

Stellungnahme zu den Sturzflutereignissen Ende Mai / Anfang Juni in Süddeutschland am Beispiel der Sturzflut in Braunsbach

Stand: 23. Juni 2016

Anlass

Am Abend des 29. Mai und zudem in den nachfolgenden Tagen wurden verschiedene Regionen in Süddeutschland, aber auch in Thüringen, Sachsen und NRW von kurzen aber sehr heftigen Starkniederschlagsereignissen getroffen. In vielen dieser betroffenen Gebiete schollen daraufhin kleine Bäche zu reißenden Flüssen an. Diese hoch-intensiven Niederschläge und der dadurch auf den Flächen der Einzugsgebiete entstandene Oberflächenabfluss verursachten sehr hohe Bodenerosionsraten, und mancherorts lösten die extremen Durchflussraten der Bäche Baumentwurzungen, Hangrutschungen und die Mobilisierung großer Steine aus.

Die Deutsche Hydrologische Gesellschaft (DHG) nimmt nachfolgend zu den wesentlichen fachlichen Aspekten dieser Hochwasserereignisse Stellung. Dabei wird das Ereignis in Braunsbach bzw. dem Einzugsgebiet des dortigen Orbacher Bachs als exemplarisches und besonders prägnantes Beispiel genommen.

Definition und Spezifika von Sturzfluten

Bei dem Hochwasserereignis von Braunsbach – wie auch bei den Ereignissen an anderen Orten im NO 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. Sie werden gegenüber Hochwasser in größeren Flüssen durch die Zeit der Verzögerung zwischen dem auslösenden Niederschlagsereignis und dem Eintreten des Hochwasserscheitels abgegrenzt („Reaktionszeit“). Von einer Sturzflut wird typischerweise bei einer Reaktionszeit (Zeit zwischen Niederschlagsbeginn und Beginn des Hochwasserabflusses) von nicht mehr als sechs Stunden gesprochen. Sie werden verursacht durch hochintensive Regen (viel Regen in kurzer Zeit) und werden verstärkt durch Böden mit nur geringer Wasseraufnahmefähigkeit (Infiltrationskapazität). Zudem begünstigen geringe Oberflächenrauigkeiten und Gebiete mit zum Teil ausgeprägtem Relief eine rasche Abflusskonzentration.

Die besondere Gefährdung, die von Sturzfluten ausgeht, wird durch folgende Merkmale geprägt:

- **Geringe Vorwarnzeit;**
- **hohe Fließgeschwindigkeiten; z.T. Mobilisierung und Mitführung von Geröll („Geschiebe“) und Bäumen und Sträuchern („Schwemmholz“) und anderem Treibgut;**
- **Singuläres bzw. spontanes Verhalten u.a. durch plötzliche Verlagerungen im Flusslauf, Ablagerungen von Geröll und Schwemmholz in Engstellen („Verkläuserungen“)**

Niederschlagsbedingungen

Bei den die Sturzfluten auslösenden Niederschlägen handelte es sich generell um relativ kurze aber hochintensive Starkregen, Unwetterereignisse. Im NO Baden-Württembergs fiel der größte Anteil der Niederschläge am Sonntagabend (29. Mai), in etwa zwischen 17 und 21 Uhr. Die räumliche Variabilität der Niederschlagsmengen und -intensitäten war dabei groß, was typisch für solche Gewitterereignisse ist. Die nächste Niederschlagsmessstation des DWD ist die Station Vellberg-Klein-Altdorf (zeitliche Auflösung: 10min), ca. 10km südöstlich von Braunsbach. Die nächste Station des Landesmessnetzes BW ist die Station Kupferzell (zeitl. Auflösung: 30min). Die Werte der beiden Stationen sind in Tabelle 1 für verschiedene Dauerstufen gegeben. Es wird klar, dass es ein sehr starkes Ereignis war mit Spitzenintensitäten von Widerkehrintervallen > 100 Jahren (insbesondere für die Dauerstufen 2 Stunden).

	Station Kupferzell-Rechbach (DWD)	Station Vollberg-Klein-Altdorf (TM BaWü)	Station Langenburg-Atzenrod (DWD)	KOSTRA-Wert: Gitterzelle 79,33; T = 100 J
$\Delta t = 10\text{min}$	13,3mm (19:30-19:40)			20,5mm
$\Delta t = 30\text{min}$	22,0mm (19:20-19:50)	21,3mm (17:30-18:00)		33,8mm
$\Delta t = 60\text{min}$	32,8mm (18:40-19:40)	34,9mm (17:00-18:00)		44mm
$\Delta t = 120\text{min}$	43,1mm (18:10-20:10)	53,5mm (17:00-19:00)		49mm
$\Delta t = 24\text{h}$	58,4mm (00:00-24:00)	73,1mm (00:00-24:00)	105,5mm	90mm

Tabelle 1: Spitzenwerte der Niederschlagsintensität am 29. Mai für verschiedene Dauern Δt von drei Stationen bei Braunsbach. Die rechte Spalte enthält die KOSTRA-Werte (Jährlichkeit: 100 Jahre) für die Gitterzelle, welche für Braunsbach gilt.

Allerdings wurden mit diesen Stationen vermutlich nicht die stärksten Niederschlagsintensitäten erfasst. Abb. 1 zeigt die Ergebnisse des stündlichen Radarproduktes des DWD (RADOLAN) in der Region um Braunsbach. In Abb. 2 sind die Tageswerte des 29. Mai aller Niederschlagsstationen im Umkreis dieses Einzugsgebiets dargestellt.

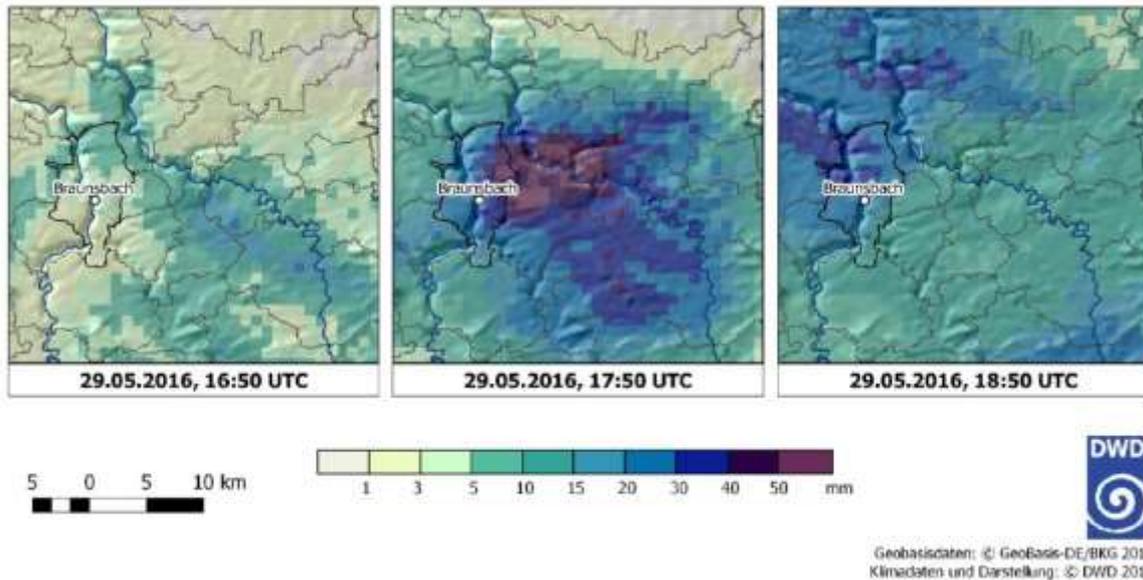


Abb. 1: Stündliche Radarniederschläge (Radolan-Produkt) des DWD bei Braunsbach in den drei intensivsten Stunden am 29. Mai 2016 (Quelle: Ziese et al., 2016)

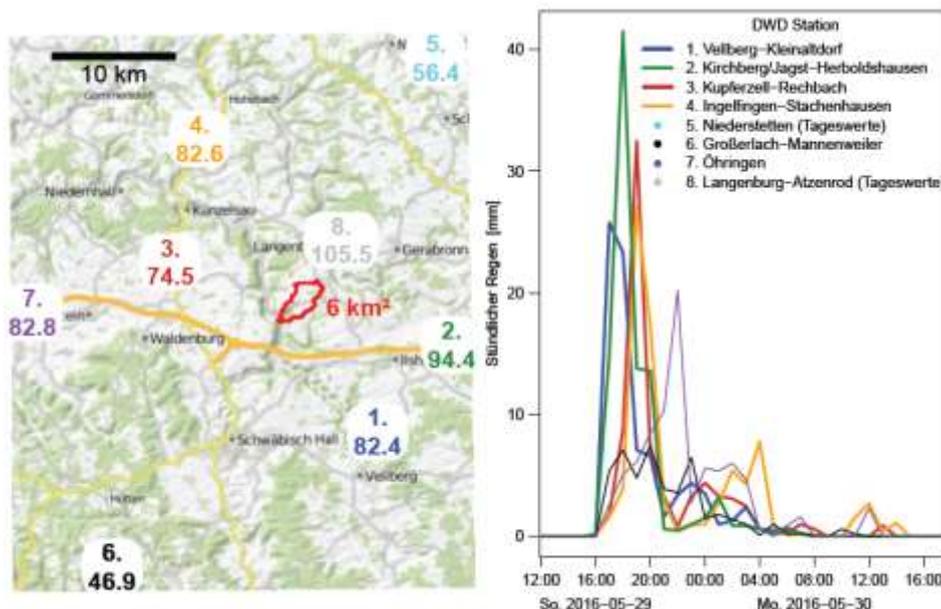


Abb. 2: Lage und Tageswerte an den Niederschlagsstationen um Braunsbach (links) und zeitlicher Verlauf der Intensitäten in stündlicher Auflösung (rechts); Quelle: NatRiskChange Taskforce „FlashFlood“ (TFFF, 2016)

Aus beiden Abbildungen wird deutlich, dass die größten Intensitäten der Gewitterzelle im Einzugsgebiet des Orlacher Baches, dem Einzugsgebiet von Braunsbach fielen. Die nächstgelegene Station Langeburg liefert leider nur Tageswerte. Die dort registrierten 105mm haben ein Wiederkehrintervall deutlich größer 100 Jahren. Auch die 2-Stunden-Werte gemessen an den Stationen Kupferzell und Vollberg liegen nach den KOSTRA-Werten bei einer Jährlichkeit von 100 Jahren oder gar deutlich drüber.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass es sich sowohl bzgl. des Tagesniederschlags als auch bei höherer zeitlicher Auflösung um Niederschlagsmengen und –intensitäten mit Wiederkehrintervallen von deutlich größer als 100 Jahren handelte. Das Einzugsgebiet des Orlacher Baches lag im Zentrum des lokalen Gewittergeschehens. Eine Analyse der örtlichen und kurzzeitigen Niederschlagsintensitäten ist aktuell auf Basis der zeitlich hochaufgelösten Radardaten (5min) in Bearbeitung.

Abflussbildungsprozesse

Infolge der hochintensiven Niederschläge kam es schnell und weitreichend (vermutlich flächendeckend im Einzugsgebiet) zu Oberflächenabfluss. Dabei trat sowohl Infiltrationsüberschuss (Infiltrationskapazität der Bodenoberfläche geringer als die Niederschlagsintensität) als auch Sättigungsüberschuss (keine Infiltration infolge Bodensättigung) auf. Diese Erkenntnis beruht auf einer Ortsbegehung 5 Tage nach dem Ereignis. Dort wurden in vielen Bereichen der Hochfläche des Einzugsgebietes Fließ- und Erosionsspuren gesehen, was auf Infiltrationsüberschuss deutet. Zudem war ersichtlich, dass in weiten Bereichen in Richtung zum Gewässersystem der Boden noch voll gesättigt war, was auf großflächigen Sättigungsüberschuss hindeutet, siehe Abb.3.



Abb. 3: Abflussbildungsspuren (Oberflächenabfluss) auf der Hochfläche des Einzugsgebietes (Fotos: AL Vela)

Abflussraten und -menge

Bei der o.g. Feldbegehung 5 Tage nach dem Hochwasserereignis wurde Erhebungen über die Maximalwasserstände (mittels Angaben von Anwohnern, Geschwemmsellinien und anderen Markern im Gelände), Geometrie des „Gerinnes“ während des Hochwasserablaufs, und Fließgeschwindigkeiten (Angaben von Bewohnern, Schätzungen, sog. „likelihood Verteilungen“) durchgeführt. Im Ergebnis wurden „wahrscheinliche maximale Durchflüsse“ am Gebietsauslass (Braunsbach) von $100\text{m}^3/\text{s} \pm 50\text{m}^3/\text{s}$ geschätzt. An einer Stelle im Oberlauf, vor Beginn des tief eingeschnittenen Tales des Orlacher Baches, wurde ein Wert zwischen $6\text{-}12\text{m}^3/\text{s}$ geschätzt. Diese Ergebnisse sind mit erheblichen Unsicherheiten behaftet, können aber als erste Schätzungen dienen. Der Wert am Gebietsauslass lässt sich auch plausibilisieren durch einen Vergleich des geschätzten Abflussvolumens mit dem des Effektivniederschlags:

- $\text{Vol}_{\text{Abfluss}} = 360\,000\text{ m}^3$ (Annahmen: $100\text{m}^3/\text{s}$; Q_{max} : Ereignisdauer: 2 Stunden; dreiecksförmige Ganglinie)
- $\text{Vol}_{\text{Neff}} = 336\,000\text{ m}^3$ (Annahmen: 80mm Niederschlag; Abflussbeiwert: 70%; Einzugsgebietsfläche: 6 km^2)

Geomorphologische Prozesse

Geomorphologische Prozesse spielten bei dem Ablauf des Hochwasserereignisses als auch bei den Schadensursachen in Braunsbach eine große Rolle. Dabei handelt es sich sowohl um Bodenerosion in der Einzugsgebietsfläche, als auch

um Hangrutschungen, Ufererosion und Sohlerosion entlang des Orlacher Baches bzw. in dessen (Kerb)tal. Desweiteren kamen zahlreiche Baumentwurzungen im Tal hinzu. Geröll, Geschiebe und das Schwemmh Holz wurde mit dem Abfluss weiter transportiert.

Die hohen Niederschlagsintensitäten und die nachfolgenden hohen Abflussbildungsraten auf der Einzugsgebietsfläche verursachten großflächige Bodenerosionsprozesse, was exemplarisch auch aus Abb. 3 ersichtlich ist. Müller & Pfister (2011) geben einen Grenzwert für erosionsverursachende Niederschlagsintensitäten von $> 0,3\text{mm}/\text{min}$ an, was $>20\text{ mm}/\text{h}$ entspricht. Folgt man dieser einfachen Betrachtung, dann ergibt sich aus Tabelle 1 und Abb. 2, dass dieser Wert praktisch für über zwei Stunden überschritten wurde. Dies unterstützt somit den Befund starker Bodenerosionen im Gebiet.

Fast alles mobilisierte Geröll lagerte sich noch im Ortbereich, d.h. vor der Mündung in den Kocher, ab. Dies erfolgte sowohl in dem ursprünglichen Bachbett, als auch in der Hauptstraße des Ortes, in der sich der größte Teil des Abflusses verlagerte. Möglich ist, dass es während des Ereignisses kurzfristig zu Barrieren durch ein Verkeilen von Geröll und Schwemmh Holz im Tal oberhalb des Ortes kam. Ein nachfolgender Bruch solcher kurzfristigen Aufstau würde dann temporär zu sehr starken Abflussraten und dadurch Schäden im Ort führten. Ob sich eine solch pulsartige Schwallwelle tatsächlich so ereignet hat, lässt sich aber nicht feststellen.



Abb. 3: links: Geröllablagerungen in Braunsbach (Foto: B. Boessenkool); rechts: Schwemmh Holzablagerungen im Tal des Orlacher Baches, oberhalb von Braunsbach (Foto: AL Vela)

Schäden

Im Gegensatz zu langsam ansteigenden Flusshochwassern, spielen bei Sturzfluten, neben dem Wasserstand, vor allem die Fließgeschwindigkeit und die transportierte Wasser- und Geröllfracht eine entscheidende Rolle bei der Schadensentstehung.

9 Tage nach dem Hochwasserereignis wurden äußerlich erkennbare Gebäudeschäden mit Hilfe von standardisierten Fragebögen aufgenommen. Diese Erhebung ergab, dass hohe Schäden nicht nur in Bereichen mit besonders hohem Wasserstand aufgetreten sind, sondern auch in Bereichen in denen Gebäude sehr exponiert während des Hochwassers waren und dadurch stärker durch Wasser- und Geröllfracht beschädigt wurden. Von den Überschwemmungsschäden wurde fast der ganze Ort (mit Ausnahme eines oberhalb gelegenen Ortsteils) betroffen, mit Überschwemmungshöhen zwischen 50 cm und über 3 m. Die Auswertung der Schadenserhebungen ist momentan noch im Gange und wird im Bericht der Task Force „Flash Flood“ des DFG-Graduiertenkollegs NatRiskChange (TFFF, 2016) enthalten sein.

Auswirkungen anthropogener Eingriffe in die 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 glasklar 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 Line 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 Modellierungen. Die in Braunsbach stattgefundenen meteorologischen, hydrologischen, hydraulischen und geomorphologischen Prozesse lassen sich aber in ihrer Gesamtheit kaum so modellieren, dass eine Aussageschärfe ableitbar ist, die eine integrierte, konkrete, quantitative Beantwortung erlauben würde. Insbesondere die geomorphologischen Prozesse wie Hangrutschungen, Entwurzelungen und Gerölltransport sind nicht adäquat modellierbar. Gleichwohl soll nachfolgend zu drei wichtigen anthropogenen Effekten qualitativ Stellung bezogen werden.

Aspekte des Klimawandels

Bezüglich „Flash Floods“ und Klimawandel ist von zentraler Bedeutung, ob durch die globale und regionale Erwärmung 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 meist geschehen – helfen hier nicht weiter.

In einer detaillierten Studie berichten Müller und Pfister (2011) über die Analyse langer Niederschlagszeitreihen, welche für acht Stationen im Emscher-Lippe Gebiet in Nordrhein-Westfalen in einer außergewöhnlich hohen zeitlichen Auflösung (1 min) für die letzten 70 Jahre (1940er – 2009) zur Verfügung standen. Ereignisse über einem Schwellenwert der Niederschlagsintensität von 0,3 mm/min beziehungsweise > 20 mm/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 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 Regenereignisse zumindest an diesen Stationen deutlich verstärkt hat.

Ein anderer Ansatz ist die Untersuchung der Abhängigkeit extremer Niederschlagsintensitäten (Ereignisse kurzer Dauer) 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, 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 $7 \text{ \%}/^{\circ}\text{C}$) erklären. Somit liegt zumindest nahe, dass durch eine erwärmte Atmosphäre auch mehr bzw. stärkere kurzzeitige Starkregenereignisse entstehen können. Details dazu sind in den genannten Veröffentlichungen enthalten.

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 Bereitstellung von landwirtschaftlichen Flächen bzw. die landwirtschaftliche Nutzung. Folgende Frage hat dabei in Bezug zum Ereignis in Braunsbach besondere Bedeutung: Wie stark ist der Einfluss von Landnutzungsänderungen auf die Bildung von Abfluss infolge Starkregenereignissen? Die Möglichkeit der Verschlämmung der Bodenoberfläche ist bei Ackerbewirtschaftung dann von besonderer Relevanz, wenn die Vegetationsbedeckung noch gering ist (Beginn der Wachstumsphase), der Boden lehmig und evtl. durch Bodenbearbeitung schon vorverdichtet. Unter solchen Bedingungen, wie es etwa bei Maiskulturen in der Jugendentwicklungsphase der Fall ist (siehe auch Abbildung 3), wirken hohe Niederschlagsintensitäten verschlammend (also verstopfend) für die Grobporen und auch für die Feinporen des Oberbodens, was die Infiltrationskapazität der Bodenoberfläche bedeutend herabsetzen und damit die Entstehung von Oberflächenabfluss verstärken kann.

Niehoff (2002) und Bronstert et al. (2003) stellten zu diesen Fragen eine Simulationsstudie vor, in der gezeigt wurde, dass der Einfluss einer geänderten Landnutzung auf die Hochwasserentstehung in Einzugsgebieten bis ca. 100 bis 1000 km² Größe 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 hochintensiven Niederschlägen stark auf die lokale Hochwasserentstehung wirkt. Die o.g. 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 klare Funktion der Niederschlagsmenge ist. Für häufige bis mittel-häufige Ereignisse kann dieser Rückhalt eine wichtige Rolle spielen, für sehr starke (dh. seltene) Ereignisse ist dessen relative Bedeutung aber eher klein. Somit sind vermutlich für extreme Niederschlagsereignisse auch Verschlammungsprozesse von geringerer relativer (prozentualer) Bedeutung für die Bildung des Hochwasserabflusses in dem Gebiet.

Aspekte des Gewässerbaus

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

Bei Baumaßnahmen zur Reduktion von Hochwasserabflüssen handelt es sich meist um die Anlage von Rückhaltebecken oder um die erwähnten Entlastungskanäle. Solche Baumaßnahmen sind also explizit zur Reduktion von Hochwasserabflüssen geplant. Im Fall von Braunsbach waren solche Maßnahmen bislang nicht erfolgt. Es ist auch fraglich ob unter den örtlichen Bedingungen solche Maßnahmen überhaupt durchführbar wären und ob sie bezahlbar wären. Hinzu kommen zwei weitere Aspekte, die oft übersehen werden: a) Die Wirkung einer jeden Baumaßnahme ist naturgemäß begrenzt, und damit auch deren „Schutzwirkung“ vor Hochwasserabflüssen. Es bleibt ein Restrisiko / Restgefährdung, welche vor allem bei Extremereignissen eintritt; b) Baumaßnahmen können auch versagen, d.h. ein Rückhaltebecken kann etwa überströmen oder ein Deich kann brechen. Die dadurch entstehenden Schäden sind dann oft noch verheerender, da unvorhersehbar und sehr plötzlich auftretend.

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 Schwemmholttransport) 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 Verdohlungen 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 Orbacher Baches im Ortsbereich vorgehen zu wollen, soll hier aber als erster Eindruck festgestellt werden, dass auch ein unverdohlter Bach in Braunsbach die aus dem oberliegenden Einzugsgebiet ankommenden Extremabflüsse kaum hätte abführen können und somit die Überschwemmung des Ortes auch eingetreten wäre (TFFF, 2016).

Schlussfolgerungen

Das Extremereignis im Einzugsgebiet des Orbacher Baches macht erneut klar, dass Hochwasserereignisse 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 Baches,
- die sehr hohen Niederschlagsintensitäten über einen Zeitraum von 2 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 > 1m) und Schwemmholz im Kerbtal des Orlicher Baches 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.

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 „Schulduweisung“ 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. 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. Technische Maßnahmen in diesem Sinne sind:

Eine Verbesserung der Vorhersage von kurzzeitigen 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. Hierzu besteht bereits ausgewiesene Erfahrung bei den mit Wildbachfragen betrauten Verwaltungen in Gebirgsregionen.

Danksagung

Wir danken den Bürgern und 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. Wir danken insgesamt der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung des Graduiertenkollegs NatRiskChange (GRK 2043/1).

Zitierte Quellen und Literatur

- Bronstert, A., Niehoff, D., Fritsch, U. (2003): Auswirkungen von Landnutzungsänderungen auf die Hochwasserentstehung. *Petermanns Geographische Mitteilungen*, 147. Jahrgang, Heft 6, 24-33.
- 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 Subdaily Rainfall Disaggregation via Clausius–Clapeyron. *Journal of Hydrometeorology*, 15(3), 1303–1311.
- 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.
- Müller, EN, 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].
- Pfister, A. (2016): Langjährige Entwicklung von Starkregen – Handlungsempfehlungen für die Zukunft. Kapitel 35 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.
- 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 (working paper).
- Ziese, M., Junghänel, T., Becker, A. (2016): Andauernde Großwetterlage Tief Mitteleuropa entfaltet Ihr Unwetterpotential in Deutschland, 03.06.2016, Online-Bericht des DWD; Link: https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/niederschlag/20160603_starkregen_mai-2016_meldung.pdf?blob=publicationFilev=3