

**Zeitschrift:** Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria  
**Herausgeber:** Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband  
**Band:** 111 (2019)  
**Heft:** 2

**Artikel:** Gefahrenbeurteilung von Schwemmholtverklausungen in Flüssen. Teil 2, Aufstau  
**Autor:** Schalko, Isabella / Schmocke, Lukas / Weitbrecht, Volker  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-941517>

### 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:** 11.01.2026

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

# Gefahrenbeurteilung von Schwemmholtzverklausungen in Flüssen: Teil 2 – Aufstau

Isabella Schalko, Lukas Schmocker, Volker Weitbrecht, Robert Boes

## Zusammenfassung

Während Hochwasserereignissen kann Schwemmholtz an Engstellen wie Brücken oder auch bewusst bei Schwemmholtzrechen 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 Schwemmholtzverklausungen 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 Schwemmholtz- 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 Schwemmholtzvolumen, das zum massgebenden Aufstau führt, ermittelt werden und so der Einfluss des Holzvolumens auf den Aufstau berechnet werden. Die Abschätzgleichungen verbessern die Dimensionierung von Schwemmholtzrechen und erleichtern die Gefahrenbeurteilung infolge Verklausungen an Engstellen.

## 1. Einleitung

Schwemmholtz 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 Schwemmholtz 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 Schwemmholtzverklausung 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 Schwemmholtz kontrolliert zurückzuhalten und die Verklausungsgefahr zu reduzieren, können Schwemmholtzrechen stromaufwärts von Siedlungs- oder Industriegebieten errichtet werden (Schmocker und Weitbrecht, 2013). Die gewollte Verklausung an Schwemmholtzrechen führt eben-

falls zu einem Aufstau, der die notwendige Stabenhöhe 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 Schwemmholtzverklausungen und dem resultierenden Aufstau wurden hauptsächlich für ausgewählte Rechenstandorte und Schwemmholtzabmessungen durchgeführt (Knauss, 1995; Rimböck, 2003; Schmocker und Hager, 2013; Hartlieb, 2015). Die Schwemmholtzzusammensetzung und das Schwemmholtzvolumen 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 Schwemmholtzverklausung 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 Schwemmholtzverklausungen mit Hilfe von Modellversuchen untersucht (Schalko, 2018). In Teil 1 dieser Ausgabe werden die Ergebnisse zur Verklausungswahrscheinlichkeit bei Brückenspfeilern vorgestellt (Schalko et al., 2019). In diesem Beitrag (Teil 2) werden die Resultate der Modellversuche zum Aufstau



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

infolge Schwemmholtverklausungen vor-  
gestellt. Für die Anwendbarkeit der Ab-  
schätzgleichungen werden Empfehlun-  
gen zusammengefasst, um das Vorgehen  
in der Praxis zu erleichtern. Die Doktorar-  
beit wurde vom BAFU finanziert und war  
Teil des interdisziplinären Forschungspro-  
jekts *WoodFlow*: Schwemmholtmanage-  
ment an Fließgewässern (Ruiz-Villanueva  
*et al.*, 2016).

## 2. Methodik

Der Aufstau infolge Schwemmholtver-  
klausung wurde im Rahmen von drei Ver-  
suchsserien A-C mit Hilfe von Laborver-  
suchen 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 Schwemmholtrechen  
verwendet werden.

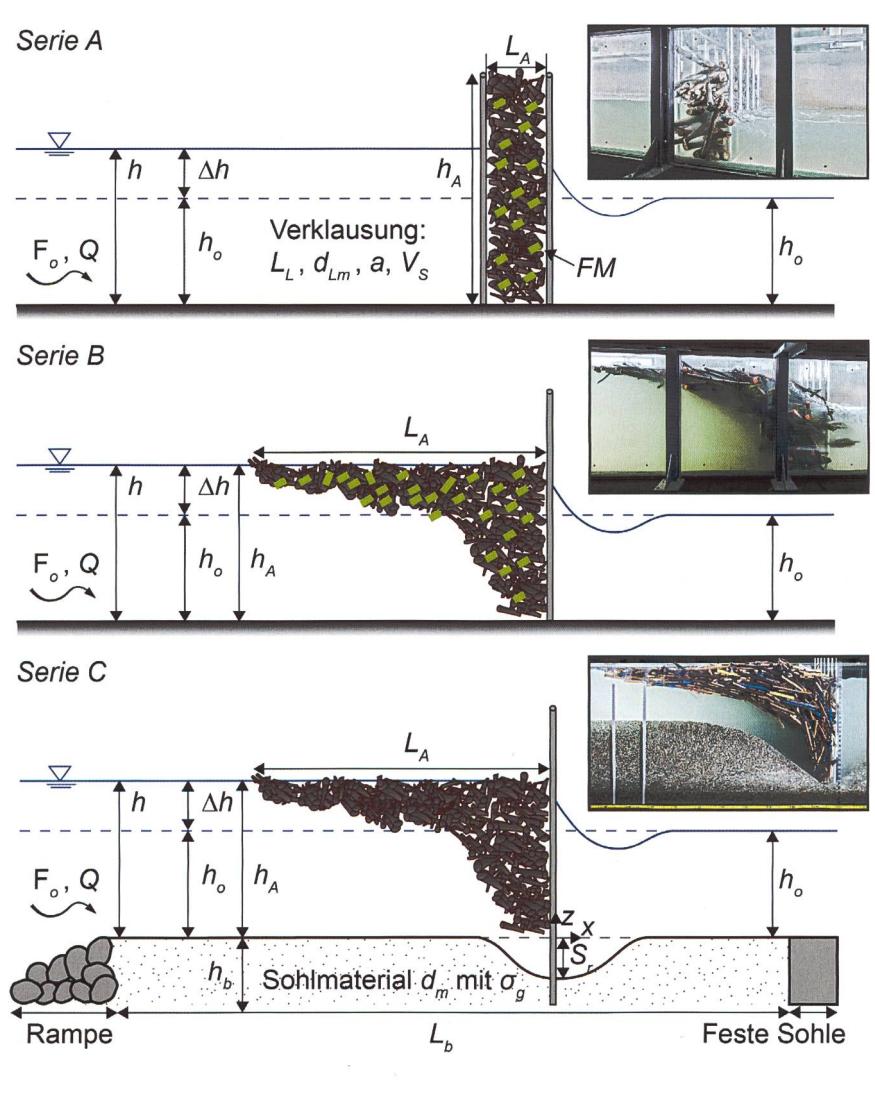
### Serie A: Vordefinierte Verklausung mit fester Sohle

In Serie A wurde in vereinfachter Form  
(Bild 2) der Aufstau verschiedener  
Schwemmholtkonfigurationen bestimmt  
(Schalko *et al.*, 2018). Um möglichst viele  
Parameter individuell zu variieren, wurde  
die Verklausung zwischen zwei Rechen-  
reihen vordefiniert eingebaut. Für den  
Nachweis der Modellähnlichkeit, insbe-

sondere für die Auswirkung von Blättern  
und Ästen in einer Verklausung, d. h. des  
Feinmaterials (FM), wurden drei unter-  
schiedliche geometrische Massstäbe  
gewählt (Massstabsfaktor  $\lambda = 6, 30, 50$ ).  
Die Modellversuche wurden in zwei ver-  
schiedenen 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  $F_o = Q_o / (B^2 g h_o)^{0.5}$ , mit  $B$  = Kanalbreite und  $g$  = Erd-  
beschleunigung. Die Verklausungseigen-  
schaften werden mit der Verklausungs-  
länge  $L_A$  (Abstand zwischen den beiden  
Rechenreihen), dem Holzdurchmesser  $d_L$ ,  
dem Auflockerungsfaktor  $a = V_l / V_s$  (Lange  
und Bezzola, 2006), mit  $V_l$  = Lockervolu-  
men und  $V_s$  = Festvolumen, und dem Vo-  
lumenanteil 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 Plastiktan-  
nenbümen modelliert. Das Feinmaterial  
wurde als Volumenprozent dem Festvolu-  
men  $V_s$  zugegeben und variierte zwischen  
 $\approx 2$  bis 17 %, basierend auf Empfehlungen  
nach Manners *et al.* (2007). Bild 3 gibt einen  
Überblick über das verwendete Holz. Bei  
der Versuchsdurchführung wurde jeweils  
die Abflusstiefe  $h_o$  ohne Holz sowie die  
Abflusstiefe  $h$  mit der eingebauten Ver-  
klausung mit Ultraschallsensoren (UDS)  
gemessen und daraus der Aufstau  $\Delta h = h - h_o$   
bestimmt.

### Serie B: Natürliche Verklausung mit fester Sohle

In Serie B (Bild 2) wurde eine Rechenreihe  
entfernt und das Schwemmholt nicht vor-  
definiert eingebaut, sondern schrittweise  
in 10 %-Anteilen von  $V_s$  über die Kanal-  
breite verteilt zugegeben. Somit konnte  
sich in Abhängigkeit der Zuflussbedingun-  
gen und Schwemmholtzeigenschaften die  
Verklausung natürlich ausbilden. Der Auf-  
stau am Rechen wurde nach Zugabe jedes  
einzelnen Schwemmholtpakets mit UDS  
gemessen. Die Modellversuche wurden  
für zwei Massstäbe (1:6 und 1:30) sowie  
verschiedene  $F_o$  und FM-Anteile durch-  
geführt. Während der meisten Versuche  
wurde das gleiche Festvolumen wie in  
Serie A zugegeben ( $V_s = 0.005 \text{ m}^3$  für 1:30)



**Bild 2. Versuchsaufbau und Notation der Modellversuchsserien A-C.** Die Zuflussbe-  
dingungen (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 Holz-  
durchmesser  $d_{Lm}$ , 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  $\sigma_g$  und  
resultierende Kolktiefe am Rechen  $S_r \approx S_{max}$  (maximale Kolktiefe).

und  $V_s = 0.240 \text{ m}^3$  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 Schwemmholt schritt- bzw. paketweise zugegeben (5–10 % von  $V_s$ ). Die Modellversuche wurden für einen Massstab 1:30 durchgeführt und das Festvolumen zu  $V_s = 0.023 \text{ m}^3$  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 Gebezugabe 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 Schwemmholtzpakets gemessen. Dabei wurde jeweils gewartet, bis sich der Kolk ausgebildet hatte und keine Sohlenänderung mehr stattfand. Nach Zugabe der gesamten Schwemmholtzmenge wurde zusätzlich die Sohle topografie mit einem Laser-Distanz-Sensor (LDS) in einem  $2.5 \times 2.5\text{-cm}$ -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  $\pm 15\%$  bestätigt werden.

## 3. Ergebnisse

### 3.1 Aufstau infolge Schwemmholtzverklausung

Die vordefinierte Schwemmholtzverklausung in Serie A ermöglichte die Variation der Zuflussbedingungen sowie der Schwemmholtzeigenschaften. Die Einflüsse der verschiedenen Parameter auf den Aufstau  $\Delta h$  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

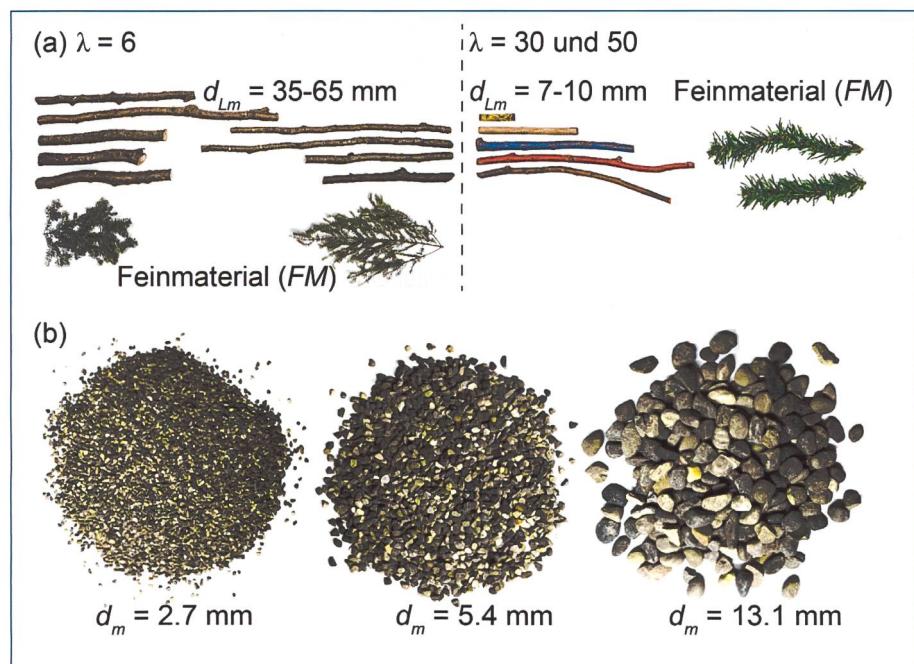


Bild 3. Beispiele von (a) Modellschwemmholtz und Feinmaterial; (b) Modellsediment.

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 $L_A$	$L_A = 0.05-0.20 \text{ m}$
	A39-A43		Holzdurchmesser $d_L$	$d_L = 4-65 \text{ mm}$
	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 $d_m$	$d_m = 2.7-13.1 \text{ mm}$

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

es kommt zu einem höheren Aufstau  $\Delta h$  (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 Durchlässigkeitsteilwert in Grundwasserströmungen. Eine kompakte Verklausung repräsentiert einen grösseren Fliesswiderstand und führt somit zu einem höheren Aufstau. Der Aufstau  $\Delta h$  nimmt somit mit abnehmendem  $a$  zu (Bild 5a versus b).

Der Einfluss der Schwemmholtzeigenschaften 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  $\Delta h$  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 Ver-

klausung. Damit wird die Strömung stärker umgelenkt, woraus sich ein grösserer Widerstand ergibt. Der Aufstau  $\Delta h$  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.

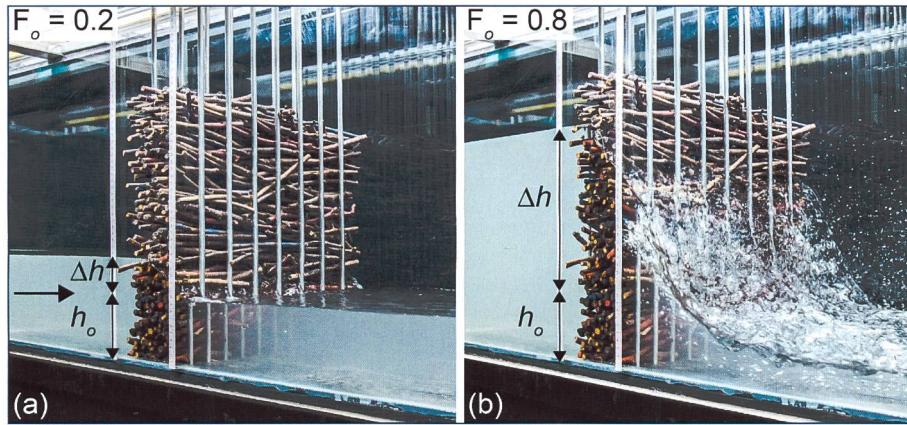
Der relative Aufstau  $\Delta h/h_o$  infolge einer vordefinierten Schwemmholtverklausung (Serie A) nimmt zu mit:

- 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 Strömungsrichtung (SH-Volumen) und
- zunehmendem Anteil an Feinmaterial  $FM$  (*Bild 6*).

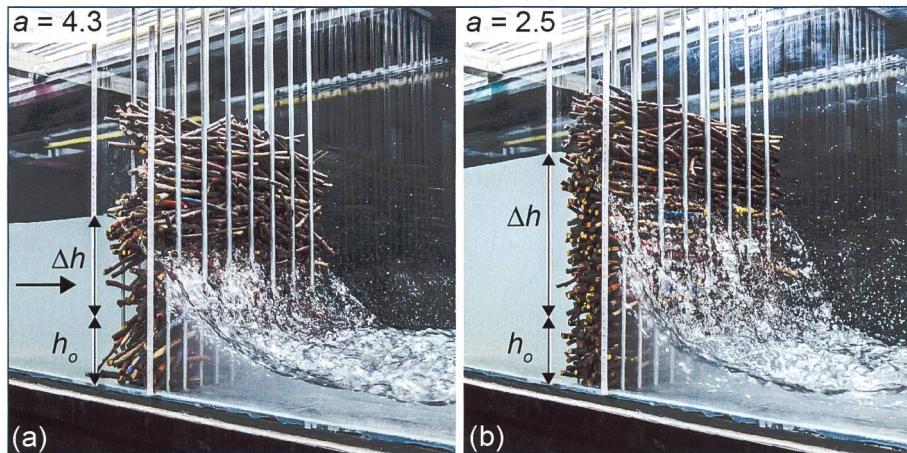
Der Auflockerungsfaktor hat dabei den grössten Einfluss auf den Aufstau, gefolgt von der Zufluss-Froude-Zahl und dem Feinmaterial. Im Vergleich dazu haben die Verklausungslänge und der Holzdurchmesser einen geringen Einfluss auf den Aufstau.

In Serie A wurde weiter die Modellähnlichkeit mit Hilfe einer Modellfamilie untersucht ( $\lambda = 6, 30, 50$ ). Mögliche Modelleffekte können abgeleitet werden, falls die Ergebnisse für die Versuche im kleinen Massstab ( $\lambda = 30$  oder 50) stark von den Ergebnissen der Versuche ähnlich dem Prototyp abweichen ( $\lambda = 6$ ). 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.

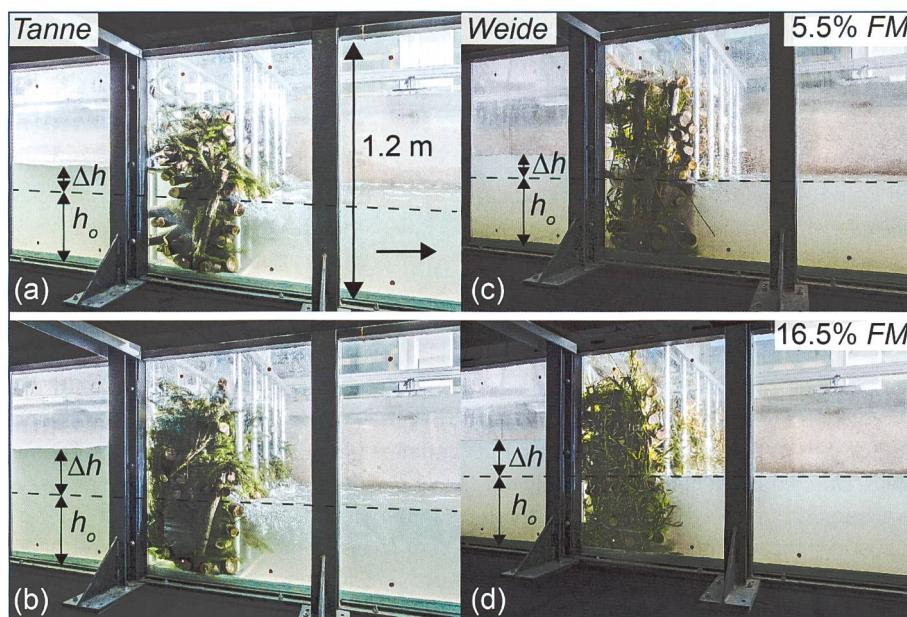
Im Rahmen von Serie A konnte der Einfluss verschiedener Parameter auf den Aufstau stark vereinfacht untersucht werden. Die Serien B und C dienten dazu, den Einfluss der Verklausungsform und der Kolkbildung auf den Aufstau abzuschätzen. In *Bild 7a–c* ist eine typische Entwicklung einer natürlichen Verklausung ( $V_{s,Prototyp} = 540 \text{ m}^3$ ) 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 relativi-



**Bild 4.** Aufstau  $\Delta h$  infolge Schwemmholtverklausung für (a)  $F_o = 0.20$  versus (b)  $F_o = 0.80$  ( $h_o = 0.10 \text{ m}$ ,  $a = 3.3$ ,  $L_A = 0.10 \text{ m}$  und  $d_L = 7 \text{ mm}$ ).



**Bild 5.** Aufstau  $\Delta h$  infolge Schwemmholtverklausung für (a)  $a = 4.3$  versus (b)  $a = 2.5$  ( $h_o = 0.10 \text{ m}$ ,  $F_o = 0.8$ ,  $L_A = 0.10 \text{ m}$  und  $d_L = 7 \text{ mm}$ ).



**Bild 6.** Aufstau  $\Delta h$  infolge Schwemmholtverklausung mit zunehmendem FM-Anteil ( $F_o = 0.3$ ,  $h_o = 0.36 \text{ m}$ ,  $a = 4.2$ ,  $L_A = 0.50 \text{ m}$ , und  $d_L = 65 \text{ mm}$ ); (a–b) Tannenzweige und (c–d) Weidenäste.

ven Schwemmholtzvolumens verklauen 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 Schwemmholtz verklaut somit den unteren Teil des Rechens. Bis zu einem relativen Schwemmholtzvolumen 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 Schwemmholtz bildet nun einen Schwemmholtzteppich, 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 Schwemmholtzmenge 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 Schwemmholtzvolumen 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 Schwemmholtzverklausung kann sich sowohl vertikal am Rechen als auch horizontal in Form eines Schwemmholtzteppichs 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 Schwemmholtz-verklausung

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):

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

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  $a = V_s/V_s$  ermittelt werden zu:

$$L_A = \frac{V_s}{h_o B} \text{ und } u = \frac{L_A}{d_L} = \frac{V_s}{h_o Bd_L} = \frac{aV_s}{h_o Bd_L} \quad (2)$$

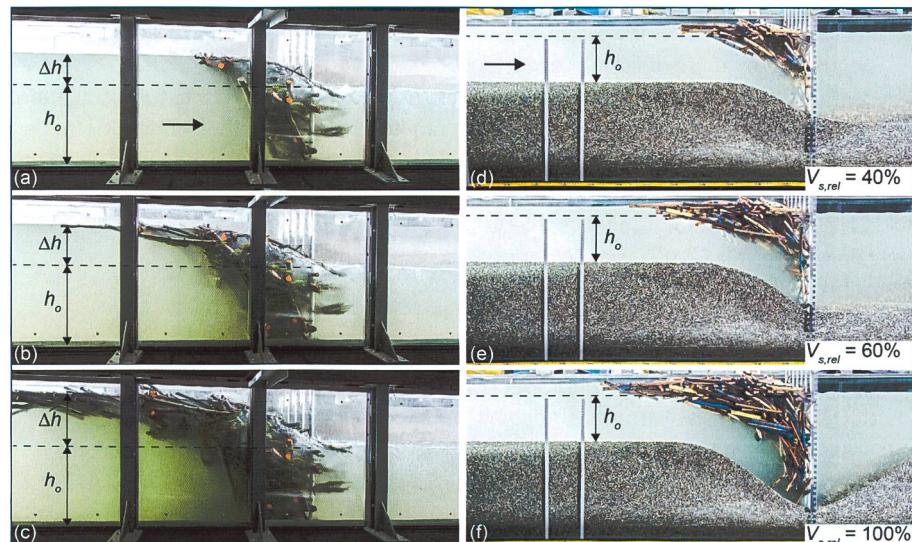
Die verschiedenen Verklausungsformen aus den Serien A-C (Bild 2) können mit dem Verklausungsformfaktor  $f_A$  berücksichtigt werden. Somit kann der relative Aufstau  $\Delta h/h_o$  wie folgt bestimmt werden:

$$\frac{\Delta h}{h_o} = 5.4 f_A \frac{F_o (aV_s/(h_o Bd_L))^{1/3} (9FM + 1)}{a^{4/3}} = 4.4 f_A \frac{F_o (V_s/(h_o Bd_L))^{1/3} (9FM + 1)}{a} \quad (3)$$

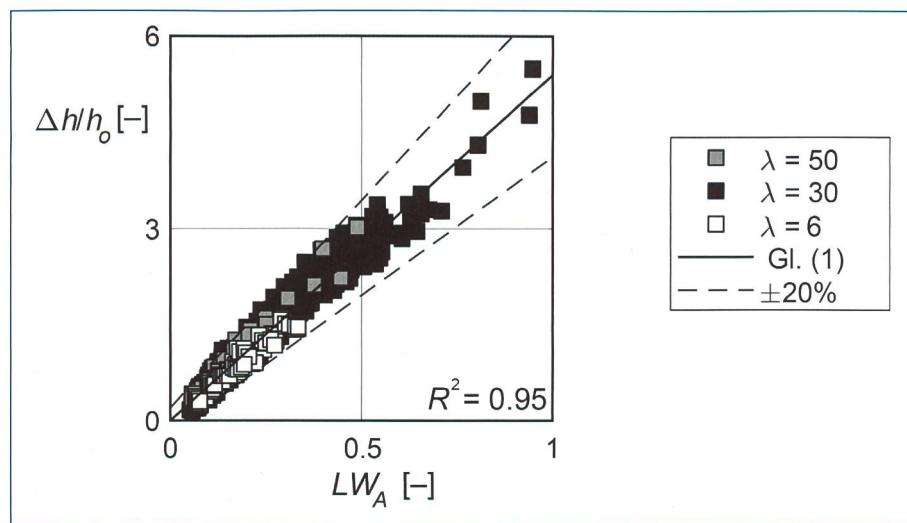
mit  
 $f_A = 1.00$  für eine vordefinierte Verklausung mit fester Sohle (Serie A),  
 $f_A = 0.55$  für eine natürliche Verklausung mit fester Sohle (Serie B) und  
 $f_A = 0.30$  für eine natürliche Verklausung mit beweglicher Sohle (Serie C).

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  $\Delta h$ . Für ein gegebenes Schwemmholtzvolumen  $V_s$  kann  $\Delta h/h_o$  mit Hilfe einer Sensitivitätsanalyse von  $f_A$  berechnet werden;  $f_A$  sollte wie folgt gewählt werden:

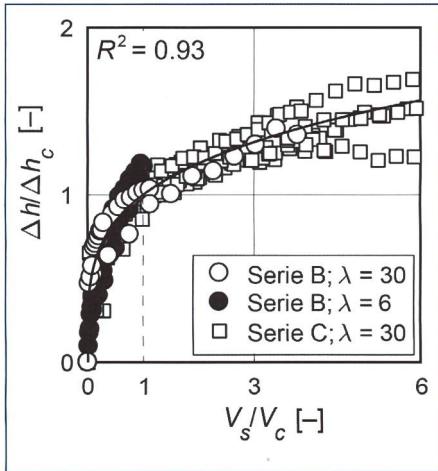
- Worst-Case-Szenario: Um den grössten Aufstau zu ermitteln, wird eine rechteckförmige Verklausung angenommen, d.h.  $f_A = 1$  (Gl. (1)).
- Average-Case-Szenario: Bei Bauwerken, an denen eine Kolkbildung aufgrund der Fundation verhindert wird, soll eine natürliche Verklausung mit



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



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



**Bild 9.** Aufstauverhältnis  $\eta = \Delta h / \Delta h_c$  versus relatives Schwemmholtvolumen  $V_s / V_c$  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 Hochwasserrereignissen (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 Hochwassereignissen oder für verschiedene Hochwasserabflüsse z.B. mittels Normalabflussberechnung bestimmt werden.
- Das zu erwartende Schwemmholtvolumen  $V_s$  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 erwarten Folgen und dem Schadenspotenzial ab. Dies muss von Fall zu Fall beurteilt werden.

### 3.3 Einfluss des Schwemmholtvolumens auf den Aufstau

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

Basierend auf den Modellversuchen, kann das charakteristische Schwemmholtvolumen  $V_c$  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

$$\frac{V_c}{Bh_o^2} = 3 \cdot IF_o \quad (4)$$

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

$$\frac{V_c}{Bh_o^2} = 3 \cdot IF_o \left( \frac{h_o}{d_m} \right)^{-0.20} \quad (5)$$

bestimmt werden.

Mit Hilfe der Definition des charakteristischen Schwemmholtvolumens kann nun der Einfluss des Schwemmholtvolumens auf den Aufstau bestimmt werden. Das Aufstauverhältnis  $\eta = \Delta h / \Delta h_c$  ( $\Delta h_c$  = 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

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

Als erste Abschätzung kann der Aufstau  $\Delta h$  mit Gl. (1) oder Gl. (3) bestimmt werden. Um den Einfluss von verschiedenen Schwemmholtvolumina auf  $\Delta h$  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  $\eta = 0.84$  im Vergleich zu  $\eta = 1.19$  für  $V_s / V_c = 2$ . Bild 9 zeigt die Sensitivitätsanalyse des Schwemmholtvolumens. 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 Schwemmholtvolumen zu. Die Variation des Schwemmholtvolumens 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 Schwemmholtverklausung 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 Schwemmholt- 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 Schwemmholtverklausung nun mit einer neuen Abschätzgleichung als Funktion der Zufluss-Froude-Zahl, der Kompattheit 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 Schwemmholtvolumens auf den Aufstau von wesentlicher Bedeutung. Das sogenannte charakteristische Schwemmholtvolumen, 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 Schwemmholtvolumens 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 zukünftigen 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 – Verklauungswahrscheinlichkeit. «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).

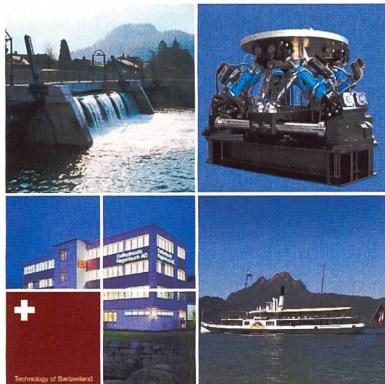
Waldner, P.; Köchli, D.; Usbeck, T.; Schmocker, L.; Sutter, F.; Rickli, C.; Rickenmann, D.; Lange, D.; Hilker, N.; Wirsch, A.; Siegrist, R.; Hug, C.; Kaenel, M. (2009). Schwemmholz der Ereignisanalyse des Hochwassers 2005. Schlussbericht des Teilprojekts «Schwemmholz» zuhanden BAFU/WSL. Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, WSL. 72 S.

#### Verdankungen

Die Doktorarbeit der Autorin wurde vom Schweizer Bundesamt für 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 Traditionss Unternehmen 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.rittmeier.com](http://www.rittmeier.com)

Mess- und Leittechnik für die Wasser- und Energiewirtschaft

**rittmeier**  
BRUGG