Gefahrenbeurteilung von Schwemmholzverklausungen in Flüssen. Teil 2, Aufstau

Autor(en): **Schalko, Isabella / Schmocker, Lukas / Weitbrecht, Volker**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria**

Band (Jahr): **111 (2019)**

Heft 2

PDF erstellt am: **28.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-941517

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Gefahrenbeurteilung von Schwemmholzverklausungen in Flüssen: Teil 2 – Aufstau

Isabella Schalko, Lukas Schmocker, Volker Weitbrecht, Robert Boes

Zusammenfassung

Während Hochwasserereignissen kann Schwemmholz an Engstellen wie Brücken oder auch bewusst bei Schwemmholzrechen zu Verklausungen führen. In beiden Fällen führt eine Verklausung zu einem Aufstau infolge des blockierten Fliessquerschnitts. Im Rahmen einer Doktorarbeit wurden Modellversuche an der VAW durchgeführt, um den Aufstau infolge Schwemmholzverklausungen zu bestimmen. Das Versuchsprogramm kann in drei Serien A-C aufgeteilt werden. In Serie A wurde eine vordefinierte, rechteckförmige Verklausung untersucht. In den Serien B und C wurde eine natürliche Verklausung mit fester bzw. beweglicher Sohle analysiert, um den Einfluss der Verklausungsform und die Wechselwirkung zwischen Aufstau und Kolk zu bestimmen. Die Zuflussbedingungen, die Schwemmholz- sowie die Verklausungseigenschaften wurden in allen Versuchsserien systematisch variiert. Basierend auf den Ergebnissen, ist der Aufstau primär von der Zufluss-Froude-Zahl, der Kompaktheit der Verklausung und dem Anteil Feinmaterial abhängig. Der Aufstau kann mit einer neuen Abschätzgleichung quantifiziert werden. Die Verklausungsform kann zusätzlich mit dem Verklausungsformfaktor berücksichtigt werden. Weiter kann das charakteristische Schwemmholzvolumen, das zum massgebenden Aufstau führt, ermittelt werden und so der Einfluss des Holzvolumens auf den Aufstau berechnet werden. Die Abschätzgleichungen verbessern die Dimensionierung von Schwemmholzrechen und erleichtern die Gefahrenbeurteilung infolge Verklausungen an Engstellen.

1. Einleitung

Schwemmholz ist ein wichtiger Bestandteil eines Flussökosystems. Holzablagerungen können die geomorphologischen und hydraulischen Bedingungen positiv beeinflussen und dienen als wichtiger Lebensraum für Kleintiere und Fische. Bei Hochwasserereignissen kann transportiertes Schwemmholz jedoch an Brücken oder Wehren zu Verklausungen führen *(Bild 1)*. Die Verringerung des Fliessquerschnitts führt einerseits flussaufwärts zu einem Aufstau mit möglichen Ausuferungen und andererseits zu Kolkerscheinungen oder Schäden am Bauwerk selbst. Vergangene Hochwasserereignisse im alpinen Raum haben die negativen Auswirkungen einer Schwemmholzverklausung auf die Hochwassersituation aufgezeigt (*Lange* und *Bezzola*, 2006; *Bezzola* und *Hegg*, 2007; *VAW*, 2008; *Waldner et al.*, 2009; *Lucía et al.*, 2015; *Steeb et al.*, 2017). Für die Gefahrenbeurteilung an Brücken und Wehren und mögliche Überflutungen ist die Abschätzung des Aufstaus somit essenziell. Eine zusätzliche Wechselwirkung zwischen Verklausung und Aufstau ist durch eine mögliche Kolkbildung am verklausten Querschnitt gegeben. In Abhängigkeit der Sohlbeschaffenheit bzw. der Bauwerksfundation kann eine Kolkbildung den resultierenden Aufstau zusätzlich beeinflussen bzw. reduzieren. Um Schwemmholz kontrolliert zurückzuhalten und die Verklausungsgefahr zu reduzieren, können Schwemmholzrechen stromaufwärts von Siedlungs- oder Industriegebieten errichtet werden (*Schmocker* und *Weitbrecht*, 2013). Die gewollte Verklausung an Schwemmholzrechen führt ebenfalls zu einem Aufstau, der die notwendige Stabhöhe des Rechens sowie die Uferhöhen bestimmt. Sowohl für die Gefahrenbeurteilung als auch für die Dimensionierung von Rückhaltebauwerken ist der Aufstau somit der massgebende Parameter.

Frühere Studien zu den Auswirkungen von Schwemmholzverklausungen und dem resultierenden Aufstau wurden hauptsächlich für ausgewählte Rechenstandorte und Schwemmholzabmessungen durchgeführt (*Knauss*, 1995; *Rimböck*, 2003; *Schmocker* und *Hager*, 2013; *Hartlieb*, 2015). Die Schwemmholzzusammensetzung und das Schwemmholzvolumen können mit den vorhandenen Abschätzgleichungen nicht berücksichtigt werden. Ebenso wurde der massgebende Einfluss von Ästen und Blättern in einer Verklausung noch nicht untersucht. Die Wechselwirkung zwischen Aufstau und Kolk aufgrund einer Schwemmholzverklausung an einem Rechen wurde in den bisherigen Studien vernachlässigt.

Im Rahmen einer Doktorarbeit an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) wurden die Auswirkungen von Schwemmholzverklausungen mit Hilfe von Modellversuchen untersucht (*Schalko*, 2018). In Teil 1 dieser Ausgabe werden die Ergebnisse zur Verklausungswahrscheinlichkeit bei Brückenpfeilern vorgestellt (*Schalko et al.*, 2019). In diesem Beitrag (Teil 2) werden die Resultate der Modellversuche zum Aufstau

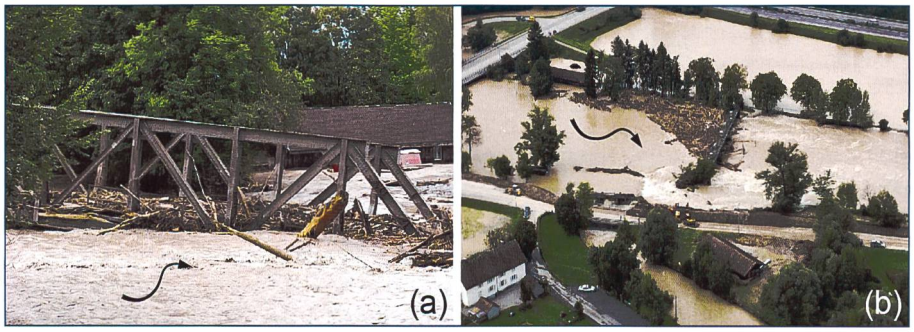


Bild 1. Schwemmholzverklausungen beim Hochwasserereignis 2005 (a) Eisenbahnbrücke Sarnen (Foto: Tiefbauamt Kanton OW) und (b) Wehr Perlen an der Reuss (Foto: Schweizer Luftwaffe).

infolge Schwemmholzverklausungen vorgestellt. Für die Anwendbarkeit der Abschätzgleichungen werden Empfehlungen zusammengefasst, um das Vorgehen in der Praxis zu erleichtern. Die Doktorarbeit wurde vom BAFU finanziert und war Teil des interdisziplinären Forschungsprojekts *WoodFlow*: Schwemmholzmanagement an Fliessgewässern (*Ruiz-Villanueva et al.*, 2016).

2. Methodik

Der Aufstau infolge Schwemmholzverklausung wurde im Rahmen von drei Versuchsserien A-C mit Hilfe von Laborversuchen analysiert (*Bild 2*). Das verklauste Bauwerk (Brücke, Wehr, Rechen usw.) wurde im Modell vereinfacht durch eine Verklausung zwischen zwei oder an einer Rechenreihe simuliert. Somit können die Resultate auch für die Berechnung des Aufstaus an einem Schwemmholzrechen verwendet werden.

Serie A: Vordefinierte Verklausung mit fester Sohle

In Serie A wurde in vereinfachter Form (*Bild 2*) der Aufstau verschiedener Schwemmholzkonfigurationen bestimmt (*Schalko et al.*, 2018). Um möglichst viele Parameter individuell zu variieren, wurde die Verklausung zwischen zwei Rechenreihen vordefiniert eingebaut. Für den Nachweis der Modellähnlichkeit, insbesondere für die Auswirkung von Blättern und Ästen in einer Verklausung, d. h. des Feinmaterials (*FM*), wurden drei unterschiedliche geometrische Massstäbe gewählt (Massstabsfaktor λ = 6, 30, 50). Die Modellversuche wurden in zwei verschiedenen Kanälen mit Rechteckprofil an der VAW durchgeführt. Die hydraulischen Anfangsbedingungen sowie die Verklausungseigenschaften wurden systematisch variiert. Die Anfangsbedingungen sind die Anfangswassertiefe h_o, der Durchfluss Q_o und die Zufluss-Froude-Zahl $F_o = Q_o/(B^2 g h_o^3)^{0.5}$, mit B = Kanalbreite und g = Erdbeschleunigung. Die Verklausungseigenschaften werden mit der Verklausungslänge L_A (Abstand zwischen den beiden Rechenreihen), dem Holzdurchmesser d_L, dem Auflockerungsfaktor $a = V_l/V_s$ (*Lange* und *Bezzola*, 2006), mit V_l = Lockervolumen und V_s = Festvolumen, und dem Volumenanteil Feinmaterial *FM* (Äste und Blätter) beschrieben. Für das Modellholz wurde für alle Modellmassstäbe echtes Holz verwendet und die Abmessungen basierend auf Erfahrungswerten von früheren Hochwasserereignissen gewählt (*Bezzola* und *Hegg*, 2007). Das Feinmaterial wurde im Massstab 1:6 mit Weidenästen und Tannenzweigen und im Massstab 1:30 und 1:50 mit zerschnittenen Plastiktannenbäumen modelliert. Das Feinmaterial wurde als Volumenprozent dem Festvolumen V_s zugegeben und variierte zwischen ≈2 bis 17 %, basierend auf Empfehlungen nach *Manners et al.* (2007). *Bild 3* gibt einen Überblick über das verwendetet Holz. Bei der Versuchsdurchführung wurde jeweils die Abflusstiefe h_o ohne Holz sowie die Abflusstiefe h mit der eingebauten Verklausung mit Ultraschallsensoren (UDS) gemessen und daraus der Aufstau $\Delta h = h - h_o$ bestimmt.

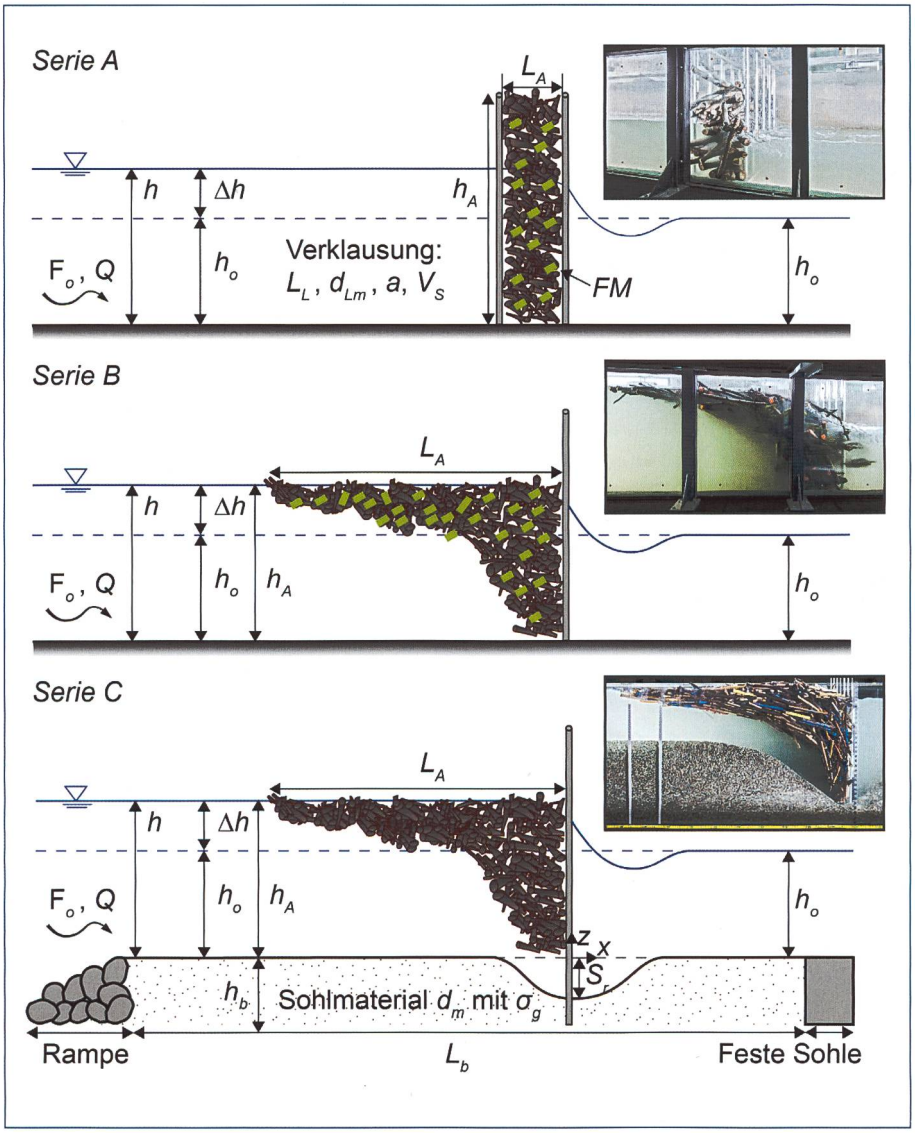


Bild 2. Versuchsaufbau und Notation der Modellversuchsserien A–C. Die Zuflussbedingungen (Zufluss-Froude-Zahl F_o, Zufluss-Wassertiefe h_o und Durchfluss Q) wurden ohne Verklausung gemessen. Die Wassertiefen wurden mit Ultraschallsensoren gemessen. Der Aufstau ergibt sich zu $\Delta h = h - h_o$. Die Verklausungseigenschaften umfassen Verklausungslänge L_A, Verklausungshöhe h_A, Holzlänge L_L, mittlerer Holzdurchmesser d_{Lm}, Auflockerungsfaktor a, Feinmaterial FM und Festvolumen V_s. Die Eigenschaften des Sohlmaterials sind Mächtigkeit h_b und Länge L_b der beweglichen Sohle, mittlerer Korndurchmesser d_m, Standardabweichung des Sohlmaterials σ_g und resultierende Kolktiefe am Rechen $S_r \approx S_{max}$ (maximale Kolktiefe).

Serie B: Natürliche Verklausung mit fester Sohle

In Serie B (*Bild 2*) wurde eine Rechenreihe entfernt und das Schwemmholz nicht vordefiniert eingebaut, sondern schrittweise in 10 %-Anteilen von V_s über die Kanalbreite verteilt zugegeben. Somit konnte sich in Abhängigkeit der Zuflussbedingungen und Schwemmholzeigenschaften die Verklausung natürlich ausbilden. Der Aufstau am Rechen wurde nach Zugabe jedes einzelnen Schwemmholzpakets mit UDS gemessen. Die Modellversuche wurden für zwei Massstäbe (1:6 und 1:30) sowie verschiedene F_o und *FM*-Anteile durchgeführt. Während der meisten Versuche wurde das gleiche Festvolumen wie in Serie A zugegeben (V_s = 0.005 m^3 für 1:30

und $V_s = 0.240\ m^3$ für 1:6), um einen direkten Vergleich des resultierenden Aufstaus zu ermöglichen.

Serie C: Natürliche Verklausung mit beweglicher Sohle

In Serie C *(Bild 2)* wurde wie in Serie B eine natürliche Verklausung mit einer Rechenreihe untersucht und das Schwemmholz schritt- bzw. paketweise zugegeben (5–10 % von V_s). Die Modellversuche wurden für einen Massstab 1:30 durchgeführt und das Festvolumen zu $V_s = 0.023\ m^3$ erhöht. Um neben dem Aufstau auch den Einfluss möglicher Kolkerscheinungen zu untersuchen, wurden die Modellversuche mit einer beweglichen Sohle durchgeführt. Während der Versuche fand keine Geschiebezugabe statt. Für das Sohlmaterial wurde Einkornmaterial verwendet und der mittlere Korndurchmesser d_m variiert. Die Anfangsbedingung (Index *IC*) für das Sohlmaterial wurde als schwacher Transport definiert und die dimensionslose Schubspannung mit $\theta_{IC} = 0.04$ bzw. $\theta_{IC} = 0.05$ festgelegt. Ähnlich wie in Serie B wurde der Aufstau am Rechen nach Zugabe jedes einzelnen Schwemmholzpakets gemessen. Dabei wurde jeweils gewartet, bis sich der Kolk ausgebildet hatte und keine Sohlenänderung mehr stattfand. Nach Zugabe der gesamten Schwemmholzmenge wurde zusätzlich die Sohltopografie mit einem Laser-Distanz-Sensor (LDS) in einem 2.5 × 2.5-cm-Raster aufgenommen. In *Bild 3* sind Fotos des Modellholzes und Einkornmaterials dargestellt.

Das Testprogramm der Serien A–C ist in *Tabelle 1* zusammengefasst. In allen Versuchsserien wurden Reproduzierbarkeitsversuche durchgeführt, indem ein Versuch mit den gleichen Randbedingungen zweimal wiederholt wurde. Die Reproduzierbarkeit der Modellversuche konnte mit ± 15 % bestätigt werden.

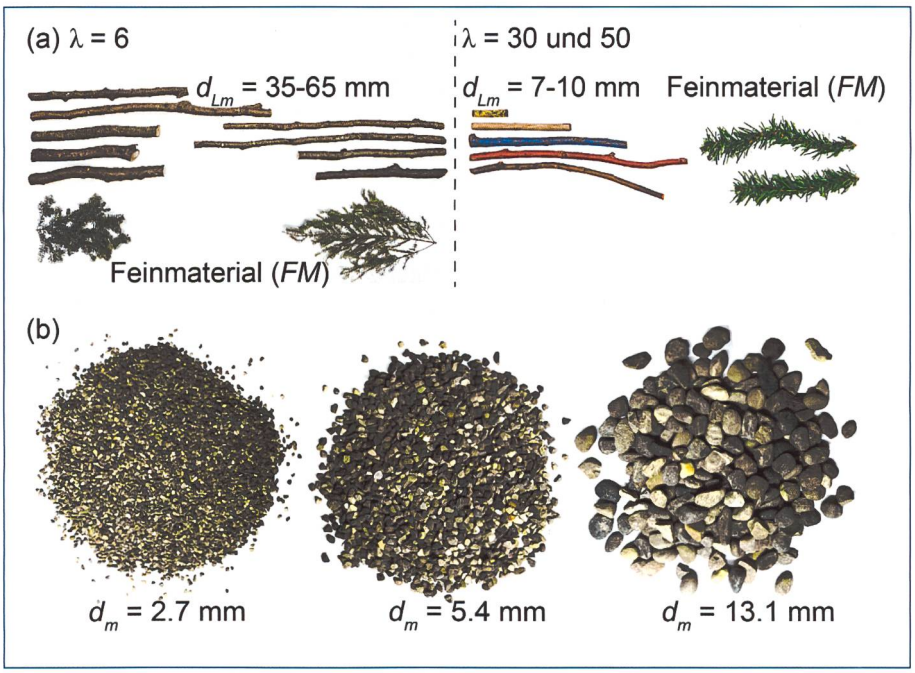


Bild 3. Beispiele von (a) Modellschwemmholz und Feinmaterial; (b) Modellsediment.

Serie	Tests	Massstabsfaktor	Parameter	Bereich
A	A1-A15	30	Reproduzierbarkeit (Repr.)	–
	A16-A21		Zuflussbedingungen (h_o, v_o, F_o)	F_o = 0.2-1.4
	A22-A29		Auflockerungsfaktor *a*	*a* = 2.5-4.3
	A30-A38		Verklausungslänge L_A	L_A = 0.05-0.20 m
	A39-A43		Holzdurchmesser d_L	d_L = 4-65 mm
	A44-A66		Anteil an Feinmaterial *FM*	*FM* = 0-8%
	A67-A74	6	Repr.	–
	A75-A94		Anteil an Feinmaterial *FM*	*FM* = 0-17%
	A95-A106	50	Bestimmung Modelleffekte	–
B	B1-B3	6	Repr.	–
	B4		Zuflussbedingungen	–
	B5-B6		Anteil an Feinmaterial *FM*	*FM* = 0-16%
	B7-B9	30	Zuflussbedingungen (h_o, v_o, F_o)	F_o = 0.3-1.5
	B10		Anteil an Feinmaterial *FM*	*FM* = 0-8%
C	C1-C7	30	Repr. und Sohlmaterial d_m	–
	C8-C12		Sohlmaterial d_m	d_m = 2.7-13.1 mm

Tabelle 1. Testprogramm der Serien A–C mit untersuchten Parametern und Bereich (weitere Details siehe Schalko, 2018).

3. Ergebnisse

3.1 Aufstau infolge Schwemmholzverklausung

Die vordefinierte Schwemmholzverklausung in Serie A ermöglichte die Variation der Zuflussbedingungen sowie der Schwemmholzeigenschaften. Die Einflüsse der verschiedenen Parameter auf den Aufstau Δh können wie folgt zusammengefasst werden:

Unter der Annahme einer konstanten Wassertiefe h_o ist die Zufluss-Fliessgeschwindigkeit v_o für höhere F_o grösser. Bei höheren F_o nehmen die Fliessverluste aufgrund der Verklausung stärker zu und es kommt zu einem höheren Aufstau Δh (*Bild 4a* versus *b*).

Die Kompaktheit einer Verklausung kann mit dem Auflockerungsfaktor *a* beschrieben werden, wobei ein kleiner Auflockerungsfaktor einer kompakten Verklausung und ein grosser Auflockerungsfaktor einer lockeren Verklausung entspricht. Der Auflockerungsfaktor ist vergleichbar mit dem Durchlässigkeitsbeiwert in Grundwasserströmungen. Eine kompakte Verklausung repräsentiert einen grösseren Fliesswiderstand und führt somit zu einem höheren Aufstau. Der Aufstau Δh nimmt somit mit abnehmendem *a* zu (*Bild 5a* versus *b*).

Der Einfluss der Schwemmholzeigenschaften wurde mit Hilfe der Variation von Holzdurchmesser d_L und Verklausungslänge L_A (Abstand zwischen den beiden Rechenreihen) untersucht. Bei kleineren d_L nimmt die Anzahl an Hölzern in einer Verklausung zu. Somit wird die Strömung in der Verklausung häufiger und stärker umgelenkt, die Reibungsverluste nehmen zu und der Aufstau wird grösser. Weiter stellen Verklausungen mit grösserem L_A einen grösseren Fliesswiderstand dar und führen somit ebenfalls zu einem grösseren Aufstau. Der Einfluss des Holzdurchmessers und der Verklausungslänge kann mit dem Umlenkungsfaktor $u = L_A/d_L$ zusammengefasst werden. Somit nimmt

der Aufstau Δh mit zunehmendem Umlenkungsfaktor u zu.

Der Anteil an Feinmaterial *FM* wurde sowohl im Massstab 1:30 als auch 1:6 untersucht. Je grösser der Anteil an *FM*, desto kompakter ist die Verklausung. Damit wird die Strömung stärker umgelenkt, woraus sich ein grösserer Widerstand ergibt. Der Aufstau Δh nimmt mit zunehmendem Anteil *FM* zu. Bei den Modellversuchen im Massstab 1:6 wurde weiter der Einfluss verschiedener Arten von Feinmaterial analysiert (*Bild 6a* und *b* [Tanne]versus *c* und *d* [Weide]). Die Unterschiede des Aufstaus mit Tannenzweigen oder Weidenästen lagen innerhalb der Reproduzierbarkeit.

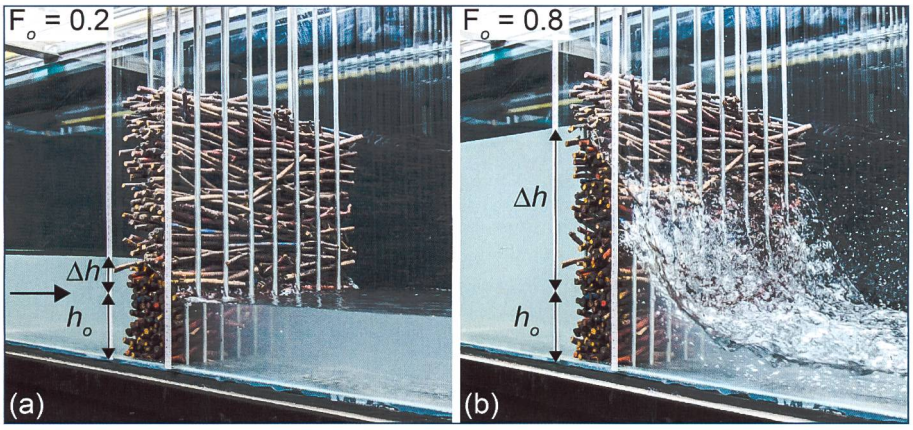


Bild 4. Aufstau Δh infolge Schwemmholzverklausung für (a) $F_o = 0.20$ versus (b) $F_o = 0.80$ ($h_o = 0.10$ m, $a = 3.3$, $L_A = 0.10$ m und $d_L = 7$ mm).

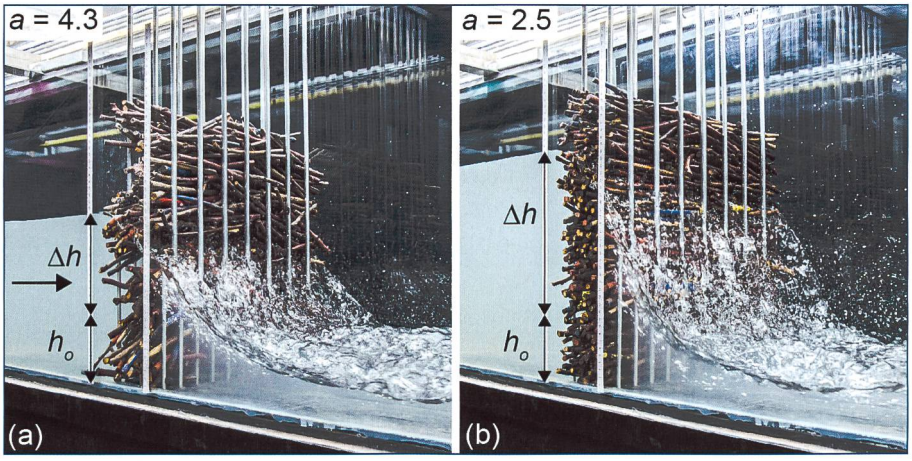


Bild 5. Aufstau Δh infolge Schwemmholzverklausung für (a) $a = 4.3$ versus (b) $a = 2.5$ ($h_o = 0.10$ m, $F_o = 0.8$, $L_A = 0.10$ m und $d_L = 7$ mm).

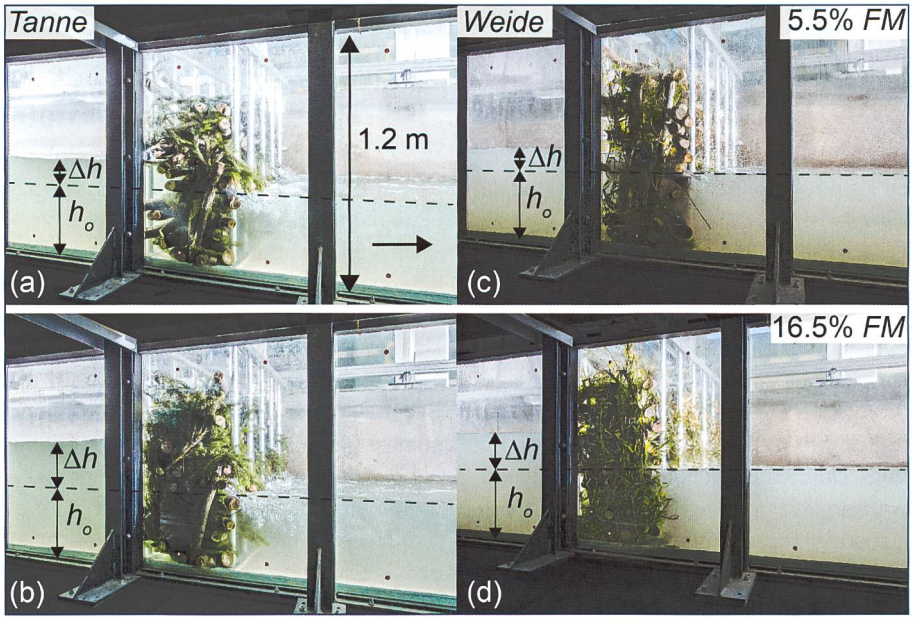


Bild 6. Aufstau Δh infolge Schwemmholzverklausung mit zunehmendem FM-Anteil ($F_o = 0.3$, $h_o = 0.36$ m, $a = 4.2$, $L_A = 0.50$ m, und $d_L = 65$ mm); (a–b) Tannenzweige und (c–d) Weidenäste.

Der relative Aufstau $\Delta h/h_o$ infolge einer vordefinierten Schwemmholzverklausung (Serie A) nimmt zu mit:

- zunehmender Zufluss-Froude-Zahl F_o *(Bild 4)*,
- abnehmendem Auflockerungsfaktor *a* bzw. für kompaktere Verklausungen *(Bild 5)*,
- abnehmendem Holzdurchmesser d_L,
- zunehmender Verklausungslänge L_A in Strömungslängsrichtung (SH-Volumen) und
- zunehmendem Anteil an Feinmaterial *FM (Bild 6)*.

Der Auflockerungsfaktor hat dabei den grössten Einfluss auf den Aufstau, gefolgt von der Zufluss-Froude-Zahl und dem Feinmaterial. Im Vergleich dazu haben die Verklausungslänge und der Holzdurchmesser einen geringen Einfluss auf den Aufstau.

In Serie A wurde weiter die Modellähnlichkeit mit Hilfe einer Modellfamilie untersucht (λ = 6, 30, 50). Mögliche Modelleffekte können abgeleitet werden, falls die Ergebnisse für die Versuche im kleinen Massstab (λ = 30 oder 50) stark von den Ergebnissen der Versuche ähnlich dem Prototyp abweichen (λ = 6). Die Versuchsergebnisse wurden auf Prototyp-Abmessungen hochskaliert. Für die gleichen Randbedingungen variierten die mittleren Abweichungen des Aufstaus für die verschiedenen Massstäbe zwischen 2.8 und 22 %. Da kein Trend der Abweichungen abgeleitet werden konnte und die Abweichungen meist im Bereich der Reproduzierbarkeit liegen, kann angenommen werden, dass mögliche Massstabseffekte bei den kleinen Massstäben vernachlässigt werden können.

Im Rahmen von Serie A konnte der Einfluss verschiedener Parameter auf den Aufstau stark vereinfacht untersucht werden. Die Serien B und C dienten dazu, den Einfluss der Verklausungsform und der Kolkbildung auf den Aufstau abzuschätzen. In *Bild 7a–c* ist eine typische Entwicklung einer natürlichen Verklausung ($V_{s,Prototyp}$ = 540 m^3) mit fester Sohle (Serie B) und der resultierende Aufstau für zunehmendes relatives Holzvolumen ($V_{s,rel} = V_s/(Bh_o^2)$) dargestellt. Dabei bezeichnet V_s das erforderliche Festvolumen, um einen idealisierten rechteckförmigen Querschnitt mit den Massen $B \times h_o \times h_o$ zu blockieren. Die ersten 10–20 % des zugegebenen relati-

ven Schwemmholzvolumens verklausen am Rechen auf Höhe des Wasserspiegels. Sobald der obere Teil des Rechens blockiert ist, nimmt die Fliessgeschwindigkeit unterhalb der Verklausung zu und die Strömung wird nach unten abgelenkt. Zusätzliches Schwemmholz verklaust somit den unteren Teil des Rechens. Bis zu einem relativen Schwemmholzvolumen von $V_{s,rel} \leq 40\,\%$ *(Bild 7a)* kann die Verklausungsform als rechteckförmig beschrieben werden. Sobald die Verklausung den gesamten Querschnitt blockiert *(Bild 7c)*, verändert sich die Verklausungsform zu trapezförmig bzw. dreieckförmig. Zusätzliches Schwemmholz bildet nun einen Schwemmholzteppich, und der resultierende Aufstau erhöht sich nur noch geringfügig *(Bild 7c)* im Vergleich zur Initialverklausung *(Bild 7a)*. Bei einer natürlichen Verklausung mit fester Sohle (Serie B) ist die blockierte Fläche kleiner und somit der resultierende Aufstau bei gleicher Schwemmholzmenge kleiner im Vergleich zu den Resultaten aus Serie A.

Die Entwicklung einer natürlichen Verklausung mit beweglicher Sohle wurde in Serie C analysiert, eine Fotoserie ist in *Bild 7d–f* dargestellt. Mit zunehmendem Schwemmholzvolumen nimmt der Kolk am Rechen zu (*Bild 7d* versus *Bild 7f*). Dadurch ist im Vergleich zur Anordnung mit fester Sohle die Querschnittsfläche unterhalb der Verklausung grösser und die Schwemmholzverklausung kann sich sowohl vertikal am Rechen als auch horizontal in Form eines Schwemmholzteppichs ausbreiten. Aufgrund der grösseren freien Fliessfläche unterhalb der Verklausung reduziert sich der resultierende Aufstau im Vergleich zu den Versuchen mit einer festen Sohle.

3.2 Abschätzgleichung: Aufstau infolge Schwemmholzverklausung

Um die Anwendbarkeit der Ergebnisse zu ermöglichen, wurden die massgebenden Parameter mittels Dimensionsanalyse (*Schalko*, 2018) in einem dimensionslosen Aufstaufaktor LW_A zusammengefasst. Der relative Aufstau $\Delta h/h_o$ kann basierend auf den Modellversuchen von Serie A mit einer linearen Beziehung für $F_o = 0.2$–1.4 (Parameterbereich in *Tabelle 1*) mit $R^2 = 0.95$ wie folgt beschrieben werden *(Bild 8)*:

$$\frac{\Delta h}{h_o} = 5.4 LW_A = 5.4 \frac{F_o u^{1/3}(9FM+1)}{a^{4/3}} = 5.4 \frac{F_o (L_A/d_L)^{1/3}(9FM+1)}{a^{4/3}} \qquad (1)$$

Das Verhältnis von Verklausungslänge und Holzdurchmesser wird mit dem Umlenkungsfaktor u beschrieben. Die Verklausungslänge L_A kann vereinfacht mit Hilfe einer rechteckförmigen Verklausung (Flussbreite B) und unter der Berücksichtigung von $a = V_l/V_s$ ermittelt werden zu:

$$L_A = \frac{V_l}{h_o B} \text{ und } u = \frac{L_A}{d_L} = \frac{V_l}{h_o B d_L} = \frac{a V_s}{h_o B d_L} \qquad (2)$$

Die verschiedenen Verklausungsformen aus den Serien A–C *(Bild 2)* können mit dem Verklausungsformfaktor f_A berücksichtigt werden. Somit kann der relative Aufstau $\Delta h/h_o$ wie folgt bestimmt werden:

$$\frac{\Delta h}{h_o} = 5.4 f_A \frac{F_o (a V_s/(h_o B d_L))^{1/3}(9FM+1)}{a^{4/3}} = 4 f_A \frac{F_o (V_s/(h_o B d_L))^{1/3}(9FM+1)}{a} \qquad (3)$$

mit

$f_A = 1.00$ für eine vordefinierte Verklausung mit fester Sohle (Serie A),

$f_A = 0.55$ für eine natürliche Verklausung mit fester Sohle (Serie B) und

$f_A = 0.30$ für eine natürliche Verklausung mit beweglicher Sohle (Serie C).

Gemäss Gl. (1) und Gl. (3) haben der Auflockerungsfaktor a, die Zufluss-Froude-Zahl F_o und der Anteil an Feinmaterial FM den grössten Einfluss auf Δh. Für ein gegebenes Schwemmholzvolumen V_s kann $\Delta h/h_o$ mit Hilfe einer Sensitivitätsanalyse von f_A berechnet werden; f_A sollte wie folgt gewählt werden:

- Worst-Case-Szenario: Um den grössten Aufstau zu ermitteln, wird eine rechteckförmige Verklausung angenommen, d.h. $f_A = 1$ (Gl. (1)).
- Average-Case-Szenario: Bei Bauwerken, an denen eine Kolkbildung aufgrund der Fundation verhindert wird, soll eine natürliche Verklausung mit

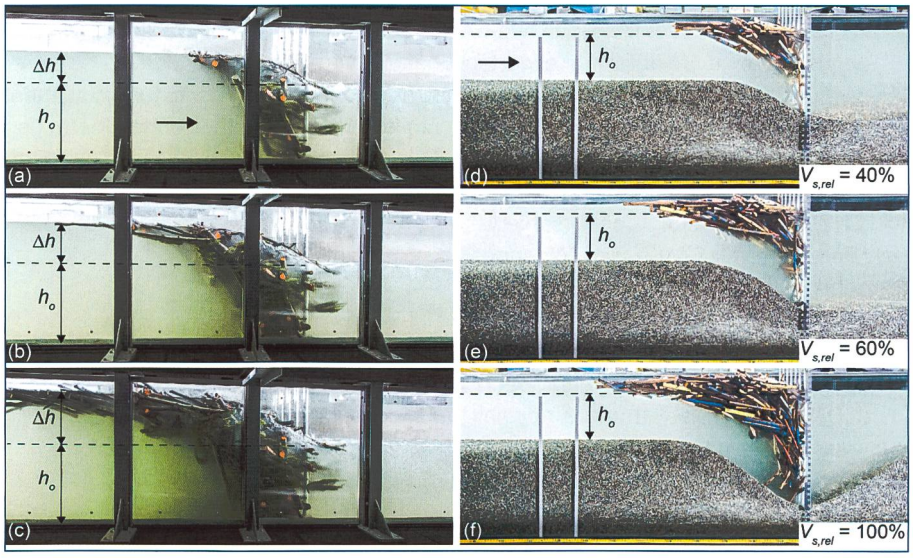


Bild 7. Natürliche Schwemmholzverklausung mit $V_{s,rel}$ = 40–100 %; (a)–(c) feste Sohle und λ = 6 (Serie B) und (d)–(f) bewegliche Sohle und λ = 30 (Serie C).

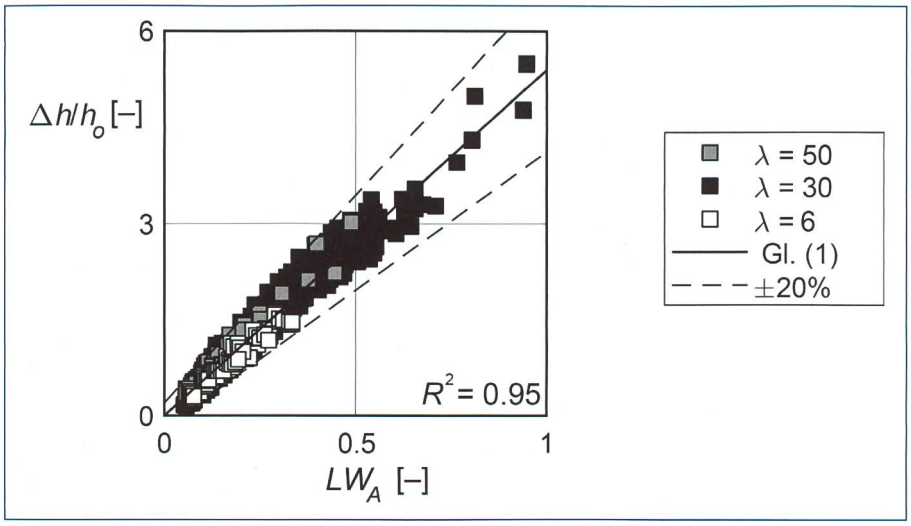


Bild 8. Relativer Aufstau $\Delta h/h_o$ als Funktion von LW_A für Serie A (λ = 50, λ = 30, λ = 6), Gl.(1), und ±20 % Abweichung.

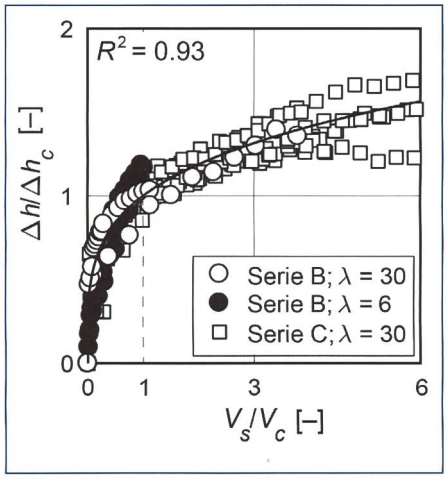


Bild 9. Aufstauverhältnis $\eta = \Delta h/\Delta h_c$ versus relatives Schwemmholzvolumen V_s/V_c mit Gl. (6).

fester Sohle angenommen werden, d.h. f_A = 0.55. Dieses Szenario entspricht am ehesten den Prototyp-Bedingungen und es wird empfohlen, f_A = 0.55 als Startwert anzunehmen.

- Best-Case-Szenario: Bei Bauwerken, an denen eine Kolkbildung erwartet wird und tolerierbar ist (z. B. Einzelfundation), kann f_A = 0.30 und somit ein reduzierter Aufstau angenommen werden.

Zur Abschätzung der verschiedenen Parameter für Gl. (3) wird folgendes Vorgehen vorgeschlagen:

- Der Auflockerungsfaktor *a* sollte gemäss Daten von früheren Hochwasserereignissen (*Bezzola* und *Hegg*, 2007) zwischen *a* = 2 und 5 gewählt werden.
- Der Anteil an Feinmaterial *FM* kann mit Hilfe einer Sensitivitätsanalyse berücksichtigt und zwischen *FM* = 2–20 % angenommen werden.
- Die Daten zu den Zuflussbedingungen (Zufluss-Froude-Zahl, Fliessgeschwindigkeit und Fliesstiefe) können basierend auf Messdaten (Abfluss, Querprofilgeometrie, Lage des Wasserspiegels) von früheren Hochwasserereignissen oder für verschiedene Hochwasserabflüsse z. B. mittels Normalabflussberechnung bestimmt werden.
- Das zu erwartende Schwemmholzvolumen V_s kann entweder mit gängigen Abschätzformeln aus der Praxis (z. B. *Rickenmann*, 1997; *Steeb et al.*, 2017) oder mit einer GIS-Analyse (*Ruiz-Villanueva et al.*, 2014; *Schalko et al.*, 2017) ermittelt werden.

Für alle Parameter sollte dabei ein gewisser Bereich gewählt werden, um die Sensitivität zu untersuchen. Bei unsicheren Grundlagen ist generell der Wert zu wählen, der zu einem grösseren Aufstau führt. Wie konservativ die Parameter gewählt werden, hängt jedoch auch von den zu erwartenden Folgen und dem Schadenspotenzial ab. Dies muss von Fall zu Fall beurteilt werden.

3.3 Einfluss des Schwemmholzvolumens auf den Aufstau

Um die Gefahrenbeurteilung von Verklausungen zu verbessern, ist eine Definition des Schwemmholzvolumens, das den massgebenden Aufstau erzeugt, von Bedeutung. Dieses Volumen wird als charakteristisches Schwemmholzvolumen V_c definiert. Es führt zum wesentlichen Aufstau und entspricht dem Schwemmholzvolumen, das entlang des Rechens verklaust, bevor sich ein Schwemmholzteppich bildet.

Basierend auf den Modellversuchen, kann das charakteristische Schwemmholzvolumen V_c als Funktion der Zufluss-Froude-Zahl und des Sohlmaterials abgeschätzt werden. Das Verhältnis von $V_c/(Bh_o^2)$ (relatives V_c) entspricht dem erforderlichen Volumen, um einen idealisierten rechteckförmigen Querschnitt mit den Massen $B \times h_o \times h_o$ zu blockieren. V_c kann für eine feste Sohle und F_o = 0.3–1.5 (R^2 = 0.89) mit

$$\frac{V_c}{Bh_o^2} = 3.1F_o \tag{4}$$

und für eine bewegliche Sohle für F_o = 0.5–1.5 (R^2 = 0.98) mit

$$\frac{V_c}{Bh_o^2} = 3.1F_o\left(\frac{h_o}{d_m}\right)^{-0.20} \tag{5}$$

bestimmt werden.

Mit Hilfe der Definition des charakteristischen Schwemmholzvolumens kann nun der Einfluss des Schwemmholzvolumens auf den Aufstau bestimmt werden. Das Aufstauverhältnis $\eta = \Delta h/\Delta h_c$ (Δh_c = Aufstau beim charakteristischen Volumen V_c) für F_o = 0.3–1.5 (R^2 = 0.93) kann wie folgt berechnet werden und ist in *Bild 9* dargestellt

$$\eta = \frac{\Delta h}{\Delta h_c} = \left(\frac{V_s}{V_c}\right)^{1/4} \tag{6}$$

Als erste Abschätzung kann der Aufstau Δh mit Gl. (1) oder Gl. (3) bestimmt werden. Um den Einfluss von verschiedenen Schwemmholzvolumina auf Δh zu ermitteln, kann Gl. (6) verwendet werden. Dafür muss nur das Verhältnis zwischen V_s/V_c gewählt werden, z. B. zwischen 0.5 und 2. Für V_s/V_c = 0.5 resultiert η = 0.84 im Vergleich zu η = 1.19 für V_s/V_c = 2. Bild 9 zeigt die Sensitivitätsanalyse des Schwemmholzvolumens. Für eine erste Abschätzung wird empfohlen, den Aufstau für das charakteristische Volumen V_c zu bestimmen. Gemäss *Bild 9* nimmt der Aufstau für V_s/V_c > 1.0 nur unterproportional mit dem Schwemmholzvolumen zu. Die Variation des Schwemmholzvolumens ermöglicht eine szenarienbasierte Risikoabschätzung und ist vor allem für die Praxisanwendung sehr hilfreich.

4. Schlussfolgerungen

Im Rahmen einer Doktorarbeit wurden an der VAW zahlreiche Modellversuche zur Verklausungswahrscheinlichkeit (Teil 1) und zum Aufstau infolge einer Schwemmholzverklausung durchgeführt. Mit Hilfe von drei verschiedenen Konfigurationen (Serien A–C) wurde der Aufstau systematisch untersucht. Eine vordefinierte Verklausung (Serie A) ermöglichte die Variation der Zuflussbedingungen sowie der Schwemmholz- und Verklausungseigenschaften. Weiter wurde eine natürliche Verklausung mit fester (Serie B) und beweglicher Sohle (Serie C) untersucht und so der Einfluss der Verklausungsform und die Wechselwirkung zwischen Aufstau und Kolk analysiert.

Basierend auf den Ergebnissen der Modellversuche, kann der Aufstau infolge einer Schwemmholzverklausung nun mit einer neuen Abschätzgleichung als Funktion der Zufluss-Froude-Zahl, der Kompaktheit der Verklausung (Auflockerungsfaktor), des Anteils an Feinmaterial, der Verklausungslänge und des Holzdurchmesser bestimmt werden. Die Abschätzgleichung kann ausserdem mit Hilfe des Verklausungsformfaktors erweitert werden, um die Verklausungsform sowie eine bewegliche Sohle zu berücksichtigen.

Für eine szenarienbasierte Risikoabschätzung ist der Einfluss des anfallenden Schwemmholzvolumens auf den Aufstau von wesentlicher Bedeutung. Das sogenannte charakteristische Schwemmholzvolumen, das zu dem massgebenden Aufstau führt, kann in Abhängigkeit der Zufluss-Froude-Zahl und des mittleren Korndurchmessers abgeschätzt werden. Mit Hilfe des Verhältnisses von Festvolumen zu charakteristischem Volumen kann weiter der Aufstau als Funktion des Schwemmholzvolumens ermittelt werden.

Die vorgestellte Abschätzgleichung ermöglicht eine Vordimensionierung der Rechenstabhöhe von Rechenbauwer-

ken sowie der erforderlichen Uferhöhen. Somit kann die Gefahrenbeurteilung in der Praxis für Hochwasserereignisse mit hohem Schwemmholzaufkommen verbessert werden.

Im Rahmen von zukünftigen Modellversuchen sollte die Interaktion zwischen Schwemmholz und Sediment an weiteren Rechenbauwerken, zum Beispiel auch bei Geschiebesammlern, untersucht werden. Der aktuelle Grundsatz zum Schwemmholzmanagement lautet «durchleiten, wo möglich, und rückhalten, wo nötig». Die meisten früheren Untersuchungen zu Schwemmholz in der Schweiz haben sich speziell mit dem Rückhalt befasst. Es besteht jedoch ein Interessenskonflikt, da Holz ein wesentlicher Bestandteil eines Fliessgewässers ist. Dieser Aspekt sollte vor allem im Rahmen von zukünftige Projekten berücksichtigt werden.

Referenzen

Bezzola, G.R.; Hegg, C. (2007). Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 1: Prozesse, Schäden und erste Einordnung. Bundesamt für Umwelt, BAFU, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, WSL. Umwelt-Wissen Nr. 0707: 215 S.

Hartlieb, A. (2015). Schwemmholz in Fliessgewässern – Gefahren und Lösungsmöglichkeiten. Bericht 133. Versuchsanstalt Obernach, TU München.

Knauss, J. (1995). Von der oberen zur unteren Isar. Bericht 76: 23–66. Lehrstuhl und Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU München.

Lange, D.; Bezzola, G.R. (2006). Schwemmholz: Probleme und Lösungsansätze. VAW-Mitteilung 188 (H.-E. Minor, Ed.), ETH Zürich.

Lucía, A.; Comiti, F.; Borga, M.; Cavallo, M.; Marchi, L. (2015). Dynamics of large wood during a flash flood in two mountain catchments. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 15: 1741–1755.

Manners, R.B.; Doyle, M.W.; Small, M.J. (2007). Structure and hydraulics of natural woody debris jams. Water Resources Research 43: W06432.

Rickenmann, D. (1997). Schwemmholz und Hochwasser. «Wasser Energie Luft» 89(5–6): 115–119.

Rimböck, A. (2003). Schwemmholzrückhalt in Wildbächen. Bericht 94. Lehrstuhl und Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU München.

Ruiz-Villanueva, V.; Díez-Herrero, A.; Ballesteros, J.A.; Bodoque, J.M. (2014). Potential large woody debris recruitment due to landslides, bank erosion and floods in mountain basins: A quantitative estimation approach. River Res. Applic. 30: 81–97.

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, Ed.). St. Louis, USA. 2307–2314.

Schalko, I. (2018). Modeling hazards related to large wood in rivers. VAW-Mitteilungen 249. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), (R.M. Boes, ed.), ETH Zürich, Schweiz.

Schalko, I.; Schmocker, L.; Weitbrecht, V.; Boes, R. (2017). Schwemmholz: Gefahrenbeurteilung und Massnahmenplanung am Fallbeispiel Renggbach, Kanton Luzern. «Wasser Energie Luft» 109(4): 271–278.

Schalko, I.; Schmocker, L.; Weitbrecht, V.; Boes, R.M. (2018). Backwater rise due to large wood accumulations. Journal of Hydraulic Engineering 144(9): 04018056.

Schalko, I.; Schmocker, L.; Weitbrecht, V.; Boes, R. (2019). Gefahrenbeurteilung von Schwemmholzverklausungen in Flüssen: Teil 1 – Verklausungswahrscheinlichkeit. «Wasser Energie Luft» 111. Heft 2: 61–78.

Schmocker, L.; Hager, W.H. (2013). Scale modelling of wooden debris accumulation at a debris rack. Journal of Hydraulic Engineering 139(8): 827–836.

Schmocker, L.; Weitbrecht, V. (2013). Driftwood: Risk analysis and engineering measures. Journal of Hydraulic Engineering 139(7): 683–695.

Steeb, N.; Rickenmann, D.; Badoux, A.; Rickli, C.; Waldner, P. (2017). Large wood recruitment processes and transported volumes in Swiss mountain streams during the extreme flood of August 2005. Geomorphology 279: 112–127.

VAW (2008). Ereignisanalyse Hochwasser 2005: Teilprojekt Schwemmholz. VAW-Bericht Nr. 4240. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich (unveröffentlicht).

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» zuhanden BAFU/WSL. Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, WSL. 72 S.

Verdankungen

Die Doktorarbeit der Autorin wurde vom Schweizer Bundesamt fur Umwelt (BAFU) finanziert (Projektnummer: 15.0018.PJ / O192-0202) und ist Teil des Forschungsprojekts WoodFlow. Die AutorInnen bedanken sich bei *Karin Bertram, Carmen Lageder, Daniel Schaller* und *Nicole Schärer* für die ausgezeichnete Unterstützung bei den Modellversuchen sowie bei Dr. Gian Reto Bezzola für die wertvollen fachlichen Hinweise.

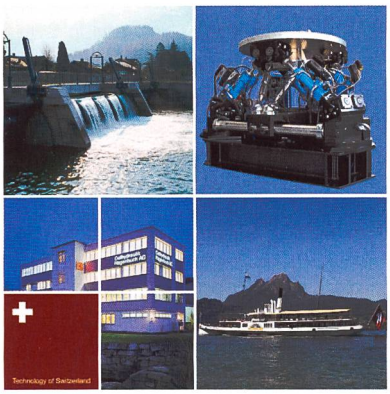
Anschrift der Verfasserin und der Verfasser

Dr. *Isabella Schalko*, Department of Civil and Environmental Engineering, Massachusetts Institute of Technology MIT (vormals VAW), ischalko@mit.edu

Dr. *Lukas Schmocker*, VAW, ETH Zürich, schmocker@vaw.baug.ethz.ch

Dr. *Volker Weitbrecht*, VAW, ETH Zürich, weitbrecht@vaw.baug.ethz.ch

Prof. Dr. *Robert Boes*, VAW, ETH Zürich, boes@vaw.baug.ethz.ch



Hydraulische Lösungen - alles aus einer Hand

Planen - entwickeln - produzieren

Als innovatives Schweizer Traditionsunternehmen sind wir spezialisiert auf hydraulische Steuerungs- und Antriebstechnik. Ob grosse, komplexe Herausforderungen oder Einzelkomponenten: Jeder Auftrag ist für uns der Wichtigste.
Bei Fragen, Anliegen oder Projekten freut es uns, für Sie da zu sein.

Hagenbuch Hydraulic Systems AG, Rischring 1, CH-6030 Ebikon, Tel. +41 (0)41 444 12 00, Fax +41 (0)41 444 12 01
info@hagenbuch.ch, www.hagenbuch.ch

HAGENBUCH
Hydraulic Systems

In guten
wie in schwierigen Zeiten

Ihr zuverlässiger Partner in der Wasserkraft
www.rittmeyer.com

Mess- und Leittechnik für die Wasser- und Energiewirtschaft

rittmeyer
BRUGG