ein Restrisiko, welches vor allem bei Extremereignissen eintritt, falls die bei der Bemessung angenommenen Werte übertroffen werden; b) Baumaßnahmen können auch versagen, d. h. ein Rückhaltebecken oder ein Deich kann z. B. auch brechen. In Siedlungsgebieten sind die dadurch entstehenden Schäden dann oft noch verheerender, da sie unvorhersehbar und sehr plötzlich auftreten.

Baumaßnahmen können unbeabsichtigt auch Engstellen bewirken und dadurch die Abflusskapazität des Gewässers an dieser Stelle begrenzen. Solche Effekte können vor allem in Verbindung mit geomorphologischen Prozessen (starker Geschiebe- oder Schwemmholztransport) zu örtlichen Verklausungen (Blockierungen) des Gewässers führen. Der Hochwasserabfluss im Gewässer sucht sich dann entweder eine alternative Abflussmöglichkeit, etwa durch die Straßen, oder der Rückstau oberstrom der Verklausung wird zum Bruch dieses Hindernisses führen, mit einer nachfolgenden, oft sehr gefährlichen Schwallwelle im Gerinne. Solche baulichen Engstellen sind oft Brücken, die nicht den gesamten Gewässerquerschnitt überspannen oder auch Durchlässe unter Straßen- oder Bahndämmen. Auch Verdolungen können den maximalen Durchfluss limitieren, so auch in Braunsbach. Die Beurteilung der möglichen Wirkungen solcher Engstellen ist wichtig, denn die Analysen vieler durch Sturzfluten hervorgerufenen, i. d. R. überraschenden Schadensereignisse haben gezeigt, dass Verklausungen oft eine wesentlich Ursache der lokalen schweren Überschwemmung waren, so etwa die Verklausung des Saltina-Flusses mit nachfolgender Überschwemmung der Innenstadt von Brig im Wallis, Schweiz im September 1993 (BAFU, 1993) oder die Verklausung der Weißeritz im Stadtgebiet von Dresden mit nachfolgender Überschwemmung des Hauptbahnhofes im August 2002 (Kinze, 2002). Ohne einer genauen Analyse der Abflusskapazität des Orlicher Baches im Ortsbereich vorgehen zu wollen, soll hier aber als erster Eindruck festgestellt werden, dass auch ein unverdolteter Bach in Braunsbach die aus dem oberliegenden Einzugsgebiet ankommenden Extremabflüsse kaum hätte abführen können und somit die Überschwemmung des Ortes auch bei einem unverdolteten Bach eingetreten wäre (TFFF, 2016).

## 6 Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse der hier dokumentierten Analyse der meteorologischen und hydrologischen Extrembedingungen am 29. Mai 2016 zeigen, dass der Ansatz der „forensischen Ereignisanalyse“



für solche Ereignisse ein adäquates Verfahren zur Rekonstruktion der abgelaufenen Prozesse und deren retrospektiven Quantifizierung darstellt. Tatsächlich wird in einer solchen Vorgehensweise die einzige Möglichkeit gesehen, Sturzfluten solcher Art zu analysieren, da es aufgrund der Kleinräumigkeit und sehr kurzen Entstehungszeit keine Möglichkeit gibt, Messungen vor Ort vor dem Ereignis zu planen, Instrumente zu installieren oder zumindest während des Ereignisses Messungen durchzuführen.

Das Extremereignis in diesem kleinen Einzugsgebiet macht erneut klar, dass Sturzflutereignisse i. d. R. eine komplexe Genese aufweisen und viele verschiedene Faktoren eine wichtige Rolle spielen. Daher ist für die Analyse eine interdisziplinäre Herangehensweise unabdingbar. Die besonderen Merkmale des hier untersuchten Ereignisses sind:

- die Lokation der Gewitterzelle direkt über dem Einzugsgebiet des Orbacher Baches,
- die sehr hohen Niederschlagsintensitäten über einen Zeitraum von weniger als zwei Stunden (Wiederkehrintervall deutlich > 100 Jahre),
- die hohe und schnelle Abflussbildung im Gebiet,
- die Mobilisierung von Sediment im Gebiet und von sehr viel grobem Geröll (Durchmesser von Einzelblöcken > 1 m) und Schwemmholz im Kerbtal des Orbacher Baches und benachbarten Tälern durch die Extremabflüsse sowie
- das Ausbrechen des Baches aus dem Bachbett samt Sediment, Geschiebefracht und Schwemmholz kurz oberhalb des Ortes und die dadurch bedingte
- Geschiebeverfrachtung und Wassermassen gegen die Häuser im Ort, welche letztlich die außergewöhnlich hohen Schäden verursachten.

Diese sind einerseits spezifische Charakteristika dieses Ereignisses, aber andererseits auch gerade typische, generelle Merkmale von Sturzfluten. Bei solch komplexen und vielschichtigen Ereignissen mit interagierenden Prozessen ist es nicht möglich, eine Einzelursache zu benennen. Erst das Zusammenspiel der verschiedenen Prozesse hat das Ereignis in dieser Form bewirkt. Auch die Frage nach anthropogenen Wirkungen lassen sich nicht ohne eine Gesamtschau aller Einflussfaktoren erörtern. Eine singuläre Ursachenbenennung oder gar „Schuldzuweisung“ ist wissenschaftlich unseriös und irreführend. Gleichzeitig ist auch klar, dass anthropogenes Handeln und Maßnahmen Auswirkungen auf die Entstehung, Häufigkeit und den Ablauf von Hochwasserereignissen haben. Änderungen in der Umwelt, wie Klimaänderungen, bestimmte Landnutzungen oder Flussbaumaßnahmen haben auch das Ereignis in Braunsbach beeinflusst. Für sehr starke Niederschläge ist die relative Bedeutung der Landnutzung aber eher klein. Die wissenschaftliche Herausforderung liegt generell darin, das Ausmaß der genannten anthropogenen Effekte zu quantifizieren und im Vergleich zu Hochwasserereignissen ohne menschliche Einwirkungen zu stellen.

Zur Vorsorge vor solchen Sturzfluten sind die Handlungsoptionen des Menschen begrenzt. Ein vollständiger „Schutz“ vor solchen Ereignissen im Sinne einer Verhinderung ist nicht möglich. Es bleibt ein Restrisiko, wie bei allen Natur- und Technikgefahren. Gleichwohl muss es das Ziel sein, mit solchen Ereignissen in der mittleren Zukunft besser umgehen zu können.

Unter Vorsorgemaßnahmen in diesem Sinne sind zu verstehen:

Eine *Verbesserung der Vorhersage kurzzeitiger Extremniederschlägen und den daraus resultierenden Sturzfluten*. Generell ist es aufgrund der Kleinräumigkeit und Kurzfristigkeit viel schwieriger, Sturzfluten zu prognostizieren als Hochwasser und Überschwemmungen an großen Flüssen. Künftige Anstrengungen zur Prognoseverbesserung sollten hier u. a. in den Aufbau von operationellen Systemen zur Nutzung von Radarinformationen in Kombination mit Bodenmessungen in Echtzeit gehen und zur Nutzung dieser Informationen zur Kurzfristprognose („near real time forecasting“) von Gewitterereignissen mit angeschlossener hydrologischer Vorhersage. Solche Systeme sind z. T. in den USA und in manchen Gebieten der Mittelmeerländer bereits in Erprobung.

*Maßnahmen am Gewässer und im Einzugsgebiet zur Verhinderung von Engstellen bei Hochwasserabflüssen*. Hierzu gehört auch die Prüfung von existierenden Brücken, Straßendurchlässen und anderen Maßnahmen an den Flüssen bzgl. deren Kapazität Extremabflüsse abführen zu können. Auch fluvial-geomorphologische Beurteilungen der Stabilität des Gewässerbettes und der angrenzenden Hänge können wichtig sein (s. Vogel et al., 2017 in diesem Heft). Hierzu bestehen ausgewiesene praktische Erfahrungen bei den mit Wildbachfragen betrauten Verwaltungen in Gebirgsregionen.

Das innovative Ausbildungskonzept der „Task-Force-Einsätze“ zur interdisziplinären und kurzfristigen Erkundung von Naturereignissen hat sich in diesem Fall sehr bewährt. Die insgesamt vier mehrtägigen vor-Ort-Erhebungen, die von Promovierenden des DFG Graduiertenkollegs NatRiskChange durchgeführt wurden und die nachfolgenden Datenanalysen und -interpretationen erzielten das erhoffte Ergebnis einer weitreichenden Erklärung der Ursachen und Mechanismen dieses starken Naturereignisses und der Quantifizierung der Prozesse und Konsequenzen. Neben der relativ schnellen Aufarbeitung der Geschehnisse ist diese Form der Analyse von Naturereignissen auch eine gute Gelegenheit, eine Brücke zwischen Wissenschaft und sowohl der von solchen Ereignissen betroffenen Bevölkerung als auch den mit dem Risikomanagement betrauten Behörden zu schaffen. Zudem hat sich die Analyse für die beteiligten jungen Wissenschaftler als sehr förderlich für die Motivation und das selbstständige Arbeiten erwiesen. Die positiven Erfahrungen, welche andernorts mit ähnlichen Initiativen gemacht wurden, etwa bei Kunz et al. (2013), wurden durch diese Studie demnach vollumfänglich bestätigt.

## Conclusions

The results of the analysis of the meteorological and hydrological extreme conditions on May 29, 2016, show that forensic event analysis is an adequate approach to reconstruction of the governing processes and their retrospective quantification. Such an approach seems to be the only option for the analysis of such extreme flash floods, because there is no possibility to plan measurement campaigns in advance, install equipment or even to conduct measurements during the course of the event, due to the typically local scale and very short response time.

This extreme event in a small catchment (6 km<sup>2</sup>) exemplifies once again that flash flood events are generated by complex and cascading processes in which many factors play an important role. Therefore, an interdisciplinary approach is indispensable. The specific characteristics of this particular event are:

- The localization of the convective cell directly above the catchment of the Orlacher Creek;
- The very high rainfall intensities over a duration of less than 2 hours (return interval over 100 years);
- The high and very fast runoff generation in the catchment;
- Mobilization of sediment in the catchments, including coarse and stony debris (with boulders extending 1 m diameter) and woody debris in the V-shaped valley of the Orlacher Creek;
- Overflow of the banks and outbreak of the creek's course just above the village, containing stony debris and woody debris;
- Discharge of water and sediments through the streets of the village, causing extraordinarily severe damages.

It is impossible to identify a single cause for such complex events. Only the intertwining of different processes can result in such an extreme event type. Effects of anthropogenic impacts must be analyzed in the context of the most important driving forces for such an event. The designation of a single cause is not scientifically justifiable and can even be misleading. At the same time it is clear that anthropogenic activities do have an impact on the generation, frequency and course of flooding events, including flash floods. Environmental changes, such as climate change, land-use change and river constructions definitely did influence the Braunsbach flash flood. For very strong rainfall events however, the effects land-use are comparatively small. The challenge facing science, then, is to quantify the anthropogenic impacts and to compare these with the natural conditions.

Precautionary measures available to society to reduce the harm of such flash floods are limited. Full protection is not possible, at any rate. A residual risk will always be present, as in all cases of technical or natural hazardous events. Nonetheless the goal remains to systematically and practically better deal with such events. Measures to reach this goal include:

- Improved forecasting of short-time extreme rainfall events and subsequent flash flooding. This includes a combination and optimized data analysis of numerical weather forecasting, now-casting of radar rainfall data and hydrological modelling of extreme events.
- Reviewing of river construction and river training measures in order to prevent or at least mitigate narrow sections and bottleneck effects in the river course.

The innovative approach of task force exercises to study such natural events in a short-term and interdisciplinary manner has proven to be adequate for such event types. In addition to the quick analysis of the occurrence, such an approach also provides a nice opportunity to build a bridge between science and the hazard-prone population and the authorities dealing with risk management. Last but not least, it has been shown to be a very suitable approach to support independent and creative work of young scientists and to reach long-lasting motivation.

#### Danksagungen

Wir danken den Bürgern und Bürgerinnen sowie dem Bürgermeister der Gemeinde Braunsbach für die Unterstützung der Vor-Ort-Erhebungen. Wir waren außerordentlich beeindruckt von dem Willen und den gemeinsamen Anstrengungen der Bürger, die

entstandenen Schäden zumindest teilweise zu beheben und auch sonstige Folgen zu mindern. Wir danken der Hochwasservorhersagezentrale Baden-Württemberg (HVZ) am LUBW in Karlsruhe für die Unterstützung und die Bereitstellung von Niederschlags- und Abflussdaten. Weitere Niederschlagsdaten erhielten wir online vom Deutschen Wetterdienst (DWD). Wir danken zudem Frau Dr. Ana Lucia Vela, Universität Tübingen, für die fruchtbaren fachliche Diskussionen und das Überlassen von Fotografien. 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

Prof. Dr. Axel Bronstert  
 Berry Boessenkool M.Sc.  
 Dr. Maik Heistermann  
 Lisei Köh-Reich M.Sc.  
 Lehrstuhl Hydrologie und Klimatologie,  
 Institut für Erd- und Umweltwissenschaften  
 Karl-Liebknecht-Str. 24-25  
 14476 Potsdam-Golm  
 axelbron@uni-potsdam.de  
 boessenk@uni-potsdam.de  
 heisterm@uni-potsdam.de  
 lkoehn@uni-potsdam.de

Madlen Fischer M.Sc.Met.  
 Thomas Moran M.Sc.  
 Institut für Meteorologie  
 Freie Universität Berlin  
 Carl-Heinrich-Becker-Weg 6-10  
 12165 Berlin  
 madlen.fischer@met.fu-berlin.de  
 thomas.moran@met.fu-berlin.de

Dadiyorto Wendi M.Sc.  
 Lehrstuhl Hydrologie und Klimatologie,  
 Institut für Erd- und Umweltwissenschaften  
 Karl-Liebknecht-Str. 24-25  
 14476 Potsdam-Golm  
 wendi@uni-potsdam.de  
 Sektion Hydrologie  
 Helmholtz-Zentrum Potsdam  
 Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ  
 Telegrafenberg  
 14473 Potsdam

Ankit Agarwal M.Sc.  
 Lehrstuhl Hydrologie und Klimatologie,  
 Institut für Erd- und Umweltwissenschaften  
 Karl-Liebknecht-Str. 24-25  
 14476 Potsdam-Golm  
 agarwal@uni-potsdam.de  
 Research Domain transdisziplinäre Konzepte und Methoden  
 Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK)  
 Telegraphenberg A 31  
 14473 Potsdam  
 Agarwal@pik-potsdam.de

## 7 Literaturangaben

- BISSOLLI, P. & DITTMANN, E. (2001): The objective weather type classification of the German Weather Service and its possibilities of application to environmental and meteorological investigations. – *Meteorologische Zeitschrift* 10(4), 253–260.
- BOESSENKOOL, B., BÜRGER, G. & HEISTERMANN, M. (2016): Effects of sample size on estimation of rainfall extremes at high temperatures. – *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss.*, DOI:10.5194/nhess-2016-183, (in review)
- BORGA, M., ANAGNOSTOU, E. N., BLÖSCHL, G., & CREUTIN, J. D. (2011): Flash flood forecasting, warning and risk management: the HYDRATE project. – *Environmental Science & Policy* 14(7), 834–844.
- BORGA, M., STOFFEL, M., MARCHI, L., MARRA, F. & JAKOB, M. (2014): Hydrogeomorphic response to extreme rainfall in headwater systems: Flash floods and debris flows. – *Journal of Hydrology*, 518, 194–205.
- BRONSTERT, A., NIEHOFF, D. & BÜRGER, G. (2002): Effects of climate and land-use change on storm runoff generation: present knowledge and modelling capabilities. – *Hydrological Processes* 16, 509–529.
- BUNDESAMT FÜR UMWELT, BAFU (1993): Die Hochwasser 1993 im Wallis und Tessin. Messdaten und ausgesuchte Auswertungen. – *Mitteilungen des BAFU Nr. 19. Landeshydrologie und -geologie der Schweiz*, Bern, 1993, 65 Seiten.
- BÜRGER, G., HEISTERMANN, M. & BRONSTERT, A. (2014): Towards Sub-daily Rainfall Disaggregation via Clausius Clapeyron. – *Journal of Hydrometeorology* 15(3), 1303–1311.
- BURTON, I. (2010): Forensic disaster investigations in depth: a new case study model. – *Environment* 52(5), 36–41.
- DITTMANN, E. (1995): Objektive Wetterlagenklassifikation. Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes. *Berichte des Deutschen Wetterdienstes* 197, Offenbach am Main.
- FUENTES-ANDINO, D., BEVEN, K., HALLDIN, S., XU, C., REYNOLDS, J. & DI BALDASSARRE, G. (2016): Reproducing an extreme flood with uncertain post-event information. – *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, DOI:10.5194/hess-2016-496, (in review)
- HESS, P. & BREZOWSKY, H. (1977): *Katalog der Großwetterlagen Europas (1861–1976)*. Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes. 2. Auflage *Berichte des Deutschen Wetterdienstes* 113, Offenbach am Main.
- IRDR: INTEGRATED RESEARCH ON DISASTER RISK (2011): *Forensic Investigations of Disasters: The FORIN Project (IRDR FORIN Publication No. 1)*. Beijing: Integrated Research on Disaster Risk.
- JONKMAN, S. N. (2005). Global perspectives on loss of human life caused by floods. – *Natural Hazards*, 34(2), 151–175.
- JACOBI, S. & HEISTERMANN, M. (2016): Benchmarking attenuation correction procedures for six years of single-polarized C-band weather radar observations in South-West Germany. – *Geomatics, Natural Hazards and Risk* 7, 1785–1799.
- KEATING, A., VENKATESWARAN, K., SZOENYI, M., MACCLUNE, K. & MECHLER, R. (2016): From event analysis to global lessons: disaster forensics for building resilience. – *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 16, 1603–1616.
- KINZE, M. (2002): Das Augusthochwasser 2002. In: Akademie der Sächsischen Landesstiftung Natur und Umwelt (Hrsg): *Aktuelle Hochwasserereignisse und ihre Folgen*. Bericht zur wissenschaftlichen Arbeitstagung am 15. und 16. November 2002 in Dresden. 13–21.
- KUNZ, M., MÜHR, B., KUNZ-PLAPP, T., DANIELL, J., KHAZAI, B., WENZEL, F., VANNIEUWENHUYSE, M., COMES, T., ELMER, F., SCHRÖTER, K., FOHRINGER, J., MÜNZBERG, T., LUCAS, C., ZSCHAU, J. (2013): Investigation of superstorm Sandy 2012 in a multi-disciplinary approach. – *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 13, 2579–2598.
- MARCHI, L., BORGA, M., PRECISO, E., SANGATI, M., GAUME, E., BAIN, V., DELRIEU, G., BONNIFAIT, L. & POGACNIK, N. (2009): Comprehensive post-event survey of a flash flood in Western Slovenia: observation strategy and lessons learned. – *Hydrological Processes*, 23(26), 3761–3770.
- MANIAK, U. (2016): *Hydrologie und Wasserwirtschaft: Eine Einführung für Ingenieure*. 7. Auflage, Springer-Verlag, Heidelberg.
- MÜLLER, E. & PFISTER, A. (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.
- NIEHOFF, D. (2002): *Modellierung des Einflusses der Landnutzung auf die Hochwasserentstehung in der Mesoskala*. Brandenburgische Umweltberichte, 11 [Dissertation Universität Potsdam]; [publishup.uni-potsdam.de/files/345/vol11.pdf](http://publishup.uni-potsdam.de/files/345/vol11.pdf)
- PFISTER, A. (2016): *Langjährige Entwicklung von Starkregen – Handlungsempfehlungen für die Zukunft*. in: Pinnekamp, J. (2016, Hrsg): *Proceedings zur 49. Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft*, 2.-4. 3. 2016 in Essen. *Gewässerschutz, Wasser, Abwasser*, Band 239, 14 Seiten.
- PIPER, D., KUNZ, M., EHMELE, F., MOHR, S., MÜHR, B., KRON, A. & DANIELL, J. (2016): Exceptional sequence of severe thunderstorms and related flash floods in May and June 2016 in Germany. Part I: Meteorological background. – *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16, 2835–2850, doi:10.5194/nhess-16-2835-2016
- SALAZAR, S., FRANCÉS, F., KOMMA, J., BLUME, T., FRANCKE, T., BRONSTERT, A. & BLÖSCHL, G. (2012): A comparative analysis of the effectiveness of flood management measures based on the concept of retaining water in the landscape in different European hydro-climatic regions. – *Natural Hazards and Earth System Sciences* 12, 3287–3306.
- TFFF (2016): Bericht der Task Force „Flash Flood“ des DFG-Graduiertenkollegs NatRiskChange zum Hochwasser in Braunsbach am 29. Mai 2016. Universität Potsdam: [urn:nbn:de:kobv:517-opus4-394881](http://nbn:de:kobv:517-opus4-394881)
- VOGEL, K., ÖZTÜRK, U., RIEMER, A., LAUDAN, J., SIEG, T., WENDI, D., AGARWAL, A., RÖZER, V., KORUP, O. & THIEKEN, A. (2017): Die Sturzflut von Braunsbach am 29. Mai 2016 - Entstehung, Ablauf und Schäden eines „Jahrhundertereignisses“. 2. Geomorphologische Prozesse und Schadensanalyse. – *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, diese Ausgabe.
- ZIESE, M., JUNGHÄNEL, T. & BECKER, A. (2016): *Andauernde Großwetterlage Tief Mitteleuropa entfaltet Ihr Unwetterpotential in Deutschland*, 03.06.2016, Online-Bericht des DWD, [www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/niederschlag/20160603\\_starkregen\\_mai-2016\\_meldung.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=3](http://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/niederschlag/20160603_starkregen_mai-2016_meldung.pdf?__blob=publicationFile&v=3)