

Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 107 (2015)
Heft: 4

Artikel: Die Schwemmholzdynamik eines steilen voralpinen Gebirgsbaches
Autor: Badoux, Alexandre / Turowski, Jens M. / Jocher, Matthias
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-941864>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 13.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Die Schwemmholzdynamik eines steilen voralpinen Gebirgsbaches

Alexandre Badoux, Jens M. Turowski, Matthias Jochner, Markus Stoffel, Christian Rickli

Zusammenfassung

Holz tritt in Bächen und Flüssen in Stücken verschiedenster Grösse auf und erfüllt dabei unterschiedliche Rollen. Einerseits stellt Holz eine wichtige Energiequelle in aquatischen Ökosystemen dar und andererseits beeinflussen grosse Holzstücke massgeblich die Gerinnemorphologie und die Fließeigenschaften von Gerinnen. Im vorliegenden Artikel wird gezeigt, dass der Export organischen Materials aus dem steilen Einzugsgebiet des Erlenbaches (Kanton Schwyz) hauptsächlich durch grosse bis aussergewöhnliche Abflussereignisse bestimmt wird. In diesem Zusammenhang spielen Verklausungen oder Holzstufen eine sehr wichtige Rolle. Bei niedrigem bis mässigem Abfluss führen Holzstufen zur Ablagerung von Holzstücken verschiedener Grösse. Nur aussergewöhnlich intensive Abflussereignisse vermögen diese Verklausungen zu zerstören und das gespeicherte Material zu mobilisieren. Zudem verstärken diese Hochwasser die Hangprozesse entlang des Gerinnes und sorgen so für die Bereitstellung von frischem Schwemmholz zur Bildung neuer Holzstufen.

1. Einleitung

Schwemmholz spielt in Gewässern eine wichtige hydraulische, flussmorphologische und ökologische Rolle. Es ist ein integraler Bestandteil eines jeden natürlichen Fließgewässers mit bewaldetem Einzugsgebiet (Wohl, 2013). Grosse Schwemmholzstücke mit einer Länge ≥ 1.0 m und einem Durchmesser ≥ 0.1 m werden oft als «large woody debris» (oder LWD) bezeichnet und beeinflussen die Fließgeschwindigkeit und Geschiebe-transportraten. Sie haben die Tendenz sich zu verkeilen und bilden besonders in steilen Gerinnen häufig Verklausungen oder Holzstufen. Diese Holzverklausungen wirken als Barrieren für Geschiebe und lagern auch zusätzliches organisches Material ein. Sie wandeln Energie um und variieren die Abflussgeschwindigkeiten; auf diese Weise gestalten sie Lebensräume für Wirbellose und Fische.

Schwemmholz in steilen Einzugsgebieten wird durch verschiedene Prozesse ins Gerinne eingetragen: kleine bis sehr kleine Stücke organischen Materials wie Blätter, Nadeln, Zweige und Früchte (z.B. Buchenkerne, Fichtenzapfen) fallen oft direkt von angrenzenden Baumbeständen in den Wasserlauf; grössere Stücke wie Äste oder ganze Stämme gelangen mit kriechenden oder rutschenden Hängen oder durch Sturmwinde, Schnee-

gleiten bzw. auch Lawinen in ein Gerinne. Direkt am Ufer stehende Bäume können schliesslich während Hochwasserereignissen durch Seitenerosion mitgerissen werden. Wenn sie einmal im Gerinne sind, werden Schwemmholzstücke verkleinert, wobei physikalische, biologische und chemische Prozesse eine Rolle spielen können. Grosse, relativ unbewegliche Stücke (z.B. in einer Verklausung) vermorschen zunehmend und verlieren so an Festigkeit. Wenn Schwemmholztransport über die Dauer eines Hochwasserereignisses betrachtet wird, sind die physikalischen Verkleinerungsprozesse wohl am wichtigsten. Darunter fallen unter anderem Bruch bei Hindernissen, Ablösung von Teilen eines Stücks durch den Wasserdruck, Zerkleinerung (Vermahlung, Abschleifen) durch Geschiebekörper und der Kollaps von gesamten Verklausungen. Bei fortgeschrittenen Vermorschung erfolgt die physikalische Verkleinerung schneller. Es ist heute noch wenig darüber bekannt, welche Verkleinerungsprozesse unter gegebenen Bedingungen im Gerinne am wichtigsten sind und wie die verschiedenen Prozesse zusammenwirken.

Wenn Holzstücke bei erhöhtem Abfluss aus einem Einzugsgebiet transportiert werden, gehen sowohl Nährstoffe wie auch Energie für das Ökosystem des Gewässers verloren (Fisher und Likens,

1973). Zudem können flussabwärts gefährliche Situationen beispielsweise an Brücken oder Durchlässen entstehen (z.B. Comiti et al., 2006; Mazzorana et al., 2011; Ruiz-Villanueva et al., 2014). Daher wird Schwemmholztransport in Kombination mit Hochwasser oft als eine beträchtliche Gefahrenquelle in dicht bevölkerten Gebirgsregionen betrachtet. Während des extremen Hochwassers im August 2005 spielte der Holztransport an verschiedenen Orten eine Schlüsselrolle, indem er Bachausuferungen, schwere Überschwemmungen und Übersarungen begünstigte (z.B. Grosse Melchaa im Mündungsdelta in Sarnen OW, s. Bezzola und Hegg, 2008). Die Probleme durch Holz im Gerinne lassen sich einerseits mit Gerinneunterhalt wie das Entfernen oder allenfalls Zerkleinern von Totholz reduzieren. Zudem kann mit baulichen Massnahmen Schwemmholz zurückgehalten oder schadlos weitergeleitet werden (Bezzola und Lange, 2003). Die Schwemmholzsituation kann aber auch durch geeignete Pflegeeingriffe in der ufernahen Bestockung verbessert werden (Frehner et al., 2005; Covi, 2008; Rickli, 2009).

Der vorliegende Artikel fasst zwei Studien zusammen, die in den letzten Jahren durch die Eidg. Forschungsanstalt WSL zusammen mit Partnern im voralpinen Einzugsgebiet des Erlenbaches durchgeführt wurden (Turowski et al., 2013; Jochner et al., 2015). Transportiertes organisches Material wurde bei Niederwasser, erhöhten Abflüssen sowie bei Hochwasser mittels verschiedener Methoden gesammelt. Die Proben wurden sortiert und gewogen und die Transportraten für Stücke schwerer als 0.1 g bei verschiedenen Abflüssen bestimmt. Um das Transportverhalten von Schwemmholz in einem Wildbach zu beschreiben und die Einflüsse des Abflussregimes und der physischen Eigenschaften einzelner Holzstücke auf deren Mobilisierung, Transport und Ablagerung zu untersuchen, wurde zudem eine Holztracerstudie im Erlenbach durchgeführt. Damit

sollten unter anderem auch die Grundlagen zur Gefahrenbeurteilung in Bezug auf die Schwemmholtproblematik verbessert werden. Schliesslich richteten wir einen speziellen Fokus auf die für unser Untersuchungsgerinne und viele andere Wildbäche typischen Holzverklausungen, die eine wichtige Rolle für den Schwemmholtshaushalt steiler Gebirgsbäche zu spielen scheinen.

2. Untersuchungsgebiet

Das Wildbach-Einzugsgebiet des Erlenbachs liegt südlich von Einsiedeln im Alptal (Kt. SZ) in den Schweizer Voralpen und ist seit über 30 Jahren Gegenstand der Forschung an der Eidg. Forschungsanstalt

WSL (Hegg et al., 2006). Es ist west-expo- niert und deckt einen Höhenbereich von 1110 bis 1655 m ü.M. ab (Bild 1). Die mittlere jährliche Niederschlagsmenge liegt bei 2290 mm, wobei rund ein Drittel dieser Menge im Winterhalbjahr als Schnee fällt. Geologisch liegt das 0.74 km² grosse Einzugsgebiet im Flysch der Einsiedler Schuppenzone. Die Böden bestehen aus undurchlässigem sandig bis kiesigem Ton glazialen Ursprungs. Rund 40% des Gebietes sind bewaldet und die restlichen 60% sind Nassflächen und Wiesen.

Das Hauptgerinne des Erlenbachs weist eine mittlere Neigung von 18% auf. Bei erhöhten Abflüssen ab ca. 200 bis 300 l s⁻¹ kann fluvialer Geschiebetrans-

port auftreten; Murgänge ereignen sich im Erlenbach nicht. Das Abflussgeschehen ist stark von der Jahreszeit abhängig. Im Winter werden typischerweise konstant geringe Abflusshöhen beobachtet, welche im Frühling während der Schneeschmelze für eine Periode von ein bis zwei Monaten deutlich und mit einem ausgeprägten Tagesgang ansteigen. Hohe Abflusswerte über 1000 l s⁻¹ werden fast ausschliesslich bei intensiven Gewitterniederschlägen registriert, die in der Region im Sommer häufig auftreten. Diese konvektiven Regenereignisse sind für die meisten geschiebeführenden Hochwasser im Erlenbach verantwortlich. Der höchste je im Erlenbach registrierte Abflusswert beträgt 14 600 l s⁻¹, das mittlere jährliche Hochwasser liegt um 2000 l s⁻¹.

1982 wurde unmittelbar oberhalb der Mündung des Erlenbachs in den Zwäckbach ein Sedimentrückhaltebecken (Geschiebesammler) sowie eine Abflussmessstation errichtet. Diese Arbeiten legten den Grundstein für eine kontinuierliche Abfluss- und Geschiebebeobachtung. Die Entwicklung bzw. der Ausbau der Gesamtanlage im Allgemeinen und des Geschiebemesssystems im Speziellen wurden u.a. von Rickenmann und McArdell (2007), Rickenmann et al. (2012) und Beer et al. (2015) beschrieben.

3. Methoden

3.1 Erfassung des Schwemmholzaustrages

Der Austrag von Stücken organischen Materials verschiedener Grössen (in der Folge als Schwemmholt bezeichnet) aus dem Einzugsgebiet wurde mit drei verschiede-

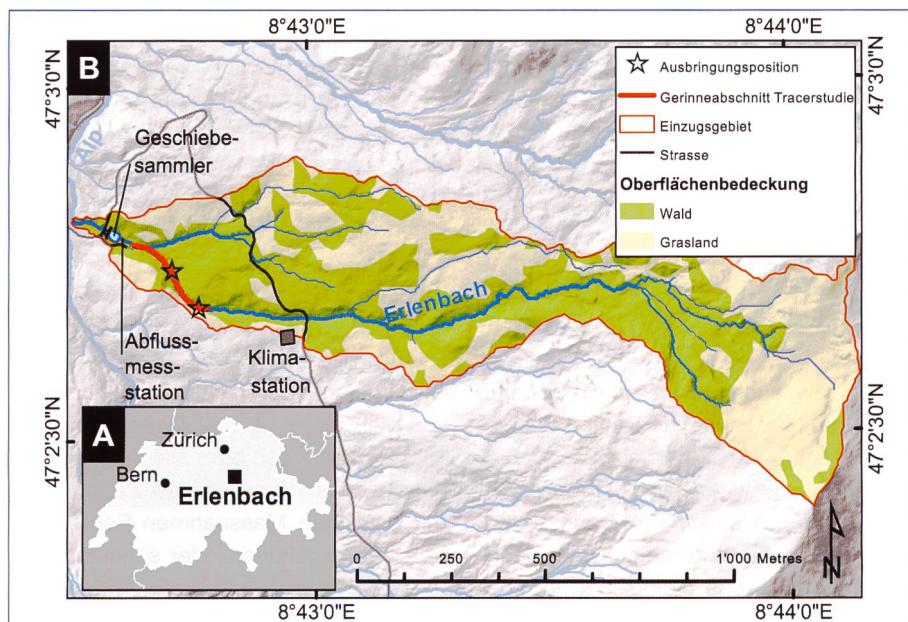


Bild 1. Übersichtskarte des Einzugsgebiets des Erlenbachs im Alptal (Kanton Schwyz). Der rot gekennzeichnete, untere Teil des Gerinnes entspricht dem Untersuchungsabschnitt der 2012 durchgeföhrten Holztracerstudie (Jochner, 2013; Jochner et al., 2015).



Bild 2. (a) Erfassung des Austrags von Stücken organischen Materials mittels Geschiebefangnetzen im Erlenbach bei leicht erhöhtem Abfluss (Schneeschmelze, 2. April 2012); (b) ein automatischer Geschiebefangkorb steht bei mittlerem Abfluss im Einsatz (29. Juli 2010); (c) mit RFID-Sender ausgerüstetes Holzstück der Längenklasse 0.5 m im Bachbett des Erlenbaches.

nen Ansätzen ermittelt, um einen möglichst grossen Bereich von Abflusswerten abzudecken. Bei tiefen bis mittleren Abflüssen bis 1000 l s^{-1} (Grossteil der Messungen $< 250 \text{ l s}^{-1}$), bei denen man sich ohne Gefahr ins Gerinne begeben konnte, wurde ein mobiles Fangnetzsystem eingesetzt (Bunte et al., 2004; siehe auch Bild 2a). Bei höheren Abflüssen zwischen ungefähr 200 bis 1500 l s^{-1} (Grossteil der Messungen $> 400 \text{ l s}^{-1}$) kamen die von Rickenmann et al. (2012) beschriebenen und weltweit einzigartigen automatischen Geschiebefangkörbe zum Einsatz (Bild 2b). Zwei Messwerte wurden schliesslich nach den ausserordentlichen Abflussereignissen in den Sommern 1995 und 2010 erfasst. Das im Geschieberückhaltebecken des Erlenbaches abgelagerte Schwemmmholz konnte damals eingesammelt und vermessen werden (Bild 3a; Tabelle 1).

3.1.1 Fangnetze

Als Geschiebefangnetze bezeichnet man tragbare Probennehmer, welche auf der Gerinnesohle eines zu untersuchenden Baches oder Flusses installiert werden. Diese Fangnetze wurden in Nordamerika entwickelt, um in eher flachen Kiesflüssen Geschiebe Proben zu entnehmen (Bunte et al., 2004, 2007), können allerdings auch gut für die Erfassung von organischem Material verwendet werden. Ein Fangnetz besteht aus einem Aluminiumrahmen von 0.3 m Breite und 0.2 m Höhe, an dem ein 1–2 m langes Netz befestigt ist, welches das gesammelte Material aufnimmt (Bild 2a). Die in der vorliegenden Studie verwendeten Netze weisen eine Maschenweite von 6 mm auf. Der Rahmen des Fangnetzes wird mit kurzen Spanngurten an eine Metallplatte fixiert, die mit Hilfe von zwei in den Untergrund geschlagenen

Stangen direkt auf der Sohle des Gerinnes befestigt ist.

Messungen mit den Fangnetzen wurden an drei Stellen in einer Stufen-Becken-Einheit des Erlenbaches rund 20 m oberhalb der Abflussmessstation durchgeführt. Mit diesem System ist es möglich, bei geringen bis mittleren Abflüssen die gesamte Fließtiefe zu erfassen. Die Effizienz der Probenahme hängt primär vom Bereich der Partikelgrösse ab, der mit dem Fangnetz aufgenommen werden kann. Bei den Abflussverhältnissen, welche während der Messkampagnen vorherrschten, war es uns zu jedem Zeitpunkt möglich, die grössten transportierten Stücke organischen Materials zu erfassen. Die genaue Mess- und Interpolationsprozedur bei den Probenahmen im Erlenbach ist in Turowski et al. (2013) detailliert beschrieben.

Meistens wurden die Fangnetze während 10 bis 20 Minuten im Gerinne eingesetzt. Bei einzelnen Probenahmen musste die Messdauer allerdings der vorherrschenden Rate der Materialzufuhr (Geschiebe und organisches Material) angepasst werden, welche primär durch die Abflussverhältnisse bestimmt wird. Bei verhältnismässig hohem Abfluss ($\sim 1000 \text{ l s}^{-1}$) blieben die Netze nur wenige Minuten in der Strömung, um eine Überbe-

lastung der Netze zu vermeiden. Bei sehr geringen Abflüssen ($\sim 1\text{--}10 \text{ l s}^{-1}$) hingegen wurde während mehrerer Stunden gemessen, um genügend Material für die Analyse sammeln zu können. Die hier präsentierten Daten wurden im Frühjahr 2012 (während der Schneeschmelze) sowie im Sommer 2012 (nach Niederschlägen und während Niederkwasser) erfasst.

3.1.2 Fangkörbe

Die automatischen Geschiebefangkörbe bestehen vereinfacht formuliert aus oben offenen Metallwürfeln mit 1 m Kantenlänge, die im Bereich des Einlaufes in den Geschiebesammler des Erlenbaches auf einem Schienensystem lateral bewegt werden können (Bild 3a, im Hintergrund). Die seitlichen Wände und der Boden der Fangkörbe bestehen aus Metallgitter mit einer Maschenweite von 10 mm (Bild 2b). Die Probenahme wird automatisch ausgelöst, wenn sowohl der Abfluss wie auch die mit dem Geophonmesssystem (Rickenmann et al., 2012) erfassten Erschütterungen einen festgesetzten Grenzwert überschreiten. Alle technischen Details zu den automatischen Geschiebefangkörben wurden von Rickenmann et al. (2012) beschrieben.

Für die Messung wird ein Fangkorb

Parameter	25.07.1984	14.07.1995	20.06.2007	01.08.2010
Spitzenabfluss ⁽¹⁾ (l/s)	12'000	9'800	14'600	10'900
Hochwasserabflussvolumen (10^6 l)	37.8	22.7	33.6	21.1
Geschiebefracht (m^3)	2230	890	1650	393
Holzvolumen im Sammler (m^3)	–	0.62	–	0.53

(1) Mit Ausnahme des Ereignisses 1984 wurden Daten in 1-min Auflösung verwendet, um den Spitzenabfluss anzugeben; der Wert für das Ereignis 1984 basiert auf 10-min Daten

Tabelle 1. Angaben zu Abfluss, Geschiebefrachten und Schwemmholtvolumen während den vier grössten Ereignissen im Erlenbach seit Messbeginn (vgl. auch Tabelle 2 in Turowski et al., 2009).

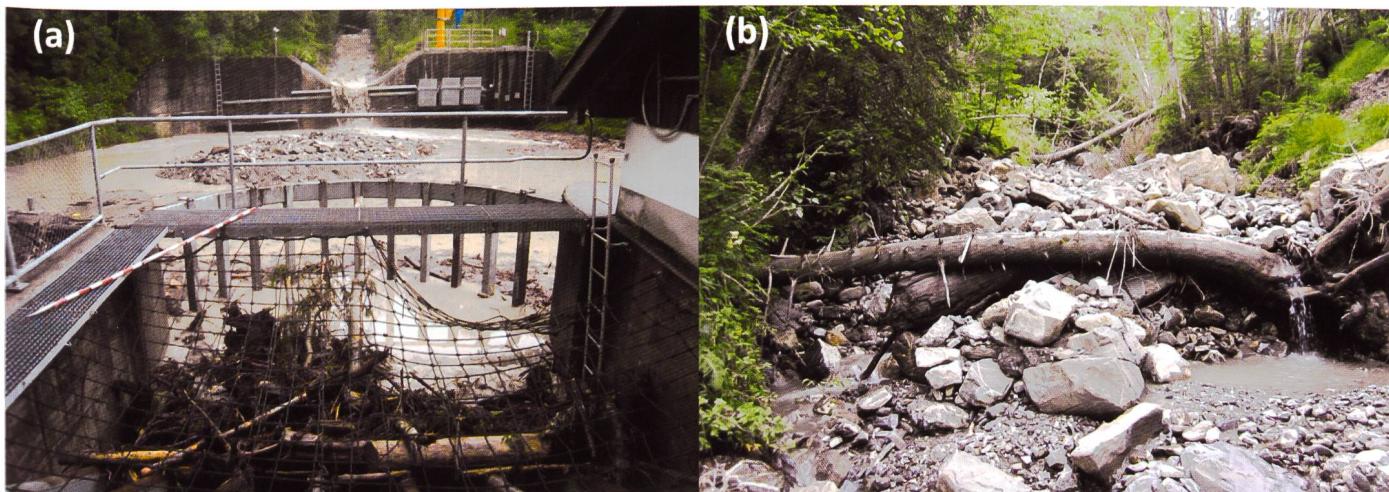


Bild 3. (a) Aufnahme des Geschiebesammlers des Erlenbaches mit abgelagerten Holzstücken verschiedener Größen nach dem Ereignis vom 1. August 2010; (b) Aufnahme der Verklausung LJ1 am 19. Juli 2011, knapp ein Jahr nach dem ausserordentlichen Abflussereignis vom 9. August 2010.



in den Abflussstrahl bewegt (*Bild 2b*). Bei Abflüssen bis 1500 l s^{-1} sind die Körbe breit genug, um den gesamten Wasserstrahl zu erfassen und um die grössten transportierten Holzstücke aufzunehmen. Die Effizienz der Probenahme ist vor allem durch den unteren Grenzwert der gesammelten Stütze (10 mm) gegeben. Die hier präsentierten Fangkorbdaten wurden im Zeitraum von Mai bis November der Jahre 2009 bis 2012 erfasst, wenn Niederschlagsereignisse einen erhöhten Abfluss im Erlenbach verursachten (*Turowski et al., 2013*).

Das mittels Fangnetzen und Fangkörben gesammelte organische Material wurden in einem ersten Schritt von Geschiebematerial getrennt und vor Ort (nass) gewogen. Danach trocknete man die Materialproben in einem Trocknungs-Ofen während 24 h bei 80°C im Labor und erfasste zusätzlich das entsprechende Trockengewicht. Für einen Teil der Fangnetz- und Fangkorbproben wurden zudem Einzelstücke von mehr als 0.1 g (Netzproben) bzw. 1 g (Korbproben) vermessen und gewogen (*Turowski et al., 2013*).

3.1.3 Grossereignisse

Bei sehr hohen Abflüssen können Geschiebe und organisches Material nicht mehr gefahrlos mit Netzen oder Körben aufgefangen werden. Grösseres Material wird jedoch im Sedimentdrückhaltebecken des Erlenbaches abgelagert (*Bild 3a; Tabelle 1*). Nach zwei ausserordentlichen Hochwassereignissen im Juli 1995 und im August 2010 mit Spitzenabflusswerten im Bereich von 10000 l s^{-1} wurden Holzstücke mit einem Durchmesser von mindestens 5 cm eingesammelt und im Feld vermessen. Anhand der Informationen zu Stücklänge und -durchmesser konnten unter Annahme einer zylindrischen Form und einer für das Einzugsgebiet typischen Holzdichte die Volumen der einzelnen Stücke abgeschätzt werden.

Im Gegensatz zu den oben beschriebenen Probenahmen mit Körben und Netzen lässt sich bei diesem Ansatz kein eindeutiger Erfassungszeitraum und somit auch kein entsprechender Abfluss bestimmen. Aus Erfahrung ist jedoch bekannt, dass erhebliche Holzmengen im Geschiebesammler erst dann auftreten, wenn Abflusswerte im Bereich von 5000 l s^{-1} erreicht werden. Bei Ereignissen mit tieferen Abflussspitzen transportiert der Wildbach nur einzelne Stücke in das Becken. Um demnach einen repräsentativen Abflusswert für den Transport grosser Holzstücke während beiden untersuchten Ereignissen zu erhalten, wurden alle Minu-

tenwerte grösser 5000 l s^{-1} gemittelt; das waren 20 Werte für das Ereignis 1995 und 18 Werte für 2010.

3.2 Tracerstudie

Zusätzlich zu den Messungen der natürlichen Austragsraten organischen Materials aus dem gesamten Einzugsgebiet, führten wir im Sommerhalbjahr 2012 eine Holztracerstudie durch. Damit konnten die Transportcharakteristiken von Holzstücken entlang eines 320 m langen Untersuchungsabschnittes im untersten Bereich des Erlenbaches analysiert werden (*Jochner, 2013; Jochner et al., 2015*). Zu diesem Zweck wurden insgesamt 236 zugeschnittene zylindrische Stücke mit RFID-Sendern (RFID = Radio-Frequency-Identification-Devices) ausgestattet. Etwa der Hälfte der Hölzer wurde vor dem Einsatz die seitlichen Äste entfernt. Der RFID-Ansatz wurde in Kiesflüssen Kandas erstmals zur Untersuchung des Geschiebetransports angewendet (*Lamarre et al., 2005*) und konnte auch im Erlenbach (*Meier, 2009; Hegglin, 2011; Schneider et al., 2014*) sowie in der hochalpinen Gornera im Wallis (*Schäfer, 2012; Gattiker, 2014*) erfolgreich eingesetzt werden. Erste Erfahrungen mit dieser Methodik zur Analyse von Schwemmholztransport wurden z.B. von *MacVicar et al. (2009)* beschrieben.

Die in der vorliegenden Studie verwendeten Holzstücke lassen sich in vier Grössenklassen einteilen (Stücklängen von ca. 0.1, 0.2, 0.5 und 1.0 m) und wurden im Juni 2012 im Bachbett ausgesetzt (*Bild 2c*). Bestandsaufnahmen erfolgten im Laufe des Sommers bis in den Oktober 2012 sechs Mal, jeweils nach Niederschlagsereignissen, die erhöhte Abflüsse im Erlenbach verursachten. Während dieser Untersuchungsperiode konnten elf Abflussereignisse mit Spitzenwerten über 500 l s^{-1} registriert werden (Maximum während der Studie: 1250 l s^{-1}). Aufnahmen wurden weitgehend bei Niedrigwasser durchgeführt, wobei der gesamte Untersuchungsabschnitt mit Hilfe eines mobilen Antennensystems systematisch abgesucht wurde. Nachdem ein Holzstück aufgespürt und identifiziert wurde, konnte die genaue Position entlang des Gerinneprofils mit Hilfe von festen Referenzpunkten eingemessen werden. Ebenfalls registriert wurden die Ablagerungscharakteristiken: Orientierung des Stücks, seitliche Entfernung vom Talweg, Beschreibung des Ablagerungsorts (freies Gerinne oder Verklausung). Um auch diejenigen Stücke zu erkennen, welche aus dem Untersu-

chungsabschnitt geschwemmt wurden, kam eine stationäre RFID-Antenne bei der Abflussmessstation zum Einsatz. Dank mehrfachen Ortungen der einzelnen Stücke konnte ihr Transportverhalten während Abflussereignissen abgeschätzt und ein Transportprofil mit insgesamt sechs Zeitschritten erstellt werden. Aufgrund der beschränkten Genauigkeit bei der Lokalisierung der Holzstücke, setzte man einen Grenzwert für die Bewegung (zwischen zwei Messungen) von 0.5 m ein. Details zur Holztracerstudie wurden von *Jochner (2013)* beschrieben.

3.3 Untersuchung der Verklausungen (Holzstufen)

Die 320 m lange Untersuchungsstrecke entlang des Gerinnes wurde sorgfältig erkundet und grosse Holzstücke wurden kartiert. Dabei lag das Augenmerk hauptsächlich auf den im Gerinne in regelmässigen Abständen vorkommenden Holzverklausungen (sogenannte «log jams», nachfolgend mit LJ abgekürzt; auch als Holzstufen bezeichnet, vgl. *Bild 3b*). Als solche definierten wir eine Akkumulation von groben Holzstücken, die im unmittelbaren Bereich mindestens eines ursprünglichen Schlüsselstücks abgelagert wurden (*Warren et al., 2009*). Schlüsselstücke sind besonders umfangreiche Baumteile (oft grosse Äste oder ganze Stämme), welche an mindestens einem Ende im Uferbereich fest verankert sind. Die Holzstufen und deren Perimeter wurden im Feld vermessen. Die Länge und der Durchmesser der in Holzstufen enthaltenen Stücke (Mindestlänge von 1 m) wurden erfasst. Zur Abschätzung von Gesamtholzvolumen und -masse jeweils einer Stufe wurde von einer zylindrischen Form der Stücke und einer Trocken-dichte von Holz im Bereich von 410 kg m^{-3} ausgegangen (charakteristisch für die verbreitet vorkommende Fichte, *Picea abies*). Das Gesamtvolume der Holzstücke kleiner als 1 m in einer Stufe wurde von Auge abgeschätzt.

Um Angaben zur Verweilzeit der in den Holzstufen gelagerten grossen Holzstücke zu erhalten, wurde eine Jahrringanalyse gemäss dem Ansatz von *Stoffel und Corona (2014)* durchgeführt. Als erstes musste eine Referenzchronologie von unmittelbar im Gerinnebereich stehenden Bäumen erarbeitet werden, wozu Bohrkerne von 30 lebenden Fichten entnommen wurden. Es gab leider zu wenige Laubbäume mit einem empfohlenen Mindestdurchmesser von 30 cm (*Hyatt und Naiman, 2001*) im Untersuchungsabschnitt. Aus diesem Grund beprobte man

in einem nächsten Schritt ausschliesslich die grossen Nadelholzstücke in den Holzstufen und registrierte Daten für eine Gesamtzahl von 24 Stücken in neun verschiedenen Stufen. Mittels der Referenzchronologie liess sich schliesslich für 20 der untersuchten Proben das Kalenderjahr ermitteln, in dem der entsprechende Baum abstarb (vier der Stücke waren bereits stark zerfallen oder wurden beträchtlich beschädigt). Eine ausführliche Beschreibung der ausgeführten Jahrringanalyse wurde von Jochner (2013) gegeben.

4. Resultate

4.1 Holztransportraten im Erlenbach

Die Trockenmasse der gesammelten Schwemmholtstücke einer einzelnen Fangnetz- oder Fangkorbprobe wurde durch die entsprechende Messzeitdauer geteilt, um eine abflusspezifische Transportrate organischen Materials zu erhalten. Aufgrund der unterschiedlichen Maschenbreite der Netze (6 mm) und der Metallgitter der Körbe (10 mm) musste allerdings eine Korrektur durchgeführt werden, um die verschiedenen Messmethoden vergleichbar zu machen. Dieser Vorgang wurde von Turowski et al. (2013) erläutert und wird hier nicht näher beschrieben.

Die korrigierten Probendaten wurden gegen den Abfluss aufgezeichnet, um eine allgemein gültige Eichkurve zu erhalten. In Bild 4a repräsentiert jede einzelne Messung einen Datenpunkt. Die Grafik zeigt dabei im Log-Log-Raum eine deutliche Abhängigkeit der ermittelten Transportraten vom Abfluss des Erlenbaches. Die resultierende Eichkurve besitzt die Form: $Q_{Holz} = a Q^b$, wobei Q_{Holz} der Transportrate des organischen Materials entspricht, Q den Abfluss im Erlenbach darstellt, $a = 4.42 \times 10^{-15} \text{ kg}/(\text{m}^{3b} \text{ s}^{1-b})$ und $b = 4.47 \pm 0.21$.

Für die Bestimmung des Exponenten (4.47) wurde eine lineare Regressionslinie an die log-transformierten Daten angepasst. Es sei besonders betont, dass die beiden Datenpunkte der ausserordentlichen Hochwasserereignisse (oben rechts in Bild 4a, vgl. auch Abschnitt 3.1.3) für die Regression nicht berücksichtigt wurden. Diese Datenpunkte sind am stärksten von Unsicherheiten behaftet, da jeweils nur Holzstücke mit einem Trockengewicht von mindestens 3000 g repräsentativ gesammelt wurden. Auch diese Messungen mussten für die Darstellung in Bild 4a korrigiert werden (Turowski et al., 2013). Die angepassten Datenpunkte kommen dabei

sehr nahe an die auf Fangnetz- und Fangkorbdaten basierende Eichkurve zu liegen. Dies bekräftigt die Gültigkeit der erarbeiteten Beziehung zwischen Transport und Abfluss während seltener Hochwasserereignisse.

Unter Verwendung der Eichkurve aus Bild 4a und der langjährigen Abflussganglinie des Erlenbaches lässt sich der Export von organischem Material aus dem Einzugsgebiet berechnen. Solange vorausgesetzt wird, dass die aus den verschiedenen Messungen resultierende Eichkurve (i) langfristig mehr oder weniger

konstant ist und (ii) auch saisonal keine bedeutenden Schwankungen erfährt, kann dieser Ansatz zur Abschätzung des Holzexportes für einzelne Abflussereignisse oder auch über längere Zeitperioden angewendet werden. Da die Transportrate von Schwemmholt im Erlenbach eine starke Abhängigkeit vom Abfluss aufweist (hoher Exponent b der Eichkurve von 4.47), wird der Materialexport aus dem Gebiet hauptsächlich durch grosse bis sehr grosse Abflussereignisse bestimmt (Bild 4b). Während des ausserordentlichen Abflusseignisses vom 1. August 2010 führte der

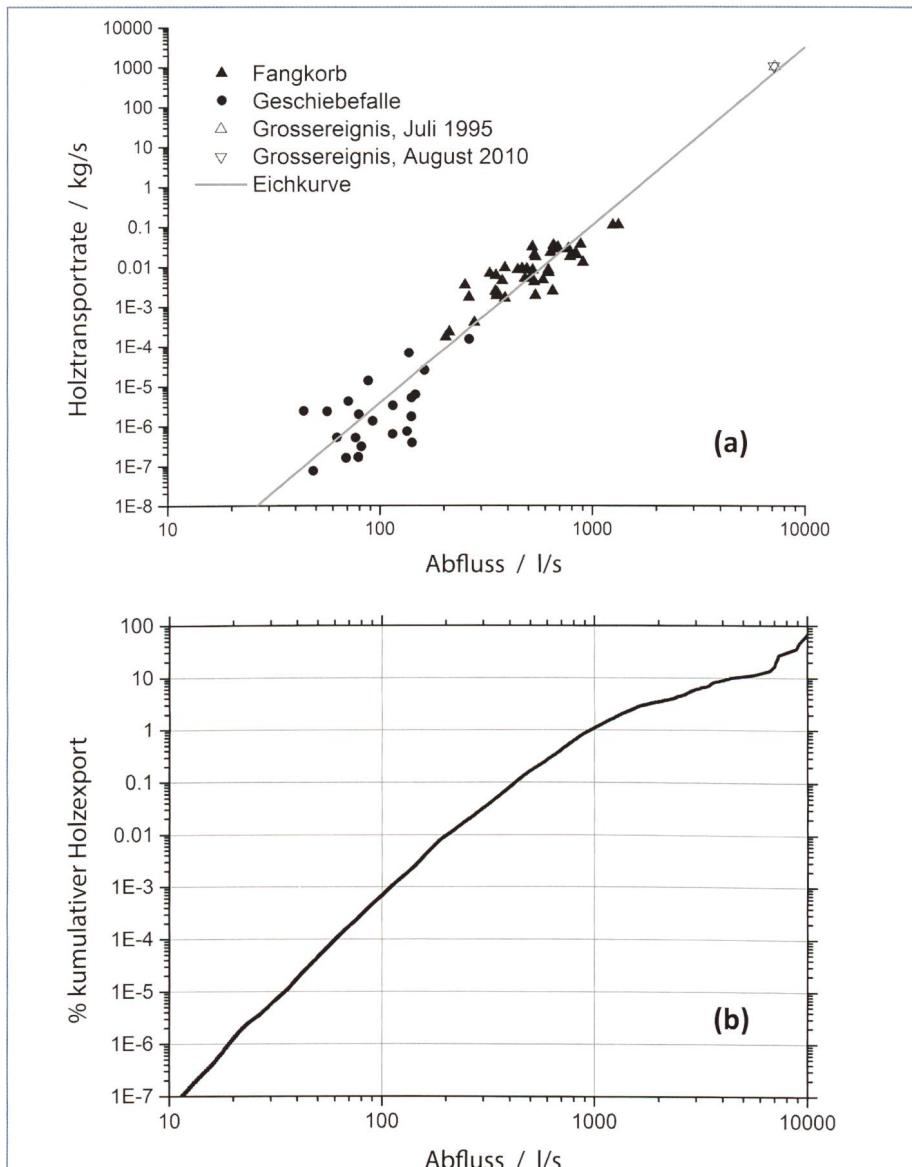


Bild 4. (a) Transportrate der Holzstücke in Funktion des Abflusses im Erlenbach. Dargestellt sind die korrigierten Transportraten (Turowski et al., 2013), wobei die Daten der Fangkörbe und der Grossereignisse auf Stücke mit einem Mindestgewicht von 0.1 g extrapoliert wurden ($R^2 = 0.94$). Die Datenpunkte der beiden Abflussereignisse (Juni 2007 und August 2010) fallen im Diagramm praktisch an die gleiche Stelle; sie wurden für die Eichkurve nicht verwendet. (b) Prozentsatz des gesamten kumulativen Holzexportes aus dem Einzugsgebiet des Erlenbaches in Abhängigkeit des Abflusses. Nur ca. 10% des totalen Holzaustrags erfolgt bei Abflüssen unter 4000 l s^{-1} . Ein solcher Abflusswert wird im Mittel jährlich nur während ca. sechs Minuten übertroffen, wodurch deutlich wird, dass die hohen Abflüsse den gesamten Holztransport im Erlenbach dominieren.

Wildbach gemäss unserer Methode zum Beispiel nahezu 2×10^6 kg Schwemmholt aus dem Gebiet heraus. Dies entspricht knapp 95% des gesamten Exports des ganzen Jahres 2010. Starke Abhängigkeiten des Exports von organischem Material vom Abfluss sind auch aus anderen Einzugsgebieten bekannt (z.B. Wallace et al., 1995), wenn auch nicht durch die Bestimmung einer auf einer Vielzahl von Messungen basierenden Eichkurve.

4.2 Mobilisierung und Transportdistanzen von Holzstücken

Das erarbeitete Transportprofil aus dem Tracerversuch zeigt eine mässig bis hohe Abhängigkeit der Mobilisierungsrate (Anteil der zwischen zwei Feldaufnahmen bewegten Holztracerstücke) sowohl vom

Spitzenabfluss, als auch vom Hochwasserabflussvolumen zwischen zwei Messungen (Jochner, 2013; Jochner et al., 2015). Der deutlichste positive Zusammenhang konnte zwischen der Mobilisierungsrate und einem gewichteten Abflussvolumen (Berücksichtigung des Quotienten von Spitzenabfluss und kritischem Abfluss bei Geschiebetransportbeginn) festgestellt werden. Einmal mobilisiert, weisen die Holztracer im Erlenbach auch unterschiedliche Transportdistanzen auf. Diese wurden stark durch die unterschiedliche Stücklänge beeinflusst, wobei kürzere Tracer über beträchtlich längere Distanzen verfrachtet wurden (Bild 5; s. auch Ruiz-Villanueva et al., 2015). Man kann davon ausgehen, dass diese Beobachtung auf die hohe Rauigkeit in steilen

Wildbächen (und somit der grossen Anzahl potenzieller Hindernisse) zurückzuführen ist, wobei lange Schwemmholtstücke viel eher blockiert werden als kurze.

In einem nächsten Schritt wurden weitere mögliche Einflussfaktoren auf die Mobilität der Tracer untersucht: die Dichte der Holzstücke, das Vorhandensein von seitlichen Ästen, die Orientierung der Stütze zur Fliessrichtung sowie die Distanz der Stücke zum Talweg. Mit Ausnahme der Orientierung der Tracer zum Fluss zeigten alle anderen Faktoren einen schwachen bis starken Einfluss auf die Mobilisierungsrate und/oder auf die Transportdistanz. Die Auswirkungen der oben genannten Faktoren wurden allerdings weitgehend durch einen wichtigeren Effekt überlagert, nämlich dem Vorhandensein von breiten Holzstufen oder Verklausungen im Erlenbach.

Die Resultate der Tracerstudie machen deutlich, dass die zahlreichen Holzstufen wirksame Barrieren gegen den Transport von Holzstücken verschiedener Grösse darstellen. Die markierten Hölzer wurden während Abflussereignissen hauptsächlich direkt in oder im unmittelbaren Umfeld der neun Holzverklausungen des Untersuchungsabschnittes abgelagert. Dies wird durch die Berechnung der Punktdichte der Tracer eindeutig bestätigt (Bild 6). Zudem bewegten sich Holzstücke, welche in Holzstufen aufgefangen wurden, im Laufe der verbleibenden Untersuchungsperiode nur selten weiter flussabwärts. Der Unterschied zwischen den beobachteten Transportdistanzen von Stücken, welche sich bei Niederwasser in oder ausserhalb einer Holzstufe befanden, ist für alle Grössenklassen beträchtlich und für kleine Stücke besonders gross (Bild 5). Diese deutliche Diskrepanz lässt

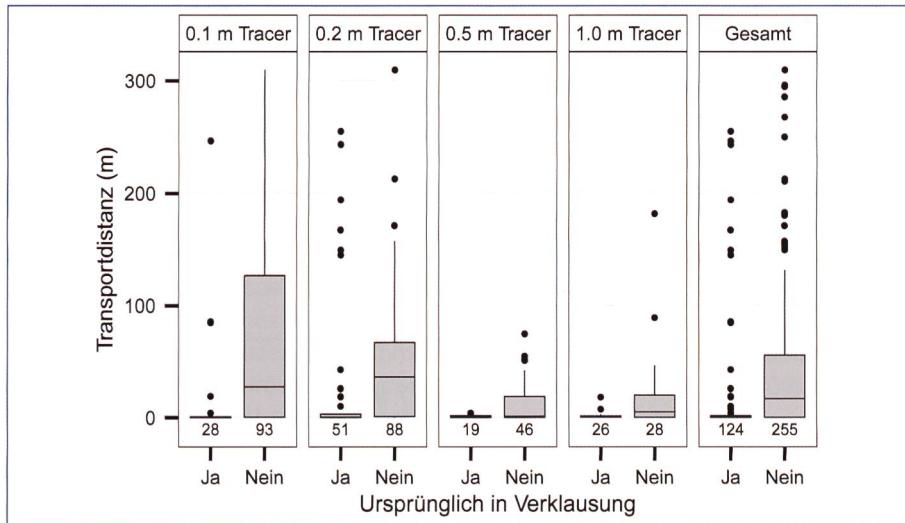


Bild 5. Transportdistanzen der markierten Holzstücke (Tracer) aufgeteilt nach ihrer Grösse (die vier ersten Boxplotgruppen repräsentieren vier Grössenklassen, die fünfte Spalte stellt alle Holzstücke dar) und nach ihrem Standort vor einem Abflussereignis (Boxplot links = in einer Verklausung; Boxplot rechts = ausserhalb einer Verklausung). Die Zahl unter den einzelnen Boxplots gibt die genaue Anzahl Datenpunkte an, welche in der Untersuchung berücksichtigt wurden (Jochner et al., 2015).

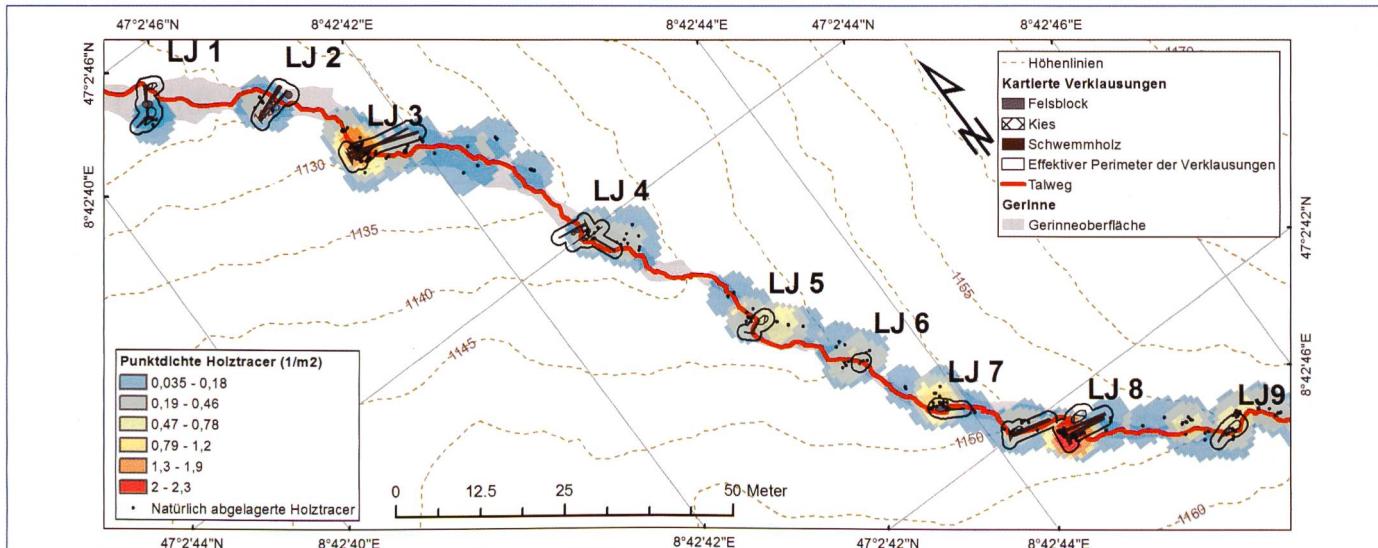


Bild 6. Karte der Untersuchungsstrecke der Holztracerstudie (vgl. Bild 1). Eingezeichnet sind die neun datierten Verklausungen (LJ 1 bis LJ 9) sowie die Punktdichte der abgelagerten Tracerstücke (Jochner, 2013; Jochner et al., 2015).

die Vermutung zu, dass auch kleine, leichte Holzstücke kleiner als 0.1 m, welche beispielsweise bei moderaten Abflüssen mit Fangnetzen gesammelt wurden, sich typischerweise in Holzstufen verfangen und vorzugsweise dort abgelagert werden. Aufgrund dieser Beobachtungen erwartet man zudem, dass ein sehr grosser Export von Holz im Erlenbach nur möglich ist, wenn zumindest einige Holzstufen zerstört werden und ihr gesamtes gespeichertes Material während eines Hochwassers flussabwärts transportiert wird. Um Informationen zum ungefähren Grenzabfluss zu erhalten, der für den Bruch von Holzstufen notwendig ist, wurden die neun Stufen des Untersuchungsabschnittes näher betrachtet.

4.3 Verweilzeiten grosser Holzstücke und Stämme in Holzstufen

Die Eigenschaften der neun im untersuchten Gerinneabschnitt identifizierten Holzstufen (LJ1 bis LJ9) sind in *Tabelle 2* wiedergegeben. Auf den gesamten Untersuchungsabschnitt bezogen haben sich pro 100 m Gerinne im Mittel 2.8 Holzstufen gebildet, was einem Anteil von 16.7% der bordvollen Gerinnefläche entspricht (*Bild 6*). Eine solche Dichte an Verklausungen ist im Vergleich zu steilen bewaldeten Einzugsgebieten der Schweiz eher hoch (*Rickli*, 2009), aber gemäss nordamerikanischen Studien nicht ungewöhnlich (z.B. *Kraft et al.*, 2011). Die Position und das Ausmass der Holzstufen zeigen einen starken Zusammenhang mit dem Auftreten von Rutschungsaktivität der Bacheinhänge und von Ufererosion entlang des Gerinnes. Sieben der neun Holzstufen bildeten sich höchstwahrscheinlich durch den seitlichen Eintrag eines einzelnen sperrigen Baumes, der sich vor Ort im Gerinne verkeilte und so zu einem Schlüsselholzstück wurde. Zwei Sperren (LJ1 und LJ7) entstanden hingegen oberhalb von grossen Felsblöcken, welche das Gerinne verengten und allmäthlich mittlere und grosse Holzstücke blockierten. Mit Ausnahme von LJ1, dessen Entstehung nicht ganz geklärt werden konnte, wurden alle Verklausungen um Schlüsselstücke oder -stämme gebildet, die aus dem ufernahen Waldbestand stammen und in unmittelbarer Nähe ihres ursprünglichen Standorts abgelagert wurden.

Die Jahrringanalyse ergab Verweilzeiten der 20 in Verklausungen liegenden grossen Holzstücke von 1 bis 13 Jahren bei einem Median von 4 Jahren (*Tabelle 2*). Nur zwei datierte Stücke gelangten vor 2007 ins Gerinne. Sie liegen beide in Holz-

Nr. Holzstufe	Stufenhöhe ⁽¹⁾ [m]	Holzvolumen ⁽²⁾ [m ³]	Anzahl Proben	Mittl. Alter Holzstücke [a]	Mittl. Verweilzeit Holzstücke [a]
LJ1	1.4	7.98	2	58.0	11.5
LJ2	1.1	1.41	2	71.0	1.5
LJ3	0.4	1.50	4	98.2	2.3
LJ4	1.9	2.12	2	72.0	4.5
LJ5	1.0	0.65	2	90.5	5.0
LJ6	1.1	0.51	2	94.0	3.0
LJ7	0.7	1.55	1	37.0	5.0
LJ8	1.6	5.70	3	55.3	3.7
LJ9	2.1	3.76	2	72.5	4.5

(1) Stufen und Becken mittels Längsprofildaten ermittelt (vgl. *Jochner, 2013*)

(2) Basierend auf Messungen von Länge (> 1 m) und Durchmesser von Holzstücken in den entsprechenden Holzstufen unter Annahme einer zylindrischen Form der Stücke

Tabelle 2. Eigenschaften der neun im Untersuchungsabschnitt liegenden Holzverklausungen (LJ).

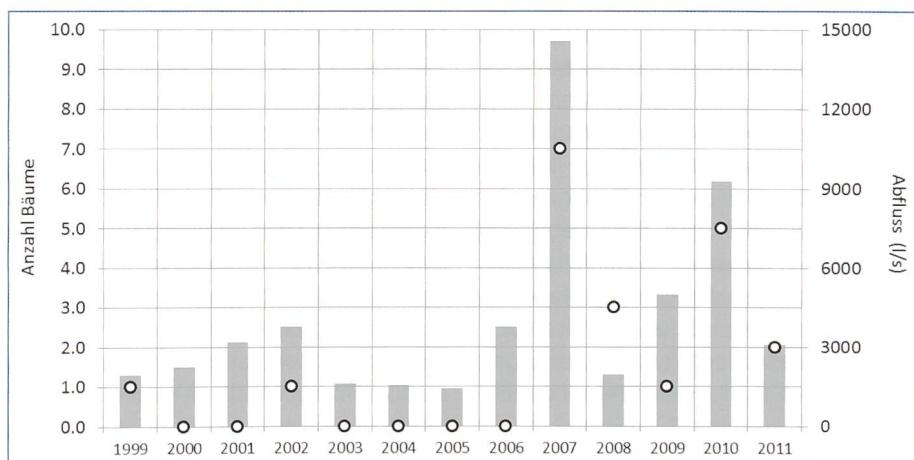


Bild 7. Zeitpunkte des Absterbens der Bäume, welche in den neun Verklausungen abgelagert sind, dargestellt durch die kleinen Kreise (vgl. *Tabelle 2*); die grauen Balken zeigen den registrierten Spitzenabfluss des Erlenbaches im entsprechenden Jahr an (sekundäre y-Achse).

stufe LJ1 und stammen von Bäumen, die 1999 und 2002 abgestorben sind. Besonders viele der Bäume, deren Stämme oder grosse Äste in den neun Holzverklausungen abgelagert sind, sind in den Jahren 2007 und 2010 abgestorben (sieben bzw. fünf Stücke, *Bild 7*). Holzteile von Bäumen, die in den Folgejahren von 2007 und 2010 abgestorben sind, sind deutlich weniger stark vertreten (2008: drei Stück; 2009: ein Stück; 2011: zwei Stück). Zwischen den Verweilzeiten der datierten Holzstücke im Gerinne und den verschiedenen Eigenschaften der entsprechenden Holzstufen (Lage im Untersuchungsabschnitt, Fläche, Holzvolumen oder -masse) konnten keinerlei signifikante Korrelationen festgestellt werden.

Der Eintrag von grossen Holzstücken in das Gerinnebett erfolgt vorzugsweise während ausserordentlichen Hochwasserereignissen. Dieser Zusammenhang wurde beispielsweise auch im Rahmen einer Untersuchung von zwei

voralpinen Wildbächen beobachtet (*Hitz, 2008*). Im Erlenbach entsprechen tatsächlich die Jahre, während denen die meisten Bäume abgestorben und ins Gerinne gelangt sind, den Jahren mit bedeutenden Hochwasserabflüssen infolge intensiver Gewitter (Juni 2007 und August 2010). Praktisch alles Holz, das vor dem Juni 2007 ins Gerinne eingetragen wurde, ist während dieses Hochwassereignisses mit einer statistischen Wiederkehrperiode von etwa 50 Jahren ausgeschwemmt worden. Das Ereignis im August 2010 (Wiederkehrperiode von etwa 20 Jahren) sorgte zwar nicht für eine komplette Ausschwemmung des im Gerinne gespeicherten Holzes, aber verursachte trotzdem den (teilweisen) Kollaps einiger Holzstufen. Die beiden seltenen Abflussereignisse führten indes nicht nur zum Austrag beträchtlicher Holzmengen, sondern aktivierten ebenfalls den Eintrag neuen Holzes. Durch die Erosion der Uferbereiche rutschten an mehreren Stellen die Bacheinhänge nach

und trugen so grosse Holzstücke und einige ganze Bäume ins Gerinne, wodurch sich neue Verklausungen bilden konnten.

5. Diskussion

5.1 Konzeptuelles Modell für Holzstufen

Unsere Beobachtungen im voralpinen Erlenbach können in einem einfachen konzeptuellen Modell zur Beschreibung des Auf- und Abbaus von Holzstufen zusammengefasst werden (Bild 8). Entlang von steilen rauen Gerinnen bilden sich Holzverklausungen generell um grosse, sperrige Schlüsselholzstücke (teilweise frische ganze Bäume, Stämme oder Teile davon, mit oder ohne Wurzelstock). Die verschiedenen grossen Stücke einer Holzstufe stammen weitgehend von Bäumen, die in der unmittelbaren Umgebung der Stufe abgestorben sind. Das angesammelte Holz versperrt den Abflussquerschnitt und führt zu einer deutlichen Abnahme der Fließgeschwindigkeiten und einem Rückgang der Transportkapazität von Geschiebe und organischem Material. Holzstufen stellen somit temporäre Ablagerungsstandorte dar, und wachsen mit der Zeit. Mit zunehmender Grösse einer Verklausung nimmt auch der stabilisierende Effekt auf die Ge-

rinneehänge im Oberlauf zu. Solange in einem steilen Einzugsgebiet nur kleine bis mittlere (z.B. statistisch jährliche) Abflussereignisse auftreten, entwickeln sich Holzstufen weiter und erhöhen aufgrund ihres Wachstums mit der Zeit auch ihre Kapazität, Material aufzunehmen und zu speichern (Bild 8a).

Erst wenn sich ein ausserordentliches Hochwasser ereignet, treten im Wildbachsystem grundlegende Veränderungen auf (vgl. auch Turowski et al., 2009). Für das Untersuchungsgebiet Erlenbach beobachtete man dies für Ereignisse im Sommer 2007 und Sommer 2010, als konvektive Niederschläge einen schnellen Abflussanstieg und hohe Spitzenwerte verursachten (Jährlichkeiten von 20 bis 50 Jahren). Ältere ebenfalls intensive Abflussereignisse sind aus den Jahren 1984 und 1995 bekannt (Turowski et al., 2009). Solche Hochwasser haben in Wildbächen zwei unterschiedliche Effekte: Erstens brechen sie Verklausungen auf, exportieren somit praktisch alle Holzstücke eines Abschnittes in den Vorfluter und führen zu intensivem Geschiebetransport (Bild 8b). Dabei kann der Kollaps einer Holzstufe die Stabilität von flussabwärts liegenden Stufen negativ beeinflussen und das Gerinne wird vorübergehend von einem Grossteil

des bisher gespeicherten Materials geräumt. Zweitens verursacht die Zerstörung der Stufen-Beckensysteme und die damit verbundene Erosion des Bachufers auch eine Destabilisierung der Hänge (Bild 8c). Die Reaktivierung und Verstärkung der Rutschprozesse (Schürch et al., 2006) verstärkt damit die Kopplungseffekte zwischen dem Gerinne und dem Hang. Es vergeht in der Regel nicht viel Zeit bis neue Stämme die Bildung neuer Holzstufen und somit einen neuen Zyklus einleiten (Bild 8d). Dieses konzeptuelle Modell erklärt die starke Abhängigkeit der im Erlenbach ermittelten Holztransportraten vom Abfluss und somit die beträchtliche Steilheit der ermittelten Eichkurve (Bild 4a).

Die Tatsache, dass im Erlenbach keine Murgänge auftreten und alles Geschiebematerial fluvial transportiert wird, stellt eine wichtige Voraussetzung für das in Bild 8 skizzierte Modell dar. In ähnlichen, allenfalls noch steileren Wildbächen ist es durchaus möglich, dass die Ausräumung des Gerinnes massgeblich durch Murgangereignisse erfolgt. In der Publikation von Jochner et al. (2015) werden zusätzlich die zeitlichen Charakteristiken des Schwemmholtzeintrags und -austrags im Erlenbach mit den Eigenschaften anderer Einzugsgebiete verglichen.

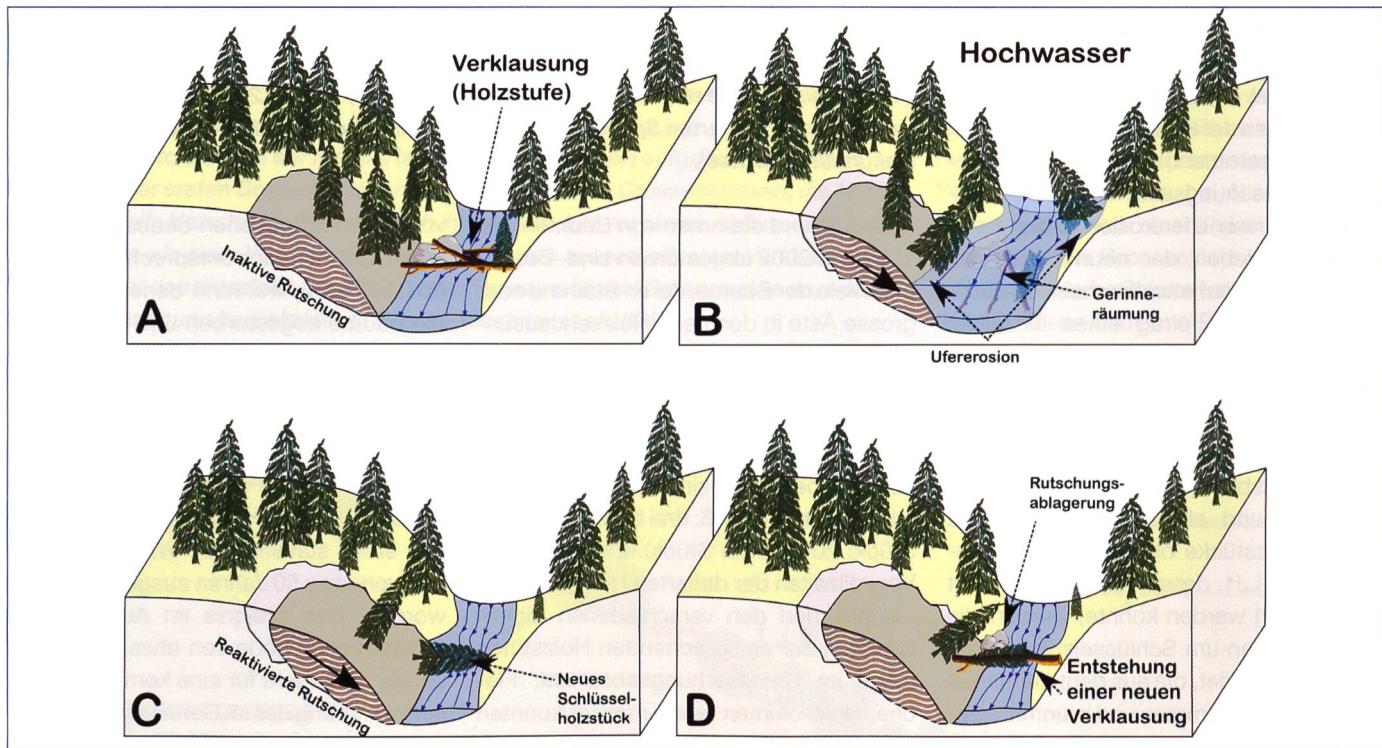


Bild 8. Darstellung des vierstufigen konzeptuellen Modells zur Beschreibung des Auf- und Abbaus von Holzstufen im Erlenbach.
 (a) Gerinnebett nach einer längeren Phase ohne ausserordentliches Hochwasser. Eine Holzstufe reduziert die Transportkapazität für Geschiebe und organischem Material und stabilisiert die Gerinneehänge. (b) Ein grosses Abflussereignis mobilisiert die Verklausung und transportiert alle Holzstücke aus dem Gerinneabschnitt. (c) Die Zerstörung von Holz- und Blockstufen sowie die erfolgte Seitenerosion während des Hochwassers reaktivieren die Rutsch- und Kriechbewegungen in den Seitenhängen. Neue sperrige Schlüsselstücke werden in das Gerinne eingetragen. (d) Um das Schlüsselstück sammelt sich weiteres Material: ein neuer Kreislauf der Holzdynamik beginnt (Jochner et al., 2015).

5.2 Bedeutung für die Bewirtschaftung kleiner Einzugsgebiete

Der ökologischen Funktion von Schwemmholt stehen oft die negativen Auswirkungen bei ausserordentlichen Hochwassereignissen gegenüber. Unsere Resultate sind für die Bewirtschaftung von Waldflächen in kleinen Gebirgseinzugsgebieten und den Unterhalt der entsprechenden steilen Gerinne relevant. Wie diese Studie zeigt, sammelt sich Schwemmholt und Geschiebe oftmals an Holzverklausungen an. Während seltener Abflussereignisse wird das Material in der Regel mobilisiert. Dadurch verschärft sich das Gefahrenpotenzial entlang des Gerinnes. Das Schadenpotenzial ist zwar üblicherweise in steilen Wilbach-Einzugsgebieten eher klein. Dies ändert sich jedoch wo die Bäche durch Siedlungen fliessen und zudem oft auch bei der Mündung in Gebirgsflüsse, wenn Geschiebeablagerungen das Gefälle reduzieren und dadurch bei Hochwasser Ausuferungen möglich werden.

In diesem Zusammenhang stellt sich generell die Frage, ob grosse Holzstücke aus Gerinnen und Holzstufen entnommen werden sollen oder nicht. Denn in Perioden mit kleinen und mittleren Ereignissen halten eben diese Holzstufen beträchtliche Geschiebemengen zurück und wirken stabilisierend auf die Bachsohle. Zudem verbessern sie die Habitatbedingungen, z.B. für Salmoniden wie die Bachforelle (*Salmo trutta fario*), indem sie die Fliessverhältnisse variieren und flachere Abschnitte gestalten (Gurnell et al., 1995). Sofern es die Situation an einem Wildbach erlaubt (geringes Schadenpotenzial im Einzugsgebiet, keine Schwachstellen in Siedlungsgebieten) sollte daher geprüft werden, ob Verklausungen im Gerinne der Biodiversität willen nicht toleriert werden können.

Wo jedoch Bäche mit Schwemmholt durch besiedelte Gebiete fliessen und Schwachstellen (Durchlass, Brücken usw.) vorhanden sind, müssen Massnahmen getroffen werden. Dazu zählen neben Bauwerken zum Rückhalt oder für das kontrollierte Weiterleiten von Schwemmholt auch Räumungen von Holz aus den Bachgerinnen sowie Pflegemassnahmen in den gerinnenahen Beständen mit dem Ziel, den Eintrag grosser Holzstücke in das Gerinne zu reduzieren und die Bestandesstabilität zu verbessern.

6. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

In einem ersten Schritt wurde im vorliegenden Beitrag eine Eichkurve zwischen Holz-

transportrate und Abfluss im Wildbacheinzugsgebiet des Erlenbaches erarbeitet. In Kombination mit der langjährigen Abflussganglinie lässt sich damit der Export von organischem Material aus dem Gebiet berechnen, für einzelne Jahre oder für individuelle Hochwassereignisse. Die Transportrate von Schwemmholt im Erlenbach weist eine starke Abhängigkeit vom Abfluss auf. Dies bedeutet, dass der Materialexport aus dem Gebiet hauptsächlich durch grosse bis sehr grosse Abflussereignisse bestimmt wird, was auch für andere kleine Einzugsgebiete beobachtet wurde. Zweitens werden in diesem Beitrag Tracerversuche im Erlenbach präsentiert. Diese legen eine deutliche Abhängigkeit der Holzmobilisierungsrate vom Spitzenabfluss und vom Hochwasserabflussvolumen nahe. Werden Holzstücke erst einmal in Bewegung gesetzt, weisen sie verschiedene Transportdistanzen auf, die durch die unterschiedliche Stücklänge beeinflusst werden. Kurze Hölzer werden dabei über grössere Distanzen transportiert als lange Hölzer, weil sie eher an den verschiedenen möglichen Hindernissen im Gerinne vorbeikommen und weniger blockiert werden.

Sehr effektive Blockaden stellen im Erlenbach die zahlreichen, charakteristischen Holzstufen dar. Unsere Resultate zeigen, dass grosse Tracerstücke (0.5 oder 1.0 m), die direkt in oder im unmittelbaren Umfeld einer Holzverklausung abgelagert wurden, während kleinen und mittleren Hochwasser praktisch nicht mehr mobilisiert werden. Bei kleinen Stücken (0.1 und 0.2 m) wurden zumindest einzelne Fälle beobachtet, bei denen in Holzstufen liegende Tracer weiter transportiert wurden. Unsere Untersuchungen legen nahe, dass ein grosser Export von Schwemmholt im Erlenbach nur im Falle eines Versagens bzw. eines Bruchs mehrerer Holzstufen möglich ist.

Pro 100 m Gerinnelänge treten im Untersuchungsgebiet durchschnittlich 2.8 Verklausungen auf, die in der Regel dort entstehen, wo die seitlichen Bacheinhänge regelmässig rutschen und grosse, sperrige Holzstücke oder ganze Stämme in den Erlenbach eintragen. Mit Hilfe einer Jahrringanalyse konnte festgestellt werden, dass die meisten in den Holzstufen gelagerten Holzstücke noch nicht lange Zeit im Gerinne liegen (Verweilzeiten zwischen 1 und 13 Jahren bei einem Median von 4 Jahren). Zudem starben auffällig viele Bäume, deren Holz in den Holzverklausungen liegt, in den Jahren 2007 und 2010 ab. Die grosse Mehrheit des Schwemmholtzes, das vor dem Juni 2007 ins Gerinne gelangte,

wurde während eines Hochwassereignisses mit einer statistischen Wiederkehrperiode von 50 Jahren ausgeschwemmt. Ein weiteres ausserordentliches Ereignis im August 2010 mit einer Wiederkehrperiode von 20 Jahren verursachte ebenfalls den Bruch einiger Holzstufen. Nach den grossen Abflussereignissen wurde jeweils der Eintrag neuen Holzes eingeleitet: infolge verstärkter Erosion der Uferbereiche rutschten vielerorts Bacheinhänge nach und trugen so neue sperrige Holzstücke ins Gerinne. Die Frage, ob grosse Holzstücke aus Bächen und deren Holzstufen vorsorglich entnommen werden soll oder nicht, muss immer differenziert betrachtet werden. Wo kein wesentliches Schadenpotenzial besteht, kann Schwemmholt ein Gerinne durch seine ökologische Funktionen aufwerten, ansonsten sind Hochwasserschutzmassnahmen zu treffen.

Verdankung

Die hier vorgestellten Untersuchungen wurden teilweise im Rahmen der SNF-Projekte 200021_124634/1 und 200021_137681/1 durchgeführt. Wir danken allen gegenwärtigen und ehemaligen Kolleginnen und Kollegen der Forschungseinheit Hydrologie und Massenbewegungen der Eidg. Forschungsanstalt WSL, insbesondere N. Federspiel, A. Klaiber, A. Ludwig, A. Pöhlmann, D. Hunziker, C. Schär, A. Stahel, K. Steiner, C. Wyss und M. Sieber für ihre wertvolle Unterstützung im Feld und Labor. Zudem danken wir T. Schneider, M. Conder und M. Fischer vom Geographischen Institut der Universität Bern für ihre Hilfe bei der Ausführung der Tracerstudie sowie D. Trappmann, J. Ballesteros und A. Sorg von dendrolab.ch für die fachliche Unterstützung und Beratung bei der dendrochronologischen Datierung. Fachliche Gespräche mit K. Bunte, D. Rickenmann, B. Fritschi, R. Hilton, N. Hovius, J. Kirchner, K. Krause und P. Schleppi, von welchen unsere Untersuchungen beträchtlich profitierten, seien hier ebenfalls verdankt.

Literatur

- Beer, A.R., Turowski, J.M., Fritschi, B., Rieke-Zapp, D. (2015): Field instrumentation for high-resolution parallel monitoring of bedrock erosion and bedload transport. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40, 530–541.
- Bezzola, G.R., Lange, D. (2003): Umgang mit Schwemmholt im Wasserbau. «Wasser Energie Luft», 95(11/12), 360–363.
- Bezzola, G.R., Hegg, C. (Eds.) (2008): Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 2 – Analyse von Prozessen, Massnahmen und Gefahrengrundlagen, Umwelt-Wissen Nr. 0825, Bundesamt für Umwelt BAU & Eidg. Forschungsanstalt WSL, Bern, 429 S.

- Bunte, K., Abt, S.R., Potyondy, J.P., Ryan, S.E. (2004): Measurement of coarse gravel and cobble transport using portable bedload traps. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130, 879–893.
- Bunte, K., Swingle K.W., Abt, S.R. (2007): Guidelines for using bedload traps in coarse-bedded mountain streams: Construction, installation, operation, and sample processing. RMRS-GTR-191, Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 91 S. (http://www.fs.fed.us/rm/pubs/rmrs_gtr191.html)
- Comiti, F., Andreoli, A., Lenzi, M.A., Mao, L. (2006): Spatial density and characteristics of woody debris in five mountain rivers of the Dolomites (Italian Alps). *Geomorphology*, 78, 44–63.
- Covi, S. (2008): Nachhaltiger Schutz entlang von Fliessgewässern. *Schweiz. Z. Forstwes.* 159(7), 198–204.
- Fisher, S.G., Likens, G.E. (1973): Energy flow in Bear Brook, New Hampshire: An integrative approach to stream ecosystem metabolism. *Eco-logical Monographs*, 43, 421–439.
- Frehner, M., Wasser, B., Schwitter, R. (2005): Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald. Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wäldern mit besonderer Schutzfunktion. Vollzug Umwelt, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern.
- Gattiker, E. (2014): Field measurements and analysis of bedload transport in an alpine torrent. Masterarbeit am Departement Umwelt-systemwissenschaften der Eidg. Technischen Hochschule Zürich. 49 S.
- Gurnell, A.M., Gregory, K.J., Petts, G.E. (1995): The role of coarse woody debris in forest aquatic habitats: implications for management. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 5, 143–166.
- Hegg, C., McArdell, B.W., Badoux, A. (2006): One hundred years of mountain hydrology in Switzerland by the WSL. *Hydrological Processes*, 20(2), 371–376.
- Hegglin, R. (2011): Beiträge zum Prozessverständnis des fluviyalen Geschiebetransports (Laborversuche und Feldmessungen am Erlenbach). Masterarbeit an der Philosophisch-naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Bern, 89 S.
- Hitz, O. (2008): Dendrogeomorphologische Prozessanalyse zum Schwemmhholzaufkommen und Rekonstruktion von Ufererosion zweier vor-alpiner Wildbachsysteme. Dissertation am Departement für Geowissenschaften der Universität Freiburg (Schweiz), Dissertation Nr. 1605.
- Hyatt, T.L., Naiman, R.J. (2001): The Residence Time of Large Woody Debris in the Queets River, Washington, USA. *Ecological Applications*, 11, 191–202.
- Jochner, M. (2013): Transport and Deposition of Woody Debris in a Mountain Stream. Masterarbeit an der Philosophisch-naturwissenschaftli- chen Fakultät der Universität Bern, 79 S.
- Jochner, M., Turowski, J.M., Badoux, A., Stoffel, M., Rickli, C. (2015): The role of log jams and exceptional flood events in mobilizing coarse particulate organic matter in a steep headwater stream. *Earth Surface Dynamics*, 3(3), 311–320.
- Kraft, C.E., Warren, D.R., Keeton, W.S. (2011): Identifying the spatial pattern of wood distribution in northeastern North American streams. *Geomorphology*, 135, 1–7.
- Lamarre, H., MacVicar, B.J., and Roy, A.G. (2005) Using Passive Integrated Transponder (PIT) Tags to Investigate Sediment Transport in Gravel-Bed Rivers. *Journal of Sedimentary Research*, 75, 736–741.
- MacVicar, B.J., Piégay, H., Henderson, A., Comiti, F., Oberlin, C., Pecorari, E. (2009): Quantifying the temporal dynamics of wood in large rivers: field trials of wood surveying, dating, tracking, and monitoring techniques. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34, 2031–2046.
- Mazzorana, B., Hübl, J., Zischg, A., Largiadèr, A. (2011): Modelling woody material transport and deposition in alpine rivers. *Natural Hazards*, 56(2), 425–449.
- Meier, S. (2009): Particles transport during floods in a steep mountain stream (a tracer experiment). Masterarbeit am Departement Bau, Umwelt und Geomatik der Eidg. Technischen Hochschule Zürich, 49 S.
- Rickenmann, D., McArdell, B.W. (2007): Continuous measurement of sediment transport in the Erlenbach stream using piezoelectric bedload impact sensors. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32, 1362–1378.
- 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.
- Rickli, C. (2009): Schwemmhholz in Wildbächen. In: Fachleute Naturgefahren FAN (Ed.) Wildbach-einzugsgebiete – Prozesse, Gefahren und Schutzmassnahmen. FAN-Tagung September 2009, 16 S.
- Ruiz-Villanueva, V., Bodoque, J.M., Díez-Herrero, A., Bladé, E. (2014): Large wood transport as significant influence on flood risk in a mountain village. *Natural Hazards*, 79, 967–987.
- Ruiz-Villanueva, V., Wyżga, B., Hajdukiewicz, H., Stoffel, M. (2015): Exploring large wood retention and deposition in contrasting river morphologies linking numerical modelling and field observations. *Earth Surface Processes and Landforms*, published online, doi:10.1002/esp.3832.
- Schäfer, K. (2012): Untersuchungen zum Sedimenthaushalt der Gornera (Kanton Wallis, Schweiz). Masterarbeit am Geographischen Institut der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 87 S.
- Schneider, J.M., Turowski, J.M., Rickenmann, D., Hegglin, R., Arrigo, S., Mao, L., Kirchner, J.W. (2014): Scaling relationships between bed load volumes, transport distances, and stream power in steep mountain channels. *Journal of Geophysical Research*, 119(3), 533–549.
- Schürch, P., Densmore, A.L., McArdell, B.W., Molnar, P. (2006): The influence of landsliding on sediment supply and channel change in a steep mountain catchment, *Geomorphology*, 78, 222–235.
- Stoffel, M., Corona, C. (2014): Dendroecological Dating of Geomorphic Disturbance in Trees. *Tree-Ring Research*, 70(1), 3–20.
- Turowski, J.M., Yager, E.M., Badoux, A., Rickenmann, D., Molnar, P. (2009): The impact of exceptional events on erosion, bedload transport and channel stability in a step-pool channel. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34, 1661–1673.
- Turowski, J.M., Badoux, A., Bunte, K., Rickli, C., Federspiel, N., Jochner, M. (2013): The mass distribution of coarse particulate organic matter exported from an alpine headwater stream. *Earth Surface Dynamics*, 1(1), 1–29.
- Wallace, J.B., Whiles, M.R., Eggert, S., Cuffney, T.F., Lugthart, G.H., Chung, K. (1995): Long-term dynamics of coarse particulate organic matter in three Appalachian mountain streams, *Journal of the North American Bentholological Society*, 14(2), 217–232.
- Warren, D.R., Kraft, C.E., Keeton, W.S., Nunery, J.S., Likens, G.E. (2009): Dynamics of wood recruitment in streams of the northeastern US. *Forest Ecology and Management*, 258, 804–813.
- Wohl, E. (2013): Floodplains and wood. *Earth-Science Reviews*, 123, 194–212.

Anschrift der Verfasser

Alexandre Badoux [1], Jens M. Turowski [1], Matthias Jochner [2,1], Markus Stoffel [3,4], Christian Rickli [1]

[1] Eidgenössische Forschungsanstalt WSL, Zürcherstrasse 111, CH-8903 Birmensdorf

[2] Institut für Terrestrische Ökosysteme, ETH Zürich, Universitätstrasse 22, CH-8092 Zürich

[3] Dendrolab.ch, Institut für Geologie, Universität Bern, Baltzerstrasse 1+3, CH-3012 Bern

[4] Institut des Sciences de l'Environnement, Université de Genève, Boulevard Carl-Vogt 66, CH-1205 Genève.