



Technische Universität München

Naturgefahren - von der Sturzflut zur Schwemmholzverkläusung

Ereignisanalysen, aktuelle Forschungsvorhaben und Projekte

Beiträge zur Fachtagung am 6. Juli 2017 in Obernach

Berichte des Lehrstuhls und der Versuchsanstalt für
Wasserbau und Wasserwirtschaft



Herausgegeben von Prof. Peter Rutschmann

Nr. 137 / 2017

Naturgefahren - von der Sturzflut zur Schwemmholzverklausung

Ereignisanalysen, aktuelle Forschungsvorhaben und Projekte

Beiträge zur Fachtagung am 6. Juli 2017 in Obernach



Finzwehr (Oberbayern), Mai 1999

Foto: VAO

Veranstalter:

Freunde des Lehrstuhls für Wasserbau und Wasserwirtschaft

in Kooperation mit dem
Lehrstuhl und der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft
der Technischen Universität München



Technische Universität München

Lehrstuhl für Wasserbau und Wasserwirtschaft

80333 München, Arcisstraße 21
Germany

Tel.: 089 / 289 23161
Fax: 089 / 289 23172
E-Mail: wabau@bgu.tum.de

Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft (Oskar von Miller - Institut)

82432 Oberrach, Walchensee
Germany

Tel.: 08858 / 9203 0
Fax: 08858 / 9203 33

ISSN 1437-3513

ISBN 978-3-943683-12-7

Berichte des Lehrstuhls und der Versuchsanstalt für
Wasserbau und Wasserwirtschaft

Herausgegeben von Prof. Peter Rutschmann
Ordinarius für Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU München

Druck und Einband: meissnerdruck, Oberaudorf

Vorwort

Die Auswirkungen der Extremereignisse vom Frühsommer 2016 in Simbach (Bayern) und Braunsbach (Baden-Württemberg) stehen uns allen noch vor Augen. Auch einem großen Teil der Fachöffentlichkeit wurde dadurch erst bewusst, dass alpine Naturgefahren auch in kleinen Einzugsgebieten außerhalb der Alpen eine reale Bedrohung darstellen. Aus diesem Anlass veranstalten wir an der Versuchsanstalt Oberrach eine Fachtagung mit dem Titel „Naturgefahren - von der Sturzflut bis zur Schwemmholtverkläuterung“, die sich mit folgenden Schwerpunkten beschäftigt:

- Sturzflut
- fluvialer Geschiebetransport
- Murgang
- Schwemmholtverkläuterung

Damit setzen wir eine lose Reihe von Fachtagungen an der Versuchsanstalt Oberrach fort, deren letzte im Juli 2014 den Titel „Hochwasser und kein Ende!“ trug und sich mit dem „gewöhnlichen“ Reinwasser-Hochwasser an großen Flachlandflüssen befasste.

Es freut mich sehr, dass ausgewiesene Experten aus der Schweiz, Österreich, Italien und Deutschland unserer Einladung gefolgt sind, um über Ereignisanalysen, aktuelle Forschungsvorhaben und -ergebnisse sowie über Strategien und konkrete Projekte zum Schutz vor Naturgefahren zu berichten und zu diskutieren. Wir wollen mit der Fachtagung insbesondere den Wissenstransfer zwischen Forschungseinrichtungen, die im Bereich der alpinen Naturgefahren aktiv sind, Wasserwirtschaftsverwaltung und Planungsbüros fördern.

Ich hoffe, dass wir diese Ziele in der besonderen Oberracher Atmosphäre erreichen und wünsche allen Teilnehmern eine erfolgreiche Veranstaltung.

Oberrach, im Juli 2017

Prof. Dr. Peter Rutschmann

Inhaltsverzeichnis

<i>Andreas Rimböck und Rainer Höhne</i>	1
Bayerische Strategie gegen Wildbachgefahren - ein Überblick vor dem Hintergrund der Ereignisse 2016	
<i>Johannes Hübl</i>	13
Das Hochwasserereignis am Simbach im Sommer 2016	
<i>Axel Bronstert, Kristin Vogel, Ankit Agarwal, Berry Boessenkool, Madlen Fischer, Maik Heistermann, Lisei Köhn-Reich, Oliver Korup, Jonas Laudan, Thomas Moran, Ugur Ozturk, Adrian Riemer, Viktor Rözer, Tobias Sieg, Dadiyorto Wendi, Annegret Thieken</i>	24
Die Sturzflut von Braunsbach vom 29. Mai 2016: eine forensische (retrospektive) Ereignisanalyse	
<i>Dieter Rickenmann</i>	38
Geschiebetransport in Wildbächen und Gebirgsflüssen: Messung, Transportkapazität und Gefahrenbeurteilung	
<i>Michael Sturm, Bernhard Gems, Florian Keller, Bruno Mazzorana, Sven Fuchs, Maria Papatoma-Köhle und Markus Aufleger</i>	49
Einwirkungen fluviatiler Geschiebetransportprozesse auf Gebäude	
<i>Andreas Dietrich und Michael Krautblatter</i>	63
Erosionskapazität, Entwicklung des Geschiebehaushalts und Simulation potentieller Murgänge am Beispiel des Roßbichelbachs und Roßbichelgrabens (Oberstdorf)	
<i>Arnd Hartlieb</i>	65
Schwemmholzgefahren - Gesamtbetrachtung im Einzugsgebiet und lokale Beurteilung einzelner Engstellen	
<i>Isabella Schalko, Lukas Schmocker, Volker Weitbrecht und Robert Boes</i>	75
Verklaesungswahrscheinlichkeit und Aufstau – Aktuelle Forschung zum Thema Schwemmholz an der VAW	
<i>Bernhard Unterreitmeier</i>	85
Schwemmholzproblematik in der fachlichen Praxis (Fragestellungen, Lösungskonzepte, Beispiele)	
<i>Walter Gostner, Corrado Lucarelli, Mathias Hochschwarzer</i>	96
Integraler Hochwasserschutz – Fallbeispiele aus verschiedenen Ländern	
<i>Johannes Riedl</i>	107
Schutzmaßnahmen vor Wildbachgefahren an der Großen Laine in Oberammergau	

Bayerische Strategie gegen Wildbachgefahren - ein Überblick vor dem Hintergrund der Ereignisse 2016

Andreas Rimböck und Rainer Höhne

Zusammenfassung

Der Freistaat Bayern investiert seit Jahrzehnten zielgerichtet in den Schutz vor Hochwasser – an den großen Gewässern wie Donau, Main oder Isar, aber auch an Wildbächen. Seit dem Pfingsthochwasser 1999 wird mit dem Hochwasserschutz-Aktionsprogramm 2020 und seiner Fortschreibung im Jahr 2013, dem Programm AP 2020plus, eine integrale Strategie verfolgt. Mit einem Gesamtvolumen von rund 3,4 Milliarden Euro zielt das AP 2020plus darauf ab, einen verbesserten Hochwasserschutz und eine Senkung des Schadenpotenzials zu erreichen. Aus jedem abgelaufenen Hochwasserereignis fließen die daraus gewonnenen Erkenntnisse in die Strategien und Programme ein und tragen zu einer kontinuierlichen Verbesserung bei. Auch die zahlreichen lokal begrenzten Ereignisse, die sich vor allem im Mai und Juni 2016 an unterschiedlichen Orten über nahezu ganz Bayern verteilt ereigneten, werden zum Optimierungsprozess beitragen. So wurde bereits die Erweiterung des bayerischen Hochwasserschutz-Aktionsprogramms 2020plus um die Komponente Sturzfluten durch den Ministerrat Ende Juli 2016 beschlossen.

Wichtige Bestandteile der Schutzstrategie im Wildbachbereich sind die Gefahrenanalyse sowie die Erstellung von integralen Wildbach-Entwicklungskonzepten. Zur Ermittlung und Festsetzung von Wildbachgefährdungsbereichen wurde vom Bayerischen Landesamt für Umwelt in den letzten Jahren eine standardisierte Methode entwickelt und in Form einer Loseblattsammlung festgelegt.

1 Hintergrund

Über 13.000 km der Gewässer in Bayern sind als Wildbach eingestuft. Der Großteil befindet sich in den Alpen. Ursache dafür sind die stark ausgeprägten Landschaftsformen und das steile Relief sowie die besonderen klimatischen Verhältnisse im (Hoch-) Gebirge. Wildbäche sind charakterisiert durch einen zumindest streckenweise steilen Verlauf, starke und schnell wechselnde Wasserführung und das Mitführen von Feststoffen, wie Schlamm, Kies, Geröll, Holz. Hochwasser und Murgänge sind als natürliche Prozesse Teil der Dynamik von Wildbächen, die seit jeher auftreten und die Landoberfläche unserer Erde mitgestalten und verändern. Begibt sich der Mensch in den Wirkungsbereich dieser natürlichen Prozesse, können sie zu einer Bedrohung für ihn und seine Sachwerte werden, die Rede ist dann von einer Naturgefahr.

2016 war Bayern erneut von heftigen Hochwasserereignissen betroffen. Im Mai und Juni traten über Wochen verteilt viele lokal sehr begrenzte Starkregenereignisse an unterschiedlichen Orten über nahezu ganz Bayern verteilt auf. Die Ereignisse aus dem vergangenen Jahr haben gezeigt, dass auch an kleinen Gewässern (keine Wildbäche) unter besonderen Umständen wildbachähnliche Prozesse auftreten können. So wurden mancherorts Verklausungen von Brücken und Durchlässen durch Schwemmholz beobachtet (vgl. Abb. 1). Kleine Bäche transportierten beachtliche Mengen von Geschiebe.



Abb. 1 Ereignis am Haibach in Passau am 23./24. Juli 2016 (Foto: Wasserwirtschaftsamt Deggendorf)

Die zahlreichen Ereignisse haben verdeutlicht, dass Risikomanagement im Bereich Hochwasser eine Daueraufgabe ist und immer bleiben wird. Die gewonnenen Erkenntnisse aus den zurückliegenden Ereignissen erfordern eine Überprüfung und ggf. Anpassung der vorhandenen Strategie zum Schutz vor Hochwasser.

2 Strategie

Nach dem Pfingsthochwasser 1999 wurde vom bayerischen Kabinett das „Hochwasserschutz Aktionsprogramm 2020 – für einen nachhaltigen Hochwasserschutz in Bayern“ beschlossen, das seitdem mit großem fachlichen Engagement und unter Einsatz erheblicher Haushaltsmittel mit Erfolg umgesetzt wurde. Stand Anfang und Mitte des letzten Jahrhunderts die reine Gefahrenabwehr, vor allem durch Begradigung und Eindeichung der Flüsse im Mittelpunkt, war bis zum Jahr 1999 die Erkenntnis gereift, dass eine nachhaltige Strategie weiter gehen muss. Die Verhinderung weiterer Schadenspotentiale in den gefährdeten Gebieten sowie der Erhalt natürlicher Überflutungsräume haben seitdem oberste Priorität. Das damals ins Leben gerufene Aktionsprogramm 2020 bestand aus den drei (gleichberechtigten) Handlungsfeldern: natürlicher Rückhalt, technischer Hochwasserschutz und Hochwasservorsorge. Es stellte die erste integrale bayernweite Schutzstrategie dar.

Nach dem katastrophalen Junihochwasser aus dem Jahr 2013 wurde die bewährte bayerische Hochwasserschutzstrategie zu einem Hochwasserschutzaktionsprogramm 2020plus (AP 2020plus) erweitert und neu ausgerichtet. Das Aktionsprogramm 2020plus ist die konsequente Fortführung des Aktionsprogramms 2020 auf der Basis des Hochwasserrisikomanagements. Grafisch wird dies durch die Anordnung der Handlungsfelder Vorsorge, Nachsorge und Vermeidung im Kreislauf des Risikomanagements verdeutlicht (vgl. Abb. 2). Diese Schutzstrategie wurde auch auf den Wildbachbereich übertragen.

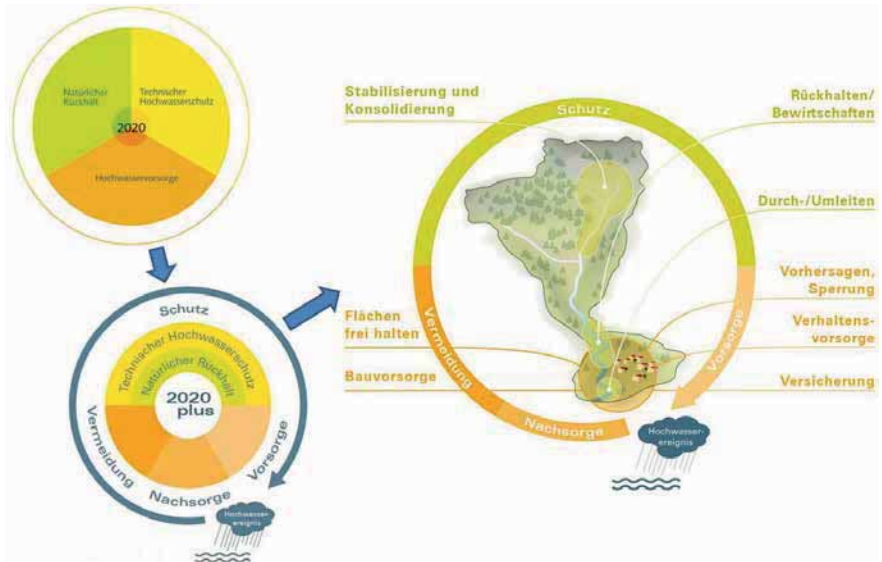


Abb. 2 Vom Aktionsprogramm 2020 zum Aktionsprogramm 2020plus und die Übertragung auf den Wildbachbereich

Gedanklicher Ausgangspunkt für den Kreislauf des Hochwasserrisikomanagements ist ein Hochwasserereignis, an das sich jeweils eine Auswahl von Maßnahmenarten anschließt. Unmittelbar nach dem Ereignis steht die Nachsorge im Mittelpunkt, die Maßnahmen zur Wiederherstellung, Regeneration und Überprüfung beinhaltet. Ziel ist, die Hochwasserfolgen für Einzelne und die Gesellschaft zu überwinden und Umweltschäden zu beseitigen. Hierunter fallen auch die Auswertung der Daten und Erfahrungen und die Fortschreibung der grundsätzlichen Strategie. Sie geht über in die Vorbereitung auf das nächste Hochwasserereignis. In den Bereich Vermeidung von Risiken fallen Maßnahmen aus den Handlungsbereichen Flächen- und Bauvorsorge. Durch das Freihalten von Überschwemmungsgebieten von weiterer Bebauung und den baulichen Einzelschutz bestehender Objekte kann die Entstehung neuer Risiken vermieden und das Risiko für bestehende Siedlungen verringert werden. Der Bereich Schutz im Risikomanagement umfasst neben den Maßnahmen im Aktionsprogramm 2020 – Handlungsfeld „technischer Hochwasserschutz“ auch jene im Handlungsfeld „natürlicher Rückhalt“. Unter „technischen Hochwasserschutz“ fallen Bau- und Betrieb von Schutzbauwerken und Anlagen zur Regulierung des Wasserhaushalts. Maßnahmen des natürlichen Wasserrückhalts beinhalten unter anderem das Management von natürlichen Überschwemmungsgebieten und dienen dazu, den Flüssen wieder mehr Raum zu geben. Informationsvorsorge, Verhaltensvorsorge sowie örtliche Gefahrenabwehr und Katastrophenschutz fallen unter die Vorsorge. Handlungsbereiche sind hier beispielsweise Hochwasservorhersagen und Hochwasserwarnungen sowie die Planung von Hilfsmaßnahmen für den Notfall. Vorsorgemaßnahmen sind vergleichsweise günstig und wirkungsvoll. Jeder Durchlauf des Zyklus beinhaltet eine gewisse „Evolution“, d.h. mit jedem Ereignis lernt man dazu und die folgenden Phasen werden auf Basis dieses größeren Wissens absolviert.

Hochwasser-Risikomanagement ist eine gemeinsame Aufgabe, an der sich viele beteiligen müssen – vom Staat über die Kommunen bis hin zu jedem einzelnen Bürger. Durch das Zusammenwirken vieler Beteiligter im integralen Hochwasser-Risikomanagement lassen sich die Auswirkungen von Naturereignissen auf die Schutzgüter menschliche Gesundheit, Umwelt, Kulturerbe und wirtschaftliche Tätigkeit mitunter weiter reduzieren.

Die gewaltigen Herausforderungen an ein modernes und nachhaltiges Risikomanagement in Wildbacheinzugsgebieten können nur bewältigt werden, wenn koordiniert vorgegangen wird und größtmögliche Synergien genutzt werden. Die einzelnen Arbeitsschritte einer künftigen Gesamtstrategie sollen daher so gestaltet und abgestimmt werden, dass sie sich gegenseitig ergänzen und aufeinander aufbauen. Derzeit entwickelt das Bayerische Landesamt für Umwelt ein solches Gesamtkonzept, von dem einige wichtige Teile bereits vorhanden sind, andere schon verfügbare Teile moderat angepasst und weitere Bausteine neu entwickelt werden (vgl. Abb. 3). Alle fertig gestellten Teile werden in die Loseblattsammlung Wildbach (LBS WI) aufgenommen.

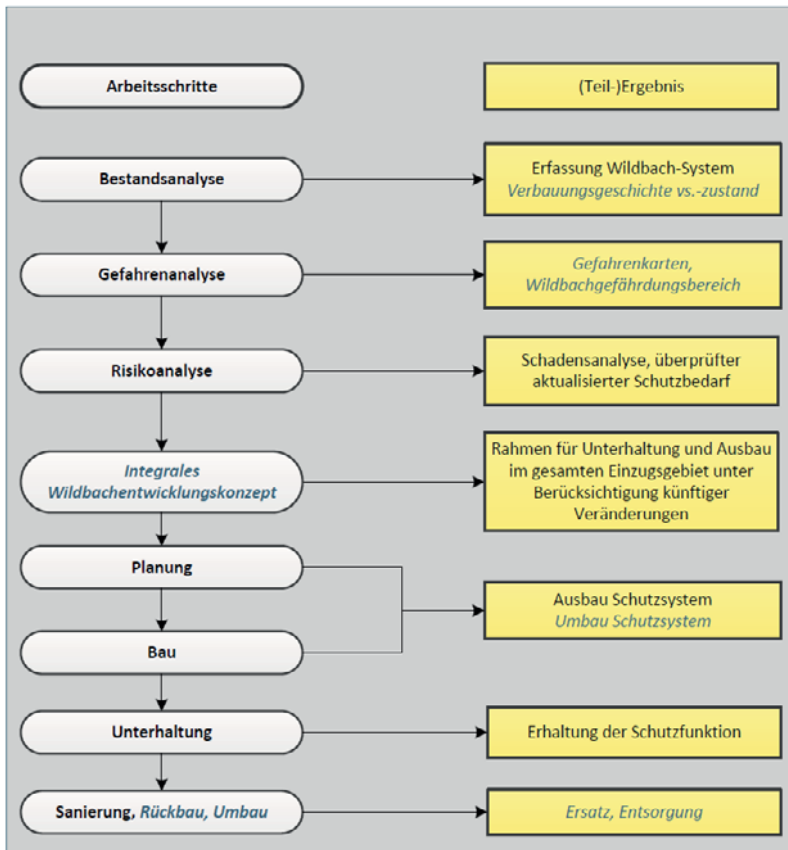


Abb. 3 Übersicht Gesamtkonzept zum Umgang mit Wildbachgefahren (*neue Elemente*)

3 Gefahrenanalyse

Die Gefahrenanalyse soll die Frage „Was kann passieren?“ beantworten. Sie ist die Grundlage für die sich anschließenden Schritte, die Risikobewertung („Was darf passieren?“) und vor allem das Risikomanagement („Was ist zu tun?“) mit der Ausarbeitung von integralen Schutzkonzepten. Zentrale Aufgabe der Gefahrenanalyse ist es, eine eher abstrakte Gefahrenlage konkret fassbar zu machen und darzustellen, um die zielführenden Konsequenzen für die Zukunft daraus abzuleiten. Ein Ergebnis einer Gefahrenanalyse ist ein rechtlich festzusetzender Wildbachgefährdungsbereich (WGB).

Gemäß Bayerischem Wassergesetz (BayWG) sind durch die Wasserwirtschaftsverwaltung Wildbachgefährdungsbereiche zu ermitteln und von der Rechtsbehörde durch Verordnung festzusetzen. Hierbei handelt es sich im rechtlichen Sinn zunächst um Überschwemmungsgebiete (infolge eines 100-jährlichen Hochwassers), jedoch unter Berücksichtigung wildbachtypischer Eigenschaften. Wildbachtypisch bedeutet neben einer zeitweise hohen Wasserführung vor allem die Beteiligung von Feststoffen am Prozessgeschehen. Feststoffe, wie Geschiebe und Schwemmholz, nehmen bei der Ermittlung von WGB eine zentrale Stellung im modularen System ein. Gemäß dem Stand der Technik wurde vom Bayerischen Landesamt für Umwelt (LfU) eine standardisierte Methode dazu entwickelt und in Form einer Loseblattsammlung zur Ermittlung und Festsetzung von Wildbachgefährdungsbereichen festgelegt. Hauptbestandteile dieses Teils der LBS WI sind die in Abb. 4 dargestellten Bausteine. Die in den Vorarbeiten ermittelten Grundlagen sind Basis für die folgenden Bausteine Hydrologie, Geschiebe und Schwemmholz. Deren Ergebnisse werden wiederum im Baustein Hydraulik zusammengeführt. Die hydraulische 2D-Simulation wird schlussendlich in Karten dargestellt zur Ausweisung der WGB herangezogen. WGB werden lediglich für bestehende und zukünftige Baulandflächen und zugehörige Verkehrsflächen – den sogenannten raumrelevanten Bereich – ermittelt und rechtlich festgesetzt. In den festgesetzten WGB besteht sodann grundsätzliches Bauverbot, von denen nur in Ausnahmefällen, unter kumulativer Erfüllung mehrerer Bedingungen, abgewichen werden darf.

Das Fachkonzept zur Ermittlung von Wildbachgefährdungsbereichen gibt eine standardisierte einheitliche Vorgehensweise für Bayern nach dem Stand der Technik vor. Ziele sind fundierte, zuverlässige, vergleichbare und nachvollziehbare Ergebnisse sowie eine wirtschaftliche Durchführung. Dieses Standardverfahren wird aber nicht eins-zu-eins auf jedes Wildbacheinzugsgebiet angewendet werden können. Es wird Sonderfälle geben, die eine Anpassung im Einzelfall notwendig machen. Das Fachkonzept gibt dem Bearbeiter die erforderlichen Arbeitsschritte und die zu verwendenden Methoden vor. Dennoch sollte diese Leitlinie nicht „blind“ angewendet, sondern im Rahmen der Untersuchung stets kritisch hinterfragt werden. Ein wichtiger Bestandteil im Rahmen der Ermittlung eines Wildbachgefährdungsbereichs sind Geländebegehungen – beispielsweise für die Systemerfassung und -charakterisierung, die Abschätzung des Leitprozesses und die Abgrenzung des Untersuchungsgebiets. Wesentliches Element der einzelnen Bausteine ist die Plausibilisierung der Ergebnisse. Eine gute Hilfestellung, um die Qualität der ermittelten Ergebnisse einschätzen zu können, kann eine umfangreiche und vollständige Ereignisdokumentation sein.

Möglichkeit, aber auch Herausforderung, für das Fachkonzept ist, das Verfahren stets auf dem Stand der Technik zu halten und wissenschaftliche Weiterentwicklungen in den einzelnen Fachgebieten in die Leitlinie einfließen zu lassen.

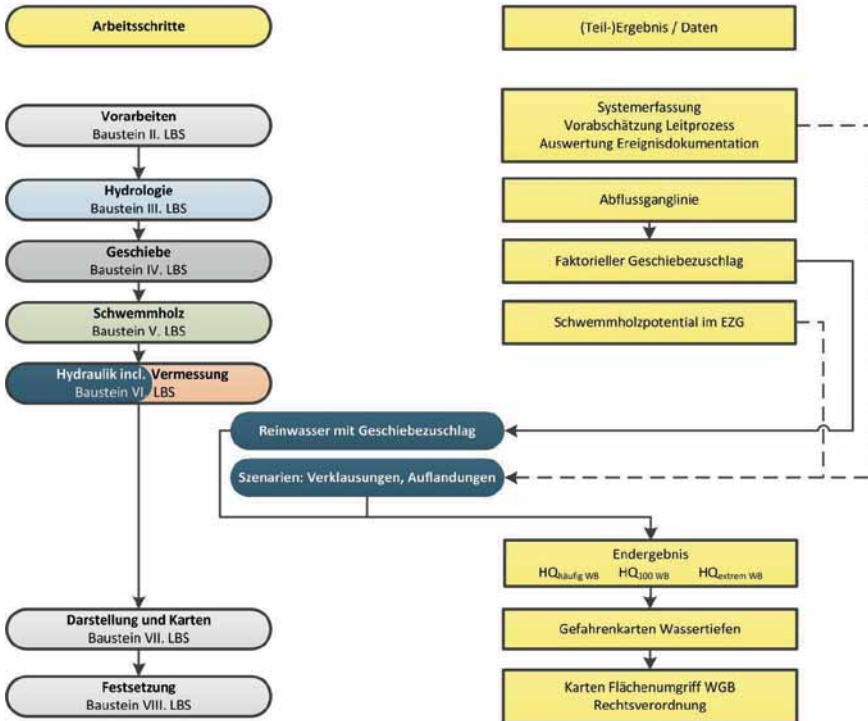


Abb. 4 Überblick über die einzelnen Bausteine des Fachkonzepts zur Ermittlung von Wildbachgefährdungsbereichen

Baustein Hydrologie

Zur Ermittlung des 100-jährlichen Reinwasserabflusses eines Wildbacheinzugsgebiets kommt in Bayern vorwiegend eine Niederschlags-Abfluss-Modellierung nach dem SCS-Verfahren (Soil Conservation Service) modifiziert nach Caspary zum Einsatz. Das gesamte Verfahren ist als Tabellenkalkulation umgesetzt. Die Niederschlagswerte werden dabei dem KOSTRA-Atlas (Koordinierte Starkniederschlags-Regionalisierungs-Auswertung) des Deutschen Wetterdienstes entnommen.

In den wenigen Einzugsgebieten, die über einen Abflusspegel und entsprechend langjährige Beobachtungen des Abflussgeschehens im Wildbach verfügen, kann der 100-jährliche Reinwasserabfluss auch über Extremwertstatistik bestimmt werden.

Baustein Geschiebe

Im Baustein Geschiebe liegt der Fokus auf dem Zusammenspiel von Geschiebepotential und -transport, um die Größenordnung des Geschiebezuschlags festzulegen. Dieser wird als Faktor GZ ausgedrückt, mit welchem der Reinwasserabfluss volumetrisch beaufschlagt wird. Die Methode zur Bestimmung des Geschiebezuschlags wurde für den in Bayern dominanten

Prozesstyp des fluviatilen Geschiebetransports entwickelt. Der Betrachtungsansatz fasst den Schwebstofftransport, den Volumenanteil des Geschiebes sowie die Bewegung der Sohle zusammen. Auflandung und Sedimentabtrag (Erosion) können durch ihn nicht abgebildet werden und müssen in der hydraulischen Simulation auf andere Weise in Szenario-Berechnungen berücksichtigt werden. Abhängig davon, ob transport- oder geschiebelimitierte Verhältnisse den Geschiebehaushalt des betrachteten Wildbachs prägen, ist für die Bestimmung des GZ die Berechnung der Transportkapazität (transportlimitiert) oder die Klassifizierung des GZ (geschiebelimitiert) zu wählen.

Eine klare Limitierung des Geschiebetransportes ist gegeben, wenn der Bach vor Eintritt in den raumrelevanten Bereich einen ausreichend langen Abschnitt durchläuft, welcher die Eigenschaften einer Umlagerungsstrecke besitzt und ein Gefälle aufweist, das deutlich geringer ist als das Pauschalgefälle des Bachs. Für einen solchen Abschnitt – die sogenannte Schlüsselstrecke – erfolgt die Berechnung der Transportkapazität, aus der sich ableiten lässt, welche Geschiebefracht beim Eintritt in den raumrelevanten Bereich zu erwarten ist.

Bei der Methode zur Klassifizierung des GZ wird der Geschiebezuschlag mithilfe eines Fragebogens abgeschätzt. Dies ermöglicht eine „gelenkte Experteneinschätzung“ nach objektiven und nachvollziehbaren Kriterien. Die Fragen sind in die beiden Themenblöcke Geschiebepotential und -verlagerung aufgeteilt. Die im Fragebogen zu bewertenden Kriterien stammen aus Auswertungen zahlreicher praktischer und wissenschaftlicher Untersuchungen zum Geschiebetransport. Eine teilweise thematische Überschneidung der Fragen soll eine Redundanz bewirken und dazu beitragen, eine Verzerrung des Ergebnisses durch subjektive Einflüsse zu minimieren. Jeder Frage sind vier mögliche Antworten mit der entsprechenden Punktezahl (zwischen 0 und 3) zugeordnet. Die jeweilige Summe der Punkte aus der Bewertung des Geschiebepotentials und der -verlagerung ergibt eine Intensitätsklasse: gering, mäßig oder hoch. Der GZ ergibt sich aus der Kombination der Intensitätsklassen mittels einer Matrix (vgl. Abb. 5).

Matrix Geschiebezuschlag

Geschiebepotential [Punkte]	16-24 hoch	1,1-1,2	1,2-1,3	1,3-1,4
	8-16 mäßig	1,05-1,1	1,1-1,2	1,2-1,3
	0-8 gering	1,05-1,1	1,05-1,1	1,1-1,2
		0-7 gering	7-14 mäßig	14-21 hoch
		Geschiebeverlagerung [Punkte]		

Abb. 5 Matrix zur Bestimmung des Geschiebezuschlags anhand der Kriterien Geschiebepotential und Geschiebeverlagerung

Baustein Schwemmholz

In einem nächsten Arbeitsschritt im Rahmen der Gefahrenanalyse erfolgt die Evaluierung möglicher Gefahren durch Schwemmholz. Zunächst einmal ist zu untersuchen, ob Schwemmholz während abgelaufener Ereignisse im Einzugsgebiet eine Rolle spielte und zu Problemen führte. Der nächste Schritt umfasst die Analyse, inwiefern die Problematik auch heute noch von Bedeutung ist oder eine bisher noch nicht erfasste Gefährdung zu berücksichtigen ist. Ergeben die Voruntersuchungen Anhaltspunkte für eine mögliche Schwemmholzproblematik, muss der Baustein Schwemmholz weiter bearbeitet werden.

Bisher wurde die Schwemmholzmenge entweder durch empirische Formelansätze berechnet oder im Zuge von Geländebegehungen gutachterlich abgeschätzt. Einen neuen Ansatz stellt ein eigens entwickeltes GIS-Tool dar (Meyer, Rimböck, 2014), welches den vorhandenen digitalen Datenbestand systematisch nutzt, um eine erste Abschätzung der potentiellen Schwemmholzmenge im Einzugsgebiet zu liefern, welche ggf. in einer nachfolgenden Geländebegehung verifiziert bzw. falsifiziert wird. Es werden unterschiedliche Prozessflächen, welche als Module in das Schwemmholz-Tool integriert wurden und wahlweise deaktiviert werden können.



Abb. 6 Ausweisung der relevanten Prozessflächen: Windwurfflächen (grün), Uferbestockung (blau), Ufererosion (orange). In diesem Beispiel erreicht keine Rutschungsfläche den Flussschlauch.

In einem zweiten Schritt müssen potentielle Verklausungsstellen im raumrelevanten Bereich mithilfe eines Aufnahmebogens erfasst und die Verklausungsgefahr für die Engstellen eingestuft werden. Im Rahmen der Gefahrenbeurteilung sind hierfür zwei Aspekte maßgeblich: der Schwemmholztransport und die Engstelle selbst. Anhand einer zielgerichteten Experteneinschätzung wird ein Verschlussgrad für die untersuchten Kreuzungsbauwerke bestimmt.

Baustein Hydraulik

Der Einsatz hydrodynamisch-numerisch basierter 2D-Modelle entspricht dem derzeitigen Stand der Technik für die Berechnung fluviatiler Prozesse. In Bayern kommt das Programm HYDRO_AS-2D zur Anwendung. Die Ergebnisse der Bausteine „Hydrologie“, „Geschlebe“ und

„Schwemmholz“ sind in das hydraulische Modell zu implementieren, um die wildbachtypischen Eigenschaften abbilden zu können.

Die Hydrologie findet als Randbedingungen (Ganglinie) Eingang ins hydraulische Modell. Geschiebe wird einerseits über den faktoriellen GZ, andererseits über Szenarien durch Auflandungen und/oder Sohlerosionen berücksichtigt. Mit dem GZ wird die hydrologische Ganglinie faktoriell erhöht. Standardmäßig wird in der Hydraulik eine Berechnung mit dem Reinwasserabfluss HQ_{100} und einem Geschiebezuschlag (mindestens 5 %) durchgeführt. Die Umsetzung von Auflandungen und/oder Sohlerosionen im hydraulischen Modell erfolgt anhand einer Modellanpassung (Anhebung/Absenkung der Netzknoten). Ebenfalls über Szenarien werden mögliche Verklausungen berücksichtigt. Im hydraulischen Modell wird dafür eine Reduktion des Abflussquerschnitts vorgenommen.

Je nach Situation können zusätzlich mehrere Szenarien gerechnet werden. Szenarien sind für das Bemessungsereignis nur dann heranzuziehen, wenn von einem Eintreten sehr wahrscheinlich auszugehen ist. Die Umhüllende der Überflutungsflächen aller Berechnungen ergibt den festzusetzenden Wildbachgefährdungsbereich – das Hauptergebnis der Gefahrenanalyse. Darüber hinaus werden, zum Beispiel für HQ_{extrem} , Hinweiskarten erstellt.

4 Integrale Wildbachentwicklungskonzepte

Zentraler neuer Bestandteil des Gesamtkonzeptes ist die Ausarbeitung sogenannter integraler Wildbachentwicklungskonzepte (IWEK). Diese sollen einen Rahmen für die künftige Entwicklung des gesamten Schutzsystems vorgeben und damit die Basis für alle folgenden Ausbau- und Unterhaltungsmaßnahmen im Einzugsgebiet bilden. Wichtige neue Elemente darin sind:

- Betrachtung der seit den Anfängen des Schutzsystems veränderten Rahmenbedingungen
- Berücksichtigung von absehbaren oder vermuteten künftigen Entwicklungen (z.B. Siedlung, Tourismus, Klima)
- Auf dieser Basis:
 - Überprüfung des Schutzbedarfes und der Schutzziele, gegebenenfalls Anpassung
 - Überprüfung des gesamten Bestandes an Schutzelementen im Einzugsgebiet auch vor historischem Hintergrund („Wann wurde das gebaut und warum?“) und hinsichtlich der erforderlichen Funktion („Ist die Funktion im künftigen Schutzsystem noch (so) nötig?“, „Erfüllt das Bauwerk die nötige Funktion?“, „Könnte sie anders besser erfüllt werden?“)
- Berücksichtigung des Überlastfalles

Bereits vorhandene, aber gestärkte Elemente oder Aspekte der Konzepte sind:

- Risikoanalyse
- Betrachtung des gesamten Einzugsgebietes, um die vielfältigen Wechselwirkungen in den Wildbacheinzugsgebieten zu berücksichtigen
- Anwendung moderner Berechnungsverfahren unter Nutzung der umfangreichen digitalen Daten
- Betrachtung der langfristigen Kosten unter Berücksichtigung der Betriebs-, Unterhaltungs- und Reinvestitionskosten

Mit den so erarbeiteten integralen Wildbachentwicklungskonzepten sollen folgende Ziele erreicht werden:

- langfristig wirtschaftliche Schutzkonzepte und Lösungen, auch hinsichtlich der Betriebs- und Unterhaltungsaufwendungen
- Schaffung flexibler und anpassungsfähiger Systeme, um auf künftige Veränderungen reagieren zu können
- nachhaltige Lösungen, durch Einbeziehung aller Elemente und aller Beteiligten des integralen Risikomanagements
- bestmögliche Nutzung von Synergien durch optimal aufeinander abgestimmte Unterhaltung, Anpassung, Umbau und weiteren Ausbau

In diesen durch die integralen Wildbachentwicklungskonzepte gesteckten Rahmen sollen künftig alle Sanierungs- und Unterhaltungsmaßnahmen, aber auch Ausbauten oder Umbauten eingepasst werden.

5 Hochwasserereignisse 2016

Die Hochwasserereignisse aus dem Jahr 2016 passen nicht in das Muster der Ereignisse aus den Jahren zuvor (1988, 1999, 2002, 2005 und 2013). Ereignisse, wie beispielsweise das Junihochwasser 2013 an der Donau, können als große Flussgebietshochwasser bezeichnet werden. Weite Teile Bayerns waren dabei großflächig einem mehrtägigen Dauerregen ausgesetzt. Im Mai und Juni 2016 traten jedoch über Wochen verteilt viele lokal sehr begrenzte Ereignisse an unterschiedlichen Orten über nahezu ganz Bayern verteilt auf und führten hauptsächlich an vielen kleinen Gewässern zu enormen Schäden in den anliegenden Ortschaften, aber auch durch intensive Oberflächenabflüsse (ohne Gewässer).

Bedingt durch eine außergewöhnliche Wetterlage bildeten sich kleinräumige, ortsfeste Gewitterzellen. Zudem waren die Böden teilweise schon stark durchfeuchtet. Immer wieder sorgten lokal begrenzte Starkniederschläge dafür, dass kleine Bäche ohne ausreichende Vorwarnzeit über die Ufer traten und sich im Extremfall sogar zu reißenden Strömen entwickelten. Diese Starkregenereignisse können gerade in Gewässern mit kleinen Einzugsgebieten sehr schnell ansteigende sturzflutartige Hochwasserwellen erzeugen. Eine Erweiterung der Wildbachstrategie und -vorgehensweise auf derartige wildbachähnliche Gewässer könnte eine Konsequenz aus der Aufarbeitung der letzten Ereignisse sein.

Bei den Ereignissen im vergangenen Jahr führte auch wild abfließendes Wasser (Oberflächenabfluss) zu Schäden. Es waren also nicht nur in unmittelbarer Nähe von Gewässern liegende Gebiete betroffen. Die besondere Problematik in diesem Fall ist, dass die Anwohner in der Regel nicht mit einem Hochwasser rechnen, da kein Gewässer in der Nähe ist. Entsprechend unvorbereitet werden sie vom Wasser überrascht. Besonders im bewegten Gelände muss ziemlich überall mit Oberflächenabfluss gerechnet werden, wenn große Niederschlagsmengen in kurzer Zeit fallen.

Bei Hochwasser können auch Feststoffe von den Fluten mittransportiert werden. Dabei handelt es sich um natürliche Materialien wie Holz, Geschiebe, Feinteile, Gestrüpp oder Pflanzen, aber auch andere Gegenstände (Silageballen, Autos, ...). An Engstellen oder Abflusshindernissen im Gewässerlauf können durch diese Feststoffe Verklausungen auftreten. Wenn sich ein dichter Verklausungskörper bildet, lässt dieser im Extremfall so gut wie kein Wasser mehr

durch. Das Gewässer ist an dieser Verklausungsstelle folglich gezwungen, das eigentliche Gewässerbett zu verlassen und sich einen neuen Weg zu suchen. Bei einigen Ereignissen im vergangenen Jahr konnte eine Verschärfung der Hochwassersituation durch Verklausungen beobachtet werden.

Zahlreiche Ortschaften besitzen einen technischen Hochwasserschutz in Form von Deichen, Hochwasserschutzmauern oder Rückhaltebecken. Gerade die Ereignisse 2016 haben aber eindrucksvoll vor Augen geführt, dass es trotz Schutzmaßnahmen keine hundertprozentige Sicherheit gibt. Hochwasserschutzanlagen sind auf ein definiertes Bemessungsereignis ausgelegt. Die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von größeren (selteneren) Ereignissen ist zwar statistisch gesehen gering, aber nicht Null. Für die Hochwasserschutzanlagen bedeutet dies den Überlastfall. Durch technische Maßnahmen muss – soweit möglich – verhindert werden, dass diese Anlagen schlagartig versagen, wenn sie außerplanmäßig beansprucht werden. Über darüber hinaus gehende Vorsorgemaßnahmen, v.a. Alarm- und Einsatzpläne, sollten in solchen Fällen zumindest die Schäden verringert werden.

6 Schlussfolgerungen und Fazit

Die abgelaufenen Ereignisse bieten Anlass, die Schutzstrategien einer, neben der laufenden Anpassung und Fortschreibung, vertieften Überprüfung zu unterziehen, um mögliches Verbesserungspotential erkennen zu können. Auch für das bayerische Hochwasserschutzaktionsprogramm 2020plus ergeben sich aus den Erkenntnissen der Ereignisse aus dem Jahr 2016 weitere Optimierungen. So werden neue Bausteine hinzukommen, andere intensiviert werden. Beispielsweise seien genannt:

Es sollen weitere **Gefahrenkarten** erstellt werden, die eine unverzichtbare Basis für das weitere Risikomanagement darstellen. Die Ereignisse 2016 haben gezeigt, dass hierbei besonders die berechneten HQ_{extrem} -Karten sowie die Betrachtung des Überlastfalls wichtige Grundlagen darstellen. Dazu werden insbesondere folgende Aspekte in die Überlegungen miteinbezogen:

- Gefahrenkarten für Bach- und Flusshochwasser an weiteren Gewässern erstellen.
- Erarbeitung eines Verfahrens zur Ermittlung von Bereichen, die infolge von Starkregenereignissen durch Oberflächenabfluss besonders gefährdet sein könnten.
- Regelmäßige Überprüfung vorhandener Gefahrenkarten und Sonderszenarien, welche durch Verklausungen oder sonstigen lokalen Besonderheiten entstehen können (zum Beispiel Straßendämme, Stauanlagen, Poldersituationen von Gemeindeteilen, etc.).

Im Bereich Land- und Forstwirtschaft wirken zahlreiche Maßnahmen positiv auf den Wasserhaushalt und können zu einer Begrenzung oder Minderung von Hochwasserschäden beitragen. Ein wichtiger Punkt ist dabei die Ausarbeitung von Handlungsempfehlungen zur effektiveren Umsetzung von **Erosionsschutzmaßnahmen** und zum Rückhalt von wild abfließendem Wasser beziehungsweise für eine verbesserte Infiltration insbesondere auf Ackerflächen. Hierzu ist eine noch intensivere Zusammenarbeit der Fachbehörden erforderlich.

Trotz aller Anstrengungen wird immer ein Risiko verbleiben. Dieses **verbleibende Risiko** darf nicht verdrängt oder vernachlässigt werden, sind doch in solchen Fällen vor allem die Schäden enorm. Dazu müssen folgende Gedanken und Elemente schon in den Planungen betrachtet bzw. später realisiert werden:

- resiliente (d.h. widerstandsfähige) Schutzsysteme und Bauweisen, die Reserven beinhalten und auch im Extremfall gewährleisten, dass kein plötzliches Versagen von Schutzbauwerken auftritt und so die Schäden begrenzt werden
- weitere Elemente aus dem Bereich der Vorsorge

Eine komplette Beherrschung von Überlastfällen ist wirtschaftlich und technisch nicht möglich.

Als Fazit aus den Erkenntnissen der Ereignisse 2016 kann festgehalten werden: Mit dem Hochwasserschutz-Aktionsprogramm 2020 und seiner Fortschreibung, dem Programm 2020plus, werden die richtigen Strategien zum Schutz der Menschen und bedeutender Sachwerte verfolgt. Die Strategien und Programme sind flexibel auf spezielle Rahmenbedingungen im Einzelfall anzupassen. Auch, um neue Erkenntnisse aus abgelaufenen Hochwasserereignissen einfließen zu lassen. Die Wasserwirtschaftsverwaltung im Zusammenwirken mit vielen anderen Beteiligten ist mit der Hochwasserschutzstrategie auf dem richtigen Weg. Es wurde schon viel erreicht – es gibt aber auch noch viel zu tun.

Literatur

Bayerisches Landesamt für Umwelt (2017). Sturzfluten- und Hochwasserereignisse Mai/Juni 2016, Wasserwirtschaftlicher Bericht; Augsburg; 2017.

Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (2014). Hochwasserschutz Aktionsprogramm 2020plus; München; Juni 2014.

Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (2015): Wildbachbericht Bayern – Teil 1: Grundlagen, Gefahren, Herausforderungen; Eigenverlag; 2015.

Dressel, P.; Wagner, P.; Mayer, K.; Rimböck, A. (2017). Umgang mit Feststoffen bei der Ermittlung von Wildbachgefährdungsbereichen in Bayern; Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft Band 69, 3-4/17, Seite 140-154; Springer Verlag; Wien 2017.

Meyer, J.; Rimböck, A. (2014). GIS basierter Ansatz zur Abschätzung des Schwemmholtzpotenzials in Wildbächen; Internationales Symposium „Wasser- und Flussbau im Alpenraum“, 25.-27.06.2014 in Zürich; Tagungspublikation S. 443 ff; Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glazialogie der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich Nr. 228; Eigenverlag; Zürich.

Anschrift der Verfasser

Dr.-Ing. Andreas Rimböck

Bayerisches Landesamt für Umwelt, Referat 61 – Hochwasserschutz und alpine Naturgefahren, Bürgermeister-Ulrich-Straße 160, D-86179 Augsburg
andreas.rimboeck@lfu.bayern.de

Dipl.-Ing. Rainer Höhne

Bayerisches Landesamt für Umwelt, Referat 61 – Hochwasserschutz und alpine Naturgefahren, Bürgermeister-Ulrich-Straße 160, D-86179 Augsburg
rainer.hoehne@lfu.bayern.de

Das Hochwasserereignis am Simbach im Sommer 2016

Johannes Hübl

Zusammenfassung

Am 1. Juni 2016 führte eine Schauerzelle mit sehr hohen Niederschlägen im Einzugsgebiet des Simbachs (Landkreis Rottal-Inn) zu äußerst hohen Abflüssen, wobei fünf Todesfälle und massive Schäden zu verzeichnen waren. Da es im Rahmen des Ereignisses auch zu einem Dammversagen oberhalb des Ortes und eines Deichbruches in der Stadt Simbach kam, wurde dieses augenscheinliche technische Versagen medial als Ursache einer Flutwelle und damit als primärer Schadensverursacher genannt. Deshalb sollte eine von der Universität für Bodenkultur-Wien durchgeführte Dokumentation und Analyse des Ereignisses im Auftrag des Bayerischen Landesamtes für Umwelt die Auswirkung des Versagens der technischen Bauwerke quantifizieren.

Die nach dem Ereignis durchgeführte Dokumentation soll die Frage: „Wann ist wo was passiert?“ beantworten und eine räumlich-zeitliche Rekonstruktion des Ereignisses ermöglichen. Die Ereignisanalyse erfolgt durch die Koppelung eines hydrologischen mit einem hydraulischen Modell, basierend auf Messdaten des Niederschlages und der Abflusstiefe in Simbach. Zur Überprüfung der Simulationsergebnisse wird die ausgewertete Dokumentation herangezogen. Bei ausreichender Übereinstimmung der simulierten Abflussdynamik mit dem realen Schadereignis werden das Dammversagen und der Deichbruch im Modell nicht mehr berücksichtigt, sodass ein Vergleich mit und ohne Bruch bzw. Versagen möglich ist.

Die Simulationen zeigen, dass die Überflutungsfläche mit und ohne Dammversagen in etwa gleich groß ist, der Deichbruch die Überflutungsfläche im Polder Erlach jedoch vergrößert. Im Ortsbereich nehmen die Abflusstiefen durch das Dammversagen im Schnitt um einen halben Meter zu. Das bedeutet, dass das Ortsgebiet von Simbach jedenfalls durch das Hochwasser massiv beaufschlagt worden wäre, die Bauwerksversagen die Abflusssituation aber verschärft haben.

1 Das Einzugsgebiet des Simbaches

Mit einem Einzugsgebiet von 30,3 km² ist der Simbach ein linksufriger Zubringer zum Inn, der in der gleichnamigen Stadt in den Inn mündet. Bei Hektometer (hm) 25 vereinigen sich die beiden Zubringer, der Antersdorfer- und Kirchbergerbach zum Simbach. Das Einzugsgebiet ist durch einen hügeligen Charakter geprägt und besteht überwiegend aus tiefgründigen, bindigen Böden mit geringen Infiltrationsraten aber hohem Speichervermögen. Der Großteil der Einzugsgebietsfläche ist land- und forstwirtschaftlich geprägt. Die Waldfläche nimmt 32 % ein, das zumeist für den Maisanbau genutzte Ackerland 29 % und das Grünland 23 %. Der Flächenanteil mit der Nutzung Siedlungsfläche und Verkehrsfläche weist einen Anteil von 13 % auf.

Das Gerinne queren bei hm 22,5 und hm 17,3 zwei Straßendämme (Abb. 1) mittels Wellstahldurchlässen mit einer Durchflussfläche von jeweils rund 18 m². Bei hm 10,4 beginnt die Ortsregulierung in Zementmörtelmauerwerk mit einem trichterförmigen Einlaufbauwerk. In diesem Abschnitt queren fünf Brücken das Gerinne. Der Ortsbereich von Simbach ist von

Hochwässern des Inns durch Deiche geschützt, wodurch die Polder Simbach und Erlach gebildet werden.



Abb. 1: Einzugsgebiet Simbach

2 Ereignisdokumentation

Die Ereignisdokumentation liefert die Eingangsdaten zur Rekonstruktion des räumlichen und zeitlichen Ablaufes eines Ereignisses. Sie versucht durch Messungen im Feld, Befragungen von Augenzeugen und Nutzung von Bilddokumentationen unterschiedliche Ereignisphasen sowohl räumlich als auch zeitlich zu identifizieren, zu beschreiben und ihre Ursachen zu ermitteln. Die Erhebungen dazu fanden kurze Zeit nach dem Ereignis statt.

Fotos und Videos zum Ereignis, die entweder von Anrainern oder öffentlichen Einrichtungen zur Verfügung gestellt oder aus dem Internet abgerufen wurden, wurden nach einer Qualitätsprüfung mit Metadaten versehen. Dazu wurde der IPTC-Standard verwendet. Für alle Bilder oder Videos wurden der Ersteller, Ort der Erstellung und Uhrzeit in die Metadaten eingetragen. Die Uhrzeit wurde wenn nötig und möglich in MEZ (CET) geändert, um sie später mit Messdaten vergleichen zu können. Schlussendlich wurden die Verwendungsrechte und das Copyright der Bilder oder Videos in den Metadaten vermerkt. Als ein wesentliches Produkt der Ereignisdokumentation ist die Karte der Überflutungsfläche (Abb. 2) anzusehen, die auf Basis der Felderhebungen erstellt wurde.

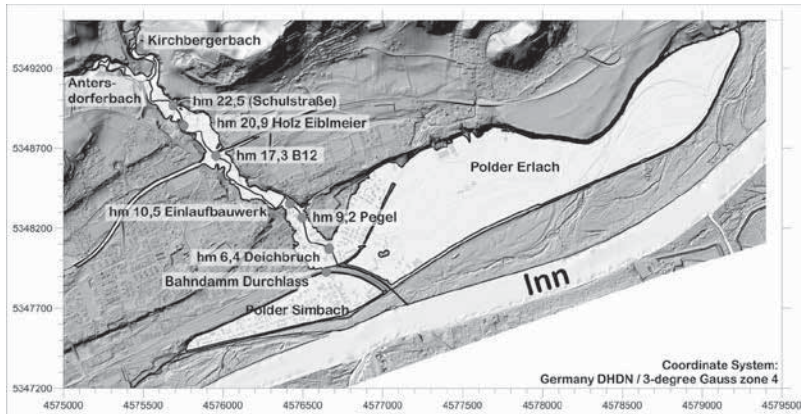


Abb. 2: Überflutungsfläche im Ortsbereich Simbach (Hübl et al., 2017a)

3 Beschreibung des Ereignisses

Schon am Morgen und frühen Vormittag des 1. Juni 2016 treten erhöhte Abflüsse auf, die jedoch im Gerinne abgeführt werden. Ab 11:11 (Zeitangaben alle in MEZ) wird der Lagerplatz der Firma Holz Eiblmeier (hm 20,9) geflutet und ab 12:30 das gelagerte Holz abgeschwemmt, nachdem die Dammkrone des etwas oberhalb liegenden Straßendamms Schulstraße (hm 22,5) überstrichen wird. Um 12:34 wird im Rückstaubereich eine Einstauhöhe von 8,9 m bei einem retendierten Volumen von rund 120 000 m³ vor dem teilverklausten maulförmigen Wellstahldurchlass erreicht. Dies bedeutet oberwasserseitig eine Tiefe von 1,8 m über Fahrbahnniveau. Die luftseitige Böschung wird durch das überströmende Wasser erodiert, ab 12:37 beginnt sich eine Bresche im Damm zu entwickeln (Abb. 3). Innerhalb von längstens 20 Minuten tieft sich der Bach auf das ursprüngliche Sohlenniveau ein.



Abb. 3: Damm Schulstraße um 12:37 kurz vor dem Versagen (Quelle: Blöchl, M.)

Der gerinneabwärts gelegene Damm der Bundesstraße 12 (hm 17,3) wird ab 12:35 überflossen, obwohl das Durchlassrohr nicht verlegt war. Hinter dem Damm werden bis auf Straßenniveau rund 100 000 m³ retendiert. Die in diesem Bereich Richtung Westen eingeschnittene Bundesstraße 12 wird auf einer Länge von rund 1 km bis über 2,5 m eingestaut. Durch den Breschenabfluss erhöht sich die Abflusstiefe ab 12:54 beim Rohreinlass auf 8,1 m, das zurückgestaute Volumen auf fast 180 000 m³. Im Ortsbereich (hm 8 bis 11) überbort der Simbach ab 12:20. Der Abfluss erfolgt über das Straßennetz in die Polder Simbach und Erlach. Am Pegelstandort bei hm 9,2 wird um 12:38 eine Abflusstiefe von über 3,6 m erreicht. Der Schwall durch das Dammversagen erreicht um 12:55 den Ort (Abb. 4).



Abb. 4: Vergleich der Abflusssituation im Bereich des Einlaufbauwerks (Quelle: Köck, G.) (links:unbeeinflusster Hochwasserabfluss; rechts: Hochwasserabfluss überlagert mit dem Breschenabfluss)

Dieser führt das Sägeholz sowie weiteres Wildholz mit, das in weiterer Folge die Abflussverhältnisse im Ortsbereich beeinflusst. Der Wasserstand am Pegel steigt bis um 13:15 auf den Höchststand von 5,1 m an. Der gerinneabwärts gelegene linksufrige Deich an der Wilhelm-Dieß Straße bei hm 6,4 wird ab 12:45 überströmt und bricht um 13:00 Uhr (Abb. 5).



Abb. 5: Abflusssituation an der Wilhelm-Dieß Straße um 13:12. Der linksufrige Deich ist an zwei Stellen gebrochen, trotzdem erfolgt ein bordvoller Abfluss in den Inn. Das Wasser strömt aus dem Rückstau vor dem Bahndamm Durchlass (im Bild links) über das Gerinne in den Polder Erlach (Quelle: Gschneidner, L.)

Ein Teil des Abflusses wird direkt in den Polder Erlach abgeleitet und führt dort zu einem raschen Anstieg des Wasserspiegels. Der rechtsufrige Abfluss auf der Inn-Straße Richtung Polder Simbach wird durch den sieben Meter breiten Bahndamm Durchlass gedrosselt, die Einstauhöhe vor dem Durchlass beträgt bis zu 3,7 m. Die aufgemessenen Anschlagmarken weisen auf ein Rückstauvolumen im Polder Simbach von 400 000 m³, im Polder Erlach auf 1,5 bis 1,7 Mio. m³ hin.

4 Ereignisanalyse

4.1 Ermittlung des Gebietsniederschlages

Die Großwetterlage Tief Mitteleuropa (TM) beherrscht vom 22. Mai bis 4. Juni 2016 das Witterungsgeschehen in Deutschland. Das Tief zog von Westfrankreich über Mittel- und Süddeutschland und setzt sich im Südwesten Deutschlands bis zu seiner ersten Auflösung fest. In dieser Zeitspanne kommt es zu teils heftigen Gewittern und Hagelschauern welche zahlreiche Überflutungen, unter anderem in Braunsbach (Baden-Württemberg), zur Folge hatten. Am 31. Mai zogen von Polen und Tschechien kommend neuerlich Gewitter- und Niederschlagszellen in Richtung Deutschland. In der Nacht zum 1. Juni bildete sich die Gewitterlinie in Niederbayern aus, die zu den Überflutungen in Tann, Untertürken, Trifttern, Anzenkirchen und Simbach am Inn führte (Ziese et al., 2016).

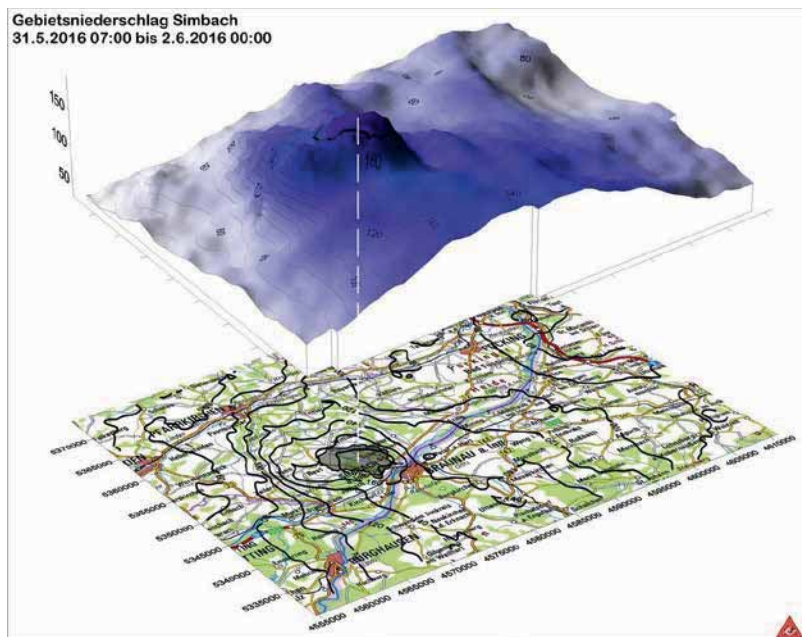


Abb. 6: Gebietsniederschlag für das Einzugsgebiet Simbach (Hübl et al., 2017a, verändert)

Vom 31.05. 00:00 bis 02.06. 00:00 registrierten 21 Niederschlagsstationen im Landkreis Rottal-Inn und Innviertel (Oberösterreich) eine mittlere kumulative Niederschlagssumme von 63 mm.

Die höchsten Niederschlagssummen wurden an der Station Simbach/Inn mit 184 mm, Ranshofen mit 151 mm und Braunau am Inn mit 108 mm gemessen. Die maximalen Intensitäten lagen in Simbach/Inn bei 5,6, in Eggenfelden bei 5,4 und in Wurmannsquick-Egelsberg bei 3,9 mm pro 5 Minuten. Die vom DWD zur Verfügung gestellten RY-Datensätze (Rastergröße 1 km²) wurden mit Hilfe von 21 Bodenstationen kalibriert. Die Kalibrierung erfolgte für jeden Zeitschritt der Radarniederschlagszeitreihe mit fünf unterschiedlichen Verfahren, wobei letztendlich das additive Verfahren Anwendung fand. Der berechnete Korrekturfaktor für jedes Stations-Radar-Paar wurde mittels Inversen Distanzenverfahrens auf das gesamte Radarfeld interpoliert. Der daraus berechnete Gebietsniederschlag vom 31.05.16 01:00 bis zum 02.06.16 00:00 beträgt für den Simbach 183,5 mm, wobei die Niederschlagshöhe im Einzugsgebiet von 162 bis 199 mm schwankt (Abb. 6). Die maximalen Intensitäten liegen im Einzugsgebiet zwischen 2,4 und 10,1 mm pro 5 Minuten.

4.2 Räumlicher Niederschlagsverlauf

Die Zugrichtung der Schauerzelle verläuft am 1. Juni von Nord nach Süd, sodass zuerst die oberen Teile des Einzugsgebietes betroffen werden und ab 11:30 die südlich gelegenen Teile. Ab diesem Zeitpunkt verlagert sich das Zentrum der Schauerzelle nach Osten, sodass anschließend bis um etwa 14:00 das gesamte Einzugsgebiet von dieser überdeckt ist. Die Verlagerung der Schauerzelle in Fließrichtung bedeutet eine Verschärfung der Abflusssituation.

4.3 Zeitlicher Niederschlagsverlauf

Die ereignisrelevante Niederschlagsdauer kann vom 31. Mai 07:00 bis zum 1. Juni 19:00 mit einer Regenhöhe von 182,7 mm angegeben werden. Innerhalb der ersten 24 Stunden fallen im Einzugsgebiet rund 63,9 mm Niederschlag. Vom 1.6. 07:00 bis 11:00 lässt sich ein Gebietsniederschlag von 27,4 mm ermitteln. Daran schließt bis 14:00 die Zeitspanne mit den höchsten Niederschlägen an. Innerhalb von 3 Stunden (8 Prozent der Niederschlagsdauer) regnet es rund 73,1 mm (40%). Von 14:00 bis 19:00 fallen noch rund 18,3 mm Niederschlag. Dieser zeitliche Niederschlagsverlauf kann als endbetont bezeichnet werden.

5 Ermittlung der Wasserstand-Durchfluss-Beziehung

Der Pegel Simbach mit der Messstellen-Nummer 18719006 ist im Siedlungsbereich bei hm 9,2 situiert. Die Aufzeichnung des Wasserstandes erfolgt über einen Radar- und über einen Druckpegel. Letzterer zeichnete den Wasserstand des Ereignisses durchgehend auf, der Radarpegel fiel jedoch ab 12:30 aus. Für den Pegelstandort liegt ein Pegelschlüssel des HND-Bayern vor, der bis zu einer Wassertiefe von rund 2,6 m angegeben wird. Um den beim Ereignis aufgetretenen Wasserstand einem Abfluss zuordnen zu können, musste der Pegelschlüssel bis auf über 5 m Wassertiefe und der durchflossene Querschnitt auf rund 100 Meter erweitert werden, wobei Gebäude, Straßen und bewachsene Flächen zu berücksichtigen waren. Die Ergebnisse von Berechnungen mit 1-D und 2-D-Modellen für den Pegelschlüssel zeigen große Differenzen in den resultierenden Abflüssen und Abflussfrachten. Tendenziell überschätzen die Berechnungen in 1-D die Abflüsse und Frachten in hohem Maße, wenn man die üblichen Rauigkeitswerte verwendet. Deshalb wurde die im 2-D-Modell mit zahlreichen Ganglinien entwickelte Wasserstand-Abfluss-Beziehung für alle weiteren Berechnungen festgelegt. Unter Anwendung dieses Pegelschlüssels erreicht der Abflussscheitel zwischen 13:00 und 13:15 einen Wert von knapp 300 m³/s am Pegelstandort. Die Abflussfracht für die Zeitdauer von 31.5.2016 07:00 bis 2.6.2016 07:00 ergibt rund 3,3 Mio. m³ (Abb. 7).

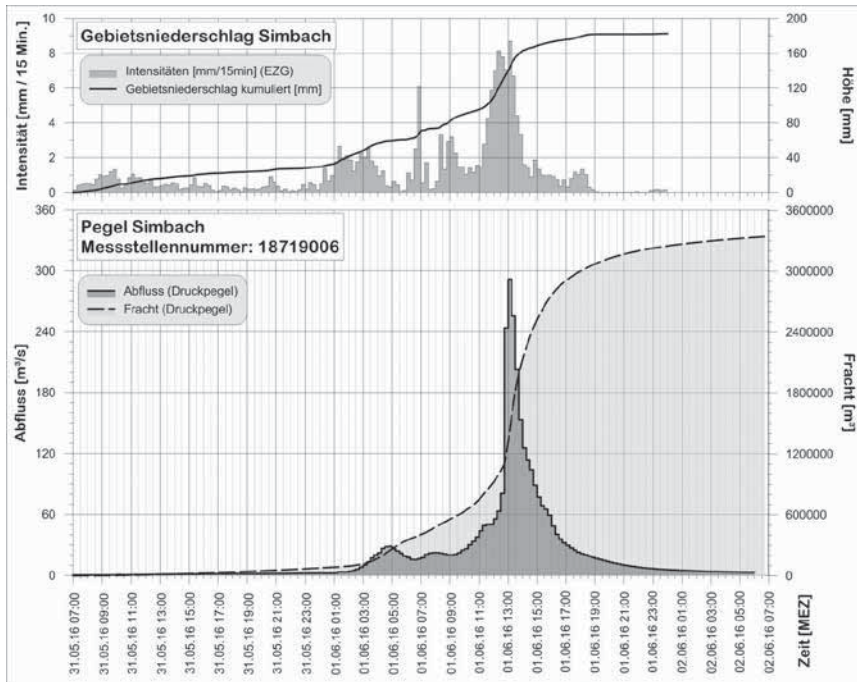


Abb. 7: Ermittelter Gebietsniederschlag und berechneter Abfluss beim Pegel Simbach auf Basis des neu erstellten Pegelschlüssels (Hübl et al., 2017b)

6 Niederschlag-Abfluss-Simulation

Für die hydrologische Simulation wurde das konzeptionelle Modell NASIM gewählt, das als Gebietsparameter topographische Daten, die Landnutzung, Bodenarten und Bodentypen verwendet. Die Abflusskonzentration wird mit Hilfe des Isochronenverfahrens durchgeführt und mit linearen und nicht linearen Speichern berechnet. Dafür wurde das Gesamteinzugsgebiet in 29 Teileinzugsgebiete mit einer mittleren Größe von ca. 0,5 km² untergliedert und die Zeitflächenfunktionen für jedes Teileinzugsgebiet ermittelt. Als Endknoten der Berechnung wird der Zusammenfluss der beiden Zubringerbäche bei hm 25 gesetzt, da die Wellenverformung durch die Speicherräume, durch den flächenhaften Abfluss im Ortsbereich und durch das Dammversagen erst im nachgeschalteten hydraulischen Modell berechnet wird.

Die Kalibrierung des Modells wurde vorerst für den Zeitraum 01.01.2014 bis zum 31.05.2016 mit einem Simulationsschritt von einer Stunde durchgeführt. Mit den ermittelten Modellparametern ließ sich jedoch das Ereignis nicht zufriedenstellend abbilden. Deshalb wurde das Ereignis mit dem höchsten aufgezeichneten Abfluss für eine Kalibrierung herangezogen, für das alle erforderlichen Eingangsdaten für einen Simulationsschritt von 5 Minuten vorhanden waren. Aber auch mit diesen Modellparametern konnte sowohl der sehr steile Anstieg der Hochwasserwelle als auch der Abflussscheitel nicht erreicht werden. Erst durch eine weitere Anpassung der Modellparameter, vor allem der Retentionskonstanten, konnte das Ereignis zufriedenstellend simuliert werden. Als Beurteilungskriterien werden der

ansteigende und abfallende Ast der gemessenen Ganglinie und die ermittelte Abflussfracht zusammen mit weiteren qualitativen Wasserstandsangaben aus der Ereignisdokumentation herangezogen. Aus dieser Simulation mit NASIM ergibt sich um 13:30 am Endknoten eine Abflussspitze von rund 175 m³/s, die Abflussfracht liegt etwa bei 3,1 Mio. m³. Bei hm 13,2 mündet ein kleiner Zubringer im Ortsbereich, der mit rund 0,2 Mio. m³ zur Abflussfracht beiträgt, sodass in Summe im Ereigniszeitraum (31.5.16 07:00 bis 2.6.16 00:00) 3,3 Mio. m³ abfließen.

7 Abfluss im Ortsbereich

Die komplexe Abflusssituation im Ortsbereich erfordert die Erstellung verschiedener Berechnungsnetze, um die Einflüsse von Verklausungen an Brücken, Ablagerungen von Nutz- und Grünholz, das Dammversagen an der Schulstraße sowie den Deichbruch abbilden zu können. Für die Verifikation werden an Punkten mit dokumentierten Anschlagmarken die berechneten mit den bekannten Wassertiefen verglichen und an Kontrollquerschnitten wird der zeitliche Verlauf des Wasserstandes und des Abflusses protokolliert und mit Zeugenaussagen, Foto- und Videomaterial verglichen. Für die hydraulische 2-D-Simulation im Ortsbereich werden 3 Szenarien definiert, um die Auswirkung des Dammversagens und Deichbruches auf den Abfluss im Ortsbereich bestimmen zu können.

Szenario 1: Abfluss erfolgt ohne Dammversagen und Deichbruch und ohne Verklausung des Durchlasses an der Schulstraße

Szenario 2: Abfluss erfolgt unter Berücksichtigung des Dammversagens und einer Teilverklausung von rund 65 % des Durchlasses an der Schulstraße

Szenario 3: Wie Szenario 2, aber zusätzlich Berücksichtigung des Deichbruches

Im Szenario 1 erreicht der Scheitelabfluss am Pegel rund 170 m³/s. Dieser Abfluss ist um rund 20 m³/s geringer als der Zufluss aus dem Einzugsgebiet, da zwischen dem Zusammenfluss der beiden Zubringer und dem Pegelstandort die Retention durch die Speicher Schulstraße und Bundesstraße 12 wirksam wird. Der Ortsbereich, sowie die beiden Polder (Simbach mit 0,6 und Erlach mit 0,1 Mio. m³) werden geflutet (Abb. 8). Das Dammversagen (12:40 bzw. 12:50) fällt in etwa mit dem Eintreffen der Hochwasserspitzen aus den beiden Zubringern zusammen. Mit der Teilverklausung von ungefähr 67 % der Durchflussfläche am Damm Schulstraße wird die dokumentierte Einstauhöhe erreicht. Dadurch ergibt sich für das Szenario 2 beim Pegel ein Wasserstand von 4,8 bis 5,0 m (je nachdem der Zeitpunkt des Dammversagens angesetzt wird), welcher einem Scheitelwert von 230 bis 260 m³/s entspricht. Der gemessene Abflussscheitel von rund 280 m³/s konnte durch die Simulationen aber nicht erreicht werden. Der Polder Simbach füllt sich mit 0,5 Mio. m³, der Polder Erlach mit 0,2 Mio. m³ Wasser. Im Szenario 3 wird der Deichbruch um 13:00 angesetzt. Dadurch ändert sich gegenüber Szenario 2 am Abfluss beim Pegel nichts (Abb. 9), jedoch in der Aufteilung des Abflusses in die Polder. Der Polder Simbach wird mit 0,35 Mio. m³, der Polder Erlach mit 0,7 Mio. m³ dotiert (Abb. 10). Die Differenz von bis zu 1 Mio. m³ zum dokumentierten Speichervolumen im Polder Erlach stammt aus Einzugsgebieten mit einer Gesamtfläche von 3,6 km², die von Norden direkt in den Polder entwässern bzw. über den Mooseckergraben aus dem Westen in das Stadtgebiet zugeführt werden (Abb. 1).

Vergleicht man die Überflutungsflächen der Szenarien, so zeigen sich bis auf den Polder Erlach nur geringe Abweichungen. Die Abflusstiefen im Siedlungsbereich sind im Szenario 3 jedoch im Mittel um einen halben Meter größer als im Szenario 1 (Abb. 11).

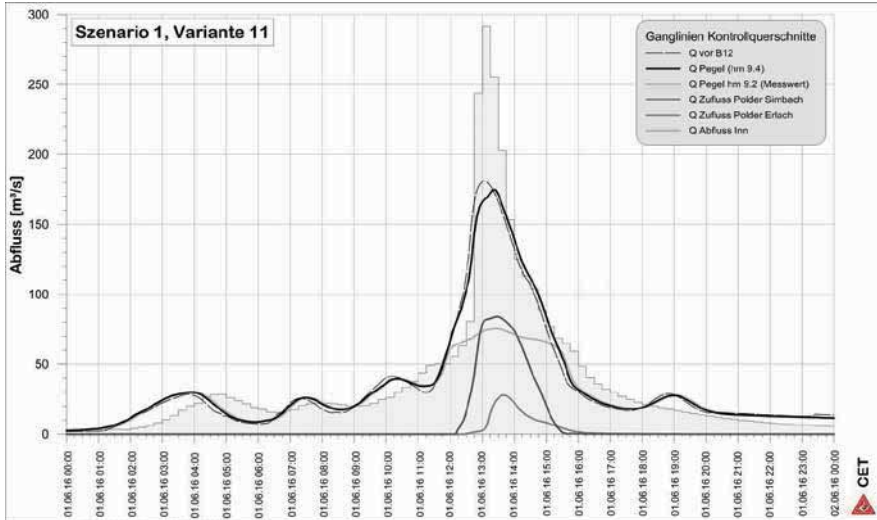


Abb. 8: Simulierte Ganglinien an den Kontrollquerschnitten für das Szenario 1 ohne Verklauung an der Schulstraße (Hübl et al., 2017b)

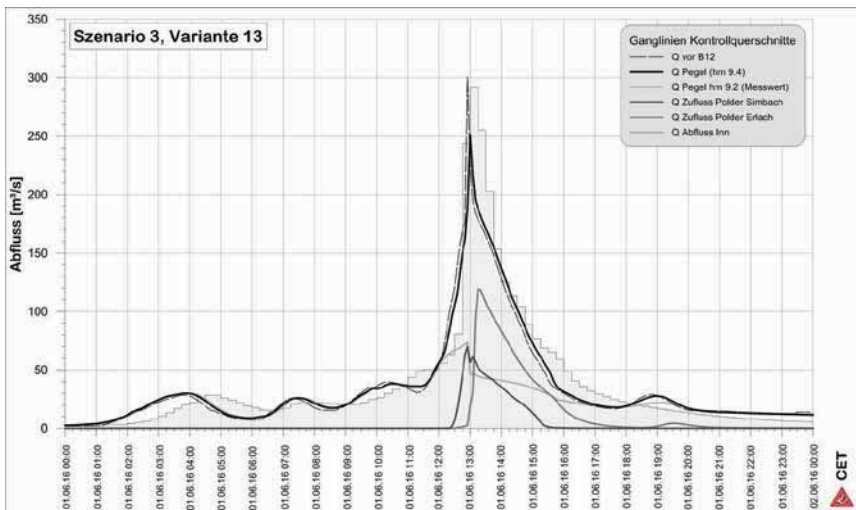


Abb. 9: Simulierte Ganglinien an den Kontrollquerschnitten für das Szenario 3 mit Dammversagen um 12:50 (Hübl et al., 2017b)

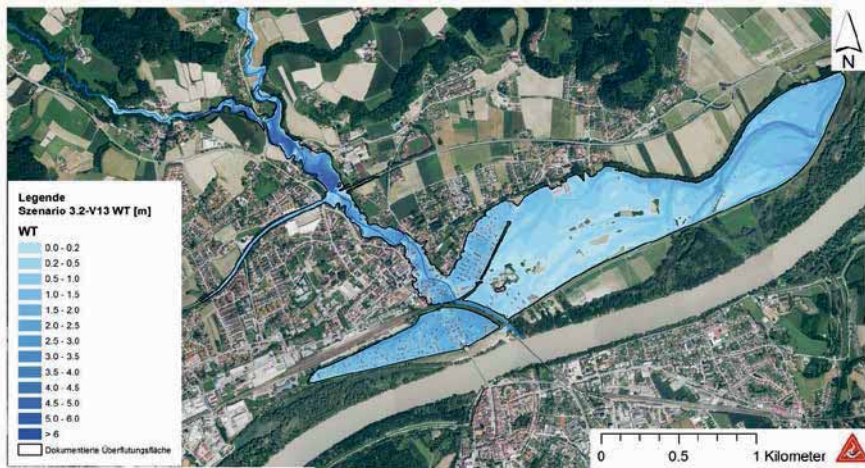


Abb. 10: Dokumentierte und simulierte Überflutungsfläche für das Szenario 3 mit Dammversagen um 12:50 (Hübl et al., 2017b)

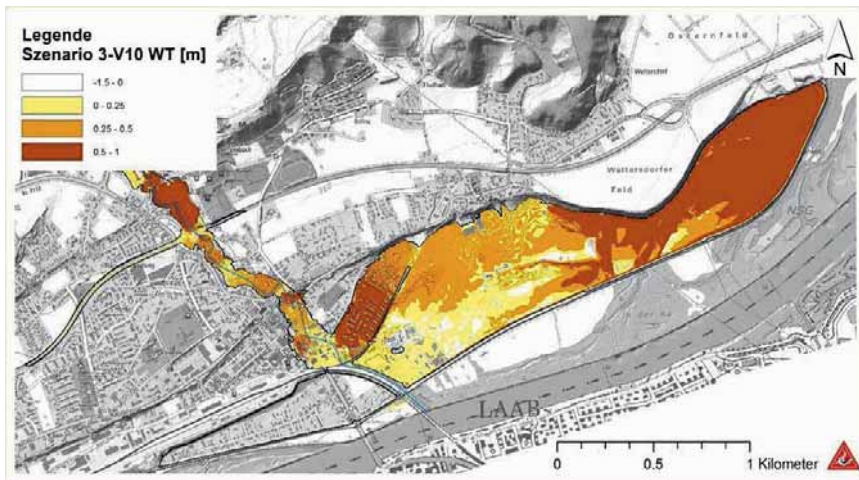


Abb. 11: Differenz der Wassertiefen zwischen Szenario 1 und Szenario 3 (Eingefärbte Bereiche zeigen im Szenario 3-V10 eine höhere Wassertiefe als in Szenario 1) (Hübl et al., 2017b)

8 Schlussfolgerungen

Dieses Ereignis am Simbach zeigt, dass aus dem Zusammentreffen hydrologisch ungünstiger Faktoren wie endbetonter, intensivster flächenhafter Niederschlag, Zugrichtung der Schauerzelle in Fließrichtung, Entstehung eines Kleingerinnenetzes auf landwirtschaftlichen Flächen ein äußerst hoher Abfluss resultieren kann, der weit über einem Bemessungsereignis

liegt. Trotzdem kann ein solcher Überlastfall in Risikoanalysen nicht außer Acht gelassen werden, da er für die Beurteilung der Tragfähigkeit technischer Maßnahmen wesentlich ist. Dies vor allem dann, wenn Hochwasserschutzmaßnahmen im Überlastfall ihre Schutzwirkung verlieren können und durch Polder abflusslose Staubeiche entstehen können. Deshalb ist es für Risikoanalysen angebracht, auch sehr seltene Ereignisse zu betrachten, um die möglichen Konsequenzen von Überlastfällen aufzuzeigen. Denn deren negative Auswirkungen können nur durch eine Kombination von aktiven technischen und passiven Maßnahmen, wie Raumplanung, angepasste Bauweise und rechtzeitige Information der Anrainer eingeschränkt werden.

Literatur

- Ziese M.; Junghänel, T.; Becker, A. (2016): Andauernde Großwetterlage Tief Mitteleuropa entfaltet ihr Unwetterpotential mit starken Gewittern und massiven Schadensgeschehen in Deutschland. DWD Hintergrundberichte, Bericht vom 3. Juni 2016
- Hübl J.; Heiser, M.; Braito, S.; Tschärner, S.; Kuntner, K.; Schraml, K.; Falkensteiner M.; Rabanser, E. (2017a): Ereignisdokumentation und Ereignisanalyse 2016 Rottal-Inn, IAN Report 180, Band 1: Ereignisdokumentation; Institut für Alpine Naturgefahren, Universität für Bodenkultur Wien (unveröffentlicht)
- Hübl J.; Heiser, M.; Braito, S.; Tschärner, S.; Kuntner, K.; Prenner, D.; Falkensteiner, M.; Rabanser, E. (2017b): Ereignisdokumentation und Ereignisanalyse 2016 Rottal-Inn, IAN Report 180, Band 2: Ereignisanalyse Simbach; Institut für Alpine Naturgefahren, Universität für Bodenkultur Wien (unveröffentlicht)

Anschrift des Verfassers

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Johannes Hübl
Institut für Alpine Naturgefahren, Department Bautechnik und Naturgefahren
Universität für Bodenkultur Wien
Peter Jordan Straße 82, 1190 Wien
johannes.huebl@boku.ac.at

Die Sturzflut von Braunsbach vom 29. Mai 2016: eine forensische (retrospektive) Ereignisanalyse

Axel Bronstert, Kristin Vogel, Ankit Agarwal, Berry Boessenkool, Madlen Fischer, Maik Heistermann, Lisei Köhn-Reich, Oliver Korup, Jonas Laudan, Thomas Moran, Ugur Ozturk, Adrian Riemer, Viktor Rözer, Tobias Sieg, Dadiyorto Wendi, Annegret Thieken

Zusammenfassung

Am Abend des 29. Mai 2016 wurde der kleine Ort Braunsbach im Landkreis Schwäbisch-Hall (Baden-Württemberg) von einer Sturzflut getroffen. Die Sturzflut war eine der Unwetterfolgen, die im Frühsommer 2016 vom Tiefdruckgebiet Elvira ausgelöst wurden. Das extreme Abfluss- und Geschiebefrachtereignis führte zu immensen Schäden im Ort.

In diesem Beitrag wird zum einen retrospektiv das Ereignis in Hinblick auf Meteorologie und Hydrologie analysiert um Ursache 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.

Zum anderen werden die geomorphologischen Prozesse und die verursachten Gebäudeschäden analysiert. Dazu wurden Ursprung und Ausmaß des während des Sturzflutereignisses mobilisierten und in den Ort getragenen Materials untersucht. Des Weiteren wurden zu 96 betroffenen Gebäuden Daten zum Schadensgrad sowie Prozess- und Gebäudecharakteristika aufgenommen und ausgewertet. Die Untersuchungen zeigen, dass bei zur Analyse der Hochwassergefährdung durch Sturzfluten die Betrachtung ihrer speziellen Charakteristika, wie hoher Feststofftransport und sehr kurzfristige Änderungen insbesondere in bebautem Gelände, wesentlich ist, um effektive Schutzmaßnahmen ergreifen zu können.

1 Einleitung

Der Orlacher Bach entwässert ein 6km² großes, überwiegend landwirtschaftlich genutztes Einzugsgebiet in der Südwestdeutschen Schichtstufenlandschaft im Nordosten Baden-Württembergs und fließt südwestlich durch ein steiles Kerbtal („Orlacher Klinge“), bis er nach ungefähr 3 km in den regionalen Hauptfluss Kocher mündet. Kurz vor der Mündung, wo sich das Kerbtal zum Kochertal öffnet, liegt der Ort Braunsbach. Die Hänge des Kerbtals, oberhalb von Braunsbach, mit einer sehr hohen Neigung bis zu 40° und mehr sind bewaldet, da eine landwirtschaftliche Nutzung dort nicht möglich ist.

2 Niederschlagsanalyse

2.1 Niederschlagsinformationen aus Stationsmessungen

Die nächstgelegene Niederschlagsmessstation in der Nähe des Einzugsgebiets des Orlacher Baches liegt in Langenburg-Atzenrod, ca. 10 km nordöstlich von Braunsbach. Hier wurde am 29.05.2016 eine Niederschlagsmenge von 105 mm/Tag (von 7:50 Uhr am 29.05.2016 bis 7:50 Uhr am 30.05.2016) verzeichnet. Eine stündliche Auflösung ist für diese Station leider nicht verfügbar. Das bisherige beobachtete Niederschlagsmaximum von 72,1 mm/Tag aus dem Jahr 1959 wurde 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 und somit als „Jahrtausendereignis“ bezeichnet werden könnte. Wird das Ereignis vom 29.05.2016 in die statistische Analyse mit einbezogen, steigt zwar die Wahrscheinlichkeit um mehr als das 10-fache entspräche aber immer noch einem Jahrhundertereignis. 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.

2.2 Niederschlagsinformationen aus Niederschlagsradardaten

Kleinräumige Variationen der Niederschläge sind bei konvektiven Ereignissen sehr stark und können daher auf Basis benachbarter Messstationen oft nicht genügend beurteilt werden. Dafür bietet die Analyse von Niederschlagsradardaten die Möglichkeit 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 1 (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.

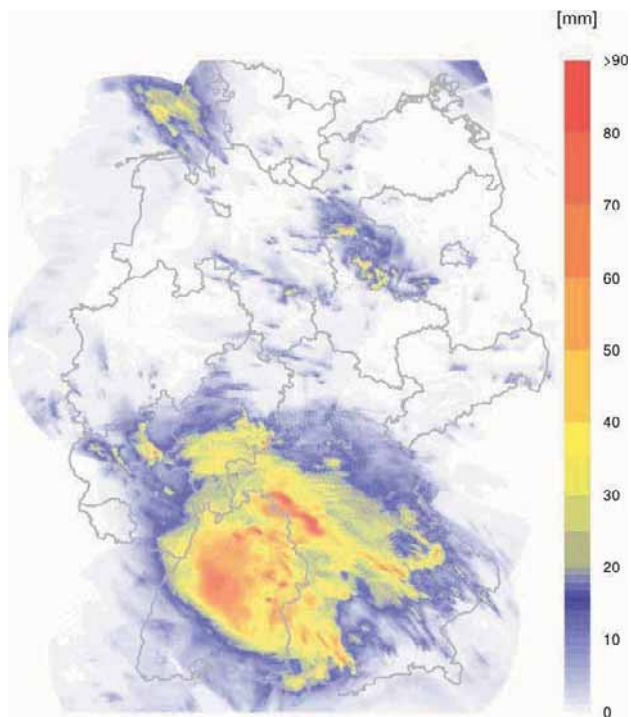


Abb. 1 Niederschlagssummen über Deutschland zwischen 15 und 23:55 UTC am 29. Mai 2016. Quelle: Eigene Analyse, basierend auf den RADOLAN-Daten des DWD.

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 diese vom DWD öffentlich bereit gestellten Daten keine Korrekturen der gerade bei Starkniederschlägen auftretenden Dämpfungen des Radarsignals beinhalten. Deshalb wurde eine Dämpfungskorrektur samt Intensitätsverlauf der Niederschlagsdaten der nächstgelegenen Radarstation „Türkheim“ des DWD, ca. 70 km südlich des Einzugsgebiets, durchgeführt, was in Abbildung 2 dargestellt ist. Es wird deutlich, dass der stärkste Niederschlag zwischen 19 und 20 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.

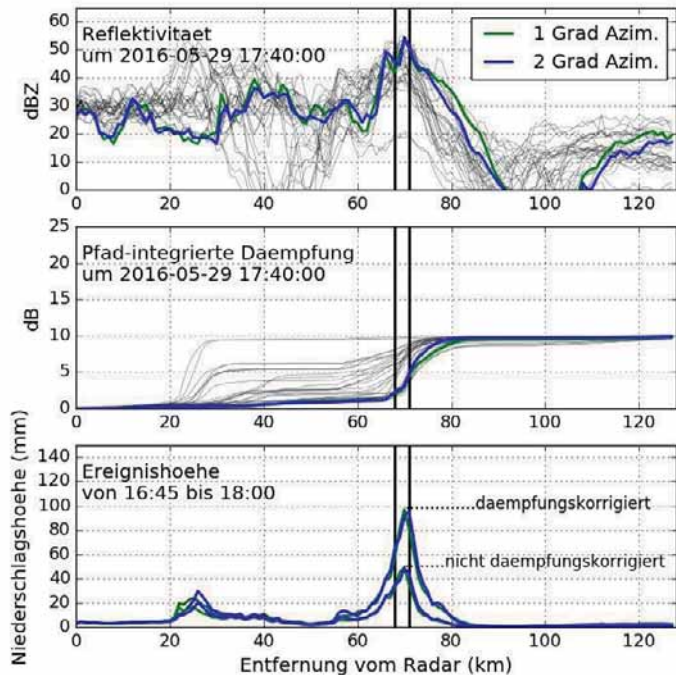


Abb. 2 Effekte der Dämpfungskorrektur der Radardaten am Beispiel der Rohdaten (DX) des Radarstandorts Türkheim, bei konservativer Parameterwahl. Oben: Reflektivität entlang beider Strahlen im Betrachtungszeitraum, exemplarisch für 17:40 UTC dick gezeichnet. Mitte: Dämpfung in Dezibel. Unten: Niederschlagssumme mit und ohne Korrektur von 16:45 bis 18:00 UTC in Abhängigkeit von der Entfernung zum Radarstandort.

Die Ergebnisse der Dämpfungskorrektur variieren zwar stark entsprechend der Parametrisierung des Verfahrens, man erkennt aber in Abbildung 2 deutlich, dass man ohne Dämpfungskorrektur mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit die Ereignishöhe stark unterschätzt (mind. um Faktor 2). Darüber hinaus zeigt die Abbildung auf klar, 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 wird erkenntlich, dass das Einzugsgebiet des Orlacher Baches im Zentrum des lokalen Gewittergeschehens lag.

3 Hydrologische Analyse

3.1 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, was auf großflächigen Sättigungsüberschuss hindeutet, siehe auch Abbildung 3. Die entstandenen Abflussmengen sammelten sich dann in den Tiefenlinien des Geländes und flossen dem Gerinnenetz 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 des Einzugsgebiets von ca. 30 mm aus. Daraus folgt ein Abflussbeiwert ψ von etwa 75 % [$\psi = (120 \text{ mm} - 30 \text{ mm}) / 120 \text{ mm}$].



Abb. 3 Oberflächliche Abflusskonzentration auf der Hochfläche des Einzugsgebietes, aufgenommen am 3. Juni 2016 (Foto: Ankit Agarwal).

3.2 Abflussanalyse

→ aus Schätzungen des Fließquerschnittes und -geschwindigkeit

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.

→ aus Schätzungen der Abflussspende, Ereignisdauer und -verlauf

Der Wert des Abflusses am Gebietsauslass lässt sich durch eine vergleichende Abschätzung der Volumina des Abflusses am Gebietsauslass Vol_{Abfluss} und des Effektivniederschlags Vol_{Neff} über dem Gebiet plausibilisieren. Dafür wird angenommen, dass die Abflussganglinie

dreieckförmig sei und deren Dauer 2 Stunden. Mit der Vorgabe der Ereignisdauer und der Ganglinienform kann das Abflussvolumen als alleinige Funktion des Spitzenabflusses Q_{max} geschätzt werden:

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

Für die Schätzung des Volumens des Effektivniederschlags Vol_{Neff} werden folgende Annahmen zugrunde gelegt: Größe des Einzugsgebietes A_E : 6 km²; Abflussbeiwert ψ : 75 %;

Mit diesen Annahmen berechnet sich das Volumen des Effektivniederschlags als alleinige Funktion des Freilandniederschlags N_{ges} über dem Gebiet:

$$Vol_{Neff} = N_{ges} * A_E * \psi \quad [2]$$

Geht man von einem Gebietsniederschlag von 100 mm aus (siehe Kap. 2.2), dann entspräche das unter den zugrunde gelegten Annahmen einem Volumen des Effektivniederschlags von 450.000 m³. Setzt man diesen Wert dann für das Abflussvolumen an, ergibt sich letztlich ein Spitzenabflusswert von 125 m³/s.

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

In Abbildung 4 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 Bachs in den Kocher liegt. Bereits um 20 Uhr Ortszeit ist ein klarer Anstieg der Ganglinie zu erkennen, der schon nach 2 Stunden einen maximalen Abflusswert von 376 m³/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 Bachs in den Kocher liegen, wird klar, dass fast die gesamte erste Spitze des Kocherhochwassers – also über 300 m³/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 Abflussspitze hilft ein Blick auf die Ganglinie des kleinen Kocher-Zuflusses „Bibers“, Pegel Westheim (siehe Abb. 4). Aus diesem, ca. 25 km südlich von Braunsbach und 8 km nördlich/flussabwärts des Kocherpegels Gaildorf gelegenen und 62 km² großem Gebiet, ergab sich ein Spitzenabfluss von nur ca. 10 m³/s in den Kocher, was einer Jährlichkeit für den „Bibers“ von ca. 1 Jahr entspricht. Damit ist klar, dass der zuvor berichtete Abflussspeak von ca. 300 m³/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. In etwa ein Drittel dieser Abflussrate im Kocher davon würde aus dem Orlacher Bach stammen.

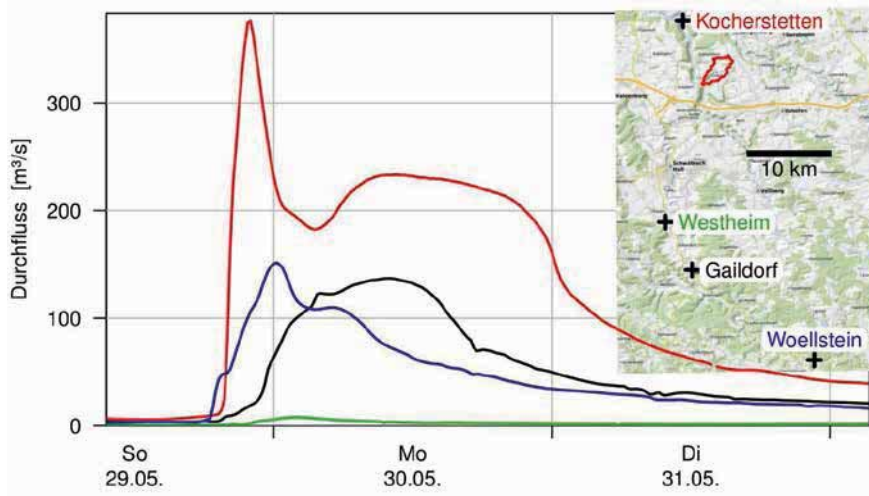


Abb. 4 Abflussganglinien des Kochers an der Pegelstationen Kocherstetten (ca. 8,5 km flussabwärts von der Einmündung des Orlacher Baches) sowie Wöllstein und Gaildorf (30 km bzw. 50 km flussaufwärts der Einmündung). Zudem ist die Ganglinie des kleinen Kocherzuflusses „Bibers“, Pegel Westheim, gezeigt.

Ein weiterer Hinweis, dass die erste Abflussspitze im Kocher von über 300 m³/s aus dem Gebiet des Orlacher Baches und direkt angrenzenden Einzugsgebieten stammte, ist der Zeitpunkt der Abflussspitze am Pegel Kocherstetten. Diese wurde um 22 Uhr Ortszeit verzeichnet. 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 m³/s, vermutlich sogar darüber, bis 150 m³/s. Wenn man bedenkt, dass laut Aussage der örtlichen Fachleute das Mittelwasser des Baches bei unter 0,2 m³/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 gleichwohl offensichtlich, dass – in Ermangelung direkter Abflussmessungen während des Ereignisses – die hier präsentierte Analyse zu den Abflussraten mit erheblichen Unsicherheiten behaftet ist.

4 Geomorphologische Prozesse

Das Kerbtal des Orlacher Baches (Orlacher Klinge) ist durch steile Hänge geprägt. Aus einem digitalen Geländemodell (DGM10 der Vermessungsverwaltungen der Bundesländer und BKG, www.bkg.bund.de) wurden Steigungen bis ca. 50° abgeleitet. Das durch die Sturzflut mitgeführte Geröll des Orlacher Baches wurde in der Ortschaft abgelagert und betrug nach Angaben eines mit der Räumung beauftragten Fuhrunternehmens 42.000 m³ Geröll, besteht aus Gebiets- und Gewässererosion, Schwemmholz, Bauschutt, Asphalttschollen und Schrott.

4.1 Methodisches Vorgehen zur Analyse der geomorphologischen Prozesse

Die Analyse der geomorphologischen Prozesse konzentriert sich auf das Einzugsgebiet des Orlacher Baches. Bei der Begehung der Orlacher Klinge vom 21. bis 23. Juni 2016 (23 bis 25 Tage nach dem Hochwasserereignis) wurde das Ausmaß der Bachbett- und Ufererosion untersucht. Hierfür wurde die Höhe der durch das Wasser erodierten Hangabschnitte (unterer Hangteil) über der Bachsohle gemessen und deren, durch die Abtragung verursachte Versteilung mit den ursprünglichen, weniger steilen Böschungswinkeln nicht betroffener Hangabschnitte (oberer Hangteil) verglichen. Zur lokalen Beurteilung der Bachbatterosion wurde der Höhenunterschied zwischen den Überresten alter Bachterrassen und dem neuen, tiefer liegenden Bachbett gemessen. Zudem wurden 48 Erdbeben dokumentiert und eingemessen, um deren Materialeintrag in den Orlacher Bach abzuschätzen. Zur Beschreibung der Ergebnisse wird der Orlacher Bach und sein Zufluss aus dem Kräuchelbach in drei Talabschnitte unterteilt (Abb. 5).

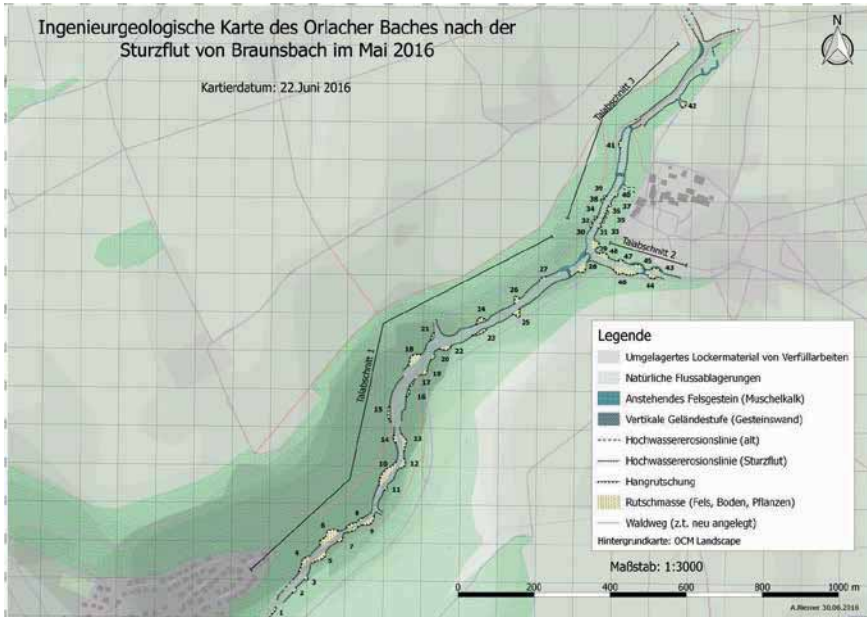


Abb. 5 Kartierte Hangrutschungen am Orlacher Bach (Talabschnitt 1 und 3) und Kräuchelbach (Talabschnitt 2).

4.2 Erosion im Einzugsgebiet

Die dokumentierten Niederschläge im nahen Umkreis von Braunsbach mit Tageswerten von teilweise über 100 mm und Intensitäten von bis zu 50 mm/h liegen weit über den genannten Grenzwerten für Bodenerosion. Auch fünf Tage nach der Sturzflut waren die Böden noch sichtlich gesättigt und deutliche Erosionsspuren erkennbar (Abb. 6).



Abb. 6 Ackerflächen auf der Hochebene des Einzugsgebiets mit erkennbaren Erosionsspuren (links) und Bodensättigung (rechts) fünf Tage nach der Sturzflut. Aufnahmen vom 03.06.2016 (links: Berry Boessenkool, rechts: Ankit Agarwal, beide Universität Potsdam).

Geht man von einer durchschnittlichen Erosionsrate von 2 bis 3 mm auf der ca. 5 km² großen Ebene im Einzugsgebiet des Orlacher Bachs aus, so ergibt sich ein Abtrag von suspendiertem Sediment von ca. 10.000 bis 15.000 m³. Da es sich hierbei um feines, suspendiertes Sediment handelt, ist davon auszugehen, dass dies praktisch vollständig in den Kocher gespült und nicht im Ort angelagert wurde.

Der im steilen Bereich der Orlacher Klinge konzentrierte Abfluss mobilisierte nicht nur Bodenmaterial, sondern auch Kies, Felsbrocken sowie Pflanzenmaterial und begünstigte daher Abflüsse mit hohem Feststoffanteil.

4.3 Erosion der Gewässersohle

Durch die hohen Fließgeschwindigkeiten und Abflussmengen während der Sturzflut wurde Sediment von Hängen und Gerinne aus dem Orlacher Bach ausgeräumt. Nahezu im gesamten Talabschnitt 1 waren im Bachbett Erosionsmarken der Sturzflut deutlich erkennbar. Die erosive Wirkung des Abflusses wurde in diesem Bereich durch das mitgeführte Geschiebe aus den oberen Talabschnitten verstärkt. Zum Zeitpunkt der Kartierung fanden hier bereits Erdarbeiten von lokalen Bauunternehmen statt, die im Auftrag des Krisenstabs das durch die Erosion vertiefte Bachbett mit den Geröllablagerungen aus dem Ort Braunsbach wieder auffüllten. Ziel dieser Maßnahme war es, die ursprüngliche Form des Tals wiederherzustellen, die darin verlaufenden Waldwege neu anzulegen und weitere Hangrutschungen durch die Wiederherstellung einer stabilen Böschung zu verhindern. Nach Angaben der hierfür eingesetzten Arbeiter wurden stellenweise Überflutungssedimente bis zu einer Höhe von 4 m erneut in das Tal eingebracht.

Diese Geländeaufnahmen legen nahe, dass ein Großteil der 42.000 m³ des bei Aufräumarbeiten aus dem Ort entfernten groben Materials durch Erosionsprozesse in den untersuchten drei

Talabschnitten in den Ort gespült wurde. Nimmt man über alle drei Talabschnitte hinweg (ca. 2 km) eine durchschnittliche Erosionstiefe von 2 m auf einer Breite von 5 m - 10 m an, so ergibt sich ein Volumen von $20.000 \text{ m}^3 - 40.000 \text{ m}^3$.

4.4 Hangrutschungen

Weitere Geröllmassen wurden durch mehrere Hangrutschungen im Mai 2016 in die Orlacher Klinge und mit der Flutwelle in den Ort Braunsbach getragen. Die harten Kalksteine des Muschelkalks bilden abschnittsweise ein steiles Relief mit schroffen Hängen und flachgründigen Böden. Solche Böden sind nach Starkregen schnell wassergesättigt und in ihrer Scherfestigkeit vermindert, was an steilen Hängen zu Rutschungen führen kann. Zudem wurden Uferböschungen stark unterspült und weitere Hangrutschungen ausgelöst. Entlang des Orlacher Bachs und des Kräuchelbachs wurden 48 flachgründige Hangrutschungen (nach Varnes 1978) mit einem Volumen von ca. 10 m^3 bis 1350 m^3 kartiert (siehe Abb. 5). Dabei wurden u.a. die Höhe der Abrisskante über dem Bachbett, die Länge der Abrisskante, die Breite der Oberkante und Basis der Rutschmasse sowie Winkel und Entfernungen vom Messpunkt zur Abrisskante, Oberkante und Basis der Rutschmasse gemessen. Die Rutschungen traten nahezu alle vollständig innerhalb eines 50 m breiten Bands, etwa je 25 m zu beiden Seiten des Bachlaufs, auf. Etwa 8% dieses Korridors war von Hangrutschungen betroffen. Basierend auf den genannten Messungen wird das Gesamtvolumen des durch Hangrutschungen in den Bachlauf eingebrachten Materials auf ca. $8000 \text{ m}^3 \pm 1600 \text{ m}^3$ geschätzt. Die angegebenen Unsicherheiten resultieren aus Variationen in der Geometrie der Rutschflächen und Messungenauigkeiten.

5 Schadensanalyse

Die hohen Fließgeschwindigkeiten und großen Mengen an mitgeführtem Material verursachten enorme Schäden in der Ortschaft Braunsbach. Hier entstand ein Großteil der vom Landratsamt Schwäbisch Hall auf 104 M€ geschätzten Schäden der 2350 Einwohner zählenden Gemeinde Braunsbach. Die Gemeinde umfasst neben dem Hauptort Braunsbach noch einige weitere Dörfer und Weiler. Diese Gemeinde trug damit über 90% des auf ~112 Mio. € geschätzten Gesamtschadens, der im Landkreis Schwäbisch Hall durch die Unwetter im Frühsommer 2016 verursacht wurde (Landratsamt Schwäbisch Hall, 2016). Auch wenn diese Zahlen auf groben Schätzungen beruhen, verdeutlichen sie das lokale Ausmaß der Zerstörung.

Um einen genaueren Eindruck über die Schäden zu bekommen sowie Schadensprozesse bei Sturzfluten allgemein besser verstehen zu können, wurden am 7. und 8. Juni 2016, d.h. neun bzw. zehn Tage nach dem Sturzflutereignis, äußerlich erkennbare Gebäudeschäden sowie weitere Informationen zu den Gebäuden und zur Überflutung systematisch aufgenommen, siehe Vogel et al. 2017. Um die Privatsphäre der Anwohner nicht zu verletzen und die voranschreitenden Aufräumarbeiten nicht zu behindern, wurden keine Schäden am Inventar oder Innenbereich der Gebäude dokumentiert. Weiterhin mussten Schäden an Infrastruktur und Fahrzeugen sowie Art und Ausmaß der Gebäudekontamination in einigen Fällen zum Zeitpunkt der Schadensaufnahme unbeobachtet bleiben.

Neben den Schadensklassen wurden Anprallschäden an Gebäuden und erkennbare Kontamination durch Öl oder Schlamm dokumentiert. Weiterhin wurde der Wasserstand an den

Gebäuden anhand von Fließspuren, Schlammkontamination und Durchfeuchtung der Außenwände abgeschätzt. Unterstützend wurden mit einer Wärmebildkamera Temperaturunterschiede in den Hauswänden abgebildet (Abb. 7). Die Wärmebildaufnahmen halfen zudem bei der Zuordnung der Bausubstanz. Weitere Felddaten zu den betroffenen Gebäuden umfassten Unterkellerung, Etagenanzahl, Art der Nutzung, Alter, Zustand, erkennbare Vorsorgemaßnahmen sowie eine Charakterisierung der unmittelbaren Gebäudeumgebung, z.B. Versiegelung und Exposition des Gebäudes zur Fließrichtung.



Abb. 7 Wärmebildaufnahmen (oben) und RGB-Normalaufnahmen (unten) von betroffenen Gebäuden zur Abschätzung des Wasserstands und zur Identifikation der Bausubstanz (z.B. Mitte: verputztes Fachwerk). Aufnahmen vom 08.06.2016 (Jonas Laudan, Universität Potsdam).

Abbildung 8 zeigt die geschätzten Wasserstände für die von der Sturzflut betroffenen Bereiche in Braunsbach. Dazu wurden die an den Gebäuden abgeschätzten Wasserstände als Grundlage genommen. Für die Räume zwischen den Gebäuden wird ein nach Entfernung gewichtetes Mittel aus den Wasserständen an den Gebäuden im 30 m Umkreis genutzt. Für Bereiche, die mehr als 25 m vom dichtesten Messpunkt entfernt liegen, wird ein Wasserstand von Null angenommen, da häufig nur die erste Häuserreihe von der Sturzflut betroffen war, während benachbarte höher gelegenen Häuser nicht erreicht wurden. Dieses Vorgehen führt allerdings dazu, dass im oberen Bereich der Orlacher Straße, in dem keine Häuser stehen, kein Wasserstand verzeichnet wurde, obwohl dieser Bereich überflutet war.

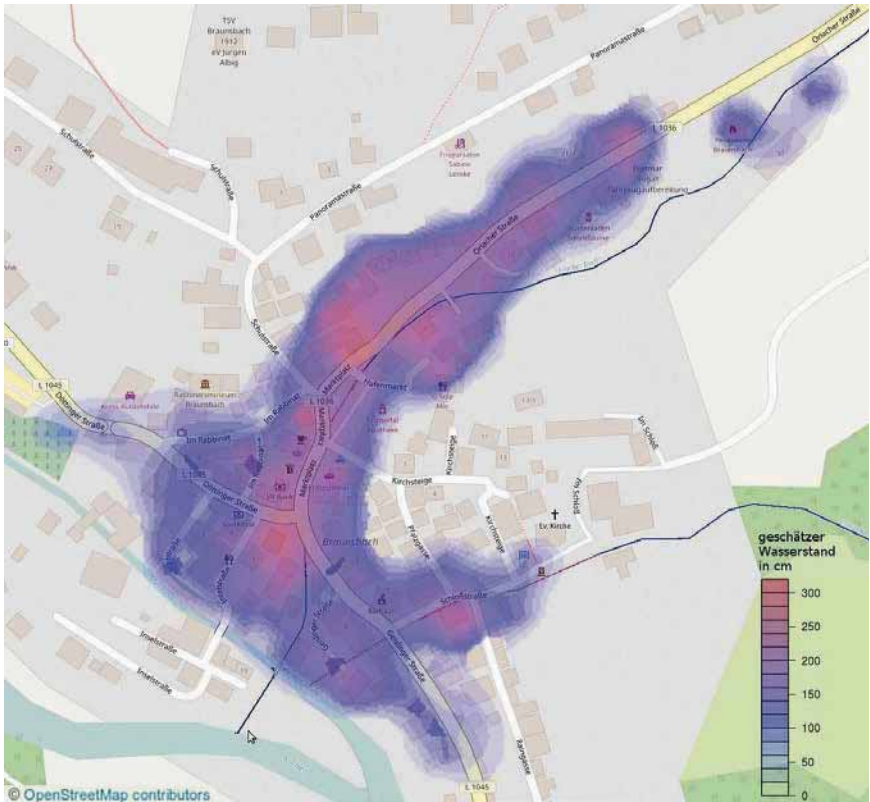


Abb. 8 Abschätzungen des Wasserstands an den von der Sturzflut betroffenen Gebäuden in Braunsbach in cm über der Geländeoberfläche. Der Orlicher Bach (parallel zur Orlicher Str. und Marktplatz) und der Schlossbach (parallel zur Schlosstr.) sind in dunkelblau dargestellt bzw. die verdolten Abschnitte in dunkelrot.

6 Diskussion und Schlussfolgerung

Die Ergebnisse der hier dokumentierten Analyse der meteorologischen und hydrologischen Extrembedingungen am 29. Mai 2016 und deren Auswirkungen auf die Geomorphologie des Einzugsgebiets 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 Orlacher Baches,
- die sehr hohen Niederschlagsintensitäten über einen Zeitraum von weniger als zwei Stunden (Wiederkehrintervall deutlich > 100 Jahre),
- die hohe und schnelle Abflussbildung im Gebiet,
- das markante Relief im Einzugsgebiet des Orlacher Baches begünstigt schnelle Abflusskonzentration bei starken Niederschlagsereignissen
- die Mobilisierung von Sediment im Gebiet und von sehr viel grobem Geröll (Durchmesser von Einzelblöcken > 1 m) und Schwemmholz im Kerbtal des Orlacher Baches und benachbarten Tälern durch die Extremabflüsse sowie die zusätzliche Mobilisierung anthropogener „Sedimente“ in Braunsbach wie Autos, Asphaltsockeln und Fassadenteile
- 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.

Zur Vorsorge vor solchen Sturzfluten sind die Handlungsoptionen des Menschen begrenzt, da die Vorhersage aufgrund der Kleinräumigkeit und Kurzfristigkeit sehr schwierig ist. 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. Dazu gehört insbesondere auch eine Verbesserung der Vorhersage kurzzeitiger Extremniederschläge und den daraus resultierenden Sturzfluten durch den Aufbau von operationellen Systemen zur Nutzung von Radarinformationen in Kombination mit Bodenmessungen in Echtzeit.

Die Frage der Stärke der Auswirkungen anthropogener Eingriffe in Natur und Umwelt auf solche Ereignisse kann aufgrund der Komplexität solcher Ereignisse und der verschiedenen Wechselwirkungen nicht pauschal beantwortet werden. Eine Diskussion der möglichen Wirkungen unterschiedlicher anthropogener Eingriffe ist in Bronstert et al., 2016 enthalten.

Im Zuge der Untersuchungen in Braunsbach wurden Daten und Erkenntnisse generiert, die für die Entwicklung von Modellkomponenten, z.B. von gekoppelten hydro-sedimentologischen Modellen oder von Schadensmodellen, wichtig sind. Mitarbeitende der DFG Graduiertenschule „NatRiskChange“ werten hierzu noch weitere Daten aus, um möglichen Schwachstellen oder Wissenslücken bezüglich solcher Extremereignisse mit modernen Lösungsansätzen zu begegnen. Schließlich demonstrieren die hohen Schäden im Mai und Juni 2016, dass diese Gefahren in Deutschland bislang unterschätzt wurden und hier ein Umdenken nötig ist.

Literatur

- Bronstert, A.; Agrawal, A.; Boessenkool, B.; Fischer, M.; Heistermann, M.; Köhn-Reich, L.; Moran, T.; Wendi, D. (2016): Die Sturzflut von Braunsbach am 29. Mai 2016 - Entstehung, Ablauf und Schaden eines „Jahrhundertereignisses“. Teil 1: Meteorologische und Hydrologische Analysen – Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 61(3), 150-162.
- 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.
- Landratsamt Schwäbisch Hall (2016): Unwetter-Schadensliste Landkreis Schwäbisch Hall, [http://www.lrascha.de/index.php?id=302?&id=302&publish\[id\]=457120](http://www.lrascha.de/index.php?id=302?&id=302&publish[id]=457120), ersch. am 8.6.16.
- TFFF (2016). Bericht der Task Force „Flash Flood“ des DFG-Graduiertenkollegs NatRiskChange zum Hochwasser in Braunsbach am 29. Mai 2016. Universität Potsdam: www.geo.uni-potsdam.de/tl_files/news/TaskForceBraunsbach.pdf
- Varnes, D.J. (1978). Slope movement types and processes – *Transp. Res. Board, Report*, 176.
- 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*, 61(3), 163-175.

Anschrift der Verfasser

Prof.- Dr. Axel Bronstert
 Dr. Kristin Vogel
 M.Sc. Berry Boessenkool
 Dr. Maik Heistermann
 M.Sc. Lisei Köhn-Reich
 Prof.- Dr. Oliver Korup
 M.Sc. Jonas Laudan
 M.Sc. Ugur Ozturk
 Dipl.-Geol. Adrian Riemer
 M.Sc. Dadiyorto Wendi
 Prof.-Dr. Annegret Thieken
 Institut für Erd- und Umweltwissenschaften,
 Universität Potsdam
 Karl-Liebkecht-Str. 24-25, D-14476 Potsdam
 axelbron@uni-potsdam.de
 kvog@uni-potsdam.de
 boessenk@uni-potsdam.de
 heistern@uni-potsdam.de
 lkoehn@uni-potsdam.de
 korup@geo.uni-potsdam.de
 jlaudan@uni-potsdam.de
 uoeztuer@uni-potsdam.de
 adrian.riemer@uni-potsdam.de
 wendi@uni-potsdam.de
 annegret.thieken@uni-potsdam.de

M.Sc. Ankit Agarwal
 Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK)
 Telegraphenberg A 31, D-14473 Potsdam
 Agarwal@pik-potsdam.de

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

M.Sc. Viktor Rözer
 M.Sc. Tobias Sieg
 Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches
 GeoForschungsZentrum GFZ
 Telegrafenberg, D-14473 Potsdam
 Victor.roezer@gfz-potsdam.de
 tsieg@gfz-potsdam.de

Geschiebetransport in Wildbächen und Gebirgsflüssen: Messung, Transportkapazität und Gefahrenbeurteilung

Dieter Rickenmann

Zusammenfassung

Wildbachgerinne und Gebirgsflüsse sind durch eine starke räumliche und zeitliche Variabilität der hydrologischen und hydraulischen Prozesse sowie des Geschiebetransportes charakterisiert. Die praktische direkte Messung des Geschiebetransportes ist wegen der bei größeren Abflüssen auftretenden Kräfte schwierig bis unmöglich. Daher werden in jüngerer Zeit vermehrt indirekte Methoden zur Messung des Geschiebetransportes angewendet, insbesondere akustische Methoden. Zur Berechnung der Geschiebetransportkapazität kommen grundsätzlich ähnliche Methoden zur Anwendung wie in flacheren Kiesbettflüssen, allerdings müssen modifizierte Ansätze zur Bestimmung des Fließwiderstandes sowie der auf die Geschiebekörner wirkenden Sohlschubspannungen angewendet werden. Für die Gefahrenbeurteilung und die dafür zu Grunde liegende Prozessbeurteilung kommen insbesondere für die steilen Wildbachgerinne zum Teil sehr unterschiedliche Methoden zur Anwendung. In den Wildbachgerinnen ist die Abschätzung des Sedimenteintrages in die bzw. der Geschiebeverfügbarkeit in den Gerinnen nach wie vor eine große Herausforderung. Numerische Simulationsmodelle für den Geschiebetransport kommen vor allem in den Gebirgsflüssen zum Einsatz. Eine Anwendung zweier Simulationsmodelle wird für ein Hochwasser in der Vispa im Kanton Wallis (Schweiz) vorgestellt.

1 Einleitung

In Wildbachgerinnen und Gebirgsflüssen sind die hydrologischen und hydraulischen Prozesse durch extreme Veränderungen räumlicher und zeitlicher Natur charakterisiert. Diese Variabilität zeigt sich auch im Geschiebetransport. Selbst bei einem gegebenen Abfluss kann der Geschiebetransport über mehrere Größenordnungen variieren. Der Geschiebetransport hängt nicht nur vom Abfluss ab, sondern auch von der Gerinnegeometrie und -morphologie, der Korngrössenzusammensetzung und dem Geschiebeeintrag bzw. der Geschiebeverfügbarkeit ab. Die Sedimenteinträge variieren tendenziell umso mehr, je kleiner und steiler die Einzugsgebiete sind.

In den europäischen Ländern bezieht sich der Begriff „Wildbach“ typischerweise auf steile Gerinne in gebirgigen Einzugsgebieten, in welchen sich der Abfluss schnell ändern und erheblicher Feststofftransport auftreten kann. Eine genaue quantitative Definition der Abgrenzung dieser Gerinnetypen fehlte allerdings in der Vergangenheit. In der Schweiz ist es üblich, in alpinen Gebieten dann von Wildbächen zu sprechen, wenn auch Murgänge auftreten können. Daraus ergibt sich als quantitative Abgrenzung für Wildbäche, dass sie ein mittleres Gerinnegefälle von mehr als etwa 10% und eine Einzugsgebietsgrösse von weniger als 25 km² aufweisen (Rickenmann & Koschni 2010). Mit zunehmender Grösse der Einzugsgebiete wird das Hauptgerinne in der Schweiz als Gebirgsfluss oder als Talfluss bezeichnet. Fluvialer Geschiebetransport kann sowohl in Wildbächen als auch Gebirgsflüssen ein wichtiger Prozess zur Verlagerung von Feststoffen durch Wasser sein.

Die Abgrenzung von Wildbächen zu grösseren Flüssen kann je nach Land etwas unterschiedlich sein. In Bayern gibt es etwa 510 erfasste Wildbäche, und davon haben etwa 100 (20%) ein Einzugsgebiet grösser als 25 km² (Bayern 2016). In Österreich gibt es unter den 13'000 erfassten Wildbäche (die.Wildbach 2012) neben den kleineren und steileren Einzugsgebieten auch viele Gebiete mit Flächen grösser als 25 km² im Kompetenzbereich der staatlichen Behörde "Wildbach- und Lawinerverbauung", wobei die Gerinne in diesen grösseren Einzugsgebieten in etwa dem in der Schweiz gebräuchlichen Typ „Gebirgsfluss“ entspricht.

Ein wichtiger Unterschied der Wildbachgerinne zu alluvialen Gebirgsflüssen besteht im Verhältnis zwischen Feststoffbereitstellung und Abflussgeschehen. Hier kann eine Unterscheidung zwischen meist transportlimitierten Verhältnissen in Gebirgsflüssen und häufig sedimentlimitierten Verhältnissen in Wildbächen getroffen werden. Während für den Geschiebetransport beim transportlimitierten Regime der Abfluss bzw. die hydraulische Belastung entscheidend ist, ist beim sedimentlimitierten Regime die Feststoffverfügbarkeit bzw. der Sedimenteintrag der Minimumfaktor (Rickenmann 2014).

2 Messung des Geschiebetransportes

Der Geschiebetransport in flacheren Kiesgerinnen sowie in Sandflüssen wird seit mehr als hundert Jahren in vielen Studien im hydraulischen Versuchslabor und auch mit Messungen in natürlichen Gerinnen untersucht und kann einigermassen zuverlässig berechnet werden. Die Quantifizierung von Geschiebetransportraten in Wildbächen und Gebirgsflüssen stellt eine der zentralen Herausforderungen in der aktuellen Geschiebetransportforschung dar. Wegen der oft sehr breiten Kornverteilungen sind Untersuchungen dazu im hydraulischen Versuchslabor relativ aufwendig.

Daher kommt der Messung des Geschiebetransportes in steileren Gerinnen eine wichtige Bedeutung zu. Zur Messung des Sedimenttransportes in natürlichen Gerinnen lassen sich verschiedene Methoden anwenden, wie z. B. das Erfassen von Geschiebe in einem Ablagerungsbecken, die Abschätzung der Bewegung von Tracersteinen entlang eines Gerinnes, das Auffangen von sich bewegenden Partikeln mit Fangkörben oder Geschiebefallen im Bachbett und indirekte Messmethoden von Transportintensitäten. Generell ist die direkte Messung des Geschiebetransportes aufwändig (Gray et al. 2010). Solche Messungen haben zudem den Nachteil, dass sich nur einzelne Punktmessungen in Raum und Zeit durchführen lassen, die keine Datenkontinuität gewährleisten. Auch ist die direkte Messung des Geschiebetransportes bei Hochwasserabfluss typischerweise schwierig oder aus Sicherheitsgründen gar nicht durchführbar.

In den letzten zehn Jahren wurde eine zunehmende Anzahl von Studien unter Verwendung von indirekten Geschiebemessungen durchgeführt (Rickenmann 2017). Dabei wurden vor allem akustische Messtechniken eingesetzt. Diese Studien wurden sowohl mit Versuchen in Laborrinnen als auch mit Feldinstallationen durchgeführt. Viele indirekte Geschiebemessungen haben den Vorteil, dass Messungen der Transportaktivität kontinuierlich über die Zeit und vor allem auch bei Hochwasser möglich sind. Die Eidgenössische Forschungsanstalt WSL begann 1986 mit indirekten Geschiebemessungen am Erlenbach mit piezoelektrischen Streifen, die in der Mitte unter einer Stahlplatte befestigt waren. Diese wurden im Jahr 2000 durch Geophonsensoren ersetzt. Die Stahlplatten sind eben in der Gerinnesohle eingebaut und übertragen die Vibrationen von laufendem Geschiebe auf den Sensor.

Das Schweizer Plattengeophon-System ist eine der Techniken, für die in den letzten 15 Jahren beträchtliche Erfahrungen gesammelt wurden. Es wurde inzwischen an mehr als 20 Feldstandorten installiert, vor allem in Wildbächen und Gebirgsflüssen in der Schweiz und in Österreich. An vielen dieser Standorte wurden mittels direkter Messungen des Geschiebetransportes gleichzeitig zu den akustischen Messungen Geschiebeprobeen erhoben (Rickenmann 2017). Diese Messtechnik wurde erfolgreich für die Bestimmung der gesamten Geschiebetransportrate an mehreren Standorten kalibriert. Darüber hinaus wurde ein Verfahren zur Bestimmung des Geschiebetransportes nach Korngrößenklassen entwickelt, basierend auf einer detaillierten Analyse der Feldmessungen am Schweizer Erlenbach, wozu auch Aufzeichnungen der sogenannten Rohdaten des Geophonsignals vorhanden waren (Wyss et al. 2016a). Systematische Messungen mit dem Schweizer Plattengeophon-System im hydraulischen Versuchslabor zeigten, dass die Signalreaktion vor allem von folgenden Faktoren abhängt: Strömungshydraulik (Fließgeschwindigkeit), Partikelgröße und -form der transportierten Körner und Betrauigkeit. Diese Faktoren bestimmen das Transportverhalten und damit die Signal-Antwort der Geophonsensoren. Es wurde ein Verfahren zur Identifizierung der Partikelgröße entwickelt, basierend auf der maximalen Amplitude und der Schwerpunktfrequenz desjenigen Teils des Rohsignals, der auf einen einzelnen Partikelaufrall auf die Stahlplatte zurückzuführen ist. Die Beziehungen zwischen Impulsen und Partikeldurchmesser aus der Laborrinne wurden mit direkten Stichproben aus Feldmessungen in Wildbächen und Gebirgsflüssen validiert. Für eine Studie mit direkten Geschiebemessungen an vier Standorten lagen die mit dem Plattengeophon-System abgeschätzten Geschiebemassen im Durchschnitt im Bereich von +/- 90% der gemessenen Geschiebemassen (Wyss et al. 2016b, 2016c).

3 Berechnung der Transportkapazität

Beobachtungen zum Geschiebetransport in Laborversuchen zeigen grundsätzlich ein ähnliches Verhalten bei flacheren und steileren Gefällen (Rickenmann 1991, 2001, 2014, 2016). Betrachtet man den Geschiebetransport in Gebirgsflüssen und in Wildbächen, so führen bei den steilen Gerinnen vor allem zwei Aspekte häufig zu vergleichsweise geringeren Transportraten: Beschränkte Sedimentverfügbarkeit und hohe Energieverluste beim Fließwiderstand wegen der unregelmässigen Gerinneformen und der geringen relativen Abflusstiefen. Der Vergleich von Geschiebetransportformeln, die meist auf Laborversuchen basieren, mit Messungen in der Natur ergibt grundsätzlich eine nur mässig gute Übereinstimmung (Gomez & Church 1989). Bei Gefällen steiler als etwa 20% können die Geschiebetransportraten stark ansteigen und ähnlich hohe Sediment-Konzentrationen wie bei Murgängen erreicht werden (Smart & Jäggi 1983; Tognacca 1999; Rickenmann 2012, 2016).

In Wildbächen tritt der Feststofftransport oft in Form von Pulsen oder Sedimentwellen auf. Das kann auf variable hydraulische Bedingungen während des Sedimenttransportes oder auf diskontinuierliche Sedimentverfügbarkeit und räumlich sowie zeitlich sich stark ändernde Mobilisierungswiderstände zurückgeführt werden. Ein weiterer schwierig zu messender Parameter ist die dynamische Veränderung des Fließwiderstands während des Transportvorgangs. Die Übergänge zwischen Korn-, Form- und Gerinnerauigkeit sind fließend. Bei beginnender Mobilisierung der Sohle verändert sich überdies die Oberflächenstruktur und damit die Korn- und Formrauigkeit.

Natürliche Gerinnesohlen von Gebirgsflüssen und Wildbächen stellen durch ihr weites Korngrößenspektrum ein Mehrkorngemisch dar. Bei diesen ist der selektive Geschiebetransport beim Ansteigen oder Abfallen der Hochwasserganglinie, knapp nach Mobilisierungsbeginn oder vor Mobilisierungsende, besonders stark ausgeprägt und verursacht Entmischungsvorgänge, die zu Deckschichtbildung führen können. Dieser selektive Geschiebetransport wird dann durch generellen Geschiebetransport abgelöst, wenn auf Grund der hydraulischen Belastung das gesamte Korngrößenspektrum mobilisiert und transportiert wird.

Bei der Bestimmung des Feststofftransports müssen insbesondere die folgenden Aspekte berücksichtigt werden: (i) Transportbeginn, (ii) Geschiebetransportfunktion, (iii) Aufteilung des Fließwiderstandes (zusätzliche Energieverluste), (iv) evtl. Deckschicht, (v) Sedimentverfügbarkeit. Die quantitative Beschreibung der Gerinneprozesse in Wildbächen und Gebirgsflüssen basiert in vielen Fällen immer noch auf früheren und umfangreichen Untersuchungen zur Beschreibung ähnlicher Prozesse in flacheren Gerinnen oder grösseren Einzugsgebieten. In jüngerer Zeit wurden und werden sowohl im hydraulischen Labor als auch in der Natur systematische Messungen zum Geschiebetransport auch in steilen Gerinnen durchgeführt. Dank dieser neueren Studien konnten die Prozesskenntnisse für Wildbäche verbessert werden, und sie zeigten, inwieweit frühere Methoden übernommen werden können oder angepasst werden müssen.

Solche neueren Untersuchungen zeigten, dass das Fließverhalten in Wildbächen und Gebirgsflüssen einigermaßen zuverlässig mit dem Fließgesetz nach Ferguson (2007), dem sogenannten variable power equation VPE, beschrieben werden kann. Dazu wurde auch eine alternative mathematische Formulierung entwickelt, womit die mittlere Fließgeschwindigkeit nicht in Funktion der Abflusstiefe sondern in Funktion des Einheitsabflusses pro Meter Gerinnebreite berechnet werden kann (Rickenmann und Recking 2011).

Zur Bestimmung des Geschiebetransportes können dann die Energieverluste durch grobe Rauigkeitselemente (sogenannte Makrorauigkeit) mit den oben erwähnten Ansätzen für den Fließwiderstand berücksichtigt werden (Rickenmann und Recking 2011; Nitsche et al. 2011; Rickenmann 2012, 2014, 2016). Mit dieser Methode wurde für verschiedene Hochwasserereignisse eine bessere Übereinstimmung zwischen in der Natur beobachteten und berechneten Geschiebevolumen erreicht werden (Chiari und Rickenmann 2011; Nitsche et al. 2011; Schneider et al. 2015). Auf steile Gerinne angepasste Ansätze zur Berechnung des Fließwiderstandes und des Geschiebetransportes sind auch in Simulationsprogrammen für den Geschiebetransport implementiert, wie z.B. in den Programmen SETRAC bzw. TomSed (Chiari et al. 2010; <http://www.bedload.at>) sowie sedFlow (Heimann et al. 2015a, 2015b; <http://www.wsl.ch/sedFlow>).

4 Gefahrenbeurteilung

Bei der Abschätzung der Hochwassergefährdung entlang geschiebeführender Wildbäche und Gebirgsflüsse sind grundsätzlich drei Aspekte zu beurteilen (Rickenmann 2014): (i) Hydraulische Beurteilung, ob die Abflusskapazität des vorhandenen Gerinne ausreicht, um das Hochwasser schadlos abzuleiten; (ii) Wann und wo kann es bei intensiver Geschiebezufuhr zu Ablagerungen kommen, welche zur Ausuferung des Abflusses führen?; (iii) Wann und wo kann intensiver Abfluss mit wenig Geschiebe zu Erosionen führen, welche zum Beispiel die Stabilität von Uferböschungen und Foundationen von Konstruktionen gefährden? Die Beurteilung dieser Aspekte kann grundsätzlich auf zwei verschiedenen Detaillierungsebenen erfolgen: (a) Mit

einfachen Abschätzungen der hydraulischen Verhältnisse und des Geschiebetransportes an kritischen Stellen (Querschnitten), verbunden mit einer integrativen Abschätzung möglicher Auswirkungen über das ganze Hochwasserereignis; oder (b) unter Anwendung von numerischen Modellen zur Simulation der Hydraulik und des Geschiebetransportes, wobei die Erfahrung damit vor allem im steileren Gefällsbereich bisher beschränkt ist.

Bei den Abschätzungen zum Geschiebetransport entlang eines Gerinnes kann man im Wesentlichen die in Abschnitt 3 erwähnten Berechnungsverfahren anwenden. Falls es zu bedeutenden Ablagerungen im Gerinnebereich kommt, ist mit Ausuferungen des Abflusses und Ablagerungen des Geschiebes außerhalb des Gerinnes, z.B. auf dem Wildbachkegel, zu rechnen. Besonders gefährdet für kritische Ablagerungen sind Gefällsknicke im Längenprofil (Abnahme des Gerinnegefälles, ohne Zunahme des Abflusses). Wenn solche Gefällsknicke zudem noch im Bereich von Brücken liegen, ist bei Schwemmholztransport die Gefahr von Verklausungen besonders ausgeprägt. Berechnungsverfahren zur Abschätzung des Ablagerungsverhaltens bei Gefällsknicken sind z.B. in Bezzola et al. (1996) sowie in French et al. (2001) beschrieben.

Mittlerweile stützt sich die Beurteilung des Geschiebetransportes in Wildbächen und Gebirgsflüssen vermehrt auch auf numerische Simulationsmodelle ab. Grundsätzlich ist die Entwicklung von hydraulisch-sedimentologischen, numerischen Simulationsmodellen für Kies- und Sandflüsse mit flacheren Gefällen schon sehr weit fortgeschritten. Speziell für steile Gerinne wurden bisher hingegen nur wenige solche Simulationsmodelle entwickelt (Rickenmann 2014). Diese Modelle sind grundsätzlich ähnlich wie für Gebirgs- und Talflüsse entwickelte numerische Sedimenttransportmodelle, wie z.B. MORMO (Schilling & Hunziker 1995) und BASEMENT (Vetsch et al. 2011; <http://www.basement.ethz.ch>). Die Erfahrung mit der Anwendung von solchen Simulationsmodellen ist für den steileren Gefällsbereich und vor allem für Wildbäche aber bisher sehr beschränkt. Vor allem bezüglich der Simulation von Geschiebeablagerungen auf Wildbachkegeln besteht noch kaum Erfahrung.

Für die schnelle Berechnung von Geschiebeverlagerungen in alpinen Einzugsgebieten wurde an der Eidg. Forschungsanstalt WSL das eindimensionale Geschiebetransportmodell sedFlow entwickelt, welches die neueren Ansätze zur Berechnung des Geschiebetransportes in steilen Gerinnen berücksichtigt. Das Programm sedFlow erlaubt die Simulation vieler verschiedener Szenarien oder die Durchführung von Sensitivitätsanalysen mit Variation verschiedener Eingabe- und Modellparameter in relativ kurzer Zeit. Mit sedFlow wurden für eine Modelleichung Geschiebetransportberechnungen u.a. für die zwei Schweizer Gebirgsflüsse Kleine Emme und Brenno durchgeführt (Heimann et al. 2015a,b; Rickenmann et al. 2015). Eine vergleichende Anwendung mit sedFlow und Basement ist in Abschnitt 5 beschrieben.

5 Beispiel: Simulation des Geschiebetransportes

Vom 14.-16. Oktober 2000 war das Wallis (Schweiz) von einem Hochwasser betroffen. Trotz den vor allem im Oberwallis und der Simplonsüd-Rampe besonders konzentrierten Dauerregen führte die Vispa (Abb. 1) kein ausgeprägtes Hochwasser (Teyssie & Nigg 2002). Am Vormittag des 15. Oktobers brachte ein Murgang aus dem Beiterbach in Neubrücke (Abb. 1, 2) in drei Schüben etwa 60'000 bis 80'000 m³ Geschiebe in die Vispa ein (Hürlimann et al. 2002; Abb. 3). Dieser starke Feststoffeintrag resultierte in einem Aufstau der Vispa (Abb. 2) flussaufwärts von Neubrücke (rund 5,8 km vor deren Mündung in den Rotten), in massiven

Ablagerungen von zusätzlich ca. 230'000 m³ Geschiebe zwischen Stalden und Neubrück sowie in Überflutungen und großen Schäden an der Infrastruktur (v.a. Bahntrasse).



Abb. 1 Untersuchungsgebiet der Vispa im Kanton Wallis, Schweiz. (Kartengrundlage: Raster Pixelkarte Relief ©2008 swisstopo DV033492)

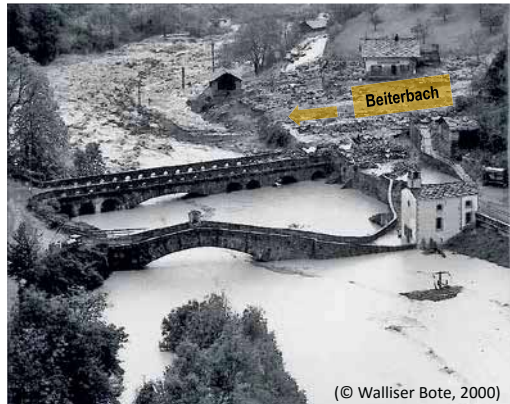


Abb. 2 Vispa beim Ort Neubrück, mit der Einmündung des Beiterbachs. Blick flussabwärts, Aufnahme der Zeitung „Walliser Bote“, kurz nach den Murgang-Schüben aus dem Beiterbach in die Vispa.

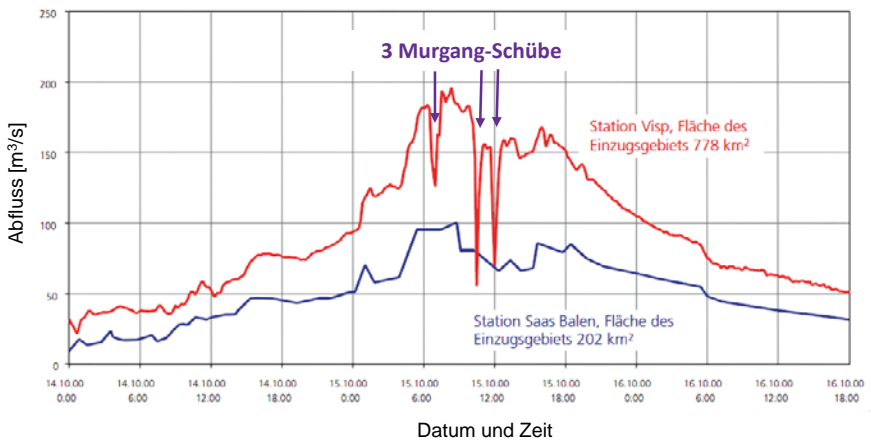


Abb. 3 Abflussganglinien in Visp (vor Mündung in den Rotten) sowie in Saas Balen (Teyssere & Nigg 2002). Der plötzliche Rückgang des Abflusses in Visp ist eine Folge der Murgangschübe aus dem Beiterbach in die Vispa mit entsprechendem temporärem Abflussrückstau.

Das Hochwasser und der Geschiebetransport während des Ereignisses vom Oktober 2000 wurden mit zwei 1D-Programmen simuliert (Briner 2016), nämlich mit sedFlow (Heimann et al. 2015a) sowie mit BASEMENT (Vetsch et al. 2011). Die beiden Programme unterscheiden sich unter anderem in der Berechnung der Hydraulik. Während in BASEMENT die Saint-Venant Gleichungen implementiert sind, wurde in sedFlow mit vereinfachten Ansätzen (uniforme Abflüsse, kein flow-routing) gerechnet. Modelliert wurde der Abschnitt der Vispa zwischen dem Zusammenfluss der Saaser Vispa und der Matter Vispa bei Stalden bis zur Mündung in den Rotten bei Visp (Abb. 4). Dabei wurden der Sedimenteintrag aus den zwei Hauptzubringern (Saaser und Matter Vispa) sowie durch die Murgang-Schübe aus dem Beiterbach berücksichtigt. In beiden Fällen wurde das Modell anhand von Eingabe- und Modellparametern kalibriert, so dass das nach Hochwasserende simulierte und das beobachtete Längenprofil möglichst gut übereinstimmten. In der Bestversion mit sedFlow wurde der Geschiebetransport mit der Transportformel von Wilcock und Crowe (2003) (Abb. 5) oder von Rickenmann (2001), mit einer Versteckfunktion mit einem Potenzgesetz, und in der Bestversion mit BASEMENT mit der Formel von Smart und Jäggi (2003) (Abb. 5), mit einer Versteckfunktion von Ashida und Michiue (1971), berechnet.

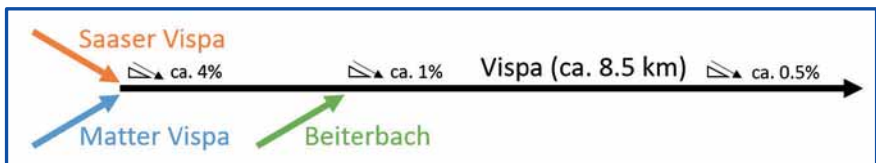


Abb. 4 Schematische Darstellung des simulierten Gerinneabschnittes der Vispa von Stalden bis Visp, mit Berücksichtigung des Eintrages aus der Saaser sowie Matter Vispa, den zwei Hauptzubringern im Oberlauf. (Briner 2016)

Die mit den beiden Programmen simulierten Längenprofile stimmen, abgesehen von lokalen Details, gut mit dem beobachteten Längenprofil überein (Abb. 5). Auch die Tendenzen zur Vergrößerung und Verfeinerung der Kornverteilungen im Eintragsbereich des Murgangs konnten reproduziert werden. Die simulierten Ablagerungen mit beiden Programmen betragen rund 210'000 m³ Geschiebe (ohne die Murgangeinträge). Für BASEMENT wurde für das Murgangmaterial eine feinere Korngrößenverteilung als für sedFlow verwendet. Oberhalb des Murgangs lagert sich durch den Aufstau feines Geschiebe ab, was zu einer Verfeinerung der Kornverteilung führt. Im Mündungsbereich des Beiterbachs resultiert eine Vergrößerung durch das Murgangmaterial. Die simulierten charakteristischen Korndurchmesser sind tendenziell feiner als die beobachteten Werte (Abb. 6). Gemäß den Simulationsresultaten und den Beobachtungen wurde das von den Murgängen eingetragene Geschiebe kaum wesentlich weiter flussabwärts transportiert als bis etwa 1,5 km unterhalb der Mündung des Beiterbachs.

Trotz des extremen Ereignisses konnten mit beiden verwendeten Programmen realistische Resultate bezüglich des Längenprofils, der Ablagerungsvolumina und den Tendenzen zur Vergrößerung und Verfeinerung der Kornverteilung erzielt werden. Da das Murgangmaterial mit

BASEMENT weniger stark abgetragen wurde als mit sedFlow, die simulierte Sohlschubspannung jedoch grösser war, hatte die Berechnung des Geschiebetransportes einen stärkeren Einfluss auf das resultierende Längenprofil als die Berechnung der Hydraulik.

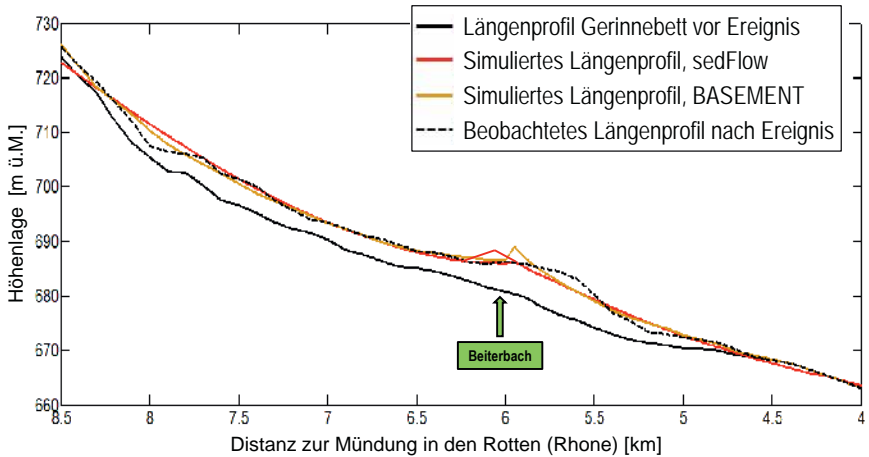


Abb. 5 Simuliertes Längenprofil der Vispa im Gerinneabschnitt von Stalden bis Visp nach dem Hochwasserereignis vom Oktober 2000, mit Berücksichtigung des Feststoffeintrages aus der Saaser und Matter Vispa sowie durch die drei Murgang-Schübe aus dem Beiterbach. (Briner 2016).

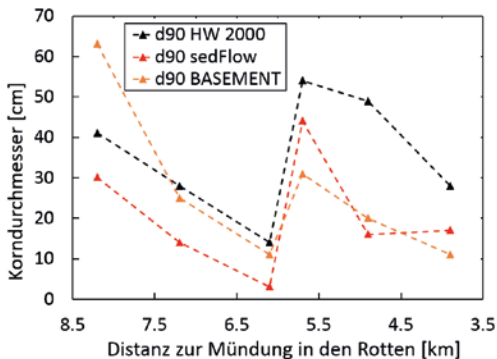


Abb. 6 : Simulierte charakteristische Korndurchmesser d_{90} an einigen Stellen um die Mündung des Beiterbachs am Ende des Hochwassers (Briner 2016) im Vergleich zu den beobachteten Korndurchmessern d_{90} nach dem Hochwasser (Teyssieire & Nigg 2002).

6 Schlussbemerkungen

In steileren und kleineren alpinen Einzugsgebieten haben die mit dem Geschiebetransport verbundenen Prozesse oft ein höheres Schadenpotential als ein grosser Wasserabfluss allein. Die quantitative Abschätzung des Geschiebetransportes ist nach wie vor mit relativ grossen Unsicherheiten verbunden, die tendenziell umso grösser sind je steiler die Einzugsgebiete sind (Wildbäche), und je bedeutender seitliche Sedimenteinträge und das Auftreten von Murgängen sind.

Literatur

- Ashida, K.; Michiue, M. (1971). An investigation over river bed degradation downstream of a dam, Proceedings 14th Congress of IAHR, Paris, Frankreich, Vol. 3, 247-256.
- Bayern (2016): Anzahl Wildbäche aus „Verzeichnisse der Gewässer zweiter Ordnung und der Wildbäche, Bekanntmachung des Bayerischen Staatsministeriums für Umwelt und Verbraucherschutz vom 12. Februar 2016, (<https://www.lfu.bayern.de/wasser/gewaesserverzeichnisse/kartendienste/index.htm>), „20% grösser al 25 km²“ von Webseite: (https://www.lfu.bayern.de/wasser/gefahren_im_alpenraum/index.htm#muren).
- Briner, K. (2016). Sohlenveränderungen in der Vispa beim Hochwasserereignis vom Oktober 2000, Simulation des Geschiebetransports mit zwei 1D-Simulationsprogrammen, Masterarbeit, ETH Zürich und Eidg. Forschungsanstalt WSL Birmensdorf.
- Chiari, M.; Friedl, K.; Rickenmann, D. (2010). A one dimensional bedload transport model for steep slopes, *Journal of Hydraulic Research*, 48(2), 152–160.
- Chiari, M.; Rickenmann, D. (2011). Back-calculation of bedload transport in steep channels with a numerical model, *Earth Surface Processes Landforms*, 36(6), 805–815.
- die.Wildbach (2012). Wildbach- und Lawinerverbauung in Österreich, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Sektion Forstwesen, Wien.
- Ferguson, R. (2007). Flow resistance equations for gravel- and boulder-bed streams, *Water Resources Research*, 43, W05427, doi: 10.1029/2006WR005422.
- Gomez, B.; Church, M. (1989). An assessment of bedload sediment transport formulae for gravel bed rivers, *Water Resources Research*, 25(6), 1161-1186.
- Gray, J.R.; Laronne, J.B.; Marr, J.D.G. (2010). Bedload–surrogate Monitoring Technologies, U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010–5091, 37p., available at: <http://pubs.usgs.gov/sir/2010/5091>.
- Heimann, F.U.M.; Rickenmann, D.; Turowski, J.M.; Kirchner, J.W. (2015a). sedFlow – a tool for simulating fractional bedload transport and longitudinal profile evolution in mountain streams, *Earth Surface Dynamics*, 3, 15-34.
- Heimann, F.U.M.; Rickenmann, D.; Böckli, M.; Badoux, A.; Turowski, J.M.; Kirchner, J.W. (2015b). Calculation of bedload transport in Swiss mountain rivers using the model sedFlow: proof of concept, *Earth Surface Dynamics*, 3, 35–54.

- Hürlimann, M.; Rickenmann, D.; Graf, C.; Hegg, C.; Näf, D. (2002): Beiterbach (Neubrück), In: Hochwasser 2000 – Les crues 2000. Ereignisanalyse / Fallbeispiele. Bundesamt für Wasser und Geologie, Berichte Serie Wasser 2, 193-198.
- Nitsche, M.; Rickenmann, D.; Turowski, J.M.; Badoux, A.; Kirchner, J.W. (2011). Evaluation of bedload transport predictions using flow resistance equations to account for macro-roughness in steep mountain streams, *Water Resources Research*, 47, W08513, doi: 10.1029/2011WR010645.
- Rickenmann, D. (1991). Hyperconcentrated flow and sediment transport at steep slopes, *Journal of Hydraulic Engineering* 117(11), 1419-1439.
- Rickenmann, D. (2001). Comparison of bed load transport in torrents and gravel bed streams, *Water Resources Research* 37(12), 3295-3305.
- Rickenmann, D. (2012). Alluvial steep channels: flow resistance, bedload transport and transition to debris flows, In: *Gravel Bed Rivers: Processes, Tools, Environment*, Wiley, Chichester, 386–397.
- Rickenmann, D. (2014). Methoden zur quantitativen Beurteilung von Gerinneprozessen in Wildbächen, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Birmensdorf, WSL Bericht Nr. 9.
- Rickenmann, D. (2016). Methods for the Quantitative Assessment of Channel Processes in Torrents (Steep Streams), *IAHR Monograph Series*, CRC Press, Boca Raton, 138p.
- Rickenmann, D. (2017). Bed-load transport measurements with geophones and other passive acoustic methods, *Journal of Hydraulic Engineering*, 60th Anniversary State-of-the-Art Reviews, 143(6), 03117004-1-14, doi: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001300.
- Rickenmann, D.; Koschni, A. (2010). Sediment loads due to fluvial transport and debris flows during the 2005 flood events in Switzerland, *Hydrological Processes*, 24, 993–1007.
- Rickenmann, D.; Recking, A. (2011), Evaluation of flow resistance in gravel-bed rivers through a large field data set, *Water Resources Research*, 47, W07538, doi:10.1029/2010WR009793.
- Rickenmann, D.; Chiari, M.; Friedl, K. (2006). SETRAC – A sediment routing model for steep torrent channels, In: *Riverflow 2006*, International Conference on Fluvial Hydraulics, September 6-8, 2006, Lisabon, Vol. 1, 843-853.
- Rickenmann, D.; Turowski, J.M.; Fritschi, B.; Klaiber, A.; Ludwig, A. (2012). Bedload transport measurements at the Erlenbach stream with geophones and automated basket samplers, *Earth Surface Processes and Landforms*, 37, 1000-1011.
- Rickenmann, D.; Böckli, M.; Heimann F.U.M.; Badoux A.; Turowski, J.M. (2015). Synthesebericht: Das Modell sedFlow und Erfahrungen aus Simulationen des Geschiebetransportes in fünf Gebirgsflüssen der Schweiz, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Birmensdorf, WSL Bericht Nr. 24.
- Schilling, M.; Hunziker, R. (1995). Programmpaket MORMO – Grundlagen. In: *Mathematische Modelle offener Gerinne*, ÖWAV-Seminar Konstruktiver Wasserbau – Landschaftswasserbau, 21. November 1995, Bd. 17, 91–104.
- Schneider, J.M.; Rickenmann, D.; Turowski, J.M.; Bunte, K.; Kirchner, J.W. (2015). Applicability of bedload transport models for mixed-size sediments in steep streams considering

- macro-roughness, *Water Resources Research*, 51, 5260–5283, doi: 10.1002/2014WR016417.
- Smart, G.M.; Jäggi, M.N.R. (1983). Sedimenttransport in steilen Gerinnen, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich, Mitteilung Nr. 64.
- Teyssie, P.; Nigg, U. (2002). Vispa im Bereich Sefinot-Ackersand. In: Hochwasser 2000 – Les crues 2000, Ereignisanalyse / Fallbeispiele. Bundesamt für Wasser und Geologie, Berichte Serie Wasser 2, 199-205.
- Tognacca, C. (1999). Beitrag zur Untersuchung der Entstehungsmechanismen von Murgängen, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich, Mitteilung Nr. 164.
- Vetsch, D.; Rousselot, P.; Fäh, R. (2011). Flussgebietsmodellierung mit der Simulationssoftware BASEMENT, *Wasser Energie Luft*, 103(4), 55-61.
- Wilcock, P.; Crowe J. (2003). Surface-based Transport Model for Mixed-Size Sediment, *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(2), 120-128.
- Wyss, C.R.; Rickenmann, D.; Fritschi, B.; Turowski, J.M.; Weitbrecht, V.; Boes, R.M. (2016a). Measuring bedload transport rates by grain-size fraction using the Swiss plate geophone signal at the Erlenbach, *Journal of Hydraulic Engineering*, 142(5), 04016003, doi: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001090.
- Wyss, C.R.; Rickenmann, D.; Fritschi, B.; Turowski, J.M.; Weitbrecht, V.; Boes, R.M. (2016b). Laboratory flume experiments with the Swiss plate geophone bedload monitoring system, Part I: Impulse counts and particle size identification, *Water Resources Research*, 52, 7744–7759, doi: 10.1002/2015WR018555.
- Wyss, C.R.; Rickenmann, D.; Fritschi, B.; Turowski, J.M.; Weitbrecht, V.; Travaglini, E.; Bardou, E.; Boes, R.M. (2016c). Laboratory flume experiments with the Swiss plate geophone bedload monitoring system, Part II: Application to field sites with direct bedload samples, *Water Resources Research*, 52, 7760–7778, doi: 10.1002/2016WR019283.

Anschrift des Verfassers

Dr. Dieter Rickenmann
Eidg. Forschungsanstalt WSL
Gebirgshydrologie und Massenbewegungen
Zürcherstraße 111
CH-8903 Birmensdorf, Schweiz
dieter.rickenmann@wsl.ch

Einwirkungen fluviatiler Geschiebetransportprozesse auf Gebäude

Michael Sturm, Bernhard Gems, Florian Keller, Bruno Mazzorana, Sven Fuchs, Maria Papathoma-Köhle und Markus Aufleger

Zusammenfassung

Der vorliegende Beitrag befasst sich mit der experimentellen Modellierung fluviatiler Geschiebetransportprozesse und einhergehenden Einwirkungen auf Gebäudestrukturen.

In einer homogenen Versuchsrinne wurden die Anströmungsmuster und Einwirkungen geschiebeführender Abflüsse auf ein einzelnes vertikales Plattenelement untersucht. Belastungen auf das Plattenelement wurden mit einem dreiaxialen Kraftsensor erfasst. Im Sinne einer Parameterstudie wurde der Einfluss von Prozessparametern (Abfluss, Geschiebeanteil und Korngrößenverteilung des transportierten Geschiebes) und von geometrischen Parametern (Gerinneneigung, Anströmwinkel, Plattenbreite) untersucht. Mit den Versuchen konnte gezeigt werden, dass am Plattenelement abgelagertes Geschiebe bei entsprechenden hydraulischen Verhältnissen oftmals eine abschirmende Wirkung auf das Plattenelement ausübt und somit die Belastungen auf das Plattenelement reduziert. Das Einwirkungsmuster wird im Wesentlichen durch die hydraulischen Verhältnisse, d.h. durch das Ausmaß des Aufstaus im Oberwasser, beeinflusst. Geschieberelevante Rahmenbedingungen wie die Korngrößen des Geschiebes und dessen Konzentrationen im Abfluss sind von untergeordneter Bedeutung für das Ausmaß der Belastungen.

Weiterführende Untersuchungen erfolgten an einem großmaßstäblichen Modellversuch (1:30), in dem reale Gebäude bzw. die realen Verhältnisse am Schwemmkegel des Schnannerbaches nachgebildet wurden. Wie bereits beim Hochwasserereignis des Schnannerbaches im August 2005 kann ein rückschreitender, fluviatiler Verlandungsprozess im Künettengerinne den Austritt von Wasser und Feststoffen in den angrenzenden Siedlungsbereich verursachen. In den experimentellen Untersuchungen konnten die räumliche Ausprägung der Prozesse und die im Ereignisverlauf variablen Einwirkungen auf die Gebäude erfasst werden. Als relevante Parameter für die Intensität der Kräfte auf die Gebäude konnte insbesondere die Siedlungsstruktur, d.h. die Anordnung umliegender Gebäude, und die Ausbildung von Fließwegen im Bereich von Feststoffablagerungen am Schwemmkegel beobachtet werden. Kurzzeitig wirkende, konzentrierte Anströmungen auf Gebäudeteile verursachten im Ereignisverlauf Belastungsspitzen, welche zum Teil erheblich größer ausfallen, als jene infolge der statischen Ablagerungen nach dem betrachteten Ereignis.

Aus den gegenständlichen experimentellen Untersuchungen können wichtige Erkenntnisse zur Analyse und Modellierung fluviatiler Feststofftransportprozesse für die Gefahrenzonenplanung, für die Projektierung lokaler Objektschutzmaßnahmen und insbesondere auch für Aktivitäten der Raumplanung gewonnen werden.

1 Einleitung

Die Modellierung komplexer hydrodynamischer Strömungsprozesse stellt eine anspruchsvolle Aufgabenstellung im Wasserbau dar. Neben der Anwendung numerischer Modellwerkzeuge werden hierfür auch experimentelle Untersuchungen im physikalischen Modellversuch

durchgeführt. Komplexe, dreidimensionale Feststofftransportprozesse sind gegenwärtig mit numerischen Modellen nur sehr eingeschränkt abbildbar. Die Modellierung dieser Prozesse erfordert lange Berechnungszeiten, die Weiterentwicklung von Modellgesetzen und Berechnungsansätzen und entsprechende Messdaten für die Kalibrierung und Validierung von Modellen. Für die Erfassung von Messdaten eignet sich neben den Naturmessungen auch der physikalische Modellversuch. Experimente im Labor bedeuten stets eine Skalierung der realen Verhältnisse in die Modellgröße. Hierbei gilt es geeignete Modellgesetze anzuwenden und prozessrelevante Vereinfachungen im Modellversuch so zu wählen, dass die Experimente mit keinen relevanten Maßstabeffekten behaftet sind und den natürlichen Verhältnissen entsprechen.

Der Transport von Feststoffen bei fluviatilen und murartigen Verlagerungsprozessen stellt im Hinblick auf die Prozesseinwirkungen auf Gebäude einen maßgebenden Parameter dar (Fuchs et al., 2007; Mazzorana et al., 2014). Charakteristik und Einwirkungen fluviatiler Hochwasserprozesse werden durch das auslösende Niederschlagsmuster, die Topografie und oberflächennahe Bodenstruktur, die Verfügbarkeit von Feststoffen im Einzugsgebiet, deren Charakteristik und auch von der Struktur des Siedlungsraumes im Gefährdungsbereich bestimmt. Große Mengen verfrachteter Feststoffe, einhergehende Ablagerung im Siedlungsbereich und auch der Materialeintritt in Gebäude bestimmen wesentlich das Ausmaß verursachter Schäden an Gebäuden, Infrastruktur, etc. Bestehende Ansätze zur Berechnung dynamischer Fließprozesse basieren überwiegend auf der Ermittlung statisch und dynamisch wirkender Kräfte im ungestörten Strömungsfeld (Bergmeister et al., 2009). Die gegenseitige Beeinflussung der Strömung mit darin befindlichen Objekten, ist hierbei nicht explizit berücksichtigt. Fließprozesse unter dem Einfluss von Objekten im Strömungsfeld sind sehr komplex. Bestehende Untersuchungen befassen sich in diesem Kontext mit der Analyse der Strömungsprozesse (Spinewine et al., 2003; Armanini et al., 2010) bzw. mit der Interaktion von murartigen Prozessen mit Sperrenbauwerken (Scheidl et al., 2013). Weiterführende Untersuchungen zur Interaktion fluviatiler Verlagerungsprozesse mit Objekten sind hierbei dennoch anzustreben.

Die im vorliegenden Beitrag dargestellten Untersuchungen befassen sich mit der experimentellen Modellierung fluviatiler Hochwasserprozesse. Hierfür wurden im Wasserbaulabor der Universität Innsbruck zunächst Grundlagenversuche in einer homogenen Versuchsrinne durchgeführt und im Weiteren der Schwemmkegel des Schnannerbaches im Maßstab 1:30 nachgebildet. Die Versuchsergebnisse stellen die Grundlage für ein physikalisch-basiertes Modellkonzept dar, in dem schließlich verbesserte Aussagen und Modelle zur Vulnerabilitätsanalyse von Gebäuden gegenüber fluviatiler Hochwasserprozesse erarbeitet werden (Mazzorana et al., 2014).

2 Untersuchungen zur Einwirkung geschiebeführender Abflüsse auf vertikale Platten

2.1 Versuchsanordnung und Messtechnik

Die Versuchsanordnung zur Einwirkungsanalyse geschiebeführender Abflüsse auf vertikale Platten umfasst eine ca. 7 m lange, homogene Versuchsrinne mit rechteckigem Querschnitt und einer Sohlbreite von 0,5 m (Abbildung 1). Die Konstruktion der Versuchsrinne besteht aus Dreischichtplatten, PVC- und Plexiglasplatten und weist entsprechend sehr geringe Rauheiten auf. Das betrachtete vertikale Plattenelement befindet sich auf einer ca. 2 m langen

Rampenkonstruktion im Gerinne. Die Rampenneigung wurde im Rahmen der Versuchsdurchführung im Bereich zwischen 4 % und 15 % variiert. Die Erfassung der Belastungen auf die Platte erfolgt mittels eines dreiaxialen Kraftsensors. Einwirkende Normal-, Schub- und Vertikalkräfte wurden mit einer Frequenz von 200 Hz gemessen. Stationäre, hydraulische Verhältnisse in der Versuchsrinne wurden über ein lokales Wasserkreislaufsystem mit Klappensteuerung und Durchflussmessung (IDM) gewährleistet. Der Eintrag von Geschiebe ins Modell (Variationen des Geschiebeanteils bis maximal ca. 15 %) erfolgte manuell am oberen Ende der Rampe. In den Versuchen wurden jeweils 50 kg Geschiebe zugegeben. Entsprechend des jeweiligen Geschiebeanteiles ergaben sich Versuchsdauern zwischen 50 s und 9,5 min. Im Zuge der Untersuchungen wurden neben der Rampenneigung und dem Geschiebeanteil im Wasser-Feststoff-Gemisch der Abfluss (1 l/s - 10 l/s) und die Kornverteilung des eingetragenen Geschiebes (0,5 mm - 1,0 mm; 3,2 mm - 5,0 mm; 5,0 mm - 8,0 mm) variiert. Zudem wurden Platten mit verschiedenen Breiten (0,2 m und 0,3 m) und definierten Anströmwinkeln (0°; 15°; 30°; 45°) betrachtet. Neben den dreiaxialen Belastungen der Platte wurden die Fließgeschwindigkeiten in der freien Fließstrecke auf der Rampe (Tracer, PIV) sowie die Anströmhöhen an der Platte gemessen. Sämtliche Versuche wurden mittels Videos dokumentiert.

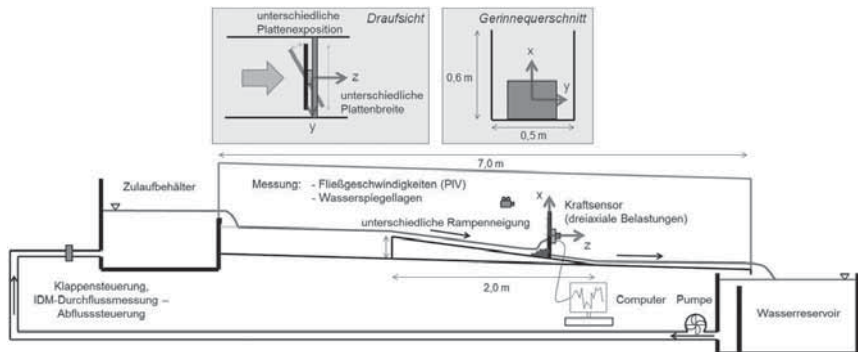


Abb. 1 Schematische Darstellung der Versuchsanordnung zur Untersuchung der Einwirkungen geschiebeführender Abflüsse auf vertikale Platten; Modellmaße (adaptiert nach Sturm et al., in Druck a, b)

2.2 Experimente und Ergebnisse

Im Folgenden werden ausgewählte Versuchsergebnisse dargestellt. Für weiterführende Darstellungen sowie begleitende 3d-numerische Berechnungen sei auf Sturm et al. (in Druck a und b) verwiesen.

In Abbildung 2 sind die Belastungen auf die Platte infolge Reinwassereinwirkung in Abhängigkeit von Rampenneigung, Anströmwinkel und Abfluss klassifiziert. Dargestellt ist jeweils die spezifische Normalkraft, d.h. die auf die Plattenbreite bezogene einwirkende Normalkraft. Geringfügige (unvermeidbare) Schwankungen im Wasserkreislauf verursachten geringfügige hydraulische Fluktuationen im Versuchserinne. Mit diesem Hintergrund sind die spezifischen Normalkräfte in Form von Boxplots unter Angabe der Extremwerte und der 25/75-Perzentilen dargestellt. Die Ergebnisse der Reinwasserbetrachtung zeigen einen klaren Zusammenhang zwischen einwirkendem Abfluss und resultierender Belastung. Fluktuationen

im Strömungsbild fallen mit zunehmendem Abfluss ausgeprägter aus. Die Belastungen auf die Platte nehmen mit zunehmendem Rampengefälle zu, wobei nur geringfügige Unterschiede in den Ergebnissen für die beiden Rampenneigungen zwischen 13 % und 15 % festzustellen sind. Die im Verhältnis höheren Belastungen auf die Platte bei einer Rampenneigung von 4 % resultieren aus dem ausgeprägteren Rückstauereffekt an der Platte (vgl. Armanini et al., 2010). Für diese Versuche wurde zudem eine Plattenbreite von 0,3 m gewählt, welche auch die seitliche Umströmung der Platte bei gegebener Breite der Versuchsrinne (0,5 m) etwas mehr einschränkt als jene Platte mit 0,2 m Breite. Sofern die Einwirkungen auf die Platte von der Einschnürung durch die Gerinnwand unbeeinflusst sind, nimmt die spezifische Normalkraft mit flacherem Anströmwinkel ab. Dieser Effekt zeigt sich bei Vergleich der Ergebnisse der Versuche mit den Anströmwinkeln 30° und 45°. Bei geringen Anströmwinkeln (15° und 30°) fallen die Normalkräfte aufgrund der dynamischeren Prozesse und den Reflektionen von der Gerinnwand zunächst größer aus, als bei den Versuchen mit orthogonaler Anströmung. Die einwirkenden Schubkräfte fallen im Vergleich zu den Normalkräften in allen Versuchen gering aus. Sie nehmen erwartungsgemäß mit zunehmendem Anströmwinkel geringfügig zu.

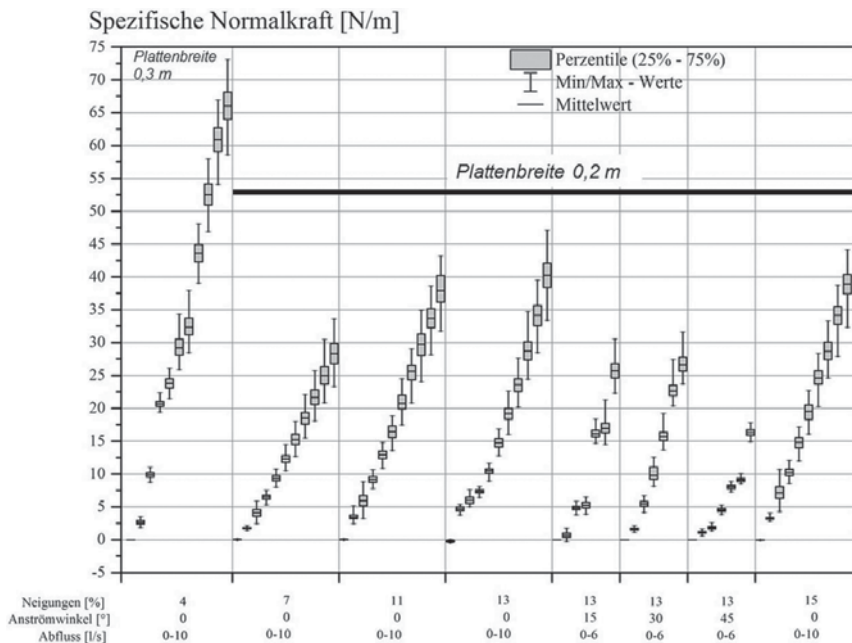


Abb. 2 Spezifische Normalkraft infolge Reinwassereinwirkung in Relation zur Rampenneigung [%], zum Anströmwinkel [°] und zum Abfluss [l/s]; Modellmaße (adaptiert nach Sturm et al., in Druck a, b)

Die beobachteten Prozesse unter geschiebelasteter Einwirkung auf die Platte fallen vergleichsweise komplexer aus. Abbildung 3 zeigt die aufgezeichneten Belastungen der Platte (Normal-, Vertikal- und Schubkraft) für einen repräsentativen Lastfall mit stationären, hydraulischen Verhältnissen und einem Geschiebeanteil von 6,3 %. Die Einwirkungen entsprechen bis zum Beginn der Geschiebezugabe (bei ca. 80 s) den Werten aus der

Reinwasserbetrachtung. Mit beginnender Geschiebezugabe lagert sich Material unmittelbar an der Platte ab, schirmt diese vor der hydraulischen Einwirkung weitgehend ab und verursacht folglich eine deutliche Abnahme der Belastungen auf die Platte. Für diese Versuchskonfiguration und allgemein bei Bedingungen, in denen das in der Strömung befindliche Objekt einen deutlichen Rückstau im Oberwasser (vgl. Armanini et al., 2010) verursacht, vermögen Feststoffablagerungen am Objekt die Belastungen zu verringern. Mit zunehmender Abflussdynamik, d.h. mit zunehmendem Gerinnegefälle und zunehmendem Abfluss, verringert sich der hydraulische Rückstau. Der Aufstau stellt sich nur unmittelbar an der Platte ein (vgl. Armanini et al., 2010), Geschiebeablagerungen an der Platte fallen wesentlich geringer aus und die abschirmende Wirkung entfällt entsprechend. Nach Ende der Geschiebezugabe wird in der Versuchsdurchführung das abgelagerte Geschiebe sukzessive wieder mobilisiert, die Belastungen entsprechen wieder dem Reinwasserniveau.

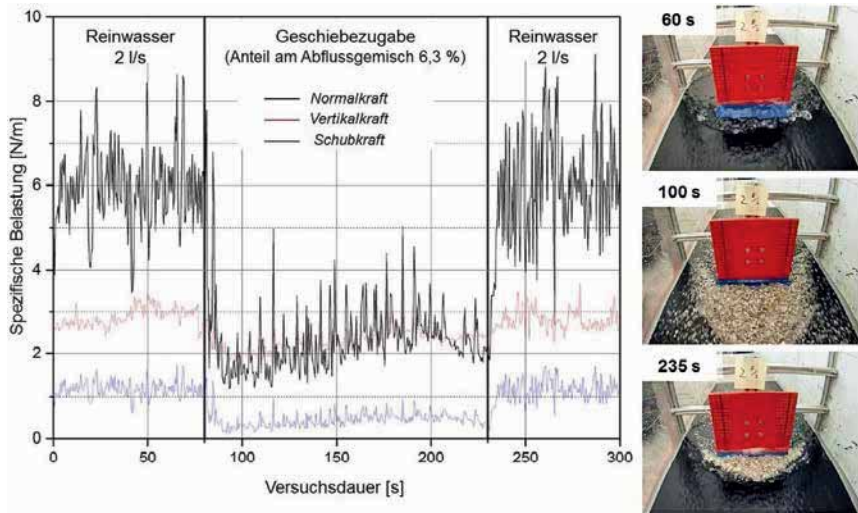


Abb. 3 Spezifische Belastungen (Normal-, Vertikal- und Schubkraft) im zeitlichen Verlauf des Versuches unter stationären, hydraulischen Bedingungen und Geschiebeeintrag; Abfluss: 2 l/s; Geschiebeanteil: 6,3 %; Korngröße: 3,2 mm - 5,0 mm; Modellmaße (adaptiert nach Sturm et al., in Druck a, b)

In Abbildung 4 ist die spezifische Normalkraft auf die Platte für die Versuchskonfiguration mit 13 % Rampenneigung und das Korngrößenspektrum 3,2 mm - 5,0 mm dargestellt. Die Ergebnisse sind entsprechend dem vorherrschendem Abfluss und Geschiebeanteil klassifiziert. Der Einfluss des Geschiebeanteiles und der Korngrößen des eingetragenen Geschiebes auf die Belastungen der Platte fällt verhältnismäßig gering aus. Diese Parameter beeinflussen in erster Linie die Ausprägung des Ablagerungskörpers an der Platte. Hohe Geschiebeanteile bedeuten eine verhältnismäßig rasche Ausbildung des Ablagerungskörpers. Eine eindeutige Abhängigkeit zwischen den Mittelwerten der spezifischen Normalkräfte und den Geschiebeanteilen bzw. den Korngrößen des transportierten Geschiebes konnte in den Versuchen nicht beobachtet werden. Wie in Abbildung 4 ersichtlich, nehmen die Fluktuationen

der Strömung unmittelbar an der Platte und folglich auch die Fluktuationen der Messwerte mit zunehmendem Geschiebeanteil zu.

Spezifische Normalkraft [N/m] Neigung 13% - Korngröße 3,2-5,0 [mm]

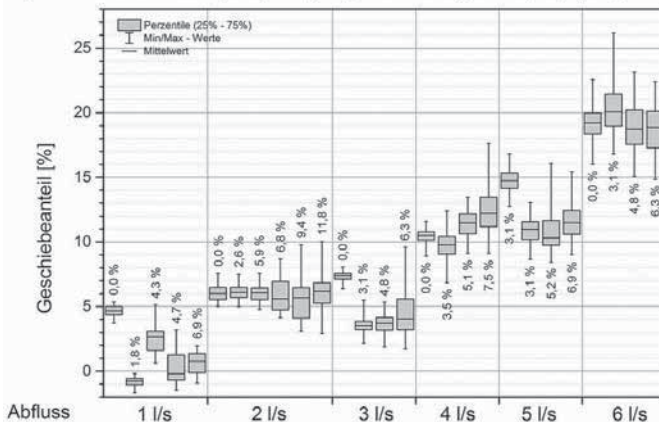


Abb. 4 Spezifische Normalkraft in Abhängigkeit des Geschiebeanteiles [%] und des Abflusses [l/s]; Rampenneigung: 13 %; Korngröße: 3,2 mm -5,0 mm; Modellmaße (adaptiert nach Sturm et al., in Druck a, b)

3 Großmaßstäbliche Versuche zur Einwirkung geschiebeführender Abflüsse auf Gebäudestrukturen (Maßstab 1:30)

3.1 Projektgebiet, Versuchsanordnung und Messtechnik

Für die in Kapitel 2 dargestellten Untersuchungen wurde ein stark vereinfachtes, abstraktes Versuchsschema gewählt. Im Hinblick auf weiterführende Modellversuche an einem komplexeren und natürlichen Verhältnissen entsprechendem Modell wurden hiermit die Eignung der Messtechnik, der Einbau der Messinstrumente und schließlich grundlegende Zusammenhänge zwischen Prozessgrößen und Belastungen untersucht. Weiterführende Versuche an einem großen Modellversuch sind Gegenstand dieses Kapitels. Der physikalische Modellversuch befasst sich, wie in Abbildung 5 dargestellt, mit dem Schwemmkegelgerinne des Schnannerbaches im Stanzertal (Tirol). Der wesentliche Bereich des Künettengerinnes (durchschnittliches Gefälle ca. 12,5 %) und des umliegenden Siedlungsraumes sind im Modellversuch im Maßstab 1:30 abgebildet. Die Darstellungen in Abbildung 5 zeigen den Zustand unmittelbar nach dem Schadensereignis vom August 2005. Hier wurden einige Gebäude zum Teil schwer beschädigt. Insgesamt verursachte das fluviale Hochwasserereignis Ablagerungen am Schwemmkegel im Ausmaß von etwa 20.000 m³ (Chiari, 2008). Für weitere Details zur Charakteristik dieses Schadensereignisses bzw. der Ereignisrekonstruktion sei auf Rudolf-Miklau et al. (2006), Chiari (2008) bzw. Gems et al. (2014) verwiesen.

Im gegenständlichen Modellversuch werden fluviale Geschiebetransportprozesse und deren Einwirkungen auf drei Objekte (Häuser 1-3, Abbildung 5) untersucht. In Analogie zu den in Kapitel 2 dargestellten Versuchen mit vertikalen Platten wurden 16 relevante Wandelemente

dieser Häuser (Abbildung 5) jeweils individuell mit dreiaxialen Kraftsensoren instrumentiert. Die durchgeführten Versuche umfassen stationäre Reinwasserversuche sowie Versuche mit Geschiebezugabe am oberstromigen Modellrand des Schnannerbaches. Abflüsse bis ca. $50 \text{ m}^3/\text{s}$, Geschiebeeinträge mit Anteilen zwischen 12,5 % und 15,5 % und unterschiedlichen Korngrößenverteilungen („feines“ Geschiebe mit $d_m = 0,122 \text{ m}$, $d_{30} = 0,025 \text{ m}$ und $d_{90} = 0,374 \text{ m}$; „grobes“ Geschiebe mit $d_m = 0,204 \text{ m}$, $d_{30} = 0,032 \text{ m}$ und $d_{90} = 0,570 \text{ m}$) wurden betrachtet. Die Versuchsdurchführung basiert auf den Erkenntnissen von Gems et al. (2014), wonach die rückschreitende Verlandung in der Künette des Schnannerbaches ausgehend vom Mündungsbereich den Austritt von Wasser und Feststoffen aus dem Gerinne verursacht. Bei den Reinwasserversuchen wurde der Austritt von Wasser an unterschiedlichen Stellen in der Künette oberhalb der Dorfbrücke simuliert. Bei den Geschiebeversuchen wurde der rückschreitende Verlandungsprozess durch Verschluss der Dorfbrücke und der Zugabe einer kritischen Geschiebefracht simuliert. Der zeitlich variable Austrittspunkt aus dem Gerinne ergab sich hier in Abhängigkeit der maßgebenden Szenarioparameter (Abfluss, Geschiebeanteil und Kornverteilung). Die in den Versuchen betrachteten Prozesse im Gerinne und auch die resultierenden Ablagerungen am Schwemmkegel entsprachen in hohem Maße den rekonstruierten Prozessen beim genannten Schadensereignis. Der Einfluss von umliegenden Gebäuden auf die Prozesscharakteristik und somit auf die Belastungen wurde anhand der durchgeführten Versuchsszenarien identifiziert.

An den 16 instrumentierten Wandelementen wurden in allen Versuchen die Anström- bzw. Ablagerungshöhen sowie die dreiaxialen Belastungen im zeitlichen Verlauf des Versuches erfasst. Zudem wurden Geschwindigkeitsmessungen am Schwemmkegel durchgeführt. Sämtliche Versuche wurden umfassend in Form von Fotos und Videos, sowohl in der Gesamtbetrachtung als auch in der Detailaufnahme der Häuser 1-3, dokumentiert.

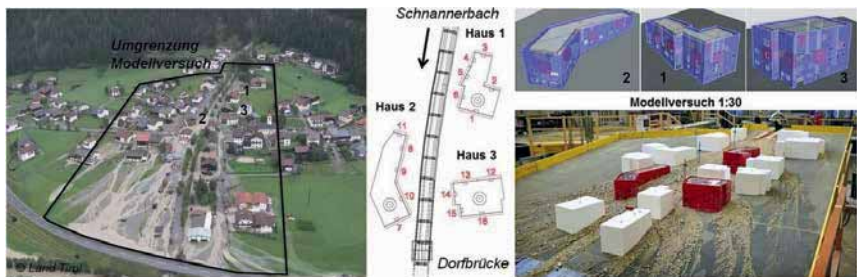


Abb. 5 Zustand am Schwemmkegel des Schnannerbaches nach dem Schadensereignis im August 2005 (links); Überblick über den im Modellversuch abgebildeten Bereich (links, rechts) und die messtechnisch instrumentierten 3 Häuser (Mitte und rechts)

3.2 Experimente und Ergebnisse

In den Abbildungen 6 und 7 sind ausgewählte Ergebnisse der Reinwasserversuche, bereits umgerechnet in den Naturmaßstab, dargestellt. Abbildung 6 zeigt die Relation von entsprechender spezifischer (auf die Länge des jeweiligen Wandelementes bezogener) Normalkraft und Anströmhöhe für sämtliche Versuchskonfigurationen mit und ohne den Einfluss umliegender Gebäude. Bei gemessenen Reinwasserbelastungen bis etwa 14 kN/m und Anströmhöhen bis etwa 2 m ist ein klarer Zusammenhang zwischen Prozessgröße und Einwirkung auf das Objekt ableitbar, der von den unterschiedlichen Prozesscharakteristika

(Abfluss, Austrittspunkt aus dem Gerinne) nur geringfügig beeinflusst wird. Abbildung 7 stellt die an den 16 Wandelementen der Häuser 1-3 erfassten spezifischen Normalkräfte für die Situationen mit und ohne die räumliche Wirkung umliegender Gebäude am Schwemmkegel gegenüber.

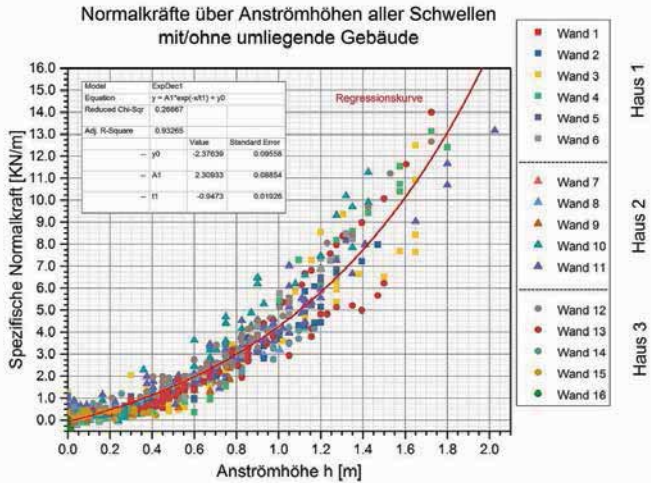


Abb. 6 Relation spezifischer Normalkräfte und Anströmhöhen aus sämtlichen Reinwasserversuchen mit und ohne Einfluss umliegender Gebäude; Naturmaße

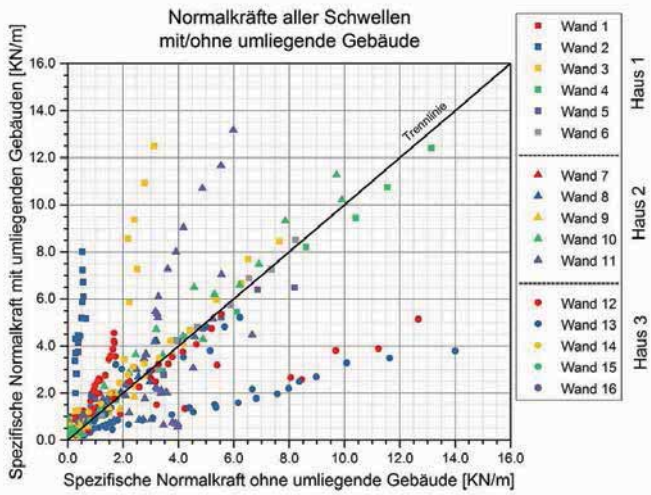


Abb. 7 Gegenüberstellung der spezifischen Normalkräfte (Reinwasser) aus sämtlichen Versuchen mit und ohne Einfluss umliegender Gebäude bzw. für alle instrumentierten Wandelemente der Häuser 1-3; Naturmaße

Im Vergleich der beiden Situationen mit unterschiedlicher Siedlungsstruktur am Schwemmkegel zeigt sich ein markanter Unterschied in der räumlichen Ausbreitung der Prozesse und in den Belastungen der Häuser. Umliegende Gebäude lenken und konzentrieren den Abfluss in der Fläche, sie verursachen auch abgeschattete und damit geschützte Bereiche. Aus den umliegenden Gebäuden geht je nach räumlichen Verhältnissen und Prozessausbreitung eine schützende oder prozessverstärkende Wirkung hervor. Die Wandelemente 2 und 3 (Haus 1) und Wandelement 11 (Haus 2) werden durch den Einfluss umliegender Gebäude deutlich mehr beansprucht als im Zustand unbeeinflusster Anströmungsverhältnisse. Für die Wandelemente 12 und 13 (Haus 3) ergibt sich durch die umliegenden Gebäude eine erhebliche Schutzwirkung, welche die spezifischen Normalkräfte im Vergleich markant verringert.

In Abbildung 8 sind die spezifischen Normalkräfte auf die Wandelemente 7-11 (Haus 2) im zeitlichen Verlauf eines (quasi-)stationären Versuches mit Geschiebezugabe dargestellt.

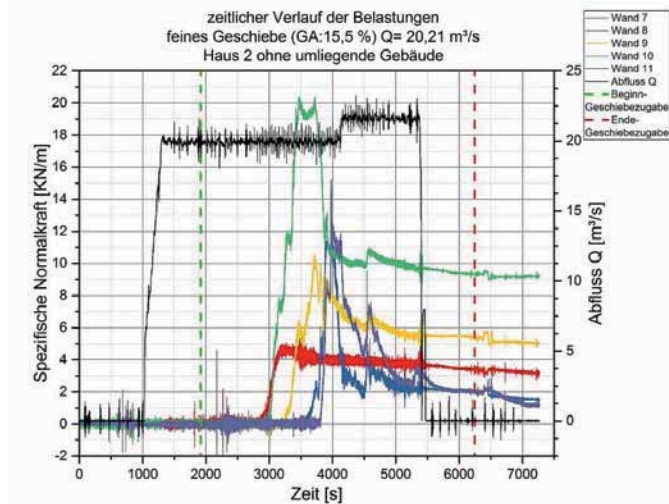


Abb. 8 Spezifische Normalkräfte über die Versuchsdauer für die Wandelemente 7-11 (Haus 2); Abfluss: ca. 20 m³/s; Geschiebeanteil: 15,5 %; „feines“ Geschiebe; Naturmaße

Nach einsetzendem Geschiebeeintrag in den betrachteten Künettenabschnitt stellt sich ausgehend von der Dorfbrücke ein rückschreitender Verlandungsprozess ein. Nach Austritt des Wasser-Feststoff-Gemisches in den Siedlungsbereich stellen sich Einwirkungen auf die Wandelemente ein. Diese Einwirkungen weisen einen jeweils für die Wandelemente spezifischen, variablen zeitlichen Verlauf auf. Letzterer ist stark geprägt von den sich ausbildenden Fließwegen am Schwemmkegel, welche wiederum von den situierten Gebäuden und den morphologischen Prozessen bestimmt werden. Belastungsspitzen, beispielsweise an Wandelement 10 (Haus 2), können durch morphologische Prozesse (Fließwege am Ablagerungskörper) und die daraus resultierende konzentrierte und teilweise schwallartige Anströmung von Wasser und Feststoffen erfolgen. Die Maximalwerte sind teilweise erheblich höher als jene nach Versuchsende. Letztere stellen statische Einwirkungen fluviatiler Geschiebeablagerungen an den Gebäuden ohne den Einfluss dynamischer Prozesse dar.

In den Abbildungen 9 und 10 sind für die Häuser 2 und 3 die Relationen von spezifischen Normalkräften und Anströmhöhen während der Versuche für sämtliche Versuchskonfigurationen dargestellt. Gegenübergestellt sind jeweils die Regressionsgeraden der Versuchsszenarien mit und ohne Einfluss umliegender Gebäude auf die Prozessgrößen und Belastungen. Die orografisch rechts, oberhalb von Haus 2 situierten Gebäude bewirken in diesem Bereich eine Konzentration der Fließwege in Richtung Haus 2, insbesondere in Richtung der Wandelemente 10 und 11 (Abbildung 9). Der Einfluss umliegender Gebäude führt hier zu höheren Belastungen des betrachteten Objekts. Orografisch links ergeben die oberhalb und unmittelbar in Gerinnenähe situierten umliegenden Gebäude eine Schutzwirkung für Haus 3. Durch die Abschirmung des Objektes und die Ablenkung der Prozesse fallen die Anström- und Ablagerungshöhen und folglich die Belastungen in dieser Versuchskonfiguration erheblich geringer aus (Abbildung 10). Für Haus 1 konnte aufgrund der oberhalb etwas abseits situierten umliegenden Gebäude kein nennenswerter Einfluss auf die Belastungen beobachtet werden.

In Abbildung 11 sind die im Verlauf aller Versuche für Haus 2 aufgezeichneten Werte der spezifischen Normalkraft den korrespondierenden Anströmhöhen gegenübergestellt. Die Daten resultieren aus fünf Versuchen mit unterschiedlichen Abflüssen, mit Zugabe von Geschiebe mit unterschiedlicher Kornverteilung und Intensität. Aus diesen Daten lassen sich keine Abhängigkeiten von den Prozessparametern wie Abfluss, Geschiebeanteil und Korngrößenverteilung ableiten. Der Einfluss dieser Prozessparameter auf die Belastungen der Häuser 1-3 ist im Vergleich zur Siedlungsstruktur am Schwemmkegel und der Ausbildung von Fließwegen am Ablagerungskörper entsprechend als geringer einzuschätzen.

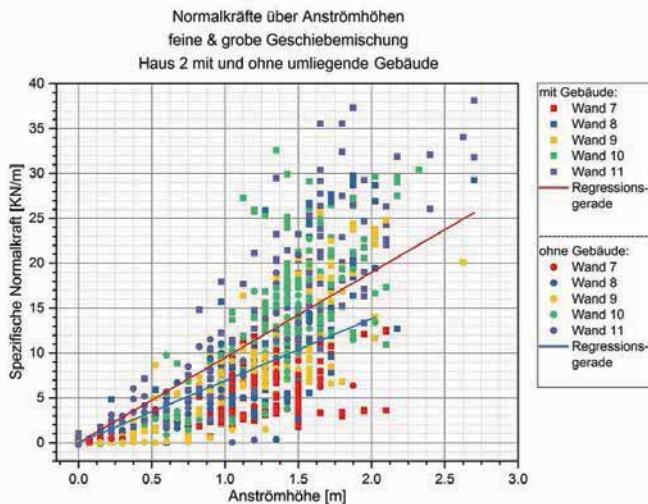


Abb. 9 Relation spezifischer Normalkräfte und Anströmhöhen aus sämtlichen Geschiebeversuchen mit und ohne Einfluss umliegender Gebäude; Haus 2; Naturmaße

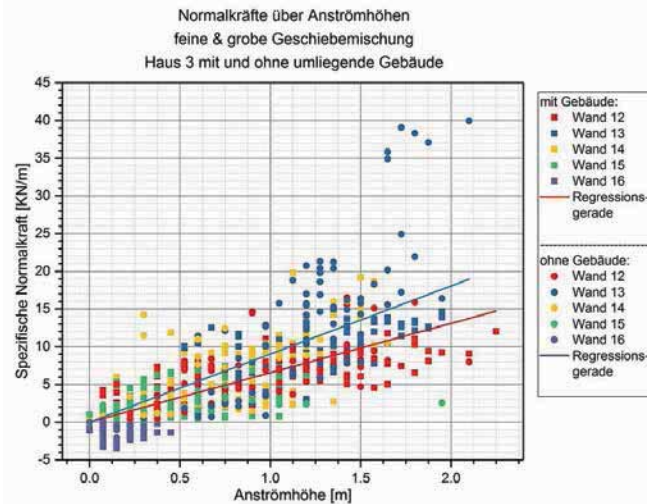


Abb. 10 Relation spezifischer Normalkräfte und Anströmhöhen aus sämtlichen Geschiebeversuchen mit und ohne Einfluss umliegender Gebäude; Haus 3; Naturmaße

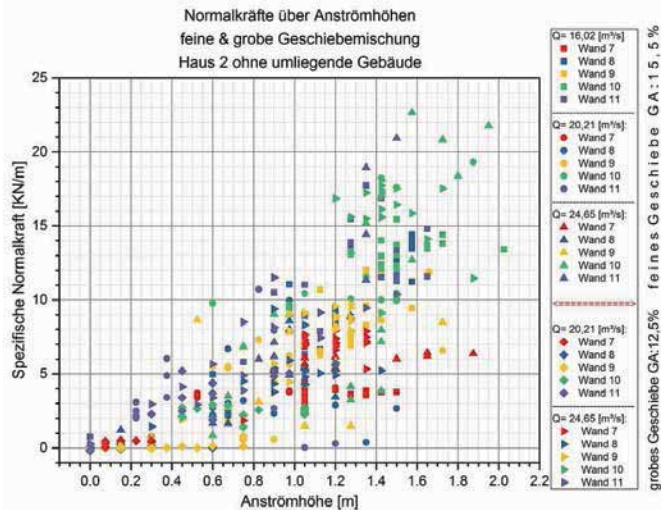


Abb. 11 Relation spezifischer Normalkräfte und Anströmhöhen aus sämtlichen Versuchen mit Geschiebetransport ohne Einfluss umliegender Gebäude; Haus 2; Naturmaße

4 Diskussion und Ausblick

Fluviatile Geschiebetransportprozesse bedeuten ein erhebliches Gefahrenpotential für den Siedlungsraum. In den dargestellten Versuchen wurden im Sinne spezifischer Normalkräfte Maximalwerte bis etwa 40 kN/m erfasst. Diese Einwirkungen führen im Nachweis der globalen

Tragfähigkeit von Gebäuden in der Regel nicht zum Versagen der Struktur. Im Falle fluviatiler Prozesse sind folglich auch andere Prozesse (Grundbruch, Unterspülung, etc.) erforderlich, um die Standsicherheit von Gebäuden zu beeinflussen. An dieser Stelle sei explizit darauf hingewiesen, dass in den dargestellten Versuchen keine murartigen Prozesse und ebenso keine Anpralllasten aus Einzelobjekten untersucht wurden.

In der Ausweisung von Gefahrenzonen aus Prozessen der Wildbachverbauung werden für das Bemessungsereignis definierte Wiederkehrintervalle festgelegt. Der Beschreibung und Modellierung der Prozesse im Einzugsgebiet wird großes Augenmerk geschenkt. Mit dem Hintergrund der Analyse von Gerinnekapazitäten und der Wirkung bestehender und projektierter Schutzmaßnahmen ist dies auch von größter Bedeutung. Im Hinblick auf die flächenhafte Ausbreitung von Prozessen an besiedelten Schwemmkegeln zeigen die gegenständlichen experimentellen Untersuchungen, dass hier insbesondere die Struktur des Siedlungsraumes die Prozesse sehr wesentlich beeinflussen. Schäden an Gebäuden werden nicht ausschließlich durch die Intensität der Geschiebetransportprozesse und die Nähe des jeweiligen Gebäudes zum Wildbachgerinne bestimmt. Umliegende Gebäude können hier prozessverstärkend oder als Objektschutz für das benachbarte Gebäude wirken.

Für die Vulnerabilitätsanalyse von Gebäuden ist der zeitlich und räumlich variable Verlauf der Belastungen relevant. Bestehende Schadenfunktionen basieren überwiegend auf Daten aus Ereignisdokumentationen und Schadenserhebungen. Diese Informationen beschreiben den Zustand nach dem Schadensereignis. Einwirkungszustände während dem Ereignis sind häufig nicht dokumentiert und auch nicht im entsprechenden Detailgrad rekonstruierbar. In den dargestellten Versuchen konnte beobachtet werden, dass Belastungsspitzen während dem Ereignis jene Belastungen nach dem Ereignis zum Teil erheblich übersteigen und dass die Einwirkungen auf die Gebäudeansichten und Wandelemente zu keinem Zeitpunkt homogen ausfallen. Dies ist in Vulnerabilitätsanalysen bzw. in der Ableitung von Schadenfunktionen zukünftig zu berücksichtigen. Mit diesem Hintergrund sind für die Vulnerabilitätsanalyse von Gebäuden weitere, auf Experimenten oder numerischen Modellen basierende Grundlagendaten zur Prozesseinwirkung und deren Konsequenzen im Sinne struktureller Schäden oder einer eingeschränkten Gebrauchstauglichkeit zu erheben.

In weiterer Folge anstehende Untersuchungen befassen sich mit dem Einfluss von Öffnungen in Gebäuden (Fenster, Türen, Lichtschächte, Garagentore, etc.) auf die Prozessmuster am Schwemmkegel. Der Eintritt von Material in das Objekt stellt einen wesentlichen Indikator in der Vulnerabilitätsanalyse von Gebäuden gegenüber fluviatiler Feststofftransportprozesse dar. Mit der Kenntnis der Einwirkungen der durchgeführten Versuche bzw. dem Fokus auf fluviatile Transportprozesse ist eine Gefährdung der globalen Tragfähigkeit des Bauwerkes auch bei Materialeintritt ins Gebäudeinnere zunächst nicht zu erwarten. Allerdings können Teile des Gebäudes (Decken, Wandelemente mit Öffnungen, etc.) bei Eintritt größerer Feststoffmengen versagen. Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit von Gebäuden werden durch den Materialeintritt ins Gebäudeinnere maßgeblich bestimmt. In Gems et al. (2016) wurde der Einfluss des Prozesseintritts ins Gebäudeinnere für Reinwasserprozesse untersucht. Anhand einer Fallstudie konnte dargestellt werden, dass der Einfluss von Durchströmungsprozessen auf das Strömungsbild im angrenzenden Vorland aufgrund des im Vergleich zur ereignisbasierten Abflussfracht geringen Gebäudevolumens sehr gering ausfällt. Die gegenseitige Schutzwirkung von Objekten war nicht Gegenstand dieser Betrachtungen. Im Falle von Ablagerungsprozessen an Schwemmkegeln bleibt zu untersuchen, inwieweit der

Materialeintritt ins Gebäudeinnere die morphologischen Prozesse (Ausprägung von Fließwegen) am Schwemmkegel zu beeinflussen vermag.

Danksagung

Die dargestellten Untersuchungen wurden im Rahmen des FWF-Projektes „P27400-NBL“ durchgeführt. Die Autoren danken dem österreichischen Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung (FWF) für die Finanzierung der Projekt- und Publikationskosten.

Literatur

- Armanini, A.; Larcher, M.; Odorizzi, M. (2010). Dynamic impact of steep waves against a vertical wall. Proceedings of First European IAHR Congress, Edinburgh.
- Bergmeister, K.; Suda, J.; Hübl, J.; Rudolf-Miklau, F. (2009). Schutzbauwerke gegen Wildbachgefahren. Ernst & Sohn, Berlin.
- Chiari, M. (2008). Numerical Modelling of Bedload Transport in Torrents and Mountain Streams. Dissertation, Institut für Alpine Naturgefahren, BOKU Wien.
- Fuchs, S.; Heiss, K.; Hübl, J. (2007). Towards an empirical vulnerability function for use in debris flow risk assessment. *Nat. Hazards Earth Sys. Sci.*, 7, 495-506.
- Gems, B.; Sturm, M.; Vogl, A.; Weber, C.; Aufleger, M. (2014). Analysis of damage causing hazard processes on a torrent fan – scale model tests of the Schnannerbach Torrent channel and its entry to the receiving water. Digital Proceedings of the Interpraevent 2014 in the Pacific Rim, Nara, Japan.
- Gems, B.; Mazzorana, B.; Hofer, T.; Sturm, M.; Gabl, R.; Aufleger, M. (2016). 3-D hydrodynamic modelling of flood impacts on a building and indoor flooding processes. *Nat. Hazards Earth Sys. Sci.*, 16/6, 1351-1368.
- Mazzorana, B.; Simoni, S.; Scherer, C.; Gems, B.; Fuchs, S.; Keiler, M. (2014). A physical approach on flood risk vulnerability of buildings. *Nat. Hazards Earth Sys. Sci.*, 18, 3817-3836.
- Rudolf-Miklau, F.; Ellmer, A.; Gruber, H.; Hübl, J.; Kleemayr, K.; Lang, E.; Markart, G.; Scheuringer, E.; Schmid, F.; Schnetzer, I.; Weber, C.; Wöhner-Alge, M. (2006). Hochwasser 2005 – Ereignisdokumentation, Teilbericht der Wildbach- und Lawinenverbauung, Wien.
- Scheidl, C.; Chiari, M.; Kaitna, R.; Müllegger, M.; Krawtschuk, A.; Zimmermann, T., Proske, D. (2013). Analysing Debris-Flow Impact Models, Based on a Small Scale Modelling Approach. *Surv. Geophys.*, 34, 121-140.
- Spinewine, B.; Capart, H.; Larcher, M.; Zech, Y. (2003). Three-dimensional Voronoi imaging methods for the measurement of near-wall particulate flows. *Experiments in Fluids*, 34, 227-241.
- Sturm, M.; Gems, B.; Mazzorana, B.; Gabl, R.; Aufleger, M. (in Druck, a). Validierung experimenteller und 3-D-numerischer Untersuchungen zur Einwirkung hydrodynamischer Fließprozesse auf Objekte. *WasserWirtschaft*, ISSN 0043 0978.
- Sturm, M.; Gems, B.; Aufleger, M.; Mazzorana, B.; Papathoma-Köhle, M.; Fuchs, S. (in Druck, b). Scale model measurements of impacting forces on obstacles induced by bed-load transport processes. 37th IAHR World Congress, Kuala Lumpur, Malaysia.

Anschrift der Verfasser

DI Michael Sturm
Arbeitsbereich Wasserbau, Universität Innsbruck
Technikerstraße 13, A-6020 Innsbruck
michael.sturm@uibk.ac.at

assoz.-Prof. DI Dr.techn. Bernhard Gems
Arbeitsbereich Wasserbau, Universität Innsbruck
Technikerstraße 13, A-6020 Innsbruck
bernhard.gems@uibk.ac.at

BSc. Florian Keller
Arbeitsbereich Wasserbau, Universität Innsbruck
Technikerstraße 13, A-6020 Innsbruck
florian.keller@student.uibk.ac.at

Dr. Bruno Mazzorana
Institute of Earth Sciences, Universidad Austral de Chile
Edificio Emilio Pugin, Avenida Eduardo Morales Miranda, Campus Isla Teja, Valdivia, Chile
bruno.mazzorana@uach.cl

Priv.-Doz. Dr. Sven Fuchs
Institut für Alpine Naturgefahren, BOKU Wien
Peter Jordan-Straße 82, A-1190 Wien
sven.fuchs@boku.ac.at

Maria Papathoma-Köhle
Institut für Alpine Naturgefahren, BOKU Wien
Peter Jordan-Straße 82, A-1190 Wien
maria.papathoma-koehle@boku.ac.at

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Markus Aufleger
Arbeitsbereich Wasserbau, Universität Innsbruck
Technikerstraße 13, A-6020 Innsbruck
markus.aufleger@uibk.ac.at

Erosionskapazität, Entwicklung des Geschiebehaushalts und Simulation potentieller Murgänge am Beispiel des Roßbichelbachs und Roßbichelgrabens (Oberstdorf)

Andreas Dietrich und Michael Krautblatter

Zusammenfassung

Am 14.06.2015 ereignete sich im südlichen Oberallgäu östlich von Oberstdorf ein Starkniederschlag mit einer Intensität von ca. 90-120 mm/45 min. Dadurch ereigneten sich Murgänge im Roßbichelbach und im oberen Bereich des Roßbichelgrabens (Allgäuer Alpen). Infolgedessen wurden einige hundert Personen evakuiert und es entstand ein finanzieller Schaden von mehreren Millionen Euro. Bei der Rekonstruktion des Ereignisses stellten sich folgende Fragen: (i) Aus welchen Bereichen wurde das Material in den Wildbächen mobilisiert? (ii) Welche Eigenschaften der Mure kontrollieren die Erosionskapazität? (iii) Wie schnell füllt sich das Bachbett wieder mit Material? (iv) Wie beeinflussen die getroffenen Schutzmaßnahmen den Fließpfad potentieller zukünftiger Murgänge? Zur Beantwortung der Fragen wurden in beiden Wildbächen terrestrische Laserscans (TLS) benutzt, um die geomorphologischen Oberflächenveränderungen durch die aufgetretenen Murgänge zu detektieren. Als Referenz diente ein luftgestützter Laserscan (ALS) von 2007. Unsicherheiten wurden durch einen räumlich variablen Grenzwert berücksichtigt, der auf der Punktdichte des ALS und TLS sowie auf der Neigung des Geländes beruht.

Die Ergebnisse im Roßbichelbach (Abb. 1, oben) zeigen, dass durch den Murgang $9.700 \pm 1.600 \text{ m}^3$ im Gerinne erodiert und $1.200 \pm 300 \text{ m}^3$ während des Fließens abgelagert wurden. Die Erosion fand vor allem in der dafür anfälligen Lithologie im Projektgebiet statt. Die mit RAMMS Debris Flow simulierten Fließparameter (Geschwindigkeit, Druck und Impuls) zeigen, dass alle drei Parameter die aufgetretene Erosion zu über 60% erklären. Die geplanten Schutzmaßnahmen wurden in das digitale Geländemodell eingepflegt. Dadurch konnte die Änderung des Fließpfades potentieller zukünftiger Murgänge mit unterschiedlichen Volumina getestet werden. Durch das LfU wurde zudem die hydraulische Wirksamkeit der Schutzmaßnahmen nachgewiesen.

Um die Rate der Wiederauffüllung im Roßbichelgraben (Abb. 1, rechts) zu bestimmen, werden halbjährliche TLS-Messungen durchgeführt. Durch den Vergleich von zwei aufeinander folgenden Messungen wird ersichtlich, in welchen Bereichen es zur Ablagerung oder Erosion nach dem Murgang von 2015 gekommen ist. Die Analysen zeigen, dass es aufgrund des Starkregenereignisses im Juni 2015 in dem Untersuchungsgebiet zu einer Erosion von insgesamt $11.600 \pm 1650 \text{ m}^3$ Material kam. Bereits wenige hundert Meter bachabwärts lagerte sich ein Großteil des Materials ab (ca. 6.600 m^3). Die Erosionstiefen erreichten im Bereich des Hauptdolomits bis zu 6,5 m. Der Eintrag in den Faltenbach fiel durch die rasche Ablagerung deutlich geringer aus, wodurch vermutlich größere Sedimentvolumina im Tal verhindert wurden. Die nachfolgenden Laserscans von Juni und September 2016 machen deutlich, wie sich der Roßbichelgraben nach dem hohen Sedimentaustrag an die neue geomorphologische Situation anpasst. Instabile, steile Böschungen werden im oberen Bereich des Roßbichelgrabens erodiert. Das Material lagert sich in flacheren und weniger stark umströmten Bereichen wieder ab.

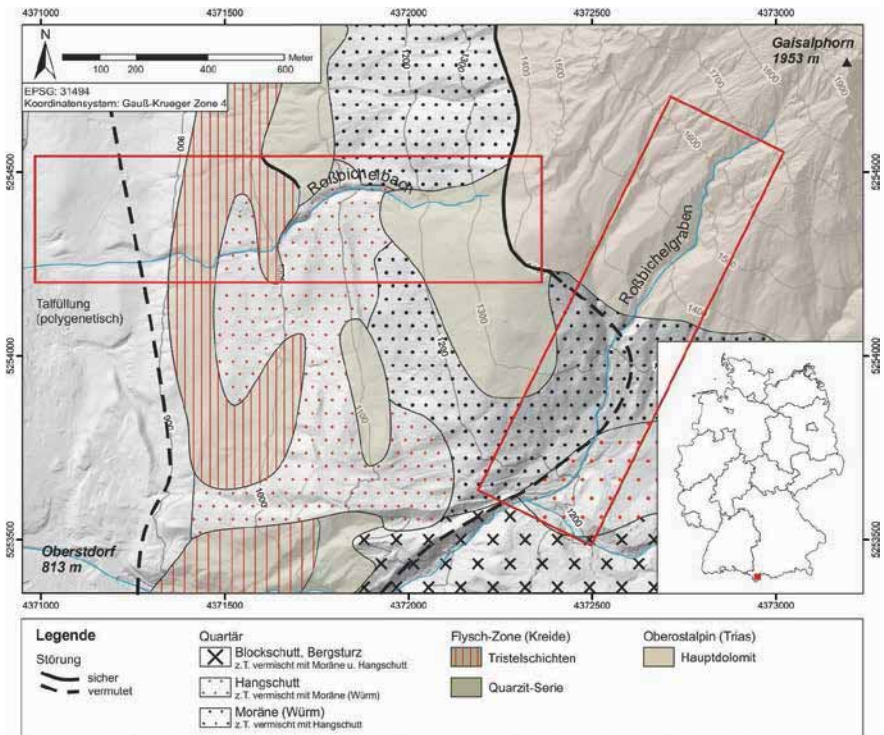


Abb. 1 Arbeitsgebiete und deren geologische Situation nahe Oberstdorf im südlichen Allgäu. Der Roßbichelbach fließt v.a. durch die Flysch-Zone, während ein Großteil des Roßbichelgrabens im Hauptdolomit verläuft (verändert nach Zacher, 1985).

Literatur

Zacher, W. (1985). Geologische Karte von Bayern 1:100 000, Blatt 670 Oberstdorf, Bayerisches Geologisches Landesamt, München.

Anschrift der Verfasser

Andreas Dietrich, M. Sc.
Professur für Hangbewegungen, TU München
Arcisstraße 21, D-80333 München
a.dietrich@tum.de

Prof. Dr. Michael Krautblatter
Professur für Hangbewegungen, TU München
Arcisstraße 21, D-80333 München
m.krautblatter@tum.de

Schwemmholzgefahren - Gesamtbetrachtung im Einzugsgebiet und lokale Beurteilung einzelner Engstellen

Arnd Hartlieb

Zusammenfassung

Die ganzheitliche Bewertung der Schwemmholzgefahren in einem Fließgewässer erfordert sowohl eine Gesamtbetrachtung im Einzugsgebiet als auch eine lokale Beurteilung der einzelnen Engstellen. Dabei kann es sich um künstliche Engstellen wie Brücken, Durchlässe, Überbauungen und wasserbauliche Anlagen, aber auch um natürliche Gewässereinengungen handeln. Der Beitrag gibt einen Überblick über die bei beiden Betrachtungsweisen erforderlichen Überlegungen. Als Schwerpunkte werden neuere Erkenntnisse zum Schwemmholzurückhalt mit Rechenkonstruktionen im Einzugsgebiet und zu Schutzkonstruktionen im Nahbereich von wasserbaulichen Anlagen vorgestellt.

1 Gesamtbetrachtung im Einzugsgebiet

1.1 Überprüfung der Gefährdung des Siedlungsraums durch Schwemmholz

Unabhängig davon, ob schon ein entsprechendes Schadenereignis aufgetreten ist (häufig werden erst dann konkrete Schutzmaßnahmen in Angriff genommen), ist zunächst die Gefährdung des Siedlungsraums durch Schwemmholz zu ermitteln. Drei Kriterien müssen erfüllt sein, um von einer Gefährdung zu sprechen: ein gefährliches Potential von im Gewässer transportiertem Schwemmholz, die Existenz von verklausungsgefährdeten Engstellen im Gewässer und gravierende Schäden im Verklausungsfall (Schadenpotential).

1.1.1 Bestimmung der zu erwartenden Schwemmholzmenge

Die Schwemmholzmenge bzw. das -potential kann auf mehreren Wegen bestimmt werden, die sich im Aufwand deutlich unterscheiden:

- Auswertung von Daten über Schwemmholzmengen bei vergangenen Ereignissen im betrachteten Gewässer. Häufig liegen aber solche Daten überhaupt nicht oder nur in unzureichendem Maße vor.
- Empirische Formeln, die durch die Auswertung von zahlreichen Ereignissen an verschiedenen Gewässern ermittelt wurden, für eine erste, sehr grobe Abschätzung. Hier werden die Schwemmholzmenge bzw. das -potential in Abhängigkeit von der Fläche des gesamten oder des bewaldeten Einzugsgebiets, von der bewaldeten Gerinnelänge, von der Wasserfracht oder von der Feststofffracht eines Hochwasserereignisses bestimmt.
- Eingehende Untersuchung des Einzugsgebiets bezüglich Bewaldung, Waldzustand, Hangneigung, Geologie, Gewässergefälle, Abflussprozessen usw. für eine genauere Abschätzung. Durch neue luftbild- oder GIS-basierte Methoden reduziert sich der Aufwand für diese Untersuchungen.

In vielen Fällen ist aber die maximale Schwemmholzmenge oder das Schwemmholzpotential nicht relevant, weil schon beim Auftreten kleiner kritischer Schwemmholzmengen Folgen auftreten, die sich auch bei höherem Schwemmholzaufkommen nur noch unwesentlich

verschärfen. Dann genügt die Überprüfung, ob im Hochwasserfall generell mit Schwemmholzanfall zu rechnen ist.

1.1.2 Identifikation von verklausungsgefährdeten Engstellen

Das gesamte Gewässer oberhalb und im Siedlungsbereich ist im Hinblick auf künstliche Engstellen wie Brücken, Durchlässe und Überbauungen, aber auch auf natürliche Gewässereinigungen zu untersuchen.

1.1.3 Abschätzung des Schadenpotentials

Im betrachteten Siedlungsraum sind die Schäden abzuschätzen, die Schwemmholzverklausungen insbesondere beim Ausbruch des Gewässers aus dem vorgegebenen Gerinne verursachen können. Hier werden die flächendeckende Erstellung von Gefahrenkarten und standardisierte Methoden zur Erhebung des Schadenpotentials mit Schadenfunktionen in Abhängigkeit von hydraulischen Parametern, die beispielsweise in der Schweiz schon Realität sind und in Bayern gegenwärtig angestrebt bzw. entwickelt werden, zu einer effizienteren und einheitlicheren Arbeitsweise führen.

1.2 Lösungsmöglichkeiten zur Reduzierung der Schwemmholzgefahren

Grundsätzlich existieren drei Lösungsmöglichkeiten, die einzeln aber auch in Kombination zum Ziel führen können: die Reduzierung des Schwemmholzaufkommens durch Bewirtschaftungsmaßnahmen im Einzugsgebiet, der Schwemmholzurückhalt durch bauliche Einrichtungen im Fließgewässer oberhalb der gefährdeten Bereiche sowie die Verbesserung der Durchgängigkeit an den verklausungsgefährdeten Engstellen. In Zukunft wird man möglicherweise vor der Umsetzung entsprechender Maßnahmen verstärkt und im Rahmen von Kosten-Nutzen-Analysen abwägen, mit welcher der Maßnahmen bei gleichem Aufwand die größere Schutzwirkung erzielt werden kann.

1.2.1 Reduzierung des Schwemmholzaufkommens

Das Schwemmholzaufkommen im Hochwasserfall könnte durch flächendeckende Bewirtschaftungsmaßnahmen im bewaldeten Einzugsgebiet und insbesondere an den Gewässerufeln deutlich reduziert werden. Diese regelmäßig erforderlichen Maßnahmen sind allerdings sehr aufwändig, bedeuten einen großen Eingriff in den Naturraum und kommen deshalb häufig nicht in Frage.

1.2.2 Bauwerke zum Schwemmholzurückhalt im Gewässer

Der Schwemmholzurückhalt erfordert Bauwerke in Form von Rechen- oder Netzkonstruktionen im Gewässer oberhalb der gefährdeten Bereiche, die häufig mit Querbauwerken kombiniert werden:

- Netzkonstruktionen

Rimböck (2003) hat sich intensiv mit diesen Netzkonstruktionen befasst. Sie kommen bei kleineren Gewässern (Sohlbreite ≤ 15 m) an schlecht erschließbaren Standorten in Betracht. Ihr Vorteil ist der nahezu vollständige Schwemmholzurückhalt, sobald der Wasserspiegel die Netzunterkante erreicht. Von Nachteil ist zum einen, dass ab dem beginnenden Holzrückhalt auch das Geschiebe annähernd vollständig am Netz zurückgehalten wird. Zum anderen muss auch das Verhalten im Überlastfall negativ bewertet werden. Beim Versagen des Netzes bricht die gesamte Rückhaltekonstruktion und es kommt zum schlagartigen und vollständigen

Ausbruch des Verklauungskörpers. Entsprechend groß müssen die Sicherheitsfaktoren bei der Bemessung sein.

- Rechenkonstruktionen

Hier gibt es viele Bauwerke, die den Schwemmholzurückhalt mit dem Geschieberückhalt kombinieren. Für den Holzurückhalt bei gleichzeitig möglichst geringem Geschieberückhalt sind Rechenkonstruktionen mit vertikalen Stäben bzw. Säulen am besten geeignet. Sie sind sowohl bei kleinen als auch bei größeren Gewässern einsetzbar. Allein schon für den Bau, aber auch für die Räumung ist eine gute Erschließbarkeit des Standorts erforderlich. In Abhängigkeit vom Säulenabstand ist es bei diesen Konstruktionen durchaus möglich, dass einzelne Schwemmholzelemente durch ihre ungünstige Ausrichtung in Bezug auf die Rechensäulen durch den Rechen schwimmen. Das darf für die unterhalb gelegenen, zu schützenden Bereiche kein Problem darstellen. Die volle Rückhaltewirkung wird erst beim Rückhalt von einzelnen Elementen entlang der gesamten Rechenfront aktiviert. In Hartlieb (2015) konnte auch durch den Vergleich mit anderen Untersuchungen die Erkenntnis gefestigt werden, dass die Rechensäulen im Grundriss V-förmig, schräg oder sogar parallel zur Fließrichtung statt senkrecht zur Fließrichtung angeordnet werden sollten. Wird diese Regel befolgt, kommt es zu weniger kompakten Verklauungskörpern und einem geringeren Aufstau. Abb. 1 zeigt die mit der identischen Holz Mischung entstandenen Verklauungskörper in der Draufsicht für drei exemplarisch ausgewählte Modellversuche mit Rechenanordnungen im 90°, im 45°- und im 20°-Winkel zur Fließrichtung.

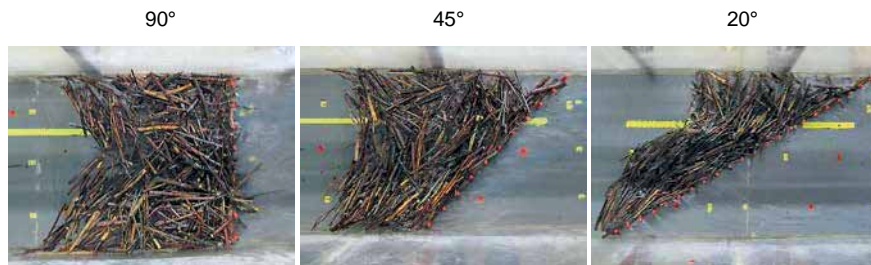


Abb. 1 Verklauungskörper im Modellversuch bei verschiedenen Anordnungen der Säulen des Rückhalterechens in einem Winkel von 90°, 45° und 20° zur Fließrichtung

Der zugehörige durch die Verklauung hervorgerufenen relative Anstieg des Oberwasserstands bezogen auf die Fließtiefe im Ausgangszustand ohne Verklauung betrug für die 90°-Anordnung 122 % und war deutlich größer als bei der 45°-Anordnung mit 92 % und annähernd doppelt so groß wie bei der 20°-Anordnung mit 62 %. Außerdem ist das Verhalten der V-förmigen, schrägen oder parallelen Rechenanordnungen im Überlastfall „gutmütiger“, da nur einzelne Rechensäulen brechen und nur Teilausbrüche der Verklauungskörper auftreten. Knauss (1995) hat die V-förmige Anordnung der Rechensäulen entwickelt. Asenkerschaumer (2009) bzw. Weitbrecht und Schmocker (2012) haben die schräge bzw. parallele Anordnung der Rechensäulen in Grundlagenversuchen genauer betrachtet. Der Vorteil der schrägen Anordnung gegenüber der V-Form liegt darin, dass das zurückgehaltene Schwemmholz eventuell verstärkt durch zusätzliche Einbauten in der Nähe eines Ufers konzentriert und dadurch besser entnommen werden kann. Gerade bei größeren Flüssen mit permanenter Wasserführung kommt dieser Vorteil zur Geltung. Eine gute Lösung bei sehr großem Schwemmholzaufkommen stellen

parallel zur Fließrichtung angeordnete Rechen in Kombination mit einer Rezirkulationszone als Holzurückhalteraum dar. Durch eine neue und einheitliche Auswertung verschiedener Versuchsergebnisse konnte auch gezeigt werden, dass bei den Rechenkonstruktionen mit vertikalen Stäben bzw. Säulen für eine gewählte Rechenanordnung die Kompaktheit des Verklauungskörpers und der dadurch hervorgerufene Aufstau mit steigender Froude-Zahl der Anströmung zunimmt. Der gleiche Zusammenhang ergab sich auch bei den Untersuchungen zur Verklauung von wasserbaulichen Anlagen wie Wehren und Hochwasserentlastungsanlagen. Aus heutiger Sicht ist ein Großteil der grundsätzlichen Fragestellungen zum Schwemmholzurückhalt in Wildbächen und -flüssen geklärt. Im einzelnen Anwendungsfall besteht aber weiterhin die Notwendigkeit eines hydraulischen Modellversuchs zur ausreichenden Berücksichtigung der lokalen Besonderheiten. Um bei diesen Fragestellungen hydraulische Modellversuche durch numerische Simulationen zu ersetzen, sind noch große Entwicklungsschritte erforderlich.

Die Rückhaltebauwerke müssen nach einem Rückhalteereignis umgehend geräumt werden, um die Schutzfunktion möglichst schnell wiederherzustellen.

1.2.3 Verbesserung der Schwemmholzdurchgängigkeit

Die Schwemmholzdurchgängigkeit kann durch folgende Maßnahmen verbessert werden, die in manchen Fällen nur einen vergleichsweise geringen Aufwand bedeuten:

- Erweiterung von verklauungsgefährdeten Engstellen in Breite und Höhe: Ersatz bestehender Brücken durch neue Konstruktionen, die den Verzicht auf Brückenpfeiler oder sogar ein Anheben oder Öffnen der Brücke im Hochwasserfall ermöglichen; Beseitigung oder Erweiterung von Durchlässen; Öffnung von Überbauungen und Abdeckungen, die in vielen Fällen Hand in Hand mit einer naturnäheren Gewässer- und attraktiveren Ortsgestaltung gehen kann und deshalb auch zukünftig eine sehr gute Option darstellt.
- Entschärfung von verklauungsgefährdeten Konstruktionsdetails: z.B. Verschalen von Brückenunterseiten, um Verklauungen an Fachwerk- oder Einzelträgern zu vermeiden.
- Errichtung von Leiteinrichtungen zur verbesserten Längsausrichtung des Schwemmholzes oberhalb von Engstellen: dafür existieren bisher nur wenige realisierte Beispiele. In Zukunft sollte diese Option öfter zumindest in die konzeptionellen Überlegungen zu Projektbeginn einbezogen werden. Auch auf der Seite der Forschung sind hier wichtige Fragen noch nicht beantwortet, beispielsweise hinsichtlich der Zuverlässigkeit von Leiteinrichtungen.
- Planmäßiger Maschineneinsatz im Hochwasserfall: z.B. fest stationierte Bagger zur Beseitigung von Verklauungen. Hier könnte die Entwicklung ausgehend von der Rechenreinigungstechnik an Wasserkraftanlagen in Richtung einer sehr robusten, automatisierten Technologie gehen.

2 Lokale Beurteilung einzelner Engstellen

2.1 Einwirkung (Schwemmholz und Hydraulik)

Wie bei einer klassischen Bemessungsaufgabe des Bauingenieurwesens steht am Anfang die Einwirkung auf das Bauwerk, in diesem Fall ein mit Schwemmholz befrachteter Hochwasserabfluss. Für wasserbauliche Anlagen an Fließgewässern in Mitteleuropa mit großen Einzugsgebieten und vielen Seitengewässern stellt sich nicht die Frage, ob und wieviel

Schwemmholz im Hochwasserfall anfallen kann. Man muss davon ausgehen, dass Schwemmholz in kritischen Mengen anfällt. Die entscheidenden Fragen hinsichtlich des zu erwartenden Schwemmholzes sind diejenigen nach den Abmessungen, insbesondere nach der Länge und der Längenverteilung, und nach der Rohdichte des Schwemmholzes. Es wird empfohlen, die maximale Schwemmholzlänge mit 80 % der für das Einzugsgebiet charakteristischen maximalen Baumlänge anzusetzen und von einer Längenverteilung des Schwemmholzes zwischen 50 % und 80 % dieser Baumlänge auszugehen.

Für Einzugsgebiete in Mitteleuropa sollten maßgebende Baumängen im Bereich von 20 m bis 25 m angesetzt werden. Für die Schwemmholzrohichte sollte man auf der sicheren Seite hohe Werte im Bereich von 0,90 t/m³ bis 0,95 t/m³ annehmen. Die Einwirkung wird auch charakterisiert durch die zu bestimmenden hydraulischen Kenndaten des charakteristischen Hochwasserabflusses wie die Geschwindigkeit und insbesondere die Froude-Zahl der Bauwerksanströmung.

2.2 Bauwerk

Demgegenüber steht das Bauwerk selbst, hier die wasserbauliche Anlage. Bei der Betrachtung der baulichen Parameter spielen die lichten Öffnungsweiten in horizontaler (Öffnungsbreite) und vertikaler Richtung (lichte Höhe zwischen Wasserspiegel und Unterkante Brücke bzw. Verschluss in vollständig geöffneter Stellung) die entscheidende Rolle. Es ist auch zu unterscheiden zwischen Anlagen mit und ohne unterströmte bewegliche Verschlüsse. Mit unterströmten beweglichen Verschlüssen besteht immer die Gefahr, dass ein Verschluss nicht vollständig herausgehoben werden kann. Aber auch im vollständig herausgehobenen Zustand stellt ein unterströmter Verschluss eine Begrenzung des Abflussquerschnitts in vertikaler Richtung dar. Natürlich stellt auch jede Brücke an oder über der Anlage eine zusätzliche Gefahr dar.

2.3 Verklausungswahrscheinlichkeit

Im nächsten Schritt ist zu klären, mit welcher Wahrscheinlichkeit die Einwirkung das Bauwerk betrifft, d.h. wie groß die Wahrscheinlichkeit einer Verklausung der wasserbaulichen Anlage durch Schwemmholz ist. Maßgebend dafür sind die Eigenschaften des Schwemmholzes. An erster Stelle zu nennen ist dabei die Holzlänge L bezogen auf die Öffnungsbreite W der wasserbaulichen Anlage. Ist $L \leq W$, liegt die Wahrscheinlichkeit einer dauerhaften Verklausung nahezu 0. Mit zunehmender Länge $L > W$ steigt die Verklausungswahrscheinlichkeit rapide an. Für den Bereich $1 \leq L/W \leq 2$ konnte Hartlieb (2015) anhand von Versuchsergebnissen für einschwimmende Holzgruppen die folgende lineare Funktion für die Verklausungswahrscheinlichkeit P aufstellen, die in Abb. 1 qualitativ für die Bereiche $L/W < 1$ und $L/W > 2$ ergänzt ist.

$$P = (L/W - 0,96) \cdot 0,73 \quad [1]$$

Eine wichtige Rolle spielen aber auch die Steifigkeit und die Verastung des Holzes: je steifer das Schwemmholz und je zahlreicher und länger die Äste, desto größer ist die Verklausungswahrscheinlichkeit. Auch führen Holzgruppen mit einer deutlich höheren Wahrscheinlichkeit zu einer Verklausung als einzeln einschwimmende Stämme. In Versuchen ohne Begrenzung des Abflussquerschnitts nach oben ergab sich die Erkenntnis, dass die Geschwindigkeit bzw. die Froude-Zahl der Anströmung und die Holzrohichte nur eine geringe Relevanz für die Verklausungswahrscheinlichkeit besitzen. Deutlich erhöht wird

Verklauungswahrscheinlichkeit bei einer Begrenzung des kritischen Abflussquerschnitts nach oben etwa durch eine Brücke bzw. einen herausgehobenen Verschluss mit geringer lichter Höhe zwischen Wasserspiegel und Unterkante Brücke bzw. Verschluss. Dann ist die Verklauungswahrscheinlichkeit bei einer niedrigeren Geschwindigkeit bzw. Froude-Zahl der Anströmung und vermutlich auch bei einer geringeren Holzrohddichte wesentlich größer.

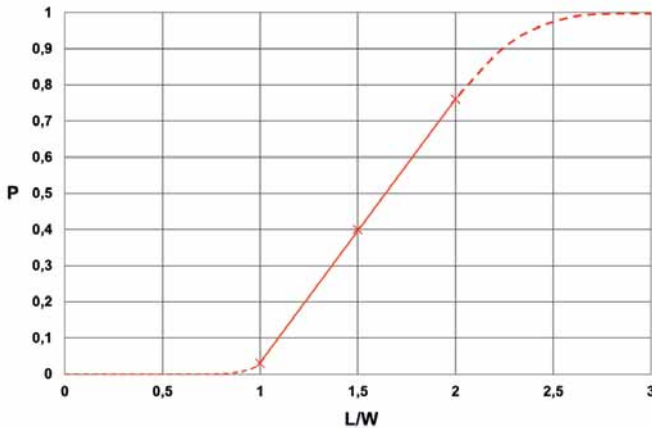


Abb. 2 Verklauungswahrscheinlichkeit P für Holzgruppen in Abhängigkeit vom Verhältnis der Holzlänge L zur Öffnungsbreite W der wasserbaulichen Anlage

2.4 Verklauungsfolgen

Der vierte Schritt beschäftigt sich mit der Frage, welche Folgen zu erwarten sind, wenn die Einwirkung das Bauwerk betrifft, d.h. wenn es zu einer Verklauung der wasserbaulichen Anlage mit einer kritischen Holzmenge kommt. Dann sind die Froude-Zahl der Anströmung und das Verhältnis der Holzroh- zur Wasserdichte die maßgebenden Einflussgrößen für den Verklauungsprozess, die Form des Verklauungskörpers und die Verklauungsfolgen. Bei kleiner Froude-Zahl der Anströmung und kleiner Holzrohddichte bildet sich ein lockerer, einlagiger Schwemmholzteppich, der nur einen geringen Anstieg des Oberwasserstands und eine kleine Reduzierung der Abflussleistung hervorruft. Bei großer Froude-Zahl der Anströmung und großer Holzrohddichte entwickelt sich ein kompakter, mehrlagiger Verklauungskörper, der einen großen Anstieg des Oberwasserstands und eine starke Reduzierung der Abflussleistung verursacht. Hier ist eine große Übereinstimmung mit den Verklauungen an Schwemmholzurückhalteeinrichtungen gegeben. Bisherige Versuchsergebnisse, unter anderem von Hartlieb (2015) sprechen dafür, dass kompakte, mehrlagige Verklauungskörper schon ab Froude-Zahlen der Anströmung von $Fr > 0,15$ auftreten können. Aufgrund des großen Zufallsaspekts beim Verklauungsprozess ist eine genauere Quantifizierung der Verklauungsfolgen in Abhängigkeit von der Froude-Zahl der Anströmung und vom Verhältnis der Holzroh- zur Wasserdichte bisher nicht möglich. Für die genauere Quantifizierung dieser Abhängigkeit könnte bei zukünftigen Versuchen die Vorgabe von identischen Ausgangsverklauungen hilfreich sein. Von weiteren Versuchen ist in jedem Fall eine

zuverlässigere Bestimmung der kritischen Froude-Zahl der Anströmung zu erwarten, ab der kompakte, mehrlagige Verkläusungskörper entstehen.

Zu erfassen ist auch, welche zusätzliche statische Belastung des Bauwerks durch die Verkläusung und den Anstieg des Oberwasserstands hervorgerufen wird.

Am Ende dieses Beurteilungsschritts muss in letzter Konsequenz die Einschätzung stehen, ob eine Talsperre infolge einer Verkläusung durch die Reduzierung der Abflussleistung der Hochwasserentlastungsanlage überströmt werden kann bzw. ob eine Wehranlage infolge einer Verkläusung durch die zusätzliche statische Belastung brechen kann.

2.5 Schadenpotential

Als nächstes muss das Schadenpotential erfasst werden, das sich aus den Verkläusungsfolgen einer wasserbaulichen Anlage durch Schwemmholz ergibt. Als Schadenpotential wird hier sowohl der infolge einer Schwemmholzverkläusung an der wasserbaulichen Anlage selbst auftretende mögliche Schaden verstanden, z.B. die Erosion einer Talsperre oder der Bruch eines Wehres, als auch die im Bereich der Unterlieger verursachten, möglicherweise enormen Folgeschäden. Bei der Bestimmung des Schadenpotentials der Unterlieger können zukünftig standardisierte Verfahren den Aufwand reduzieren. Grundsätzlich muss bei jeder wasserbaulichen Anlage allein wegen der möglichen Schäden an der Anlage selbst von einem großen Schadenpotential ausgegangen werden.

2.6 Verkläusungsrisiko

Das Verkläusungsrisiko wird als Produkt aus Verkläusungswahrscheinlichkeit und Schadenpotential ermittelt.

2.7 Bauwerksoptimierung

Im Falle eines großen Verkläusungsrisikos wird man im letzten Schritt Überlegungen zur risikosenkenden Bauwerksoptimierung anstellen. Natürlich sind dabei auch Umbaumaßnahmen, die in die Kernsubstanz der Anlagen eingreifen, wie die Verbreiterung von Wehrfeldern, die Vergrößerung der Hubhöhe von Verschlüssen oder die Höherlegung von Brücken möglich. Aufgrund verbesserter technischer Möglichkeiten wie größerer Verschlussbreiten und -höhen wird man hier in Zukunft noch größere lichte Öffnungsweiten realisieren können.

Wesentlich effizienter können aber zusätzliche Schutzeinrichtungen zum Schwemmholzrückhalt sein, wenn sie in ausreichendem Abstand von der verkläusungsgefährdeten Öffnung angeordnet werden. Durch die in der Regel größere Fläche der Rückhalteebene und die Lage außerhalb des Beschleunigungsbereichs sind dort die Geschwindigkeiten und Froude-Zahlen der Anströmung kleiner. Die Schutzeinrichtungen sollten so konzipiert werden, dass im Bemessungsfall die Froude-Zahl der Anströmung $Fr < 0,15$ ist. Im Rückhaltefall entstehen dann nur lockere, einlagige Schwemmholzteppiche mit geringem Anstieg des Oberwasserstands und kleiner Reduzierung der Abflussleistung der wasserbaulichen Anlage. Als Schutzeinrichtungen in Frage kommen Rechen mit senkrechten Stäben bzw. Säulen. Knauss et al. (1993) haben eine solche Konstruktion für die zusätzliche Hochwasserentlastungsanlage am Sylvensteinspeicher entwickelt, die auch an der erneuerten Hochwasserentlastungsanlage am Grüntensee zur Anwendung kam (Hartlieb und Overhoff (2006), siehe Abb. 3).



Abb. 3 Einlaufbauwerk der Hochwasserentlastungsanlage am Grüntensee mit Schutzeinrichtung zum Schwemmholzrückhalt in Modell und Original

Eine weitere vielversprechende Schutzkonstruktion stellen stark geneigte Rechen mit weit vorgelagerter Basis und großem Stababstand dar (siehe Abb. 4).



Abb. 4 Schutzeinrichtung vor einem Wehrbauwerk mit stark geneigten Rechenstäben, weit vorgelagerter Basis und großem Stababstand (großmaßstäblicher Modellversuch)

Aus Abb. 5, in der der relative Anstieg des Oberwasserstands $\Delta H/H$ am eigentlichen Wehrbauwerk bzw. an der Schutzkonstruktion entsprechend Abb. 4 in Folge einer Verklauung über der relativen Schwemmholzrohddichte ρ_H/ρ_W aufgetragen ist, wird ersichtlich, dass eine Verklauung an der Schutzkonstruktion zu wesentlich geringeren Aufstauwerten führt als am Wehrbauwerk selbst.

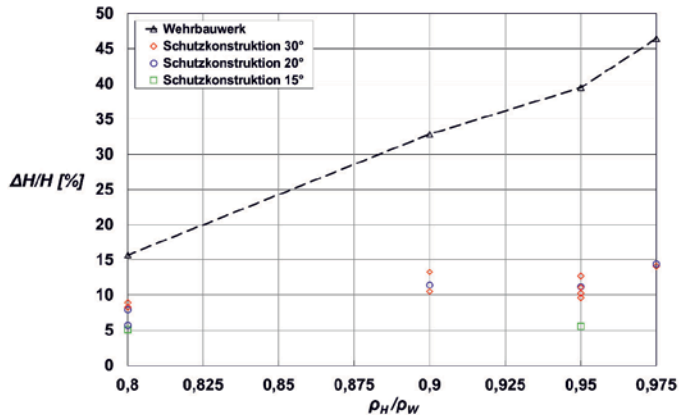


Abb. 5 Relativer Anstieg des Oberwasserstands $\Delta H/H$ durch Verklauungen des Wehrbauwerks bzw. von stark geneigten, weit vorgelagerten Schutzkonstruktionen mit unterschiedlicher Neigung im Modellversuch

Bei der Schutzeinrichtung entsprechend Abb. 3 mit senkrechten Stäben bzw. Säulen ist die problemlose Räumung nach einem Hochwasserereignis von Vorteil. Positiv bei der stark geneigten Konstruktion ist zu bewerten, dass zurückgehaltenes Schwemmholz durch nachfolgendes Holz möglicherweise aus dem Abflussquerschnitt geschoben oder gerollt wird. Allerdings dürfte die große Länge der frei tragenden, geneigten Stäbe eine statische Herausforderung darstellen. Beide Varianten sollten mit großer lichter Stab- bzw. Säulenweite ausgeführt werden, die allerdings kleiner sein muss als die kleinste Engstelle der zu schützenden wasserbaulichen Anlage. Dann können zwar einzelne Schwemmholzelemente die Schutzeinrichtung passieren. Sie werden aber mit hoher Wahrscheinlichkeit an den Stäben bzw. Säulen in Fließrichtung ausgerichtet und anschließend problemlos durch die wasserbauliche Anlage ins Unterwasser transportiert. Die hinsichtlich der Verklauung der wasserbaulichen Anlage gefährlichen Holzgruppen werden dagegen in beiden Fällen zuverlässig zurückgehalten.

Für die Schutzeinrichtungen zum Schwemmholzurückhalt vor wasserbaulichen Anlagen besteht sowohl grundsätzlich als auch im Einzelfall weiterer Forschungsbedarf. Auch bei wachsender Kenntnis der Zusammenhänge sind hier auf längere Sicht hydraulische Modellversuche erforderlich, die nur bei großen Fortschritten in der Entwicklung durch numerische Simulationen ersetzt werden können. Wenn man die Einrichtung zum Schwemmholzurückhalt und die dadurch geschützte wasserbauliche Anlage als Einheit betrachtet, erhöht sich sogar die Verklauungswahrscheinlichkeit, da eine funktionierende Rückhalteeinrichtung öfter verklaut als die wasserbauliche Anlage ohne Rückhalteeinrichtung. Da im Falle des

Schwemmholzrückhalts an der dafür vorgesehenen Einrichtung generell kein oder nur ein sehr stark reduzierter Schaden auftritt, verringert sich das Verklauungsrisiko aber sehr deutlich.

Eine weitere Möglichkeit der Bauwerksoptimierung stellen Einrichtungen zur Verbesserung der Durchleitung des Schwemmholzes dar. Hier besteht noch großes Entwicklungspotential.

Literatur

- Asenkerschbaumer, M. (2009): Analyse der Schwemmholzproblematik in der Rienz bei Brixen, Diplomarbeit an Lehrstuhl und Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU München (unveröffentlicht).
- Hartlieb, A.; Overhoff, G. (2006): Die geplante Ertüchtigung der Hochwasserentlastungsanlage an der Talsperre Grüntensee im Allgäu, in: Stauhaltungen und Speicher - Von der Tradition zur Moderne, Tagungsband des Wasserbausymposiums vom 27. bis 29. September 2006 in Graz, Schriftenreihe zur Wasserwirtschaft der Technischen Universität Graz, Nr. 46, Band 2, S. 67-79.
- Hartlieb, A. (2015): Schwemmholz in Fließgewässern - Gefahren und Lösungsmöglichkeiten, Berichte des Lehrstuhls und der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU München, Nr. 133.
- Knauss, J.; Sperer, A.; Strobl, Th. (1993): Sylvensteinspeicher - zusätzliche Entlastungsanlage, Versuchsbericht Nr. 312 der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU München (unveröffentlicht).
- Knauss, J. (1995): Treibholzfänge am Lainbach in Benediktbeuern und am Arzbach (ein neues Element im Wildbachausbau), in: Von der oberen zur unteren Isar, Berichte des Lehrstuhls und der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU München, Nr. 76, S. 23-66.
- Rimböck, A. (2003): Schwemmholzrückhalt in Wildbächen - Grundlagen zu Planung und Berechnung von Seilnetzsperrern, Berichte des Lehrstuhls und der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU München, Nr. 94.
- Weitbrecht, V.; Schmocker, L. (2012): Driftwood retention in large rivers - a new concept, Proceedings of River Flow 2012 Costa Rica, S. 1073-1080.

Anschrift des Verfassers

PD Dr.-Ing. habil. Arnd Hartlieb
Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU München
Obernach 15, D-82432 Walchensee
arnd.hartlieb@tum.de

Verklaesungswahrscheinlichkeit und Aufstau – Aktuelle Forschung zum Thema Schwemmholz an der VAW

Isabella Schalko, Lukas Schmocker, Volker Weitbrecht und Robert Boes

Zusammenfassung

An der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich werden im Rahmen einer Doktorarbeit Untersuchungen zu den Auswirkungen einer Schwemmholzverklaesung an Gefahrenstellen in Fliessgewässern durchgeführt. Die Doktorarbeit ist Teil des schweizerischen, interdisziplinären Forschungsprojekts *WoodFlow*: „Schwemmholz-Management an Fliessgewässern – ein praxisorientiertes Forschungsprojekt“ und wird vom Schweizer Bundesamt für Umwelt (BAFU) finanziert.

In diesem Beitrag werden die Resultate zur Verklaesungswahrscheinlichkeit von Schwemmholz bei einem Brückenpfeiler und der Einfluss von Blättern und Ästen (Feinmaterial) in einer Verklaesung auf den resultierenden Aufstau vorgestellt, welche mittels hydraulischer Modellversuche erarbeitet wurden. Die Ergebnisse der Versuche zeigen, dass die Verklaesungswahrscheinlichkeit vor allem mit zunehmender Schwemmholzlänge und abnehmender Zufluss-Fliessgeschwindigkeit steigt. Der Aufstau infolge einer Schwemmholzverklaesung ist primär eine Funktion der Kompaktheit der Verklaesung, der Zufluss-Froude-Zahl, und des Feinmaterials, während die Verklaesungslänge und der Holzdurchmesser einen geringeren Einfluss auf den Aufstau haben. In einem nächsten Schritt sollen die Ergebnisse der Verklaesungswahrscheinlichkeit und des Aufstaus in Bemessungsgleichungen zusammengefasst werden. Die Anwendung dieser Gleichungen soll die Gefahrenbeurteilung von Schwemmholz im Hochwasserfall erleichtern und einen wesentlichen Beitrag zur Verbesserung der Hochwassersicherheit leisten.

1 Einleitung

Schwemmholz ist ein wesentlicher Bestandteil von Fliessgewässern und beeinflusst somit die Hydraulik und Morphologie, und erhöht die Biodiversität (Gurnell *et al.*, 2002; Wohl *et al.*, 2016). Im Hochwasserfall kann die Schwemmholzmenge infolge Rutschungen oder Seitenerosion stark zunehmen. Vor allem steile und bewaldete Einzugsgebiete führen im Hochwasserfall neben Geschiebe enorme Schwemmholzmengen mit sich. Das transportierte Schwemmholz kann bei Querbauwerken zu Verklausungen führen und somit erhebliche Schäden verursachen. In der Schweiz wurden während des Hochwasserereignisses 2005 rund 30'000 Tonnen Schwemmholz transportiert (Bezzola und Hegg, 2007; Waldner *et al.*, 2009). Die Sachschäden lagen in Summe bei 3 Milliarden CHF. Eine Schwemmholzverklausung führt einerseits zu einem Aufstau, der in Abhängigkeit der Topographie die Überflutungswahrscheinlichkeit der umliegenden Gebiete erhöhen kann. Infolge des Aufstaus wird zudem flussaufwärts die Fliessgeschwindigkeit reduziert und die Geschiebedurchgängigkeit kann nicht mehr gewährleistet werden. Andererseits bildet sich infolge der Schwemmholzverklausung ein Kolk, der wiederum Schäden an dem Bauwerk (z.B. Brücke oder Wehr) verursachen kann (Abb. 1).

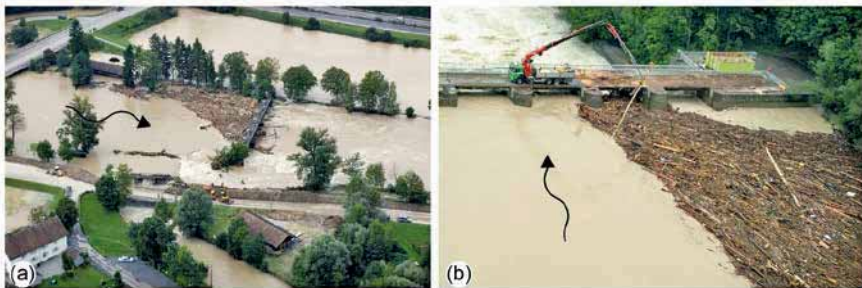


Abb. 1 Hochwasserereignis 2005 in der Schweiz, Schwemmholzverklausungen am (a) Wehr Perlen (Foto: Schweizer Luftwaffe) und (b) Wehr Bremgarten (Foto: Kantonspolizei Aargau)

Um die Gefahrenbeurteilung von Schwemmholz bei Hochwasserereignissen zu verbessern, sind genaue Kenntnisse der Verklausungswahrscheinlichkeit und der Auswirkungen einer Schwemmholzverklausung erforderlich. Frühere Untersuchungen zur Verklausungswahrscheinlichkeit konzentrierten sich hauptsächlich auf den Einfluss der Brückenunterkante (Bezzola *et al.*, 2002; Lyn *et al.*, 2003; Lange und Bezzola, 2006; Schmocker und Hager, 2011; Gschnitzer *et al.*, 2013) bzw. auf Hochwasserentlastungsanlagen oder Wildbachsperrern (Hartlieb, 2015; Piton und Recking, 2015). Die Auswirkung der Form eines Brückenpfeilers wurde von De Cicco *et al.* (2016) geprüft. Mehrere Brückenpfeiler oder eine bewegliche Sohle wurden jedoch noch nicht näher untersucht. Für die Abschätzung des Aufstaus infolge einer Schwemmholzverklausung sind nur wenige Gleichungen in der Literatur vorhanden, die jeweils verschiedene massgebende Parameter aufweisen (Knauss, 1995; Schmocker und Hager, 2013). Weiter wurde in den bisherigen Untersuchungen der Einfluss von Blättern oder Ästen in einer Verklausung vernachlässigt.

Um die Bewirtschaftung von Holzvorkommen im Einzugsgebiet zu verbessern, muss einerseits ein Gleichgewicht zwischen ökologischen und hydromorphologischen Bedingungen hergestellt werden und andererseits das Risiko einer Schwemmholzverklausung an Gefahrenstellen in Fliessgewässern minimiert werden. Im Rahmen des interdisziplinären Forschungsprojekts

WoodFlow werden die Aspekte des Schwemmholzeintrags, -transports, sowie der -verklauung mit Hilfe von Modellversuchen, Naturmessungen und numerischer Simulation untersucht (Abb. 2, Ruiz-Villanueva *et al.*, 2016). *WoodFlow* wird vom Schweizer Bundesamt für Umwelt (BAFU) gefördert, von vier Forschungsinstitutionen bearbeitet und kann in drei verschiedene Blöcke gegliedert werden: (1) Schwemmholtpotential und -eintrag, (2) Schwemmholttransport und -ablagerung, (3) Schwemmholtverklauung.

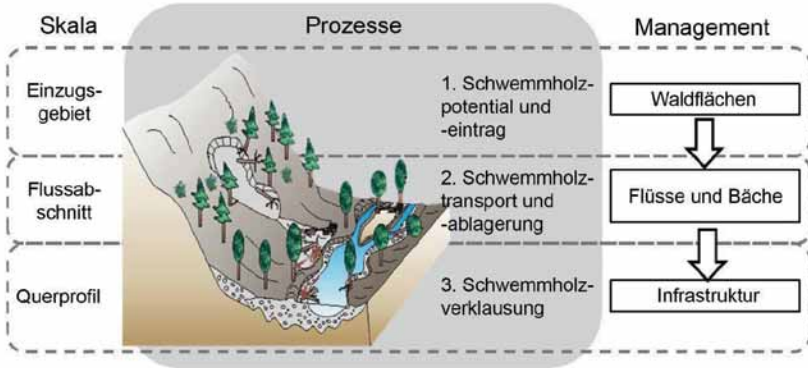


Abb. 2 Schematische Darstellung von *WoodFlow* (angepasst von Ruiz-Villanueva *et al.*, 2016)

Die VAW untersucht im Rahmen einer Doktorarbeit die Auswirkungen infolge Schwemmholtverklauungen an Gefahrenstellen in Fließgewässern (Block 3, Abb. 2). Mit Hilfe von Modellversuchen und numerischer Simulation werden die folgenden Aspekte untersucht:

1. Verklauungswahrscheinlichkeit von Schwemmholt
 - a) Einfluss eines Brückenpfeilers
 - b) Einfluss einer beweglichen Sohle
2. Eigenschaften einer Schwemmholtverklauung
 - a) Geometrie und Kompaktheit der Verklauung
 - b) Einfluss von Blättern oder Ästen in einer Verklauung auf den Aufstau
3. 2D numerische Simulation der Verklauungswahrscheinlichkeit
4. Massnahmen zur Reduktion der Verklauungswahrscheinlichkeit an Brücken

Im folgenden Beitrag werden die aktuellen Ergebnisse zur Verklauungswahrscheinlichkeit von Schwemmholt bei einem Brückenpfeiler (1a) und der Einfluss von Blättern und Ästen in einer Verklauung auf den Aufstau (2b) vorgestellt.

2 Verklauungswahrscheinlichkeit

An der VAW wurden in einem neigbaren Kanal Modellversuche zur Abschätzung der Verklauungswahrscheinlichkeit bei einem kreisförmigen Brückenpfeiler durchgeführt. Dabei wurde die Verklauungswahrscheinlichkeit für einzelne Hölzer, schubweisen Schwemmholttransport (3-5 Hölzer) sowie Hölzer mit und ohne Ästen ermittelt (Schalko, 2017). Bei den Versuchen wurden die Zuflussbedingungen (Zufluss-Froude-Zahl F_0 und Zufluss-Wassertiefe h_0) und die Holzabmessungen (verschiedene Holzlängen mit einheitlichem

Durchmesser) variiert. Der Versuchsaufbau und die untersuchten Parameter sind in Abb. 3 dargestellt.

Während der Versuche wurden die Holzstücke quer zur Fließrichtung 1 m flussaufwärts des Brückenpfeilers in Kanalmitte zugegeben. Falls das Holzstück (bzw. die 3-5 Hölzer) beim Brückenpfeiler hängen blieb(en), wurde dies als „Verklauung“ bewertet und das Holzstück (bzw. die 3-5 Hölzer) wieder aus dem Kanal entnommen. Dieser Vorgang wurde mindestens 40-mal wiederholt, um eine statistisch signifikante Verklauungswahrscheinlichkeit zu berechnen.

Basierend auf den ersten Ergebnissen kann zusammengefasst werden, dass die Verklauungswahrscheinlichkeit

- mit zunehmender Holzlänge,
 - mit abnehmender Zufluss-Fließgeschwindigkeit,
 - für schubweisen Schwemmholztransport und
 - für Hölzer mit Ästen
- zunimmt (Abb. 4).

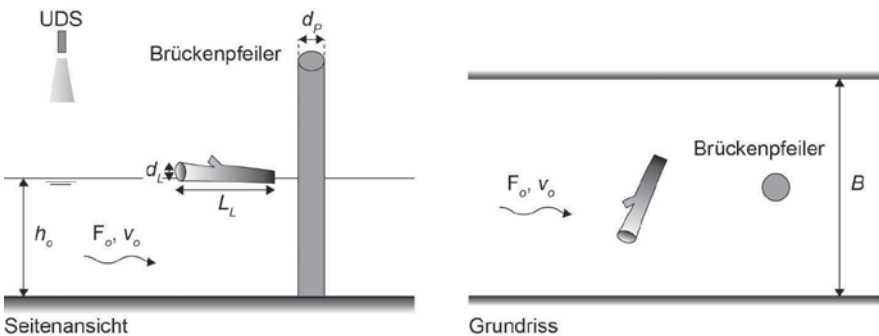


Abb. 3 Seitenansicht und Grundriss des Versuchsaufbaus zur Abschätzung der Verklauungswahrscheinlichkeit bei einem kreisförmigen Brückenpfeiler; mit UDS = Ultrasonic Distance Sensor, h_o = Zufluss-Wassertiefe, F_o = Zufluss-Froude-Zahl, v_o = Zufluss-Fließgeschwindigkeit, L_L = Holzlänge, d_L = Holzdurchmesser, d_P = Pfeilerdurchmesser und B = Kanalbreite.



Abb. 4 Modellversuche zur Ermittlung der Verklauungswahrscheinlichkeit bei einem kreisförmigen Brückenpfeiler mit (a) Einzeltransport, (b) schubweisem Schwemmholztransport und (c) schubweisem Schwemmholztransport mit Hölzern mit Ästen

3 Aufstau infolge Schwemmholzverklausung

Um den Verklausungsgrad an Gefahrenstellen abzuschätzen, wurden zahlreiche Modellversuche an der VAW durchgeführt. Dabei sollen die massgebenden Parameter für einen Aufstau infolge Schwemmholzverklausung identifiziert werden. Die Gefahrenstellen (z.B. Brücken, Wehre oder Schwemmholzrechen) wurden im Modell mit Hilfe von zwei Rechenreihen vereinfacht dargestellt und für einen Massstab nahe dem Prototyp (M 1:6) sowie für einen Massstab 1:30 untersucht (Schalko *et al.*, 2016). Der Versuchsaufbau und die untersuchten Parameter sind in Abb. 5 dargestellt bzw. aufgelistet.

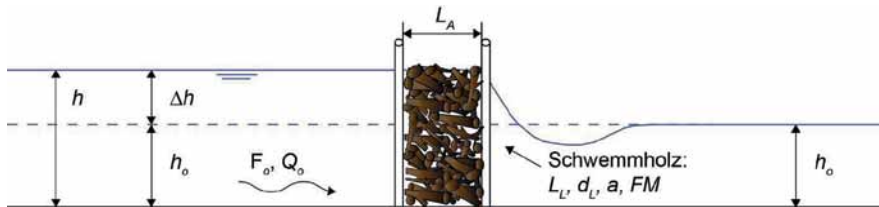


Abb. 5 Versuchsaufbau zur Abschätzung des Aufstaus infolge einer Schwemmholzverklausung für eine vordefinierte Verkläusung; mit h_0 = Zufluss-Wassertiefe, F_0 = Zufluss-Froude-Zahl, Q_0 = Zufluss-Durchfluss, L_A = Verklausungslange, L_L = Holzlänge, d_L = Holzdurchmesser, a = Auflockerungsfaktor (Kompaktheit der Verkläusung mit a = Lockervolumen/Festvolumen = V_L/V_S), FM = Feinmaterial (Astes und Blätter in einer Verkläusung), h = Endwassertiefe bei Schwemmholzverklausung, Δh = Aufstau infolge Schwemmholzverklausung

In den Modellversuchen wurden die Zuflussbedingungen (h_0 , Q_0 und F_0) variiert und der Einfluss der Verklausungslange L_A , des Holzdurchmessers d_L , des Auflockerungsfaktors a (Kompaktheit der Verkläusung) und des Feinmaterials FM auf den resultierenden Aufstau Δh systematisch untersucht. Da die Hölzer zwischen den beiden Rechenreihen mit einem Abstand L_A (Verklausungslange) eingebaut wurden, konnte der Einfluss der Holzlänge vernachlässigt werden. Für das Feinmaterial wurde im Massstab 1:30 ein Plastiktannenbaum verwendet (Abb. 6 (a)). Bei den Versuchen im Massstab 1:6 wurde das Feinmaterial mit Hilfe von Weiden- und Tannenzweigen modelliert (Abb. 6 (b)). Das Feinmaterial wurde als Volumenanteil des Festvolumens der Hölzer zugegeben. Somit fanden die unterschiedlichen Dichten der Feinmaterialien Berücksichtigung. Für das Modell-Schwemmholz wurde echtes Holz verwendet.

Der relative Aufstau $\Delta h/h_0$ in Abhängigkeit der Zufluss-Froude-Zahl F_0 ist in Abb. 7 (a)-(d) für die untersuchten Parameter (h_0 , a , L_A und d_L) und den Modellmassstab 1:30 dargestellt. Gemäss Abb. 7 (a) ist der relative Aufstau $\Delta h/h_0$ unabhängig von der Zuflusswassertiefe h_0 . Je kleiner der Auflockerungsfaktor a und somit je kompakter der Verklausungskorper, desto grösser ist $\Delta h/h_0$ (Abb. 7 (b)). Ein kompakter Verklausungskorper stellt einen grösseren Flieswiderstand dar, weshalb der Aufstau zunimmt. Abb. 7 (c) und (d) zeigen, dass $\Delta h/h_0$ mit zunehmender Verklausungslange L_A und mit abnehmendem Holzdurchmesser d_L ansteigt. Das Verhältnis dieser beiden Parameter L_A/d_L kann als Strömungs-Umlenkungsfaktor u beschrieben werden. Ein langer Verklausungskorper mit dünnen Hölzern führt zu einer grösseren Anzahl von Umlenkungen der Sickerstromung und somit zu einem höheren Aufstau. Weiter ist in Abb. 7 (a)-(d) ersichtlich, dass $\Delta h/h_0$ mit zunehmender Zufluss-Froude-Zahl F_0 steigt.

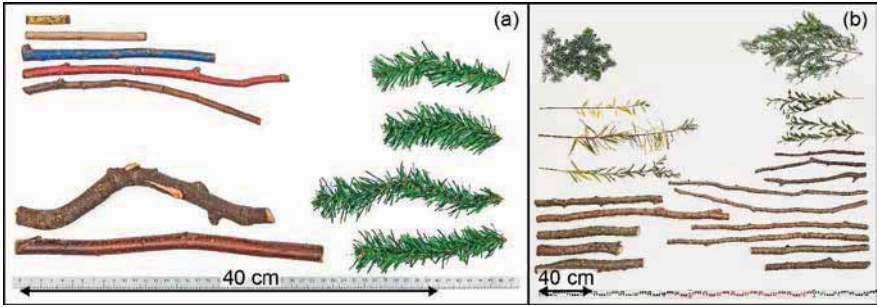


Abb. 6 Modell-Schwemmholz und -Feinmaterial für die Massstäbe (a) 1:30 und (b) 1:6

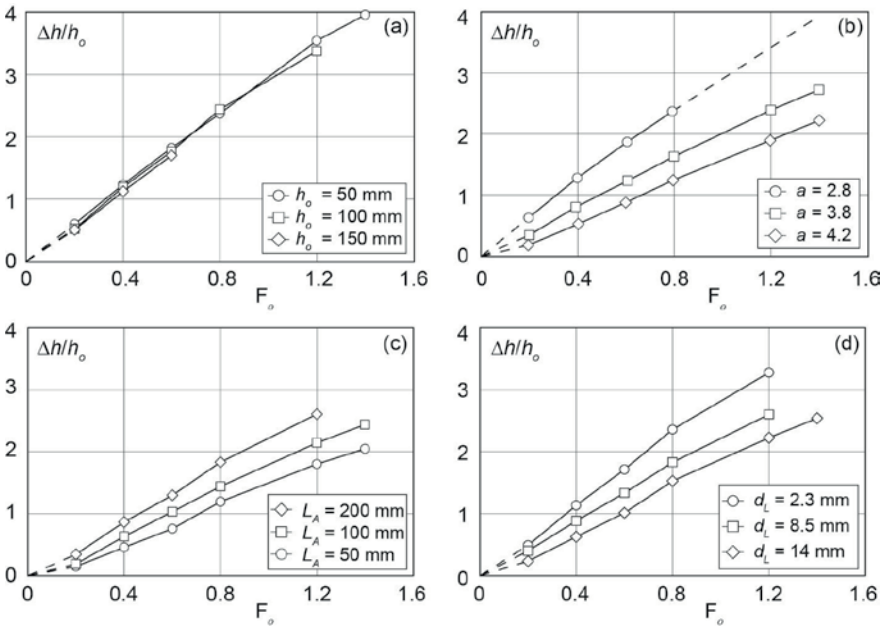


Abb. 7 $\Delta h/h_0$ in Abhängigkeit von F_o für (a) $a = 3.6$, $d_L = 3.7$ mm, $L_A = 100$ mm und verschiedene h_o , (b) $d_L = 13$ mm, $h_o = 100$ mm, $L_A = 100$ mm und verschiedene a (Kompaktheit der Verklauung), (c) $a = 3.8$, $d_L = 10.3$ mm, $h_o = 100$ mm und verschiedene L_A und (d) $a = 3.6$, $h_o = 100$ mm, $L_A = 100$ mm und verschiedene d_L

Der Einfluss des Feinmaterials auf den relativen Aufstau wurde für beide Massstäbe (1:6 und 1:30) ermittelt. In Abb. 8 (a) ist der Aufstau Δh in Abhängigkeit der Zufluss-Wassertiefe h_o für 0% und 17% Tannen- bzw. 19% Weidenzweigen (M 1:6) dargestellt. Dabei ist erkennbar, dass der Aufstau infolge Feinmaterial stark zunimmt. Weiter ist ersichtlich, dass sowohl Tannen- als auch Weidenzweige zu einem ähnlichen Aufstau führen und somit gut geeignet sind, um Äste und

Blätter in einer Schwemmholzverkläung zu modellieren. Abb. 8 (b) und (c) zeigen einen Versuchsdurchgang mit 17% Tannen- bzw. 19% Weidenzweigen im Massstab 1:6. Um etwaige Modelleffekte abzuleiten, wurden die Ergebnisse der beiden Massstäbe miteinander verglichen (Abb. 8 (d)). Der Aufstau Δh in Abhängigkeit der Zufluss-Wassertiefe h_o ohne Feinmaterial ist für den Massstab 1:6 etwas höher als für den Massstab 1:30. Bei den Versuchen mit ca. 7% FM stimmen die Ergebnisse ebenfalls relativ gut überein. Die Abweichungen sind innerhalb des Bereichs der Reproduzierbarkeit. Basierend auf diesen Ergebnissen werden die Modelleffekte somit als vernachlässigbar eingeschätzt. Neben einer vordefinierten Verkläung wurden bereits Versuche mit einer natürlichen Verkläung durchgeführt, um den Einfluss der Verkläungsform auf den Aufstau zu untersuchen (Abb. 9). Dabei wurde ein bestimmtes Schwemmholzvolumen oberstrom des Rechens kontinuierlich (10%-Pakete) zugegeben und der resultierende Aufstau ermittelt. Für eine detaillierte Auswertung des Aufstaus bei einer natürlichen Verkläung sind jedoch weitere Versuche erforderlich. Abschliessend sollen die Ergebnisse in einer Bemessungsgleichung zusammengefasst werden, um den Aufstau infolge einer Schwemmholzverkläung für ein Hochwasserereignis abschätzen zu können.

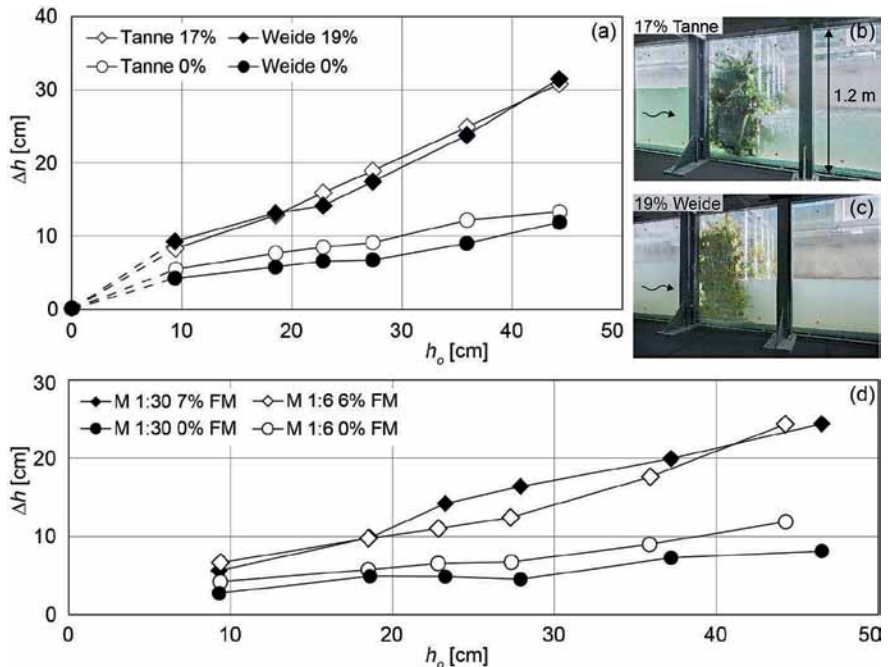


Abb. 8 Einfluss des Feinmaterials auf den Aufstau; (a) Δh in Abhängigkeit von h_o für 0% und 17% Tannen- bzw. 19% Weiden (M 1:6); Versuch (M 1:6) mit (b) 17% Tannen und (c) 19% Weiden und (d) Δh in Abhängigkeit von h_o für 0% und $\approx 7\%$ Feinmaterial (M 1:6 und M 1:30)

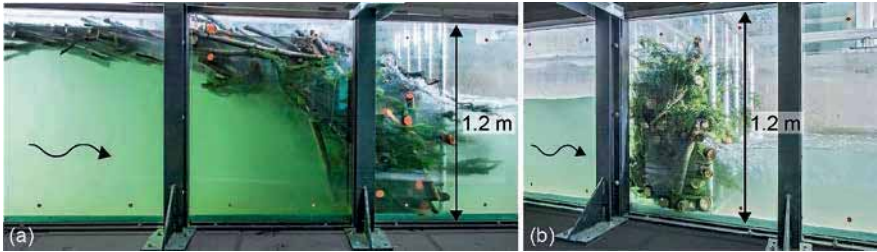


Abb. 9 (a) Natürliche und (b) vordefinierte Schwemmholzverklausung im Massstab 1:6

4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Im Rahmen des *WoodFlow*-Forschungsprojekts wurden an der VAW zahlreiche Modellversuche zum Thema Schwemmholzverklausung durchgeführt. Dabei wurde einerseits die Verklausungswahrscheinlichkeit bei einem Brückenpfeiler untersucht und andererseits der Aufstau infolge einer Schwemmholzverklausung analysiert. Die Ergebnisse der Versuche zur Pfeilerverklausung zeigen, dass die Verklausungswahrscheinlichkeit vor allem mit zunehmender Schwemmholzlänge und abnehmender Zufluss-Fliessgeschwindigkeit steigt. Weiter erhöht sich die Verklausungswahrscheinlichkeit, je mehr Hölzer auf einmal transportiert werden. In einem nächsten Schritt sollen die Ergebnisse in einer Abschätzgleichung für die Verklausungswahrscheinlichkeit zusammengefasst werden. Dies ist ein erster wichtiger Schritt, um gefährdete Brückenquerschnitte auszuscheiden und geeignete Schutzmassnahmen abzuleiten. Weiter sollen die Modellversuche zur Pfeilerverklausung mit Hilfe eines numerischen Modells simuliert werden. Dazu wird das hydro-numerische 2D Modell „Iber“ mit dem integrierten Modul „Iber-Wood“ verwendet (Ruiz-Villanueva *et al.*, 2014).

Der Aufstau infolge einer Schwemmholzverklausung wurde in zwei verschiedenen Kanälen untersucht (M 1:30 und M 1:6). Um die Durchführbarkeit der Versuche zu vereinfachen, wurde ein bestimmtes Schwemmholzvolumen definiert und zwischen zwei Rechenreihen eingebaut. Zusammenfassend steigt der Aufstau infolge einer Schwemmholzverklausung mit

- zunehmender Zufluss-Froude-Zahl,
- zunehmender Kompaktheit der Verklausung,
- zunehmendem Feinmaterial,
- zunehmender Verklausungslänge und
- abnehmendem Holzdurchmesser.

Ein wesentlicher Unterschied zwischen Laborbedingungen und Prototyp ist, dass die Sohle z.B. im Bereich einer Brücke nicht vollständig befestigt ist. Eine Schwemmholzverklausung kann in diesem Fall zu verändertem Geschiebetransport führen. Aus diesem Grund wurden erste Versuche mit einer natürlichen Schwemmholzzugabe (Abb. 9) sowie mit beweglicher Sohle (Abb. 10) durchgeführt. Die Kolkbildung führt einerseits zu einem reduzierten Rückstau, andererseits zu einer Gefährdung der Bauwerksfundamente. Mit weiteren Experimenten sollen diese Prozesse im Detail untersucht und in einer Bemessungsgleichung für die Ermittlung des Aufstaus zusammengefasst werden.



Abb. 10 Natürliche Schwemmholtverkläuerung mit beweglicher Sohle, massgebender Korndurchmesser des Sohlenmaterials $d_m = 2.65$ mm, $Q_o = 40$ l/s, $F_o = 0.5$ im Massstab 1:30

Literatur

- Bezzola, G.R.; Gantenbein, S.; Hollenstein, R.; Minor, H.-E. (2002). Verkläuerung von Brückenquerschnitten, Proc. Intl. Symposium "Moderne Methoden und Konzepte im Wasserbau", VAW-Mitteilung 175, Ed. H.E. Minor, ETH Zürich, Schweiz, 87-97.
- Bezzola, G.R.; Hegg, C. (2008). Ereignisanalyse Hochwasser 2005 Teil 2: Analyse von Prozessen, Massnahmen und Gefahrengrundlagen, Bundesamt für Umwelt, BAFU, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, WSL, Umwelt-Wissen Nr. 0825: 429 S.
- De Cicco, P.N.; Paris, E.; Solari, L. (2016). Wood accumulation at bridges: Laboratory experiments on the effect of pier shape, Proc. 8th River Flow Congress, Constantinescu, Garcia & Hanes (Eds.), St. Louis, USA, 2341-2345.
- Gurnell, A.M.; Piégay, H.; Swanson, F.J.; Gregory, S.V. (2002). Large wood and fluvial processes, *Freshwater Biology* 47 (4), 601-619.
- Gschnitzer, T.; Gems, B.; Aufleger, M.; Mazzorana, B.; Comiti, F. (2013). Physical Scale Model Test on Bridge Clogging, Proc. 35th IAHR World Congress, Chengdu, Beijing.
- Hartlieb A. (2015). Schwemmholt in Fließgewässern - Gefahren und Lösungsmöglichkeiten, Report 133. TU München, Deutschland.
- Knauss, J. (1995). Von der oberen zur unteren Isar, Bericht 76, TU München, 23-66.
- Lange, D.; Bezzola, G.R. (2006). Schwemmholt: Probleme und Lösungsansätze, VAW-Mitteilung 188, Ed. H.E. Minor, ETH Zürich, Schweiz.
- Lyn, D.A.; Cooper, T.; Yi, Y.K.; Sinha, R.; Rao, A.R. (2003). Debris accumulation at bridge crossings: Laboratory and field studies, Report No.: FHWA/IN/JTRP-2003/10, Joint Transportation Research Program, Purdue University, West Lafayette, IN, USA.
- Piton G.; Recking A. (2015). Design of sediment traps with open check dams, II: Woody debris, *Journal of Hydraulic Engineering* 142 (2), 04015046.

- Ruiz-Villanueva, V.; Bladé Castellet, E.; Díez-Herrero, A.; Bodoque, J.M.; Sánchez-Juny, M. (2014). Two-dimensional modelling of large wood transport during flash floods, *Earth Surf. Process. Landforms* 39, 438-449.
- Ruiz-Villanueva, V.; Badoux, A.; Boes, R.M.; Rickenmann, D.; Rickli, C.; Schalko, I.; Schmocker, L.; Schwarz, M.; Steeb, N.; Stoffel, M.; Weitbrecht, V. (2016). Large wood research in Swiss watercourses, *Proc. 8th River Flow Congress*, Constantinescu, Garcia & Hanes (Eds.), St. Louis, USA, 2307-2314.
- Schalko, I.; Schmocker L.; Weitbrecht, V.; Boes, R.M. (2016). Modeling the effect of organic fine material in a driftwood accumulation on backwater rise, *Proc. 8th River Flow Congress*, Constantinescu, Garcia & Hanes (Eds.), St. Louis, USA, 2326-2332.
- Schalko, I. (2017). Large wood accumulation probability at a single bridge pier, *Proc. 37th IAHR World Congress*, Kuala Lumpur, Malaysia (accepted).
- Schmocker, L.; Hager, W.H. (2011). Probability of drift blockage at bridge decks, *Journal of Hydraulic Engineering* 137 (4), 480-492.
- Schmocker, L.; Hager, W.H. (2013). Scale modelling of wooden debris accumulation at a debris rack, *Journal of Hydraulic Engineering* 139 (8), 827-836.
- Waldner, P.; Köchli, D.; Usbeck, T.; Schmocker, L.; Sutter, F.; Rickli, C.; Rickenmann, D.; Lange, D.; Hilker, N.; Wirsch, A.; Siegrist, R.; Hug, C.; Kaennel, M. (2009). Schwemmholz der Ereignisanalyse des Hochwassers 2005, Schlussbericht des Teilprojekts 'Schwemmholz' zuhänden BAFU/WSL, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, WSL, Birmensdorf, 72 S.
- Wohl, E.; Bledsoe, B.P.; Fausch, K.D.; Kramer, N.; Bestgen, K.R.; Gooseff, M.N. (2016). Management of large wood in streams: an overview and proposed framework for hazard evaluation, *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)* 52 (2), 315-335.

Dank

Die Doktorarbeit wird vom Schweizer Bundesamt für Umwelt (BAFU) finanziert (Projektnummer: 15.0018.PJ / O192-0202) und ist Teil des Forschungsprojekts *WoodFlow*.

Anschrift der Verfasser/innen

Isabella Schalko
 Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich
 Hönggerberggring 26, CH-8093 Zürich
 schalko@vaw.baug.ethz.ch

Dr. Lukas Schmocker
 schmocker@vaw.baug.ethz.ch

Dr. Volker Weitbrecht
 weitbrecht@vaw.baug.ethz.ch

Prof. Dr. Robert Boes
 boes@vaw.baug.ethz.ch

Schwemmholzproblematik in der fachlichen Praxis (Fragestellungen, Lösungskonzepte, Beispiele)

Bernhard Unterreitmeier

Zusammenfassung

Schwemmholz ist seit jeher ein Bestandteil von Hochwasserabflüssen und als natürlicher Feststoff im Gewässersystem zu sehen. Führt das beim Hochwasser mitgeführte Schwemmholz zu Verklausungen, Abflussbeeinträchtigungen oder betrieblichen Störungen an wasserbaulichen Anlagen, ist die Schwemmholzproblematik bei flussbaulichen Maßnahmen in die Planungsüberlegungen einzubeziehen. Eine besondere Bedeutung kommt dem Schwemmholz an Wildbächen und Gewässern mit alpinen Einzugsgebieten durch die hohen Schwemmholzpotentiale zu. Neben dem Schwemmholz sind auch abschwemmbar Feststoffe aus Flächen der Infrastruktur, der Landwirtschaft, der Forstwirtschaft und den Siedlungsflächen für die Störung des Hochwasserabflusses verantwortlich. Begleitend zur Anwendung der gängigen Bemessungsgrundlagen zur Ermittlung der Schwemmholzpotentiale sowie der Verklausungsgefahr, ist es für den Planer daher unerlässlich, das Einzugsgebiet zu begehen und die Einflüsse auf die Zusammensetzung des Schwemmholzes und Treibgutes in der Gesamtbewertung zu berücksichtigen. In diesem Beitrag werden vier verschiedene wasserbauliche Maßnahmen vorgestellt, in denen der Schwemmholzanfall in die Planungsüberlegungen einzubeziehen war. Im ersten Beispiel wird ein Hochwasserrückhaltebecken an einem Wildbach innerhalb von Waldflächen vorgestellt. Das Beispiel zwei beinhaltet ein Sperrenbauwerk zur Schwemmholz- und Geschieberückhaltung. Im Beispiel drei wird ein innerörtlicher Hochwasserschutz mit vorgeschalteten Schwemmholzrechen vorgestellt. Das Beispiel vier zeigt ein Lösungskonzept, in dem der Schwemmholzdurchgang optimiert wurde.

1 Einführung

Im Wasser mitgeführtes Holz wird als Schwemmholz bezeichnet. In der Blütezeit des Salinenwesens und der Holzrft war das Abschwemmen von Holz bei Hoch- und Schmelzwasserabflüssen eine gängige und effektive Transportmöglichkeit, der in vielen bayerischen Regionen eine wichtige wirtschaftliche Bedeutung zukam. Im nachfolgenden Beitrag wird auf die Problematik von mitgeführtem Schwemmholz und Treibzeug eingegangen, die im Hochwasserabfluss als Risikofaktor zu sehen sind. Schwemmholz ist bei Hochwasserereignissen oftmals ein signifikanter Systemparameter, der auf Art und Umfang des Schadensausmaßes erheblichen Einfluss nehmen kann. Die Berücksichtigung von Schwemmholz in der wasserbaulichen Praxis stellt eine große und unliebsame Herausforderung für Ingenieure dar, da die Zusammensetzung des Schwemmguts, die Potentialabschätzung sowie die ereignisbezogenen Transportkapazitäten in der Bestimmung und Abschätzung mit großen Unsicherheiten behaftet sind. Neben den Bemessungsgrundlagen wie z.B. der Schwemmholzermittlung nach der „Lösen Blattsammlung Wildbach“ des bayerischen Landesamtes für Umwelt ist es für den Planer unerlässlich, das Einzugsgebiet zu begehen und die Einflüsse auf die Zusammensetzung und Menge des Schwemmholzes und Treibgutes durch Infrastruktur, landwirtschaftliche, forstwirtschaftliche, gewerbliche und bauliche Nutzung in die Gesamtbewertung einfließen zu lassen. In dem nachfolgenden Beitrag wird auf die planerische Herangehensweise von wasserbaulichen Maßnahmen zur Sicherung

vor Schwemmholz eingegangen und anhand von ausgewählten Maßnahmen unterschiedliche Lösungskonzepte vorgestellt.

2 Fragestellungen beim Umgang mit Schwemmholz

Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass bei Hochwasserabflüssen in Gewässern Schwemmholz mitgeführt wird. Durch eine Analyse des Einzugsgebietes und des Überschwemmungsgebietskorridders kann die Art, die Zusammensetzung und die Menge des Schwemmholzes abgeschätzt werden. Neben der Schwemmholzanalyse ist auch zu klären, ob Schwemmholz für einen Betrachtungsabschnitt ein Problem darstellt. Im Rahmen der Projektanalyse wasserbaulicher Vorhaben, wie z.B. Hochwasserschutzmaßnahmen empfiehlt es sich, den Einfluss von Schwemmholz und Treibgut und die damit verbundenen Störungen im Gewässer, an Bauwerken und an Anlagen zu analysieren. In einer Risikobetrachtung ist zu hinterfragen, ob die Funktion oder die Standsicherheit des Bauwerks durch Schwemmholz beeinträchtigt wird und welche Gefährdungs- und Schadenspotentiale damit verbunden sind. Erst mit den obengenannten Betrachtungen ist zielführend darüber zu entscheiden, ob und in welcher Art und welchem Umfang eine Schwemmholzproblematik vorliegt.

Die Konzeptionierung von wasserbaulichen Bauwerken und Anlagen zur Sicherung vor Schwemmholz beziehungsweise dessen negative Auswirkungen wie Beeinträchtigung von Bauwerken und Anlagen in ihrer Funktion, Bauwerksschäden durch Schwemmholzanprall und Beeinträchtigung des Hochwasserabflusses, erfordert eine differenzierte Betrachtung hinsichtlich der Bemessung von Anlagen, der baulichen Umsetzung und dem Bauwerksunterhalt. Bei den grundsätzlichen Überlegungen im Umgang mit Schwemmholz sollte die Abwägung zwischen Schwemmholzdurchgang, Schwemmholzurückhalt und Maßnahmen zur Vermeidung von Schwemmholzanfall getroffen werden. Fällt die Entscheidung auf die Schwemmholzurückhaltung, sind das Zwischeneinzugsgebiet ab dem Rückhaltestandort und der Überlastfall in die Risikobetrachtung einzubeziehen.

Neben den baulichen Eingriffen durch Herstellung von Bauwerken und Anlagen im Gewässer, sind auch die naturschutzfachlichen Auswirkungen durch den Betrieb und den Unterhalt von Rückhalteanlagen zur Sicherung vor Schwemmholz in der Planung von besonderem Interesse. Eine besondere Bedeutung kommt der Frage der Beeinträchtigung der ökologischen Durchgängigkeit und dem unterhaltungsbedingten Eingriff in den aquatischen Lebensraum zu.

Bei wasserbaulichen Anlagen zur Sicherung vor Schwemmholz sind oft die topographischen Gegebenheiten für die Art und den Umfang der Maßnahmen bestimmend. Bei der Planung von Bauwerken zur Schwemmholzurückhaltung sollte die Exposition der Baustelle und die damit verbundenen bautechnischen und baubetrieblichen Anforderungen bereits in der Konzeptionsphase in die Überlegungen miteinfließen.

Bauwerke und Anlagen mit Schwemmholzanfall erfordern in vielen Fällen einen aufwendigen Bauwerksunterhalt, wie z.B. die Beseitigung von Schwemmholz, der mit regelmäßigen, kostenintensiven Eingriffen ins Gewässer verbunden und dem ein hoher Stellenwert hinsichtlich der Gesamtwirtschaftlichkeitsbetrachtung beizumessen ist.

Für den Bauwerksunterhalt werden folgende Überlegungen empfohlen:

- Ist eine Zufahrt mit LKW möglich, um wirtschaftliche Transportkosten zu ermöglichen und um auf eine aufwendige Schwemmholzerkleinerung vor Ort weitgehend verzichten zu können.
- Wie kann die Vermengung von Schwemmholz und Geschiebe minimiert und dadurch die Entsorgungskosten reduziert werden.
- Kann der Feststoffrückhalteraum vergrößert und dadurch die Räumungszyklen verringert werden.

Ergänzend zu Maßnahmen zur Sicherung vor Schwemmholz und Treibgut ist eine Restrisikobetrachtung unerlässlich, in der die partielle oder vollständige Verklausung von Bauwerken und die damit verbundenen Gefährdungspotentiale für Siedlungsflächen und Infrastruktur zu beurteilen sind. Bei der Sicherung vor Gefahren durch Schwemmholz kommt der Verhaltensvorsorge und der Entwicklung geeigneter Abwehrstrategien bei Störfällen durch Schwemmholz eine große Bedeutung zu.

3 Lösungskonzepte und Beispiele wasserbaulicher Praxis

Beispiel 1 – Hochwasserrückhaltebecken im Waldgebiet

Aufgabenstellung

Die Marktgemeinde Prien wurde im südlichen Ortsteil regelmäßig durch den Reitbach überschwemmt. Der Reitbach ist ein Gewässer Dritter Ordnung und als ausgebauter Wildbach in der Zuständigkeit des Freistaates Bayern. Für die Sicherung der bebauten Flächen ist eine Hochwasserrückhaltung erforderlich. Der Hochwasserrückhaltestandort liegt innerhalb einer Waldfläche, die forstwirtschaftlich genutzt wird. Bei der Projektierung des Hochwasserrückhaltebeckens war für den Hochwasserbetrieb der Einfluss von Schwemmholz zu berücksichtigen. In der Konzeption war sicherzustellen, dass der Betriebsdurchlass und die Hochwasserentlastungsanlage vom Schwemmholz nicht beeinträchtigt werden und die Verrohrungen und Brücken im Unterlauf vor Verklausung geschützt sind. Die Planung des Hochwasserrückhaltebeckens erfolgte unter folgenden Planungsanforderungen:

- Der Stauraum liegt vollständig innerhalb von Waldflächen. Es ist zu erwarten, dass der Schwemmholzanfall große Mengen an Ästen und Grünzeug beinhaltet.
- Die Waldfläche im Stauraum soll auch zukünftig forstwirtschaftlich genutzt werden.
- Im Unterlauf des Hochwasserrückhaltebeckens mündet ein Seitengewässer mit hohem Schwemmholzpotential in den Reitbach.

Maßnahmenbeschreibung

Das Ausbaukonzept zur Sicherung des schadlosen Abflusses beinhaltet ein ungesteuertes Hochwasserrückhaltebecken mit einem Speichervolumen von ca. 40.000 Kubikmeter im Oberlauf, eine Gewässerrenaturierung und die Nachrüstung eines Geschiebesammlers mit einem Wildholzrechen oberhalb der bestehenden Bebauung. Durch das Hochwasserrückhaltebecken wird der Schwemmholztransport deutlich reduziert und dadurch die baulichen Anforderungen für den geplanten Schwemmholzrechen im Unterlauf erheblich vereinfacht. Für den Betriebsdurchlass wurde ein Trogprofil mit schrägliegenden Rechen am Einlaufbauwerk gewählt, wodurch eine große Rechenanströmfläche erreicht und das Aufschwimmen des Schwemmgutes begünstigt wird. Für die Bemessung des Rechens am

Einlaufbauwerk wurde ein Verklauungsgrad von ca. 95 % zugrunde gelegt. Die Hochwasserentlastung in Form einer überströmbaren Dammscharte mit einer Überströmbreite von 20m wurde seitlich zur Bauwerksanströmung angeordnet und vom zu erwartenden Schwemmholzteppich, der sich am Durchlassbauwerk bildet, abgerückt. In Deutschland gelten derzeit keine verbindlichen Regeln für Schwemmholz an Hochwasserentlastungsanlagen. Die konstruktive Ausbildung der Überlaufsektion zur Hochwasserentlastung wurde in Anlehnung an die Schweizer Empfehlungen für HWE überprüft. Auf einen Wildholzrechen im Bereich der Stauwurzel wurde verzichtet.

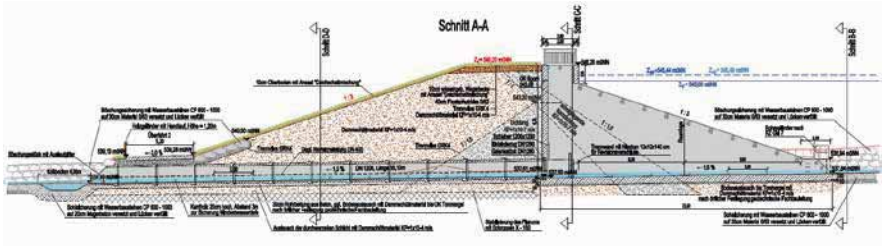


Abb. 1 Betriebsdurchlass als Einlaufbauwerk im Trogprofil



Abb. 2 Einlaufbauwerk mit Schwemmholzrechen



Abb. 3 Lageplan Hochwasserrückhaltebecken am Reitbach / Prien a. Chiemsee

Beispiel 2 – Geschiebesperre mit Wildholzrechen

Aufgabenstellung

Die Gemeinde Ramsau ist durch den Freidinggraben hochwassergefährdet. Der Hochwasserabfluss beinhaltet große Mengen an Schwemmholz (Wildholz) und Geschiebe und führt im Ortsbereich zu massiven Verklausungen an Brücken und Durchlässen, wodurch der Wildbach aus seinem Bachbett gedrückt und die Siedlungsfläche überschwemmt wird. Zur Sicherung der Brücken und Durchlässe vor Verklausung war eine Feststoffrückhaltung im Freidinggraben herzustellen. Die Durchleitung des Schwemmholzes und des Geschiebes ist auf Grund der beengten Verhältnisse im Ortsbereich nicht möglich. Für die Geschiebe- und Wildholzsperre waren folgende Planungsanforderungen zu erfüllen:

- Schwemmholz- und Geschiebesperre muss mit LKW-Verkehr erreichbar sein
- Schwemmholzrückhalt ist am Sperrenbauwerk sicherzustellen
- Schwemmholzrückhalt für Bemessungsabfluss BHQ3 = HQ100



Abb. 4 Hochwasser mit Verklausung am Freidinggraben / Gemeinde Ramsau (2005)

Maßnahmenbeschreibung

Für den Feststoffrückhalt wurde ein Sperrenbauwerk mit integriertem Stabrechen realisiert. Die Sperrendimensionierung erfolgte in Abhängigkeit der topographischen Gegebenheiten auf ein maximal mögliches Rückhaltevolumen. Das Sperrenbauwerk wurde mit einem Grunddurchlass und Entwässerungsdolen versehen, um einen abflussbedingten Wasseraufstau zu vermeiden und eine teilweise Geschiebeselbstentleerung zu ermöglichen. Die Schwemmholzrückhaltung erfolgt durch Ablagerung im Stauraum des Sperrenbauwerks und durch einen Stabrechen, der im Bereich der Überlaufsektion angeordnet wurde. Die Überlaufsektion wurde unter Annahme einer vollständigen Verklausung des Rechens für ein hundertjähriges Ereignis zzgl. 1m Freibord bemessen. Für hydraulische Extremlastfälle (Überschreiten des Bemessungshochwassers) wurde ein zusätzlicher Stabrechen im Tosbecken des Sperrenbauwerks vorgesehen und dadurch eine zusätzliche Sicherung im Unterlauf vor Schwemmholz geschaffen. Die Zufahrt zur Bewirtschaftung des Sperrenbauwerks erfolgt seitlich über die Hangflanke und ist für einen Schwerlastverkehr SLW 30 ausgelegt. Eine Entfernung von Schwemmholz im Tosbecken ist nur mit erhöhtem Aufwand möglich. Im Ereignisfall erfolgt im Stauraum eine Vermischung von Schwemmholz und Geschiebe, da die Exposition des Bauwerks keine wirtschaftlich vertretbaren Alternativen ermöglicht. In der Gesamtkonzeption sind weitere Schwemmholzrückhaltestandorte im Oberlauf angedacht.



Abb. 5 Sperrenbauwerk mit Schwemmholzrechen am Freidinggraben

Beispiel 3 – Schwemmholzurückhalt am Eckerbach

Aufgabenstellung

Im Jahr 2002 führte ein extremes Hochwasserereignis am Eckerbach (Unterer Bayerischer Wald) zu Schäden in Millionenhöhe in der Marktgemeinde Obernzell. Neben den extremen Niederschlägen war die Verklausung von Straßendurchlässen im oberen Einzugsgebiet mit Dammbürchen an mehreren Stellen für das verheerende Ausmaß des Schadensereignisses mitverantwortlich. Der Eckerbach gliedert sich in ein oberes Einzugsgebiet mit hoher Straßen- und Siedlungsdichte, einen bewaldeten Schluchtverlauf mit hohem Gefälle und einen Talraum mit hoher Nutzungsdichte (Wasserkraft, Gewerbe- und Wohngebiet). Im Talraum überspannen 13 Brücken den Eckerbach. Kurz vor der Mündung in die Donau ist der Eckerbach über ca. 300 m verrohrt. An der Verrohrung ist ein Feinrechen vorgeschaltet. Bei Hochwasserabflüssen werden im Eckerbach hohe Geschiebe- und Schwemmholzfrachten transportiert.

Im Rahmen der Beseitigung von Schäden und der Wiederherstellung von Infrastruktur und Gewässersicherung war ein Gewässerausbau für einen schadlosen Abfluss HQ100 unter Berücksichtigung des hohen Schwemmholz- und Geschiebepotentials im Einzugsgebiet, unter Beibehaltung der ökologischen Durchgängigkeit, sicherzustellen.



Abb. 6 Schadensereignis 2002 im Eckerbachtal / Markt Oberzell

Maßnahmenbeschreibung

Im Rahmen einer Hochwasserschutzmaßnahme wurde im Eckerbach der Gerinnequerschnitt auf einen Bemessungsabfluss HQ100 ausgebaut und die Brücken auf ein Freibord von 1m angehoben. Zur Sicherung des Hochwasserabflusses im Ortsbereich wurden am Ortsrand beziehungsweise an den Enden der Schluchtverläufe des Rampersdorfer Baches, des Griesenbaches und des Hofleitenbaches drei Wildholzrechen zur Rückhaltung von Schwemmholz errichtet. Die Konzeption der Wildholzrechen berücksichtigte einen Geschiebedurchgang. Für den Geschieberückhalt wurde im Ortsbereich eine Auflandungsstrecke vorgesehen, die durch Geschiebeentnahme bewirtschaftet wird. Ein Hochwasserereignis im Jahr 2016 mit Abfluss nahe HQ100 zeigte die Wirksamkeit der Maßnahme. Durch die effektive Schwemmholzrückhaltung an den Schluchtausläufern konnte der Hochwasserabfluss bis zum Dükerbauwerk schadlos abgeführt werden. Mit dem Hochwasserereignis 2016 wurde aber auch deutlich, dass für Gewässerstrecken mit verkläusungssensiblen Bauwerken und Anlagen eine Restrisikobetrachtung erforderlich ist und Hochwassereinsatzmaßnahmen auf das verbleibende Risiko abzustimmen sind.



Abb. 7 Wildholzrechen an Seitengewässer

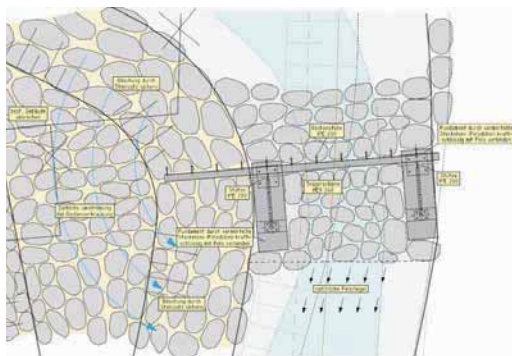


Abb. 8 Lageplan Wildholzrechen – Bauart Stabrechen mit Gründung auf Mikropfählen

Beispiel 4 – Sicherung vor Verklausung am Lidlgraben

Aufgabenstellung

Der Lidlgraben entspringt den nördlichen Felsabbrüchen der Reiter Alpe und führt bei Hochwasser hohe Frachten an Geschiebe und Schwemmholz mit. Im Bachbett des Lidlgrabens bestehen Bauwerke zur Belüftung einer technischen Anlage, die in der Vergangenheit wiederholt durch Schwemmholz und Geschiebe beeinträchtigt oder beschädigt wurden. Zweck des Vorhabens war die Sicherung der bestehenden Bauwerke und Anlagen vor Schwemmholz und Geschiebe sowie Sicherung des schadlosen Hochwasserabflusses.

Projektanforderungen

- sehr steiles Gewässer mit mehr als 20 % Gefälle
- nur in Teilabschnitten mit geländegängigen Fahrzeugen erreichbar
- hohes Schwemmholzpotential aus alpinem Einzugsgebiet
- Oberlauf des Lidlgraben nicht zugänglich
- eine Brücke mit Verklausungsgefahr

Maßnahmenbeschreibung

Für das Vorhaben wurde eine Variantenstudie durchgeführt, in der Lösungsmöglichkeiten zur Sicherung vor Schwemmholz und Geschiebe aufgezeigt wurden. In der Vorzugsvariante wurde ein flussbauliches Konzept gewählt, in dem potentiell verklausungsgefährdete Stellen beseitigt und der Geschiebe- und Schwemmholztransport optimiert wurden. Ergänzend wurde in Teilabschnitten die hydraulische Leistungsfähigkeit angepasst. Auf Geschiebe- und Schwemmholzrückhaltemaßnahmen im Oberlauf wurde bewusst verzichtet, da die bauliche Umsetzung und Sperrenbewirtschaftung nur unter Einsatz von Seilkrananlagen oder Hubschrauber möglich gewesen wäre und im Unterstrom kein Schadenspotential besteht. Das Vorhaben umfasst im Wesentlichen fünf Maßnahmen, die die bestehenden Bauwerke und Anlagen vor Schwemmholz sichern:

1. Herstellung einer Gleitwand zur Sicherung vor Verklausung der Bauwerksstützen
2. Beseitigung von Flachstrecken und Furten im Bachbett
3. Herstellung von Leitdämmen zur Erhöhung der Feststofftransportleistung im Gewässer.
4. Herstellung eines seitlich angeströmten Bypasses zur Entlastung eines Brückenbauwerks
5. Anprallschutz für Objekte und Anlagen im Abflussquerschnitt

Durch das Vorhaben wird der schadlose Durchgang von Schwemmholz und Geschiebe gewährleistet und die Bauwerke gegen Hochwasser gesichert. Durch den Verzicht von Schwemmholz- und Geschieberückhaltemaßnahmen wird die Gewässerunterhaltung die auf Bauwerksinstandhaltung reduziert. Aufwendige Bewirtschaftungsmaßnahmen wie regelmäßige Feststoffentnahmen entfallen.



Abb. 9 Verklauungsgefährdeter Steg vor Umsetzung der Maßnahmen



Abb. 10 Sicherung des Steges gegen Verklauung durch eine Gleitwand



Abb. 11 Bypass 2x DN1400 zur Sicherung des Abflusses bei Brückenverkläusung

Literatur

Rickenmann, D. (1997). Schwemmholz und Hochwasser. *Wasser, Energie, Luft* 89(5/6), 115-119

Rimböck, A. (2003). Schwemmholz an Wildbächen. Doktorarbeit TU München, Deutschland

Hartlieb, A. (2015). Schwemmholz in Fließgewässern – Gefahren und Lösungsmöglichkeiten

Schmocker, L. (2016). Schwemmholz an Hochwasserentlastungsanlagen von Talsperren

Anschrift der Verfasser

Dipl.-Ing. Bernhard Unterreitmeier
aquasoli Ingenieurbüro
Hauertinger Str.1a, D-83133 Siegsdorf
info@aquasoli.eu

Integraler Hochwasserschutz – Fallbeispiele aus verschiedenen Ländern

Walter Gostner, Corrado Lucarelli, Mathias Hochschwarzer

Zusammenfassung

Hochwasserschutz ist eine integrale Aufgabenstellung geworden. Es ist nicht mehr nur ausreichend, aufgrund von Ereignissen in der Vergangenheit technische Hochwasserschutzmaßnahmen zu planen und auszuführen. Projekte sollen langfristig wirksam sein sowie Ökologie und Ökonomie gleichermaßen berücksichtigen.

Mit dem Hochwasserschutz befasste Akteure stehen deshalb vor neuen Herausforderungen. In vorliegendem Artikel wird anhand von Fallbeispielen gezeigt, wie in verschiedenen Regionen Mitteleuropas integraler Hochwasserschutz betrieben wird, welche Probleme dabei auftreten können und wie man mit umfassenden Lösungen versucht, der Anforderung des integralen Hochwasserschutzes gerecht zu werden.

1 Einführung

Seit Beginn der industriellen Revolution ist der Mensch der Meinung, mit Technik nahezu alle Probleme lösen zu können. Dieses Denken hat sich auch beim Umgang mit Naturgefahren festgesetzt. Katastrophale Hochwasserereignisse in den letzten Jahrzehnten, die auch unsere hochentwickelte Zivilisation oft überraschend treffen, haben uns eines Besseren belehrt. Der Klimawandel erschwert die Vorhersehbarkeit der Ereignisse zusätzlich.

Bei den Verantwortlichen in Politik, Verwaltung, Forschung und Technik hat ein gradueller Paradigmenwechsel von einem rein technischen hin zu einem integralen Hochwasserschutz eingesetzt. Die EU hat in der Richtlinie über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken (EU, 2007) ein gemeinschaftliches Regelwerk definiert, welches dieser Entwicklung Rechnung trägt. Aufgrund der verschiedenen gesellschaftlichen und kulturellen Hintergründe und finanziellen Möglichkeiten der Mitgliedsstaaten liegt es in der Natur der Sache, dass sich die konkrete Umsetzung der Richtlinien in unterschiedlichen Herangehensweisen äußert.

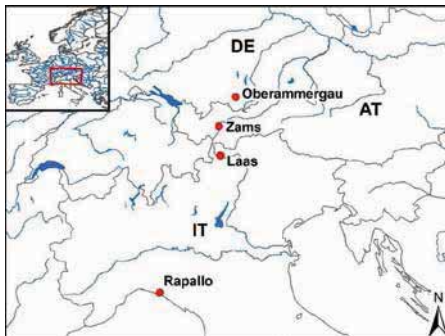


Abb. 1. Übersichtskarte mit Lokalisierung der Fallbeispiele

Der vorliegende Artikel zeigt anhand von mehreren Fallbeispielen (Abb. 1), wie integraler Hochwasserschutz in die Praxis umgesetzt wird und welche Probleme dabei auftreten können. An diesen Beispielen entlang der Nord-Süd Achse Mitteleuropas wird ersichtlich, dass sich die Problemstellungen sehr oft decken und auch die Leitlinien für die konkrete Umsetzung ähnlich sind. Dennoch gibt es Unterschiede, welche sich einerseits aufgrund der länderspezifischen Gesetzgebungen und andererseits durch regionale und projektspezifische Randbedingungen manifestieren.

2 Integraler Hochwasserschutz

Der integrale Hochwasserschutz ist als Weiterentwicklung zum rein technischen Hochwasserschutz zu sehen. Folgende wesentliche Kriterien kennzeichnen ihn:

- **Proaktiv/vorsorgend.** In der traditionellen Herangehensweise wurden Hochwasserschutzmaßnahmen häufig als Reaktion auf in der Vergangenheit aufgetretene Schadensereignisse geplant und umgesetzt. Auch aufgrund des Mangels an geeigneten Modellen orientierte man sich vielmehr an der Vergangenheit als an den in Zukunft möglichen Ereignissen. Die flächendeckende Ausweisung von Gefahrenzonen erlaubt es mittlerweile, Hochwasserschutz vorausschauend zu betreiben und die Schäden aufgrund extremer zukünftiger Ereignisse mittels einer umsichtigen Planung von vorneherein zu verhindern.

Die Kenntnis der Gefahrenzonen erlaubt es, mit Hilfe einer gefahrenangepassten Raumplanung und geeignetem Objektschutz das Schadenspotenzial zu verringern. Dadurch ist es nicht mehr nötig, die Gefahr überall möglichst auszuschalten, sondern sie dort auch zuzulassen, wo das Risiko geringer ist.

Ein weiterer Punkt in diesem Zusammenhang ist die Erkenntnis, dass es trotz aller aktiven und passiven Vorkehrungen zu einem Überlastfall kommen kann. Beim integralen Hochwasserschutz wird deshalb diesem Restrisiko besonderes Augenmerk geschenkt.

- **Einzugsgebietsbezogen.** Integraler Hochwasserschutz ist vor allem auch dadurch gekennzeichnet, dass auf einen gewissen Bereich in einem Einzugsgebiet lokalisierte Projekte in einen zumindest auf die Einzugsgebietsebene bezogenen Zusammenhang gestellt werden. Dadurch erlaubt es, eventuell das Entstehen von Hochwasserwellen selber zu beeinflussen und Hochwasser vor allem dort zurückzuhalten, wo es möglich ist und nur dort durchzuleiten, wo es nötig ist. Das Verschlechterungsverbot für Unterlieger, welches in verschiedenen Hochwasserschutzrichtlinien vorgeschrieben ist, ist aus diesem Ansatz heraus entstanden.
- **Prozessorientiert/adaptiv.** Beim klassischen Hochwasserschutz erfolgte die Bemessung der Abflussquerschnitte üblicherweise mittels Näherungsformeln und lediglich unter Berücksichtigung der Reinwasserabflüsse. Von Fall zu Fall können bei einem Hochwasserereignis jedoch in erster Linie das Geschiebe oder das Schwemmholz die Auslöser für die durch das Ereignis hervorgerufenen Schäden sein. Mittels ausgereifter hydrodynamischer Modelle ist man mittlerweile imstande, die beim Hochwasser ablaufenden Prozesse zuverlässig wiederzugeben. Zudem hat die Forschung große Fortschritte bei der Entwicklung der Modelle für den Geschiebetransport gemacht, sodass hydrodynamische Modelle auch mit mobilem Bett gerechnet werden können. Auf diese Weise kann die Änderungen der Sohlagen während eines Ereignisses beurteilt werden. Auch werden

Ansätze angewandt, anhand welcher beispielsweise die Verklauungswahrscheinlichkeit von Brücken oder die Wahrscheinlichkeit eines Deichbruches abgeschätzt werden können.

Wo es möglich ist, versucht man weiters Hochwasserschutzmaßnahmen mittels adaptiven Bauweisen umzusetzen. Damit können nach stattgefundenen Ereignissen, welche immer auch einen Erkenntniszugewinn bedeuten, Schutzmaßnahmen mit geringem Aufwand an die Erfordernisse angepasst werden. Auch hat man dadurch die durch den Klimawandel noch nicht vorhersehbaren Folgen besser unter Kontrolle.

- **Fächerübergreifend.** Beim technischen Hochwasserschutz sind in der Vergangenheit viele Flussläufe begradigt worden. Dies hat zu einer Homogenisierung der Fließgewässerlebensräume und in weiterer Folge zur Verarmung der Biodiversität geführt. Beim integralen Hochwasserschutz wird ein interdisziplinärer Ansatz verfolgt. In Flussgebietsplänen werden auch die Anforderungen der aquatischen und terrestrischen Ökologie, des Landschaftsschutzes, der Geographie und der Soziologie berücksichtigt.
- **Interessensübergreifend/partizipativ.** Hochwasserschutz ist nicht mehr nur Aufgabe der Behörden und politischen Vertreter. Nachhaltiger Hochwasserschutz kann nur gelingen, wenn in den Begleitprozessen zu den Projekten alle Interessen erfasst und bestmöglich berücksichtigt werden. Durch die Einbindungen der betroffenen Bevölkerung und der Interessensträger in partizipativen Prozessen kann es gelingen, dass eine Identifikationsbildung für die Projekte erfolgt und die Umsetzung der Projekte von breiten Teilen der Öffentlichkeit mitgetragen wird.

3 Fallbeispiele

3.1 Fallbeispiel 1: Hochwasserschutz Rapallo (Ligurien/Italien)

3.1.1 Vorgehensweise

Die Region Ligurien wird immer wieder von Katastrophenhochwässern heimgesucht. Um die Jahrtausendwende definierte die Region Ligurien Leitlinien zur Untersuchung von Gefahrenzonen und Konkretisierung von Maßnahmen, welche bereits dem Leitgedanken der Vorsorge und der prozessorientierten und einzugsgebietsbezogenen Betrachtung Rechnung trugen.

Die Stadt Rapallo liegt am ligurischen Meer und wird vom Torrente Boate durchflossen. Der Torrente Boate hat ein Einzugsgebiet von ca. 25 km². An der Bergkette des Apennins entladen sich die vom Meer Richtung Land ziehenden Regenwolken. Sie können zu Starkniederschlägen mit überaus hohen Intensität führen. Der Torrente Boate führt während des gesamten Jahres kaum Wasser, während ein HQ100 eine Abflussspitze von ca. 410 m³/s aufweist.

Für alle Einzugsgebiete in Ligurien wurde ein stufenweises Vorgehen angewandt. Im Fall des Torrente Boate unterteilte sich dieses für die Projektebene in drei Bearbeitungsphasen:

1. Nach der über alle Einzugsgebiete vereinheitlichten Festlegung der Scheitelwerte für ein HQ50, HQ200 und HQ500 wurden vereinfachte, auf der sicheren Seite liegende 1d-Modellierungen vorgenommen, um die von den Hochwasserereignissen betroffenen Gebiete großflächig auszuweisen und Konfliktfelder zu erkennen.
2. In der nachfolgenden Phase wurden Bereiche mit einem relevanten Risiko, also Bereiche mit einer Überlappung von Gefahr mit Schadensempfindlichkeit, genauer untersucht und die

Gefahrenzonen definitiv ausgewiesen. Dies erfolgte unter Anwendung von instationären, hydrodynamischen 2d-Modellierungen. Aufbauend auf diese Detailstudien wurden Variantenstudien für Hochwasserschutzmaßnahmen ausgearbeitet. Aus diesen Variantenstudien wurden die zu realisierenden Projekte definiert.

3. Die dritte Phase betraf die Ausarbeitung des Entwurfs-, des Genehmigungs- und des Ausführungsprojektes. Sie lieferte also die Grundlagen für die Ausführung der Arbeiten.

3.1.2 Ausgeführte Lösungen

Nach Durchführung der Variantenstudie kam ein aus verschiedenen Teillösungen bestehendes Hochwasserschutzkonzept zur Durchführung. Im Stadtbereich wurden die Sohle eingetieft und die Ufermauern erhöht. Zur Beherrschung des Geschiebes wurden oberstrom des Stadtbereiches zwei Geschieberückhaltesperren errichtet. Der hohen Gefahr der Brückenverklausung wurde durch die Errichtung einer neuen Hubbrücke begegnet (Abb. 2). Diese ist zu beiden Ufern auf jeweils zwei Hydraulikpressen gelagert und wird im Hochwasserfall um 2 m angehoben, wobei zwei in der Flucht der Ufermauer angebrachte Stahlschürzen die Ufermauer schließen und das Ausuferen verhindern.

Die Brücke hat beim Hochwasserereignis im Herbst 2015, welches große Teile der Region Ligurien betroffen hat, ihre Funktionalität unter Beweis gestellt. Rapallo kam aufgrund der angehobenen Brücke ohne Ausuferungen des Torrente Boate davon.

3.1.3 Besonderheiten

In den Gesetzen Liguriens war die Möglichkeit von mobilen Hochwasserschutzelementen und deren Berücksichtigung bei der Ausweisung der Gefahrenzonen nicht gegeben. Insbesondere ging der erste Ansatz dahin, eine mobile Brücke für die Ausweisung der Gefahrenzonen als im Eintretensfall nicht wirksam anzunehmen. Damit wäre die Errichtung einer mobilen Brücke ad absurdum geführt worden.

In einem Überzeugungsprozess zwischen der Gemeinde Rapallo als Bauherrn, dem Projektierungsteam und der Region Ligurien als Genehmigungsbehörde konnte mittels eines Ereignisbaumes und des Zuweisens einer Wahrscheinlichkeit des Versagens des Brückenhebemechanismus im Ereignisfall aufgezeigt werden, dass dieses Risiko als Restrisiko eingestuft werden kann. Erst dadurch war es möglich, für die mobile Brücke eine Genehmigung zu erhalten und die Gefahrenzonen in der Stadt Rapallo wieder zurückzustufen. Bei Errichten einer fixen Brücke wäre zur Erreichung des geforderten Freibordes zu beiden Seiten des Ufers und in beide Richtungen eine steile Anrampung der Zufahrtsstraßen erforderlich gewesen. Dies hätte zu einer massiven Beeinträchtigung des Stadtbildes geführt. Durch die mobile Brücke konnte dies vermieden werden.



Abb. 2. Neue Hubbrücke am Torrente Boate. Links: Hochwasserereignis. Mitte: Angehobene Brücke (von oberstrom). Rechts: Angehobene Brücke (vom angrenzenden Platz)

3.2 Fallbeispiel 2: Hochwasserschutz Laas (Südtirol/Italien)

3.2.1 Vorgehensweise

Der Talboden der Etsch im Bereich zwischen Glurns und Laas (Länge ca. 13 km, Breite ca. 3 km) ist ein geographisch homogenes und durch markante Änderungen des Geländereiefs in alle Richtungen klar abgetrenntes Gebiet. In Zusammenarbeit zwischen den vier dort angesiedelten Gemeinden und dem Amt für Wasserschutzbauten der Autonomen Provinz Bozen wurde ein Flussgebietsplan in die Wege geleitet. Nach Zusage von Fördergeldern seitens der EU im Rahmen eines EFRE-Projektes wurde ein Projekt in mehreren Stufen umgesetzt:

1. Die erste Projektphase betraf die Erhebung und Beurteilung des IST-Zustandes. Neben der Ausweisung der Gefahrenzonen durch Hochwasser auf Basis von hydrodynamischen Modellierungen sowohl für die Talflüsse als auch für die murfähigen seitlichen Zubringer wurden auch andere Fachgebiete wie die aquatische und terrestrische Ökologie und die Raumnutzung bearbeitet. In mehreren Workshops (Flussraumforen) wurden unter Einbeziehung von Interessensgruppen und Vertretern der örtlichen Bevölkerung ein Leitbild und daraus resultierende Maßnahmenkonzepte entwickelt.
2. Da für das Dorf Laas eine kritische Gefahrensituation aufgrund von Hochwässern an der Etsch und am Eckbach (Abb. 3) festgestellt worden war, wurde im zweiten Schritt die Ausarbeitung eines Hochwasserschutzprojektes in Auftrag gegeben. Auch in diesem Fall erfolgte eine Variantenstudie, aus welcher die zu realisierende Lösung hervorging. Für diese wurde in weiterer Folge das Genehmigungs- und Ausführungsprojekt ausgearbeitet.

3.2.2 Ausgeführte Lösungen



Abb. 3. Das Untersuchungsgebiet. Links: Die Etsch in Laas. Mitte: Der Eckbach kurz vor der Einmündung in der Etsch. Rechts: geplantes Streichwehr zur Beaufschlagung des Hochwasserrückhaltraumes.

Aus dem demokratisch geführten Entscheidungsprozess ging eine Lösung hervor, welche aus einer Kombination von Hochwasserrückhalt (Abb. 3), Schaffung einer Flussaufweitung mit dem Ziel der ökologischen Aufwertung und der gezielten Geschiebeablagerung sowie Erhöhung der Abflusskapazität im Siedlungsbereich durch Erhöhung der Ufermauern bestand.

In Bezug auf den Hochwasserrückhalt sah die Projektlösung die Reaktivierung einer an der Etsch liegenden und nicht mehr den ursprünglichen Zweck erfüllende Aulandschaft vor. Es war geplant, die Au ab einem HQ10 zu fluten. Ab einem HQ100 sollte auch eine für die intensive Landwirtschaft genutzte Fläche von ca. 20 ha geflutet werden. Durch diese Inanspruchnahme von natürlichen Retentionsräumen wäre es möglich gewesen, bei einem HQ100 den Hochwasserspitzenabfluss von 127,3 m³/s um 7 % zu reduzieren und damit auch dem Verschlechterungsverbot für die Unterlieger Genüge zu tun.

3.2.3 Besonderheiten

Die vorgeschlagene Projektlösung fand im Flussraumforum eine breite Mehrheit. Jeder der 4 ad hoc gebildeten Arbeitsgruppen sprach sich für deren Umsetzung aus. Den Grundbesitzern der landwirtschaftlich genutzten Flächen wurde für die Eintragung einer Dienstbarkeit als Überflutungsfäche ein hoher einmaliger Entschädigungsbetrag angeboten. Im Eintretensfall wäre der entstandene Schaden ersetzt worden.

Nichtsdestotrotz bildete sich unter den Grundbesitzern, sinnbildlich für das Nimby-Syndrom, eine breite Front gegen das Projekt. Sie sprachen sich einstimmig gegen die Umsetzung des Projekts aus, sodass schlussendlich nicht die vom Flussraumforum verabschiedete Variante zur Umsetzung kam, sondern eine um den Hochwasserrückhalt reduzierte Variante.

Dieses Beispiel zeigt, dass auch ein Prozess mit einer umfassend angelegten Öffentlichkeitsarbeit nicht notwendigerweise zum Erfolg führen muss. Einzelne Stakeholder mit einer Schlüsselfunktion (z.B. Grundbesitzer) können ein Projekt auch bei einer breiten Projektmehrheit zum Scheitern bringen.

3.3 Fallbeispiel 3: Hochwasserschutz Zams (Nordtirol/Österreich)

3.3.1 Vorgehensweise

Die Bundeswasserbauverwaltung in Tirol (A) führt seit mehreren Jahren die flächendeckende und großmaßstäbliche Untersuchung der Hochwassergefahren auf Basis 2-dimensionaler Abflussberechnungen durch. Ergibt sich dabei die Erkenntnis, dass Siedlungsbereiche oder wichtige Infrastrukturen betroffen sind, werden detaillierte Studien ausgearbeitet.

Teile des Siedlungs- und Industriegebietes der Gemeinde Zams sind durch Hochwasser am Inn von Überflutungen bedroht. Um diese Hochwassergefahr mildern zu können, hat die zuständige Gemeinde Zams ein Hochwasserschutzprojekt in Auftrag gegeben.

Dieses wurde in mehreren Phasen abgewickelt:

1. Im Rahmen der Gefahrenzonenplanung oberer Inn wurden mithilfe hydrodynamischer 2d-Modellierung die Abflussmodellierung der Bemessungsabflüsse durchgeführt und die Gefahrenzonen bestimmt.
2. In einer Vorstudie wurden die aus dem Gefahrenzonenplan ersichtlichen Schwachstellen im Detail analysiert und abschnittsweise vertiefende Abflussuntersuchungen durchgeführt. In

weiterer Folge wurden mehrere Varianten zur Herstellung der Hochwassersicherheit für die festgelegten schutzwürdigen Zonen definiert und einander gegenübergestellt. Besonderes Augenmerk war dabei auf die genaue Analyse der Auswirkungen der Schutzmaßnahmen auf das Abflussverhalten im lokalen Bereich und insbesondere auf die Unterlieger zu legen. Zusätzliche Abflussvolumina, welche aufgrund der Hochwasserschutzmaßnahmen durchgeleitet würden, sind im Projektgebiet zu kompensieren. Für diese sogenannten Kompensationsmaßnahmen wurden ebenfalls mehrere Varianten ausgearbeitet.

3. Für die als Bestvariante definierte Lösung wird derzeit das Genehmigungsprojekt ausgearbeitet.

3.3.2 Ausgeführte Lösungen

Das Projekt sieht eine Kombination aus Erhöhung der Abflusskapazität und Hochwasserretention vor. Die Erhöhung der Abflusskapazität wird erreicht durch einen Neubau und die entsprechende Aufhöhung der Längsverbauungen am Inn. Die Hochwasserretention wird erreicht, indem ein heute bereits bei Hochwasser überfluteter Bereich (natürlicher Retentionsraum) durch geringfügige bauliche Maßnahmen so adaptiert wird, dass die Retention optimiert wird. Dadurch ist es möglich, einerseits die erforderliche Kompensation zu gewährleisten, andererseits wird durch eine gezielte Beeinflussung des Abflusshydrographen durch Kappung des Scheitelwertes sogar eine Verbesserung der Abflusssituation und dadurch eine Entspannung der Situation für den Unterlieger für das Bemessungsereignis erreicht (Abb. 4). Somit können mit diesem Projekt auch außerhalb des Projektperimeters positive Effekte erzielt werden.

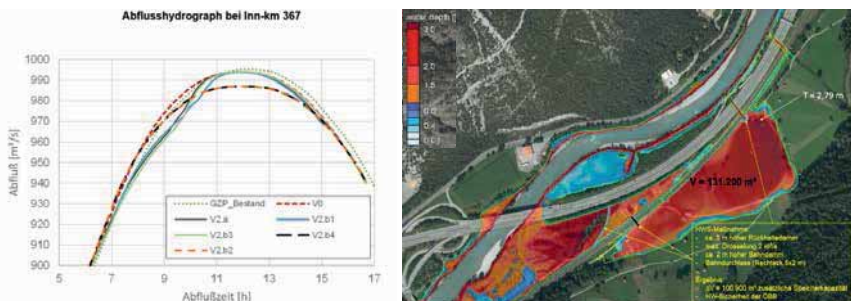


Abb. 4. Links: Änderung der Abflusshydrographen (HQ100) durch die verschiedenen untersuchten Varianten (Vorzugsvariante: V2.b2 oder V2.b4). Rechts: Lageplan mit dem zu optimierenden Retentionsraum

3.3.3 Besonderheiten

Dem Prinzip des Verschlechterungsverbot für die Unterlieger wurde im vorliegenden Fall besonderes Augenmerk geschenkt, da entlang des Inn ein sehr hohes Schadenspotenzial vorhanden ist. Vor allem im Tiroler Unterinntal, an dem derzeit sehr große Hochwasserschutzprojekte in Planung sind, besteht eine erhebliche Hochwassergefahr (Baumgartner et al., 2017). Jede Erhöhung der Abflussvolumina und –spitzen ist deshalb tunlichst zu vermeiden.

Nichtsdestotrotz soll festgehalten werden, dass die Hochwasserhydrographen nur eine möglichst wirklichkeitsgetreue Abbildung der Wirklichkeit sind und nicht notgedrungen der absoluten Wahrheit entsprechen müssen. Alle Modelle sind mit Unsicherheiten behaftet. Deshalb ist von Fall zu Fall ein gesundes Augenmaß anzuwenden. Wenn wenige Tausend m³ Rückhalteraum nur mit sehr hohem Aufwand gewonnen werden können, darf nicht vergessen werden, dass die Unschärfe der Modelle häufig größere Volumina impliziert als schlussendlich in einem spezifischen Projekt gewonnen werden können. Es ist gleichermaßen wichtig, die Änderung der Abflusshydrographen entlang ihres Durchlaufens im Flussschlauch sowie die Änderung von Sohllagen möglichst zuverlässig zu beurteilen, da gerade dadurch Überflutungen, welche mit Reinwassermodellierungen nicht erfasst werden, zustande kommen können.

3.4 Fallbeispiel 4: Hochwasserschutz Oberammergau (Bayern/Deutschland)

3.4.1 Vorgehensweise

Während in den übrigen deutschsprachigen Alpenländern in den Jahren von 1990 – 2010 intensive Entwicklungsarbeit bei der Beurteilung von murfähigen Wildbächen durchgeführt worden war, war in dieser Zeit der Fokus in Bayern auf den Hochwasserschutz bei den großen Talflüssen gerichtet.

Unter der Koordination des LfU München wurden in Zusammenarbeit mit vier Wasserwirtschaftsämtern Pilotstudien mit der Zielsetzung, das Wissen bei der Beurteilung von Wildbachgefahren zu sammeln und darauf aufbauend eine allgemeingültige Richtlinie ausarbeiten zu können, in Auftrag gegeben.

Das Wasserwirtschaftsamt Weilheim hat die Untersuchung der Großen Laine (Abb. 5), welche die Stadt Oberammergau immer wieder mit stark geschiebeführenden Hochwässern oder Murgängen bedroht hat, als Pilotstudie definiert. Als Aufgabenstellung war gefordert, die von der Großen Laine ausgehende Hochwassergefahr für die Stadt Oberammergau im Detail zu untersuchen. Zu diesem Zweck wurden in einem prozessorientierten und einzugsgebietsbezogenen Vorgehen alle Feststoffherde sowie Schwemmholtvorkommen erhoben und quantifiziert. Mittels geeigneten Transportmodellen wurden abschnittsweise die Reinwasser- und Feststoffhydrographen ermittelt. Auf Grundlage einer hydrodynamischen 2d-Modellierung wurden schließlich die Gefahrenzonen für die Stadt Oberammergau bestimmt. Dabei wurde die in der Schweiz und Südtirol angewandte Matrix für die Definition der Gefahrenzonen herangezogen. Die Ausweisung der Gefahrenzonen zeigte, dass der alte Ortskern von Oberammergau, welcher orographisch rechts der Großen Laine liegt, kaum bedroht ist, während sich der neue in der zweiten Hälfte des 20. Jh. entstandene Siedlungsbereich zum großen Teil in der Gefahrenzone befindet (Abb. 6).

Besondere Beachtung erhielt das Verklauungsrisiko an den Brücken. Mithilfe einer Ausarbeitung von Ereignisbäumen konnte das Risiko Brücke für Brücke quantifiziert werden. Damit war es möglich, die Wahrscheinlichkeit von Ausuferungen aufgrund Brückenverklauung zu quantifizieren und mit der Wahrscheinlichkeit der Hochwasserereignisse zu kombinieren.

Eine weitere spezifische Fragestellung der Pilotstudie war die Beurteilung der im Einzugsgebiet vorhandenen Sperrbauwerke und deren Versagensrisiko sowie eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung hinsichtlich der Sinnhaftigkeit, alle Sperrbauwerke auch in Zukunft zu erhalten oder eventuell einzelne Sperrstaffeln auch nicht mehr weiter zu unterhalten. Zur Bestimmung des Versagensrisikos wurde eine länderübergreifende

Expertenbefragung durchgeführt. 20 ausgefüllte Fragebögen erlaubten die Ermittlung eines repräsentativen Mittelwerts (Abb. 6).

Auf Basis der Pilotstudie wurde eine Vorentwurfsplanung in Auftrag gegeben. Darin wurden mehrere Varianten zur Entschärfung der Hochwassergefährdung von Oberammergau untersucht. Die Entscheidungsfindung erfolgte in enger Abstimmung mit dem Auftraggeber und der betroffenen Standortgemeinde. In mehreren Öffentlichkeitsveranstaltungen wurde das Projekt der Bevölkerung der Stadt Oberammergau vorgestellt. Derzeit ist die Entwurfsplanung für das Projekt im Gange.



Abb. 5. Links: Die Große Laine in Oberammergau. Mitte: Die Einmündung der Großen Laine in die Ammer. Rechts: errichteter V-Rechen oberhalb der Rückhaltesperre.

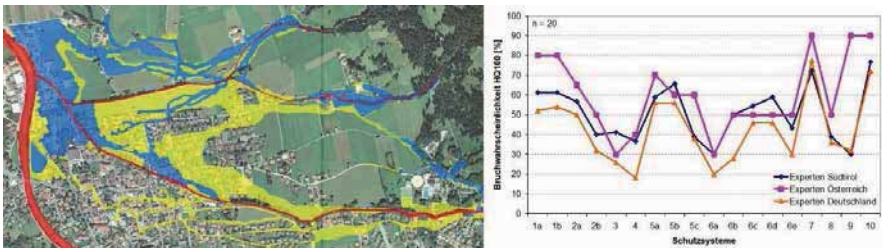


Abb. 6. Links: Gefahrenzonen in Oberammergau. Rechts: Länderspezifische Mittelwerte der aufgrund einer Expertenbefragung definierten Versagenswahrscheinlichkeit von Sperrsystemen bei einem HQ100

3.4.2 Ausgeführte Lösungen

Aus einer Nutzen-Kosten Analyse und mittels Beurteilung verschiedener anderer Kriterien (technische Machbarkeit, Landschaftsauswirkungen, Flächenbedarf) ging schließlich eine Variante mit einer Teilüberleitung als die beste Lösung hervor.

In einem weiteren Artikel dieses Tagungsbandes (Riedl, 2017) wird das Projekt im Detail beschrieben.

3.4.3 Besonderheiten

Die auf Grundlage von technischen und wirtschaftlichen Überlegungen definierte Bestvariante sah eine Teilüberleitung des Hochwassers von der Großen Laine in die parallel dazu verlaufende Esellaine und von dort mittels einer Flutmulde in den Schnitzlergraben vor. Die Flutmulde wäre ab einem HQ5 beaufschlagt worden. Ähnlich wie beim Fallbeispiel in Laas setzten die Besitzer

der von der Flutmulde betroffenen landwirtschaftlichen Flächen dem Projekt massiven Widerstand entgegen. Schlussendlich mussten der Projektträger und die Gemeinde von dieser Lösung wieder abweichen und die ursprünglich als zweitbeste Variante beurteilte Projektlösung zur Anwendung bringen.

4 Zusammenfassung

Tab 1. zeigt zusammenfassend, welche Kriterien des integralen Hochwasserschutzes bei den einzelnen Fallbeispielen zur Anwendung gekommen sind. Der Hochwasserschutz hat sich, von seiner ursprünglichen Aufgabenstellung ausgehend, sehr stark weiterentwickelt. Die zuständigen Behörden planen Hochwasserschutzmaßnahmen nicht mehr nur sektoriell und als Reaktion auf stattgefundene Ereignisse, sondern versuchen durch eine integrale Herangehensweise Projekte umzusetzen, welche langfristig wirksam sind und positive Auswirkungen auch für die Fließgewässerökologie und den Geschiebehaushalt nach sich ziehen. Durch die Einbindung der betroffenen Bevölkerung und von Interessensträgern wird eine Sensibilisierung für die Hochwassergefahren und eine Identifikation mit den Projekten erwirkt. Wissenschaftliche Entwicklungen bei der Modellierung von Reinwasser kombiniert mit dem Geschiebe- und Schwemmholtztransport tragen dazu bei, dass auch die Instrumente zur Beurteilung der Hochwassergefahren und bei der Planung der Schutzmaßnahmen immer zuverlässiger werden (z.B. Dressel et al., 2017).

Tab. 1 Gegenüberstellung der einzelnen Fallbeispiele mit Angabe der zur Anwendung gekommenen Kriterien (J ... angewandt, zT ... zum Teil angewandt, N ... nicht angewandt): 1 Proaktiv/vorsorgend, 2 einzugsgebietsbezogen, 3 prozessorientiert/adaptiv, 4 fächerübergreifend, 5 interessensübergreifend/partizipativ. In Spalte 4 sind die berücksichtigten Wiederkehrzeiten (WKZ) für die Beurteilung der Hochwassergefahren angegeben mit Angabe der eventuellen Berücksichtigung des Überlastfalles (ÜLF), Spalte 5 hingegen beschreibt, welche Prozesse beurteilt worden sind.

Fallbeispiel	Region	Kriterium					WKZ _{HQ}	Prozesse
		1	2	3	4	5		
Rapallo	Ligurien (IT)	J	J	J	zT	zT	50, 200, 500,	Reinwasser, Geschiebe (qualitativ)
Laas	Südtirol (IT)	J	J	J	J	J	30, 100, 300,	Reinwasser, Geschiebe (semiquantitativ)
Zams	Nordtirol (A)	J	J	J	J	zT	30, 100, 300 (=ÜLF)	Reinwasser, Geschiebe (qualitativ)
Oberammergau	Bayern (D)	J	J	J	zT	zT	30, 100, 300, ÜLF	Reinwasser, Geschiebe (quantitativ), Schwemmholtz

Die Fallbeispiele haben jedoch auch gezeigt, dass nicht immer die aus integraler Sicht besten Varianten zur Anwendung kommen. Im Zusammenhang mit Hochwässern ablaufende Prozesse können falsch eingeschätzt werden, gesetzliche Grundlagen tragen der Realität nicht immer

vollständig Rechnung und bedürfen steter Verbesserung oder Widerstände von direkt betroffenen Interessensgruppen können Projektlösungen zum Kippen bringen.

Literatur

- Baumgartner, K.; Gems, B.; Walder, S.; Auer, F.; Federspiel, M.; Aufleger, M. (2017). Bedeutung des Geschiebetransportes für die Planung von Hochwasserschutz- und Retentionsmaßnahmen in Talflüssen – Numerische Modellierung des Inns im Tiroler Unterinntal, Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 69, 155-170.
- Dressel, P.; Wagner, P.; Mayer, K.; Rimböck, A. (2017). Umgang mit Feststoffen bei der Ermittlung von Wildbachgefährdungsbereichen in Bayern, Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 69, 140-154.
- EU (2007). Richtlinie 2007/60/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2007 über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken, Amtsblatt der Europäischen Union, L 288/27.
- Riedl, J. (2017). Schutzmaßnahmen vor Wildbachgefahren an der Großen Laine in Oberammergau. Tagungsband zur Fachtagung „Naturgefahren – von der Sturzflut zur Schwemmholtzverklausung“, Obernach.

Anschrift der Verfasser

Dr. Walter Gostner
Ingenieure Patscheider & Partner GmbH
Glurnserstraße 5/k, I-39024 Mals
w.gostner@ipp.bz.it

Dipl.-Ing. Corrado Lucarelli
Ingenieure Patscheider & Partner GmbH
Avogadrostraße 2, I-39100 Bozen
c.lucarelli@ipp.bz.it

Dipl.-Ing. Mathias Hochschwarzer
Ingenieure Patscheider & Partner GmbH
Mindelheimerstraße 6, A-5242 Schwaz
m.hochschwarzer@patscheiderpartner.at

Schutzmaßnahmen vor Wildbachgefahren an der Großen Laine in Oberammergau

Johannes Riedl

Zusammenfassung

Der nördliche Siedlungsbereich von Oberammergau liegt auf dem Schwemmkegel der Großen Laine. Ihr Einzugsgebiet beträgt 10 km² und erstreckt sich in einer Höhenlage zwischen 830 und 1542 mNN. Aufgrund des labilen nördlichen Einzugsgebiets im Flysch mit Zementmergeln wurde der Wildbach schon frühzeitig verbaut. Heute befinden sich 332 Bauwerke, davon 211 Sperren in dem Wildbachsystem. Der 100-jährliche Bemessungsabfluss wurde mit einem NA-Modell mit 32,6 m³/s ermittelt. Die max. Abflussleistung im Ortsbereich beträgt 14 m³/s. In einer Pilotstudie wurden die maßgebenden Prozesse im Einzugsgebiet ermitteln, die Notwendigkeit der vorhandenen Bauwerke untersucht und Maßnahmen im Einzugsgebiet und im Siedlungsbereich aufgezeigt, um einen Schutz vor einem 100-jährlichen Hochwasserereignis herzustellen. Die Lösung sieht vor, etwa 2/3 des Hochwasserabflusses mittels eines Verteilungsbauwerkes und eines neuen Gerinnes um den besiedelten Bereich herumzuleiten. Für die Trassenfindung wurden 8 Varianten untersucht und mit einem modifizierten Kosten-Nutzen-Faktor bewertet. Die als Vorzugsvariante weiterverfolgte Planung weist die geringsten Gesamtkosten als auch die geringste gesamte und private Flächeninanspruchnahme auf.

1 Kenndaten der Großen Laine

- Einzugsgebiet 10 km², blattförmig nach Westen geöffnet
- Höhenlage zwischen 830 und 1542 mNN
- Geologie: im nördlichen Einzugsgebiet befindet sich im Flysch, im südlichen Einzugsgebiet stehen Wettersteinkalke an
- Hydrologie: HQ₁₀₀+15% nach NA-Modell und Kostra DWD 2000 beträgt 32,6 m³/s
- das bestehende Gerinne im Ortsbereich kann max. 14 m³/s abführen

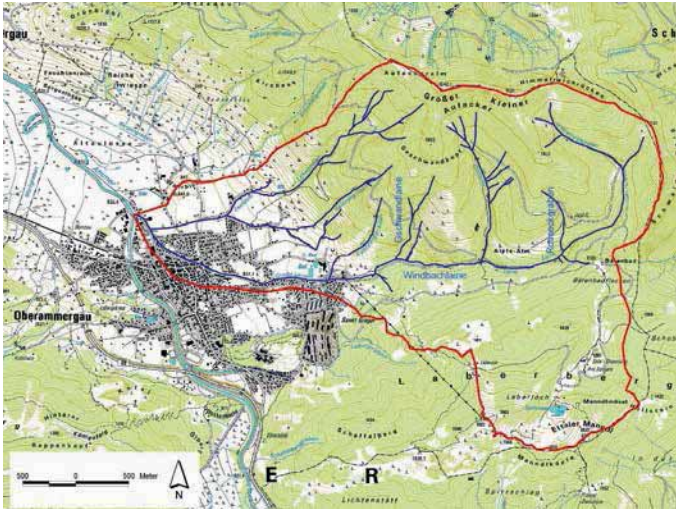


Abb. 1: Einzugsgebiet der Großen Laine mit den Seitenbächen

2 Ergebnisse der Pilotstudie „Integrales Wildbachsanierungskonzept Große Laine“

- Ermittlung Überschwemmungsgebiet und Gefahrenzonenkarte in der Pilotstudie
- Vorläufige Sicherung des ÜG durch LRA
- Maßnahmen im Einzugsgebiet +
- Maßnahmen im Wirkungsbereich =
- Erstellung von Schutzvarianten

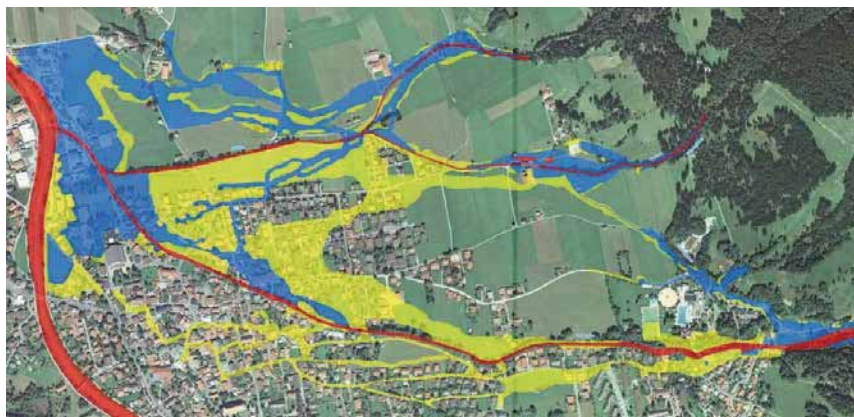


Abb. 2: Überschwemmungsgebiet und Gefahrenzonenkarte rot = sehr hoch, blau = hoch, gelb = mittel)

Randbedingungen:

- Wirkung des Bergwaldes als HW-schutzmaßnahme notwendig
- Mögliche Überlastfälle und ihre Auswirkungen auf den besiedelten Bereich
- Zustand, Lebensdauer und Wirkungen der Schutzsysteme

Erforderliche Maßnahmen im Bergwald

- Neue Waldbewirtschaftung durch Privatwaldgemeinschaft
- Verjüngung mit gemischten Baumarten
- Durchforstung der dichten Altbestände (Fichten)
- Reduzierung der Wilddichte durch Umstellung auf Eigenjagd
- Weideneuordnung

Auswirkungen des Waldumbaus (Optimalszenario)

- gestufter Bergmischwald (50% Fichte, 35% Buche/Laubholz, 15% Tanne)
- Verminderung des Oberflächenabflusses um 20% gegenüber Ist-Zustand
- Verminderung des Schwemmholtzanfalls um 30% gegenüber Ist-Zustand
- Verminderung der Geschiebefracht um 10% gegenüber Ist-Zustand

Maßnahmen im Einzugsgebiet:

- Es existieren 10 Schutzsysteme mit insgesamt 332 Bauwerken, davon 211 Sperren, (57 % Holzsperrern, 43% Steinsperren)
- Funktion: 95 % dienen der Konsolidierung und Stabilisierung der Hänge u. der Sohle, der Reduktion des Gefahrenpotentials für Rutschungen, Talzuschub und Feststoffaustrag
- Von 7 untersuchten Szenarien ist die Variante 6 die wirtschaftlichste mit dem besten Nutzungsfaktor:
 - Vollständige Sanierung der best. Schutzsysteme mit Ausnahme von System Nr. 1 und 7
 - Neues Geschieberückhaltebecken mit $V= 12.000 \text{ m}^3$
- Schutzziel:
 - HQ_{100} mit 0,5 m Freibord
 - HQ_{300} bordvoll
- max. Abfluss in Großen Laine im Dorfbereich $14 \text{ m}^3/\text{s}$
- Entlastungsgerinne auf der Trasse bestehende Bäche oder Überschwemmungsflächen für Restabfluss
- ungesteuertes Teilungsbauwerk unterhalb der Geschieberückhaltesperre vor der Besiedlung durch Modellversuch optimiert



Abb. 3 u. 4: Modellversuch bei Versuchsanstalt der TUM in Obernach



Maßnahmen im Siedlungsbereich

- Untersuchung für das Ableitungsgerinne mit 4 Varianten und 8 Untervarianten
- Maßgebende Faktoren für den Kosten-Nutzungs-Faktor
 - Baukosten
 - techn. Machbarkeit
 - temporäre Flächeninanspruchnahme
 - dauernde Flächeninanspruchnahme
 - Auswirkungen auf die Landschaft
 - soziale Akzeptanz der Maßnahme
- Ergebnisse für F_{K-N} zwischen 1,4 und 3,5
- Die besten 3 Varianten wurden weiter untersucht im Hinblick auf:
 - gesamte Flächeninanspruchnahme
 - private Flächeninanspruchnahme
 - öffentliche Flächeninanspruchnahme (Wasserflächen)
 - öffentliche Flächeninanspruchnahme (sonst. Flächen)
- Variante 4a mit den niedrigsten Gesamtkosten und der geringsten gesamten und privaten Flächeninanspruchnahme ist die Vorzugsvariante, die derzeit ausgeplant wird.

Geplante Maßnahmen:

- Vollständige Sanierung der best. Schutzsysteme mit Ausnahme von System Nr. 1 und 7
- Kontrollierter Verfall der Systeme 1 und 7 mit 33 Bauwerken
- Neues Geschieberückhaltebecken mit $V = 12.000 \text{ m}^3$
- Errichtung eines Teilungsbauwerks
- Teillageitung des HW-Abflusses in neuen Graben über Kühberggraben-Köckenbach-Esellaine zur Ammer
- bereichsweise Anpassung der best. Schutzverbauungen an der Großen Laine in Oberammerngau an den Bemessungsabfluss $14 \text{ m}^3/\text{s}$
- Neubau eines Geschieberückhaltebeckens am Kainzengraben $V = 2.000 \text{ m}^3$

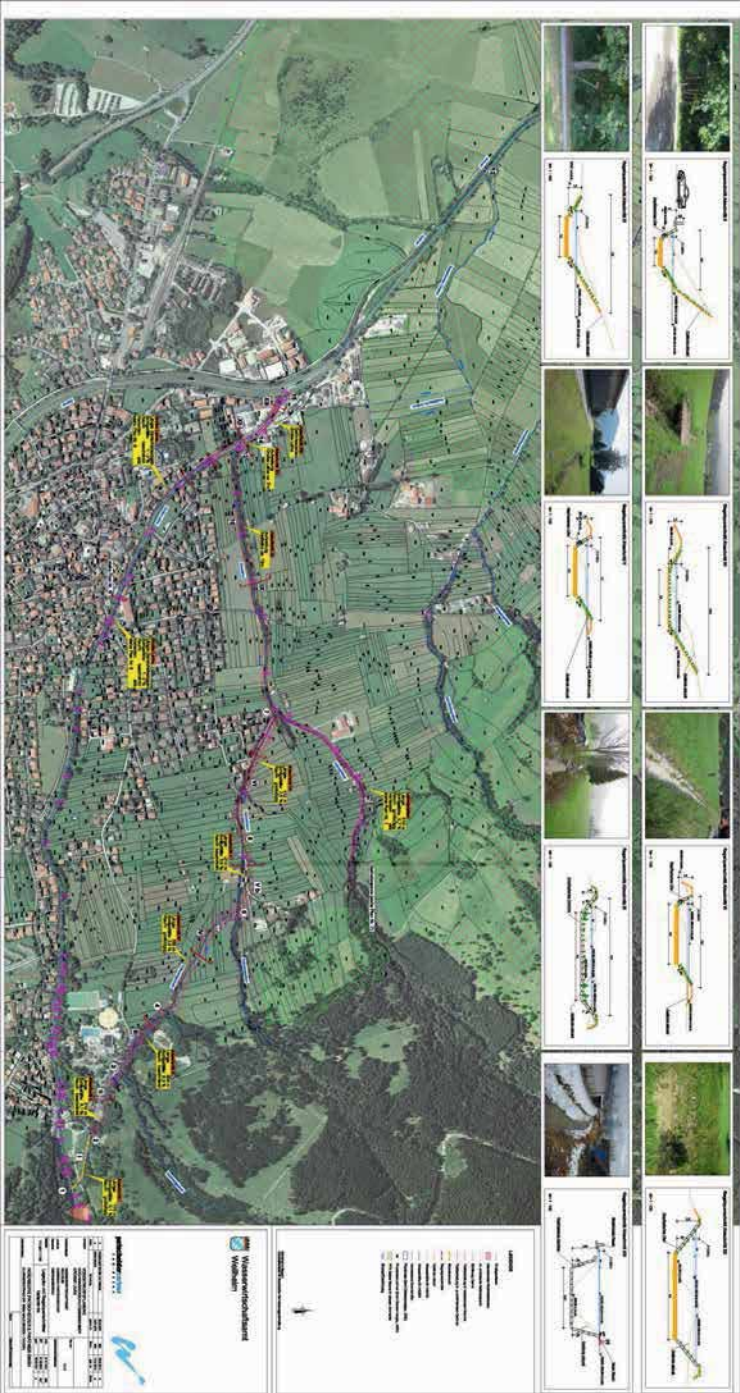


Abb. 5: Maßnahmen der Vorzugsvariante

Ausgeführte Maßnahmen:

- Sanierung und Umbau der alten, schadhaften Dosiersperre in eine Vorsperre



Abb. 6: sanierte Vorsperre

- Errichtung des V-förmigen Wildholzrechens mit 24 Stäben aus verkleideten Bohrpfehlen



Abb. 7 u.8: Wildholzrechen





Abb. 9: Lageplan Wildholzrechen und Geschieberückhaltesperre

- Abbruch der alten Geschiebesperre und Neubau Geschieberückhaltesperre mit 12.000 m³ Fassungsvermögen.





Abb. 10 – 16: Bau der Geschieberückhaltesperre



- Sanierung von 6 schadhafte Holzsperrren in der großen Laine durch Neubau von Steinsperren.



Abb. 17 – 19 :Sanierung und Umbau schadhafter Holzsperrren

Weiteres Vorgehen:

- Erstellung der Genehmigungsplanung für den Hochwasserschutz bis Ende Juni 2017
- Planfeststellungsverfahren bis November 2017
- Bauzeit 3 Jahre
- Kostenschätzung: 5 Mio. €

Literatur

Patscheider & Partner Ingenieure: Pilotstudie Integrales Wildbachsanierungskonzept Große Laine, 2011

Patscheider & Partner Ingenieure: Vorentwurfsplanung Hochwasserschutzmaßnahmen Große Laine, 2013

Anschrift des Verfassers

BD Johannes Riedl
 Wasserwirtschaftsamt Weilheim
 Pütrichstr. 15
 82362 Weilheim
 johannes.riedl@wwa-wm.bayern.de

Bisher erschienene Berichte des Lehrstuhls und der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische Universität München

- Nr. 1 **Häusler Erich:** Energieumwandlung bei einem frei fallenden, kreisrunden Strahl in einem Wasserpolster, 1962, *vergriffen*
- Nr. 2 **Spiekermann, Günter:** Instabile Formen des Schußstrahles beim Abfluß unter Schützen und seine Kraftwirkungen auf die Schützenkonstruktion, 1962, *vergriffen*
- Nr. 3 **Linder Gaspar:** Über die Gestaltung von Durchlaßausläufen, 1963, *vergriffen*
- Nr. 4 **Knauss Jost:** Modellversuche über die Hochwasserentlastungsanlagen an kleinen Rückhaltespeichern in Südbayern, 1963, *vergriffen*
- Nr. 5 **Mahida Vijaysinh:** Mechanismus der Schnellsandfiltration, 1964, *vergriffen*
- Nr. 6 **Rothmund, Hermann:** Energieumwandlung durch Strahlumlenkung in einer Toskammer, 1966, *vergriffen*
- Nr. 7 **Häusler Erich:** Luftsiphons für den pneumatischen Verschluß von Wassereinflößen, 1966, *vergriffen*
- Nr. 8 **Seus Günther J.:** Die Anfangskavitation, 1966, *vergriffen*
- Nr. 9 **Knauss Jost:** Schießender Abfluß in offenen Gerinnen mit fächerförmiger Verengung, 1967, *vergriffen*
- Nr. 10 **Häusler Erich; Bormann Klaus:** Schießender bzw. strömender Abfluß in Bächen
Schultz Gert A.: Die Anwendung von Computer-Programmen für das Unit-Hydrograph-Verfahren am Beispiel der Iller
Bauch Wolfram: Untersuchungen über Wasserstandsvorhersagen an einem 600 m langen Modell der Donaustrecke Regensburg-Straubing, 1967, *vergriffen*
- Nr. 11 **Schultz Gert A.:** Bestimmung theoretischer Abflußganglinien durch elektronische Berechnung von Niederschlagskonzentration und Retention (Hyreun-Verfahren), 1968, *vergriffen*
- Nr. 12 **Raumer Friedrich von:** Verteilung von Bewässerungswasser in Kanälen - Eine Systematik großer Kanalsysteme zur Verteilung von Bewässerungswasser unter besonderer Berücksichtigung von Regulier- und Meßvorgängen, 1968, *vergriffen*
- Nr. 13 **Bormann Klaus:** Der Abfluß in Schußrinnen unter Berücksichtigung der Luftaufnahme, 1968
- Nr. 14 **Scheuerlein Helmut:** Der Rauherinneabfluß, 1968, *vergriffen*
- Nr. 15 **Koch Kurt:** Die gegenseitige Strahlableitung auf horizontaler Sohle, 1968
- Nr. 16 **Bauch Wolfram:** Die Hochwasserwelle im ungestauten und gestauten Fluß, 1968
- Nr. 17 **Marr Gerhard:** Vergleich zweier Differenzenverfahren in einem mathematischen Modell zur Berechnung von instationären Abflußvorgängen in Flüssen, 1970, *vergriffen*
- Nr. 18 **Herbrand Karl:** Der räumliche Wechselsprung, 1970, *vergriffen*
- Nr. 19 **Seus Günther J.:** Betrachtungen zur Kontinuitätsbedingung der Hydromechanik;
Zielke Werner: Zur linearen Theorie langer Wellen in Freispiegelgerinnen, 1971
- Nr. 20 **Häusler Erich:** Entnahmetürme mit Luftsiphons, 1971, *vergriffen*
- Nr. 21 **Herbrand Karl:** Das Tosbecken mit seitlicher Aufweitung, 1971
- Nr. 22 **Knauss Jost:** Hydraulische Probleme beim Entwurf von Hochwasserentlastungsanlagen an großen und kleinen Staudämmen, 1971, *vergriffen*
- Nr. 23 **Zielke Werner:** Brechnung der Frequenzganglinien und Eigenschwingungen von Rohrleitungssystemen
Zielke Werner; Wylie E. Benjamin: Zwei Verfahren zur Berechnung instationärer Strömungen in Gasfernleitungen und Gasrohrnetzen, 1971
- Nr. 24 **Knauss Jost:** Wirbel an Einläufen zu Wasserkraftanlagen, 1972, *vergriffen*
- Nr. 25 **Kotoulas Dimitrios:** Die Wildbäche Süddeutschlands und Griechenlands, Teil 1, 1972, *vergriffen*
- Nr. 26 **Keller Andreas:** Experimentelle und theoretische Untersuchungen zum Problem der modellmäßigen Behandlung von Strömungskavitation, 1973, *vergriffen*
- Nr. 27 **Horn Heinrich:** Hochwasserabfluß in automatisch geregelten Staustufen, 1973
- Nr. 28 **Bonasoudas Markos:** Strömungsvorgang und Kolkproblem am runden Brückenpfeiler, 1973
- Nr. 29 **Horn Heinrich; Zielke Werner:** Das dynamische Verhalten von Flußstauhaltungen, 1973
- Nr. 30 **Uslu Orhan:** Dynamische Optimierung der Fließbeiwerte in mathematischen Flußmodellen und Berücksichtigung der Vorlandüberströmung - Eine Anwendung des Operations Research im theoretischen Flußbau, 1974

- Nr. 31 **Kotoulas Dimitrios:** Die Wildbäche Süddeutschlands und Griechenlands, Teil 2, 1975, *vergriffen*
- Nr. 32 **50 Jahre Versuchsanstalt Oberrach**
Hartung Fritz: Einführung: Was treiben eigentlich die Oberracher?
Knauss Jost: Strategien und Entscheidungshilfen beim Hochwasserschutz in Städten, dargestellt am Beispiel der Hochwasserfreilegung der Stadt Harburg an der Wörnitz
Häusler Erich: Abstürze und Stützschnellen in hydraulischer und konstruktiver Betrachtung (Mindestfallhöhen zur Erzielung einer genügenden hydraulischen Wirksamkeit)
Seus Günther J.; Hack Hans-Peter: Erster Vergleich der Ergebnisse des physikalischen Modells in Oberrach mit denen des neuen mathematischen Modells
Uslu Orhan; Schmitz Gerd: Parameteridentifikation und Sensitivitätsanalyse bei mathematischen Modellen in der Hydrologie
Keller Andreas; Zielke Werner: Veränderung des freien Gasgehaltes in turbulenten Rohrströmungen bei plötzlichen Druckabsenkungen
Herbrand Karl: Zusammenführung von Schußstrahlen. Zwei praktische Beispiele konstruktiver Lösungen aus Modellversuchen
Zielke Werner: Grenzen der deterministischen Betrachtungsweise in der Strömungsmechanik, 1976
- Nr. 33 **Probleme der Arbeit des beratenden Ingenieurs in der Wasserwirtschaft der Entwicklungsländer.** Symposium am 13.10.1976 in Wallgau, 1977
- Nr. 34 **50 Jahre Versuchsanstalt Oberrach**, Feierstunde am 14.10.1976 in Wallgau
Hartung Fritz: Die Wasserbauversuchsanstalt Oberrach im Strom der Zeit
Bischofsberger Wolfgang: Laudatio für Professor Dr.-Ing. E. Mosonyi
Mosonyi Emil: Wasserbau, Technik oder Kunst? 1977
- Nr. 35 **50 Jahre Versuchsanstalt Oberrach**,
Ausleitungen aus geschiebeführenden Flüssen, Seminar am 15.10.1976 in Oberrach
Cecen Kazim: Die Verhinderung des Geschiebeeinlaufes zu Wasserfassungsanlagen
Midgley D.C.: Abstraction of water from sediment-laden rivers in Southern Africa
Jacobsen J.C.: Geschiebefreie Triebwasserfassungen - Modellversuche am Beispiel des sogenannten Geschiebeabzuges
Scheuerlein Helmut: Die Bedeutung des wasserbaulichen Modellversuchs für die Gestaltung von Ausleitungen aus geschiebeführenden Flüssen, 1977
- Nr. 36 **Hack Hans-Peter:** Lufteinzug in Fallschächten mit ringförmiger Strömung durch turbulente Diffusion, 1977
- Nr. 37 **Csallner Klausotto:** Strömungstechnische und konstruktive Kriterien für die Wahl zwischen Druck- und Zugsegment als Wehrverschluß, 1978
- Nr. 38 **Kanzow Dietz:** Ein Finites Element Modell zur Berechnung instationärer Abflüsse in Gerinnen und seine numerischen Eigenschaften, 1978
- Nr. 39 **Keller Andreas; Prasad Rama:** Der Einfluß der Vorgeschichte des Testwassers auf den Kavitationsbeginn an umströmten Körpern - Ein Beitrag zur Frage der Rolle der Kavitationskeime bei Strömungskavitation, 1978
- Nr. 40 **Hartung Fritz:** 75 Jahre Niltau bei Assuan - Entwicklung und Fehlentwicklung, 1979, *vergriffen*
- Nr. 41 **Knauss Jost:** Flachgeneigte Abstürze, glatte und raue Sohlrampen
Scheuerlein Helmut: Wasserentnahme aus geschiebeführenden Flüssen
Häusler Erich: Unkonventionelle neuere Stauhaltungswehre an bayerischen Flüssen als gleichzeitige Sohlsicherungsbauwerke, 1979, *vergriffen*
- Nr. 42 **Seus Günther J.; Joeres Erhard P.; Engelmann Herbert M.:** Lineare Entscheidungsregeln und stochastische Restriktionen bei Bemessung und Betrieb von Speichern, 1979, *vergriffen*
- Nr. 43 **Meier Rupert C.:** Analyse und Vorhersage von Trockenwetterabflüssen - Eine Anwendung der Systemhydrologie, 1980, *vergriffen*
- Nr. 44 **Treske Arnold:** Experimentelle Überprüfung numerischer Berechnungsverfahren von Hochwasserwellen, 1980, *vergriffen*
- Nr. 45 **Csallner Klausotto; Häusler Erich:** Abflußinduzierte Schwingungen an Zugsegmenten - Ursachen, Sanierung und allgemeine Folgerungen
Herbrand Karl; Renner Dietrich: Aufnahme und Wiedergabe der Bewegung von Schwimmkörpern mit einem Video-Meßsystem
Keller Andreas: Messungen des Kavitationskeimspektrums im Nachstrom eines Schiffes - die ersten Großausführungsmessungen mit der Laser-Streulichtmethode
Knauss Jost: Neuere Beispiele für Blocksteinrampen an Flachlandflüssen

- Scheuerlein Helmut:** Der gelbe Fluß - nach wie vor Chinas Sorge oder die Unerbittlichkeit der Natur gegenüber 4000 Jahren menschlicher Bemühungen
- Seus Günther J.:** Nochmals: Das Muskingum-Verfahren. Fingerübungen zu einem bekannten Thema als "gradus ad parnassum" sowie neue Gedanken zur Interpretation des Anwendungsbereiches und eine Lösung des Problems der Nebenflüsse
- Treske Arnold:** Hochwasserentlastung an Dämmen. Zwei konstruktiv ähnliche Lösungen im Modellversuch, 1981, *vergriffen*
- Nr. 46 **Schmitz Gerd:** Instationäre Eichung mathematischer Hochwasserablauf-Modelle auf der Grundlage eines neuen Lösungsprinzips für hyperbolische Differentialgleichungs-Systeme, 1981, *vergriffen*
- Nr. 47 **Scheuerlein Helmut:** Der wasserbauliche Modellversuch als Hilfsmittel bei der Bewältigung von Verhandlungsproblemen in Flüssen
Knauss Jost: Rundkronige und breitkronige Wehre, hydraulischer Entwurf und bauliche Gestaltung
Keller Andreas: Maßstabeffekte bei der Anfangskavitation, 1983, *vergriffen*
- Nr. 48 **Renner Dietrich:** Schifffahrtstechnische Modellversuche für Binnenwasserstraßen - Ein neues System und neue Auswertungsmöglichkeiten, 1984, *vergriffen*
- Nr. 49 **Sonderheft: Erhaltung und Umbau alter Wehre** (Wasserbau im historischen Ensemble, drei Beispiele aus dem Hochwasserschutz bayerischer Städte), 1984, *vergriffen*
- Nr. 50 **Knauss Jost; Heinrich B.; Kalczyk H.:** Die Wasserbauten der Myner in der Kopais - die älteste Flußregulierung Europas, 1984, *vergriffen*
- Nr. 51 **Hartung Fritz; Ertl Walter; Herbrand Karl:** Das Donaumodell Straubing als Hilfe für die Planung und Bauausführung der Staustufe Straubing, 1984
- Nr. 52 **Hahn Ulrich:** Lufteintrag, Lufttransport und Entmischungsvorgang nach einem Wechselsprung in flachgeneigten, geschlossenen Rechteckgerinnen, 1985
- Nr. 53 **Bergmann Norbert:** Entwicklung eines Verfahrens zur Messung und Auswertung von Strömungsfeldern am wasserbaulichen Modell, 1985
- Nr. 54 **Schwarz Jürgen:** Druckstollen und Druckschächte - Bemessung und Konstruktion, 1985, *vergriffen*
- Nr. 55 **Schwarz Jürgen:** Berechnung von Druckstollen - Entwicklung und Anwendung eines mathematischen Modells und Ermittlung der felsmechanischen Parameter, 1987
- Nr. 56 **Seus Günther J.; Edenhofer Johann; Czirwitzky Hans-Joachim; Kiefer Ernst-Martin; Schmitz Gerd; Zunic Franz:** Ein HN-Modellsystem für zweidimensionale, stationäre und instationäre Strömungen beim Hochwasserschutz von Städten und Siedlungen, 1987
- Nr. 57 **Knauss Jost:** Die Melioration des Kopaisbeckens durch die Myner im 2. Jt.v.Chr.; Kopais 2 - Wasserbau und Siedlungsbedingungen im Altertum, 1987
- Nr. 58 **Mtalo Felix:** Geschiebeabzug aus Kanälen mit Hilfe von Wirbelröhren, 1988
- Nr. 59 **Yalin M. Selim; Scheuerlein Helmut:** Friction factors in alluvial rivers
Yalin M. Selim: On the formation mechanism of dunes and ripples
Keller Andreas: Cavitation investigations at one family of NACA-hydrofoils at different angles of attack, as a contribution to the clarification of scale effects at cavitation inception, 1988
- Nr. 60 **Schmitz Gerd H.:** Strömungsvorgänge auf der Oberfläche und im Bodeninneren beim Bewässerungslandbau. Grundlagen, Kritik der herkömmlichen Praxis und neue hydrodynamisch-analytische Modelle zur Oberflächenbewässerung, 1989
- Nr. 61 **Muckenthaler Peter:** Hydraulische Sicherheit von Staudämmen, 1989, *vergriffen*
- Nr. 62 **Kalenda Reinhard:** Zur Quantifizierung der hydraulischen Versagenswahrscheinlichkeit beweglicher Wehre, 1990
- Nr. 63 **Knauss Jost:** Kopais 3, Wasserbau und Geschichte, Minysche Epoche - Bayerische Zeit (vier Jahrhunderte - ein Jahrzehnt), 1990
- Nr. 64 **Kiefer Ernst-Martin, Liedl Rudolf, Schmitz Gerd H. und Seus Günther J.:** Konservative Strömungsmodelle auf der Basis krummliniger Koordinaten unter besonderer Berücksichtigung von Wasserbewegungen im ungesättigt-gesättigten Boden, 1990
- Nr. 65 **Hartung Fritz:** Der ägyptische Nil 190 Jahre im Spiel der Politik (1798-1988)
Hartung Fritz: Gedanken zur Problematik der Nilwehre
Döscher Hans-Dieter und Hartung Fritz: Kritische Betrachtungen zum Stützwehr im Toschka-Entlastungsgerinne des Assuan-Hochdammes, 1991

- Nr. 66 **Schmitz Gerd H., Seus Günther J. und Liedl Rudolf:** Ein semi-analytisches Infiltrationsmodell für Füllung und Entleerung von Erdkanälen
Keller Andreas P.: Chinese-German comparative cavitation tests in different test facilities on models of interest for hydraulic civil engineering, 1991
- Nr. 67 **Liedl Rudolf:** Funktionaldifferentialgleichungen zur Beschreibung von Wasserbewegungen in Böden natürlicher Variabilität - Beiträge zur Theorie und Entwicklung eines numerischen Lösungsverfahrens, 1991
- Nr. 68 **Zunic Franz:** Gezielte Vermaschung bestehender Kanalisationssysteme - Methodische Studien zur Aktivierung freier Rückhalteräume unter besonderer Berücksichtigung der Abflusssteuerung, 1991
- Nr. 69 **Eickmann Gerhard:** Maßstabeffekte bei der beginnenden Kavitation - Ihre gesetzmäßige Erfassung unter Berücksichtigung der wesentlichen Einflußgrößen, 1991
- Nr. 70 **Schmid Reinhard:** Das Tragverhalten von Erd- und Steinschüttdämmen mit Asphaltbeton-Kerndichtungen, 1991
- Nr. 71 **Kiefer Ernst-Martin:** Hydrodynamisch-numerische Simulation der Wasserbewegung im ungesättigten und gesättigten Boden unter besonderer Berücksichtigung seiner natürlichen Variabilität, 1991
- Nr. 72 **Strobl Th., Steffen H., Haug W. und Geiseler W.-D.:** Kerndichtungen aus Asphaltbeton für Erd- und Steinschüttdämme, 1992
- Nr. 73 **Symposium: Betrieb, Unterhalt und Modernisierung von Wasserbauten**
Garmisch-Partenkirchen, 29. - 31. Oktober 1992
- Nr. 74 **Heilmair Thomas und Strobl Theodor:** Erfassung der sohnnahen Strömungen in Ausleitungsstrecken mit FST-Halbkugeln und Mikro-Flowmeter - ein Vergleich der Methoden, 1994
- Nr. 75 **Godde Dominik:** Experimentelle Untersuchungen zur Anströmung von Rohrturbinen. Ein Beitrag zur Optimierung des Turbineneinlaufs, 1994
- Nr. 76 **Knauss Jost:** Von der Oberen zur Unteren Isar: Alte und neue Wasserbauten rund um die Benediktenwand. Sohlensicherung an der Unteren Isar., 1995
- Nr. 77 **Knauss Jost:** Argolische Studien: Alte Straßen - alte Wasserbauten. Talsperre von Mykene; Flußumleitung von Tiryns; Hydra von Lerna; Küstenpass Anigraia, 1996
- Nr. 78 **Aufleger Markus:** Ein Beitrag zur Auswertung von Erddruckmessungen in Staudämmen, 1996
- Nr. 79 **Heilmair Thomas:** Hydraulische und morphologische Kriterien bei der Beurteilung von Mindestabflüssen unter besonderer Berücksichtigung der sohnnahen Strömungsverhältnisse, 1997
- Nr. 80 **Maile Willibald:** Bewertung von Fließgewässer-Biozöosen im Bereich von Ausleitungskraftwerken (Schwerpunkt Makrozoobenthos), 1997
- Nr. 81 **Knauss Jost:** Olympische Studien: Herakles und der Stall des Augias. Kladeosmauer und Alpheiosdamm, die Hochwasserfreilegung von Alt-Olympia, 1998
- Nr. 82 **Symposium: Planung und Realisierung im Wasserbau - Vergleich von Zielvorstellungen mit den Ergebnissen,** Garmisch-Partenkirchen 15. - 17. Oktober 1998
- Nr. 83 **Hauger Stefan:** Verkehrssteuerung auf Binnenwasserstraßen - Ein Beitrag zur Optimierung der Schleusungsreihenfolge in Stillwasserkanälen und staugeregelten Flüssen, 1998
- Nr. 84 **Herbrand Karl:** Schifffahrtstechnische Untersuchungen der Versuchsanstalt Oberrach; Ein Rückblick auf ein traditionelles Untersuchungsgebiet der VAO, 1998
- Nr. 85 **Hartlieb Arnd:** Offene Deckwerke - Eine naturnahe Methode zur Sohlstabilisierung eintiefungsgefährdeter Flußabschnitte, 1999
- Nr. 86 **Spanning Michael:** Die Wirkung von Buhnen auf Strömung und Sohle eines Fließgewässers: Parameterstudie an einem numerischen Modell, 1999
- Nr. 87 **Kleist Frank:** Die Systemdurchlässigkeit von Schmalwänden. Ein Beitrag zur Herstellung von Schmalwänden und zur Prognose der Systemdurchlässigkeit, 1999
- Nr. 88 **Lang Tobias:** Geometrische Kriterien zur Gestaltung von Kraftwerkseinläufen. Experimentelle Untersuchungen an Rohr-S-Turbine und Durchströmturbine, 1999
- Nr. 89 **Aufleger Markus:** Verteilte faseroptische Temperaturmessungen im Wasserbau, 2000
- Nr. 90 **Knauss Jost:** Späthelladische Wasserbauten. Erkundungen zu wasserwirtschaftlichen Infrastrukturen der mykenischen Welt, 2001
- Nr. 91 **Festschrift** aus Anlass des 75-jährigen Bestehens der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Technischen Universität München in Oberrach;
Oskar v. Miller-Institut, 2001

- Nr. 92 **Wildner Harald:** Injektion von porösem Massenbeton mit hydraulischen Bindemitteln, 2002
- Nr. 93 **Wildbach Naturversuche**
Loipersberger Anton und Sadgorski Constantin: Schwemmholz in Wildbächen: Problematik und Abhilfemaßnahmen; Geschiebeuntersuchungen; 1D und 2D Abflussmodelle in einem Wildbach
Rimböck Andreas: Naturversuch Seilnetzsperrn zum Schwemmholzurückhalt in Wildbächen: Planung, Aufbau, Versuchsdurchführung und Ergebnisse
Hübl Johannes und Pichler Andreas: Zur berührungslosen Erfassung der Fließtiefe und Fließgeschwindigkeit in einem Wildbachgerinne zum Zeitpunkt des Durchganges der Hochwasserwelle, 2002
- Nr. 94 **Rimböck Andreas:** Schwemmholzurückhalt in Wildbächen – Grundlagen zu Planung und Berechnung von Seilnetzsperrn, 2003
- Nr. 95 **Nothhaft Sabine:** Die hydrodynamische Belastung von Störkörpern, 2003
- Nr. 96 **Schmautz Markus:** Eigendynamische Aufweitung in einer geraden Gewässerstrecke: Entwicklung und Untersuchungen an einem numerischen Modell, 2003
- Nr. 97 **Neuner Johann:** Ein Beitrag zur Bestimmung der horizontalen Sicherheitsabstände und Fahrrinnenbreiten für Wasserstraßen, 2004
- Nr. 98 **Göhl Christian:** Bypasseinrichtungen zum Abstieg von Aalen an Wasserkraftanlagen, 2004
- Nr. 99 **Haimerl Gerhard:** Groundwater Recharge in Wadi Channels Downstream of Dams: Efficiency and Management Strategies, 2004
- Nr. 100 **Symposium: Lebensraum Fluss – Hochwasserschutz, Wasserkraft, Ökologie. Band 1;** Wallgau, Oberbayern, 16. bis 19. Juni 2004
- Nr. 101 **Symposium: Lebensraum Fluss – Hochwasserschutz, Wasserkraft, Ökologie. Band 2;** Wallgau, Oberbayern, 16. bis 19. Juni 2004
- Nr. 102 **Huber Richard:** Geschwindigkeitsmaßstabseffekte bei der Kavitationserosion in der Scherschicht nach prismatischen Kavitatoren, 2004
- Nr. 103 **Exposed Thermoplastic Geomembranes for Sealing of Water Conveyance Canals,** Guidelines for Design, Supply, Installation, 2005
- Nr. 104 **Workshop „Anwendung und Grenzen physikalischer und numerischer Modelle im Wasserbau“.** Wallgau, Oberbayern, 29. und 30. September 2005
- Nr. 105 **Conrad Marco:** A contribution to the thermal stress behaviour of Roller-Compacted-Concrete (RCC) gravity dams – Field and numerical investigations, 2006
- Nr. 106 **Schäfer Patrick:** Basic Research on Rehabilitation of Aged Free Flow Canals with Geomembranes, 2006
- Nr. 107 **Deichertüchtigung und Deichverteidigung in Bayern.** Beiträge zur Fachtagung am 13. und 14. Juli 2006 in Wallgau, Oberbayern, 2006
- Nr. 108 **Porras Pablo:** Fiber optic temperature measurements – Further Development of the Gradient Method for Leakage Detection and Localization in Earthen Structures, 2007
- Nr. 109 **Perzmaier Sebastian:** Verteilte Filtergeschwindigkeitsmessung in Staudämmen, 2007
- Nr. 110 **Wasserbau an der TU München – Symposium zu Ehren von Prof. Theodor Strobl** am 16. März 2007 in Wallgau, Oberbayern, 2007
- Nr. 111 **Haselsteiner Ronald:** Hochwasserschutzdeiche an Fließgewässern und ihre Durchsickerung, 2007
- Nr. 112 **Schwarz Peter und Strobl Theodor:** Wasserbaukunst - Oskar von Miller und die bewegte Geschichte des Forschungsinstituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft in Oberrach am Walchensee (1926-1951). 120 Seiten, Preis: 9,80 €, 2007
- Nr. 113 **Flutpolder: Hochwasserrückhaltebecken im Nebenschluss.** Beiträge zur Fachtagung am 19. und 20. Juli 2007 in Wallgau, Oberbayern. ISBN 978-3-940476-03-6, 240 Seiten, durchgehend farbige Abbildungen, Preis: 34,80 €, 2007
- Nr. 114 **Assessment of the Risk of Internal Erosion of Water Retaining Structures: Dams, Dykes and Levees.** Intermediate Report of the European Working Group of ICOLD. ISBN 978-3-940476-04-3, 220 Seiten, Preis: 29,80 €, 2007
- Nr. 115 **14. Deutsches Talsperrensosymposium (14th German Dam Symposium) and 7th ICOLD European Club Dam Symposium.** Beiträge zur Tagung am 17. bis 19. September 2007 in Freising (Contributions to the Symposium on 17 - 19 September 2007 in Freising, Germany). ISBN 978-3-940476-05-0, 570 Seiten, Preis: 49,80 €, 2007

- Nr. 116 **Niedermayr Andreas:** V-Rampen – Ökologisch weitgehend durchgängige Querbauwerke. ISBN 978-3-940476-06-7, 240 Seiten, Preis: 29,80 €, 2008
- Nr. 117 **Hafner Tobias:** Uferückbau und eigendynamische Gewässerentwicklung – Aspekte der Modellierung und Abschätzungsmöglichkeiten in der Praxis. ISBN 978-3-940476-07-4, 206 Seiten, Preis: 29,80 €, 2008
- Nr. 118 **Wang Ruey-wen:** Aspects of Design and Monitoring of Nature-Like Fish Passes and Bottom Ramps. ISBN 978-3-940476-10-4, 280 Seiten, Preis: 29,80 €, 2008
- Nr. 119 **Fischer Markus:** Ungesteuerte und gesteuerte Retention entlang von Fließgewässern: Beurteilung der Wirksamkeit möglicher Maßnahmen unter Verwendung hydrodynamisch-numerischer Modellierung. ISBN 978-3-940476-11-1, 220 Seiten, Preis: 29,80 €, 2008
- Nr. 120 **Fiedler Katharina:** Erfassung hydromorphologischer Vorgänge in Fließgewässern mit Hilfe von ADCP-Messungen. ISBN 978-3-940476-12-8, Preis: 29,80 €, 2008
- Nr. 121 **Hoepfner Roland:** Distributed Fiber Optic Strain Sensing in Hydraulic Engineering. ISBN 978-3-940476-13-5, Preis: 29,80 €, 2008
- Nr. 122 **Gewässermorphologie und EU-WRRRL:** Beiträge zur Fachtagung am 24. und 25. Juli 2008 in Wallgau, Oberbayern. ISBN 978-3-940476-15-9, 230 Seiten, durchgehend farbige Abbildungen, Preis: 34,80 €, 2008
- Nr. 123 **Zukunftsfähiger(s) Wasserbau und Flussgebietsmanagement – Wasser- und Feststofftransport in Fläche und Fluss.** Beiträge zur Fachtagung am 30. und 31. Juli 2009 in Wallgau, Oberbayern. ISBN 978-3-940476-19-7, 104 Seiten, durchgehend farbige Abbildungen, Preis: 9,80 €, 2009
- Nr. 124 **Rutschmann Peter (Hrsg.): Wasserbau in Bewegung ... von der Statik zur Dynamik.** Beiträge zum 15. Gemeinschafts-Symposium der Wasserbau-Institute TU München, TU Graz und ETH Zürich vom 1. bis 3. Juli 2010 in Wallgau, Oberbayern. ISBN 978-3-940476-22-7, 624 Seiten, teils farbige Abbildungen, Preis: 59,00 €, 2010
- Nr. 125 **14. Treffen junger WissenschaftlerInnen an Wasserbauinstituten.** Beiträge zum JuWi-Treffen am 25. und 26. Juni 2012 an der Technischen Universität München. ISBN 978-3-940476-23-4, 220 Seiten, Preis: 14,80 €, 2012
- Nr. 126 **Efthymiou Nikolaos:** Transient Bedload Transport of Sediment Mixtures under Disequilibrium Conditions - An Experimental Study and the Development of a New Dynamic Hiding Function. ISBN 978-3-940476-24-1, 300 Seiten, Preis: 29,80 €, 2012
- Nr. 127 **Contributions on Sediment Transport**
Hutter Kolumban: Tutorial on Prograding and Retrograding Hypo- and Hyper-pycnal Deltaic Formations into Quiescent Ambients
Hutter Kolumban and Luca Ioana: A Global View of Sediment Transport in Alluvial Systems
Vetsch David: Force-coupled Lagrangian Approach for Numerical Modelling of Bed-load Transport, ISBN 978-3-940476-25-8, 202 Seiten, Preis: 19,80 €, 2013
- Nr. 128 **Ökohydraulik - Leben im, am und mit dem Fluss.** Beiträge zur Fachtagung am 27. und 28. Juni 2013 in Oberrach. ISBN 978-3-943683-04-2, 300 Seiten, durchgehend farbige Abbildungen, Preis: 29,80 €, 2013, *vergriffen*
- Nr. 129 **Shokry Mohamed Ahmed Abdelaziz:** Numerical Simulation of Fish Behaviour and Fish Movement Through Passages. ISBN 978-3-943683-05-9, 130 Seiten, durchgehend farbige Abbildungen, Preis: 24,80 €, 2013
- Nr. 130 **Hochwasser und kein Ende! Statusberichte, aktuelle Vorhaben, neue Planungswerkzeuge.** Beiträge zur Fachtagung am 3. und 4. Juli 2014 in Oberrach. 978-3-943683-06-6, 200 Seiten, durchgehend farbige Abbildungen, Preis: 29,80 €, 2013
- Nr. 131 **Skublics Daniel Alexander:** Großräumige Hochwassermodellierung im Einzugsgebiet der bayerischen Donau. Retention, Rückhalt, Ausbreitung. ISBN 978-3-943683-07-3, 200 Seiten, Preis: 19,80 €, 2014
- Nr. 132 **Cuchet Mathilde:** Fish Protection and Downstream Migration at Hydropower Intakes: Investigation of Fish Behavior under Laboratory Conditions. ISBN 978-3-943683-08-0, 145 Seiten, Preis: 19,80 €, 2014
- Nr. 133 **Hartlieb Arnd:** Schwemmholz in Fließgewässern - Gefahren und Lösungsmöglichkeiten. ISBN 978-3-943683-09-7, 165 Seiten, Preis: 19,80 €, 2015
- Nr. 134 **Rutschmann Peter (Hrsg.): Wasserbau – mehr als Bauen im Wasser.** Beiträge zum 18. Gemeinschafts-Symposium der Wasserbau-Institute TU München, TU Graz und ETH Zürich vom 29. Juni bis 1. Juli 2016 in Wallgau, Oberbayern. ISBN 978-3-943683-10-3, 400 Seiten, Preis: 39,00 €, 2016

- Nr. 135 **Bauer Andreas:** Aspekte zur Sicherheitsbeurteilung eines Staudammes mit und ohne Sickerwassermessung. ISBN 978-3-943683-40-0, 300 Seiten, Preis: 29,00 €, 2016
- Nr. 136 **Yao Weiwei:** Application of the Ecohydraulic Model on Hydraulic and Water Resources Engineering. ISBN 978-3-943683-11-0, 220 Seiten, Preis: 24,80 €, 2016
- Nr. 137 **Rutschmann Peter (Hrsg.): Naturgefahren – von der Sturzflut zur Schwemmh Holzverklausung.** Beiträge zur Fachtagung am 6. Juli 2017 in Oberrach. ISBN 978-3-943683-12-7, 150 Seiten, durchgehend farbige Abbildungen, Preis: 24,80 €, 2017

Die Berichtsbände können beim Lehrstuhl für Wasserbau und Wasserwirtschaft bestellt werden:
E-Mail: sigrid.machauer@tum.de - Telefon: +49 89 289 23174

ISBN 978-3-943683-12-7
ISSN 1437-3513