

Schwemmholzrisiko und Massnahmenplanung am Fallbeispiel Renggbach

Isabella Schalko, Lukas Schmocker, Volker Weitbrecht, Robert Boes

Zusammenfassung

In steilen und bewaldeten Einzugsgebieten können im Hochwasserfall erhebliche Schwemmholzmengen mobilisiert werden, die an Querbauwerken, wie zum Beispiel Wehren oder Brücken, zu Verklausungen führen können. Die damit einhergehende Reduktion des Fliessquerschnitts führt zu einem Aufstau des Wasserstands flussaufwärts und kann somit die Hochwassersituation verschärfen. Die Hochwasserereignisse der letzten Jahre haben gezeigt, dass in Kombination mit ausgeprägtem Schwemmholztransport das Überflutungsrisiko aufgrund von Verklausungen deutlich steigen kann.

Der Renggbach befindet sich in der Nähe der Stadt Luzern (Kanton LU) und wird durch eine Vielzahl von Querbauwerken charakterisiert. Bei einer Ausuferung in Richtung Luzern besteht ein Schadenpotential von rund 200 Mio. CHF. Am Beispiel des Renggbachs werden im vorliegenden Beitrag die erforderlichen Schritte zur Schwemmholzrisikoabschätzung und Massnahmenplanung vorgestellt:

1. Definition und Analyse der massgebenden Prozesse im Einzugsgebiet
2. Abschätzung potentieller Gefährdungsflächen zur Ermittlung des Schwemmholzpotentials mit Hilfe einer GIS-basierten Analyse und Vergleich mit Ergebnissen empirischer Schätzformeln aus der Literatur
3. Gefahrenbeurteilung der massgebenden Brückenbauwerke
4. Planung geeigneter Massnahmen für den Schwemmholzrückhalt oder ein schadloses Durchleiten

Die vorliegende Fallstudie soll die Schwemmholzrisikoabschätzung in der Praxis vereinfachen und mit dem aktuellen Forschungsstand hinsichtlich Schwemmholzverklausung und Aufstau verknüpfen.

1 Einleitung

Während Hochwasserereignissen kann in bewaldeten Einzugsgebieten neben Wasser und Geschiebe auch eine erhebliche Schwemmholzmenge mobilisiert werden. Bei Brücken kann es zu Verklausungen kommen und aufgrund des Rückstaus zu Ausuferungen und Überschwemmungen (Abb. 1). Für die Beurteilung der Hochwassergefahr in einem Einzugsgebiet sowie die Massnahmenplanung ist daher eine Schwemmholzrisikoabschätzung erforderlich. Der Renggbach befindet sich in der Nähe der Stadt Luzern (Kanton LU) und wird durch eine Vielzahl von Querbauwerken charakterisiert. Im Einzugsgebiet befinden sich mehrere Brückenbauwerke (Abb. 2), die eine ungünstige Geometrie und teilweise ein geringes Freibord aufweisen. Bei einer Ausuferung in Richtung Luzern besteht ein Schadenpotential von rund 200 Mio. CHF (PlüssMeyerPartner 2009).



Abb. 1 Verklauung der Eisenbahnbrücke Sarnen, Kanton OW (Quelle: Tiefbauamt Kanton OW 2005).

Für die Gewährleistung der Hochwassersicherheit werden am Beispiel des Renggbachs die erforderlichen Schritte zur Schwemmholzrisikoabschätzung und Massnahmenplanung vorgestellt (VAW 2016). Zuerst wird das Schwemmholzvolumen mit Hilfe verschiedener Ansätze im Einzugsgebiet ermittelt. Basierend auf einer Gefahrenbeurteilung und den aktuellen Forschungsergebnissen der VAW können geeignete Gegenmassnahmen abgeleitet werden.

2 Der Renggbach

Der Renggbach besitzt ein Einzugsgebiet von $EG = 12.5 \text{ km}^2$ und weist ein durchschnittliches Längsgefälle von $J = 14\%$ auf (PlüssMeyerPartner 2009). Er entspringt am nördlichen Abhang des Pilatusmassivs und mündet nach 7 km in die Kleine Emme. Bei dem Hochwasserereignis im Jahr 2005 (HQ_{30}) wurden im Renggbach Kubaturen von 20-50 m^3 Schwemmholz als Festvolumen V_F erfasst (Hunziker, Zarn & Partner *et al.* 2008). Weitere Angaben zu Zusammensetzung und Art des Schwemmholzes sind nicht vorhanden.

Im Projektperimeter befinden sich sieben Brückenbauwerke, deren Verklauungswahrscheinlichkeit sowie das daraus resultierende Schadenpotential zu beurteilen sind. Das Schwemmholzpotential und die Schwemmholzmenge werden für das gesamte Einzugsgebiet ermittelt.

3 Schwemmholzmenge und Schwemmholzpotential

In einem ersten Schritt werden die Prozesse, die zu Schwemmholzeintrag führen, identifiziert. Im Renggbach treten hauptsächlich Rutschungen auf, wobei es im Hochwasserfall auch infolge Seitenerosion zu Schwemmholzeintrag kommen kann. Mit Hilfe einer GIS-Analyse werden unter Berücksichtigung der Flächennutzung, Hangneigung und Abflusscharakteristika die Gefährdungsflächen infolge Rutschungen und Seitenerosion ermittelt (Rimböck 2003, Mächler 2009). Nach Bezzola und Hegg (2008) sind beim Hochwasserereignis 2005 Rutschungen bei Hangneigungen von 20 – 50° aufgetreten. Weiter wird davon ausgegangen, dass Schwemmholztransport erst ab $EG \geq 1 \text{ km}^2$ erfolgt (Waldner *et al.* 2009).

Für die Ausweisung der Gefährdungsflächen infolge Rutschungen werden Waldflächen mit einer Hangneigung zwischen 20 – 50° ermittelt, die ein Gewässer mit $EG \geq 1 \text{ km}^2$ überlagern.

Als Ergebnis wird für das *EG* des Renggbachs eine Fläche von $A_R = 1.6 \text{ km}^2$ ausgewiesen, was einem Flächenanteil von 13% entspricht (Abb. 2).

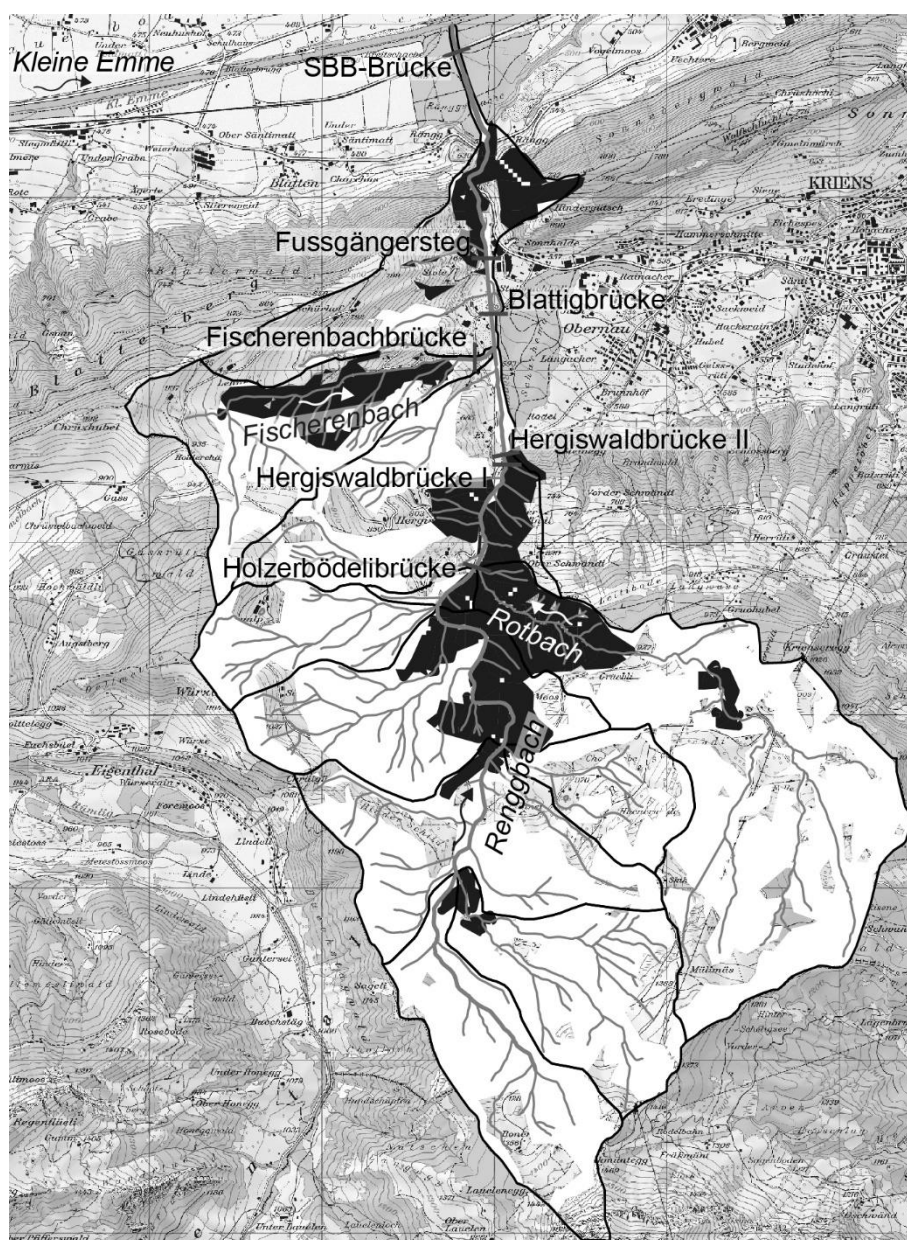


Abb. 2 Einzugsgebiet des Renggbachs (Umrandung). Die Waldflächen sind weiss und die Gefährdungsflächen infolge Rutschung schwarz schraffiert (swisstopo 2016).

Aufgrund der verschiedenen stabilisierenden Wirkungen wird nicht die gesamte ermittelte Fläche A_R zum Schwemmholzeintrag beitragen. Dies wird mit Hilfe eines Abminderungsfaktors f_R berücksichtigt, der basierend auf Empfehlungen von Rimböck (2003) mit $f_R = 0.4$ angenommen wird.

Bei einem HQ_{30-100} stellt sich in einem unverbauten Wildbach die Regimebreite ein und es kommt infolge Seitenerosion zum Schwemmholzeintrag. Daher wird für den Renggbach die Regimebreite B_{Parker} für ein HQ_{100} ($96 \text{ m}^3/\text{s}$) mit dem empirischen Ansatz nach Parker (1979) berechnet. Unter Berücksichtigung der bewaldeten, unbefestigten Uferlänge L_W für Abschnitte ohne Rutschgefährdung ergibt sich daraus eine potentielle Gefährdungsfläche infolge Seitenerosion von $A_{SE} = 0.05 \text{ km}^2$.

Für die Berechnung des Schwemmholtzpotentials müssen die Gefährdungsflächen mit dem vorhandenen Holzvorrat multipliziert werden, der mit $v_H = 0.04 \text{ m}^3/\text{m}^2$ angenommen wird (Brändli 2010). Somit ergibt sich ein Schwemmholtzpotential infolge Rutschung und Seitenerosion von $S_{pot} = 28'420 \text{ m}^3$. Dabei beträgt der Anteil des Schwemmholtzpotentials infolge Rutschung 93% und infolge Seitenerosion 7%.

Mit Hilfe von tatsächlich aufgenommenen Schwemmholtzmengen während Hochwasserereignissen kann basierend auf dem Schwemmholtzpotential der GIS-Analyse eine effektive Schwemmholtzmenge abgeleitet werden. Während des Hochwasserereignisses 2005 (HQ_{30}) wurden 50 m^3 Schwemmholtz als Festvolumen V_F in den Renggbach eingetragen (Hunziker, Zarn & Partner *et al.* 2008). Dies entspricht 0.2% des Schwemmholtzpotentials der GIS-Analyse. Während des Hochwasserereignisses 2005 wurden bei der Kleinen Emme 0.01% und bei der Grossen Melchaa 0.5% des Schwemmholtzpotentials infolge Rutschung effektiv in das Gerinne eingetragen (Mächler 2009). Unter der konservativen Annahme, dass im Hochwasserfall 1.0% des Schwemmholtzpotentials im Renggbach mobilisiert wird, ergibt die effektive Schwemmholtzmenge $S_{GIS} \approx 280 \text{ m}^3$ (Abb. 3).

Neben der GIS-Analyse kann die Schwemmholtzmenge in einem Einzugsgebiet auch mit Hilfe empirischer Schätzformeln berechnet werden. Im Allgemeinen wird zwischen einer effektiven Schwemmholtzmenge und einem Schwemmholtzpotential unterschieden. Als effektive Schwemmholtzmenge wird die tatsächliche Holzmenge, die während eines Hochwasserereignisses auftritt, beschrieben. Das Schwemmholtzpotential entspricht dem Holzvorrat, der im Einzugsgebiet vorhanden ist und während eines Hochwasserereignisses in das Gewässer eingetragen werden kann. Die empirischen Schätzformeln berechnen das Schwemmholtzvolume S [m^3] basierend auf den folgenden Eigenschaften des Einzugsgebiets bzw. des Hochwasserereignisses (Abb. 3):

- Grösse des Einzugsgebiets (Rickenmann 1997):

$$S = 45 \cdot EG^{2/3} \quad [1]$$

mit EG = Einzugsgebietsgrösse in [km^2].

- Abflussfracht (Rickenmann 1997):

$$S = 4 \cdot V_W^{2/5} \quad [2]$$

mit V_W = Abflussfracht in [m^3]. Bei einem HQ_{100} kann die Abflussfracht im Renggbach mit $925'000 \text{ m}^3$ angenommen werden.

- Feststofffracht (Ishikawa 1990 und Uchiogi *et al.* 1996):

$$S = 0.02 \cdot F \quad [3]$$

mit F = Feststofffracht in [m^3]. Bei einem HQ_{100} ergibt die Feststofffracht im Renggbach $17'000 \text{ m}^3$ (VAW 1999).

- Vegetationstyp im Einzugsgebiet (Ishikawa 1990 und Uchiogi *et al.* 1996):

$$S = C \cdot EG \quad [4]$$

mit C = dimensionsloser Beiwert in Abhängigkeit des Vegetationstyps. Beim Vegetationstyp wird zwischen Nadelwald ($10 < C < 1000$) und Laubwald ($10 < C < 100$) unterschieden. In

der Region Luzern beträgt der Nadelholzanteil 80% (Brändli 2010). Die tatsächlich aufgenommenen Schwemmh Holz mengen während des Hochwasserereignisses 2005 entsprechen für Einzugsgebiete mit $\sim 10 \text{ km}^2$ maximal einem Beiwert $C = 400$ (Bezzola und Hegg 2008). Für eine konservative Berechnung wird für das Einzugsgebiet des Renggbachs $C = 400$ angenommen.

- Bewaldetes Einzugsgebiet (Rickenmann 1997):

$$S = 90 \cdot EG_W \quad [5]$$

mit EG_W = bewaldetes Einzugsgebiet in $[\text{km}^2]$.

- Bewaldete Uferlänge (Rickenmann 1997):

$$S = 40 \cdot L_W^2 \quad [6]$$

mit L_W = bewaldete Uferlänge in $[\text{km}]$.

In der Literatur werden die Schätzformeln [1]-[3] als effektive Schwemmh Holz menge für ein betrachtetes Hochwasserereignis und [4]-[6] als Schwemmh Holz potential definiert. Das Schwemmh Holz potential in [4]-[6] ist jedoch nur eine Funktion des Uferbereichs (L_W) respektive des Vegetationstyps (C , EG_W) im Einzugsgebiet. Die Ergebnisse der Formeln [4]-[6] entsprechen somit nicht dem gesamten mobilisierbaren Holzvorrat im Einzugsgebiet. Weiter sind die empirischen Schätzformeln [5]-[6] von der Grössenordnung eher vergleichbar mit den Ergebnissen der effektiven Schwemmh Holz menge. Die Gegebenheiten im Einzugsgebiet werden mit Hilfe der GIS-Analyse stärker berücksichtigt, weshalb dieses Vorgehen einem besseren Ansatz zur Ermittlung des Schwemmh Holz potentials entspricht.

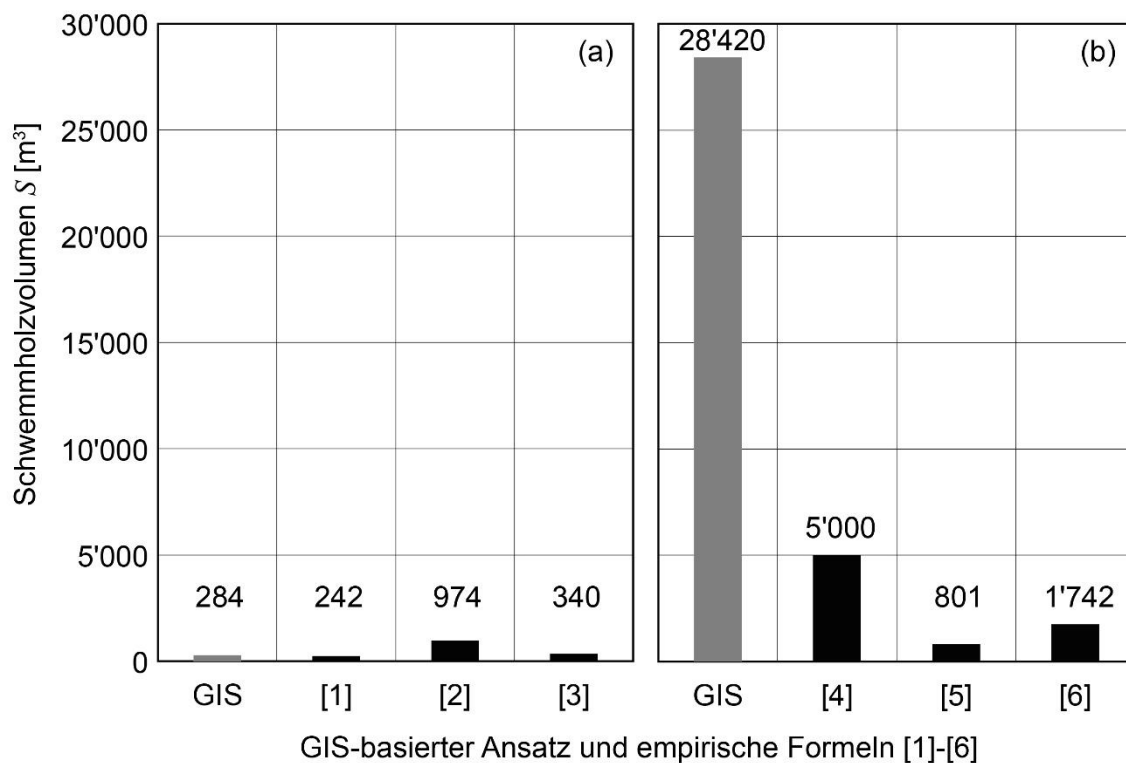


Abb. 3 Ergebnisse der Schwemmh Holz volumen mit Hilfe des GIS-basierten Ansatzes und der empirischen Schätzformeln. (a) effektive Schwemmh Holz menge, (b) Schwemmh Holz potential.

4 Gefahrenbeurteilung

Bei der Gefahrenbeurteilung werden die gefährdeten Gerinneabschnitte und Brückenbauwerke im Einzugsgebiet ausgewiesen. Eine wichtige Kenngrösse hierfür ist, ob das Schwemmholz zu den gefährdeten Abschnitten transportiert werden kann. Nach Braudrick und Grant (2000) ist der Transportbeginn von der Froude-Zahl F und dem Stammdurchmesser d abhängig. Für den Schwemmholztransport muss die Wassertiefe $h > F \cdot d$ sein. Ein weiteres Kriterium wird von Lange und Bezzola (2006) beschrieben. Dies besagt, dass glatte Stämme ab einer Wassertiefe $h > d/2$ transportiert werden können. Beide Kriterien werden im Einzugsgebiet des Renggbachs bei einem HQ_{100} erfüllt.

Bei den Brückenbauwerken kann es infolge von Schwemmholztransport zu Verklausungen kommen. Die Verklausungswahrscheinlichkeit kann nach Lange und Bezzola (2006) für einzelne Stämme und einzelne Wurzelstöcke berechnet werden. Fällt das Schwemmholz schubweise an, erhöht sich die Verklausungswahrscheinlichkeit. Weiter vergrössern eine Werkleitung an der Brückenunterkante, Unterzug-, Fachwerkskonstruktion und die unebene Ausführung der Brückenunterseite die Gefahr des Verhängens von Schwemmholz (Abb. 4). Das Freibord bei Brückenquerschnitten wird bei Lange und Bezzola (2006) vernachlässigt. Für die Gefahrenbeurteilung ist das Freibord jedoch ein wichtiger Parameter. So kann bei einem genügend hohen Freibord ein Anprall von Schwemmholz an der Brückenunterkante ausgeschlossen und die Verklausungswahrscheinlichkeit verringert werden. Für den Renggbach weisen vier von sieben Brückenbauwerken eine Verklausungsgefahr auf.



Abb. 4 Ungünstige Brückenquerschnitte im Projektperimeter. (a) Holzerbödelbrücke, (b) Hergiswaldbrücke II, (c) Fischerenbachbrücke, (d) Blattigbrücke, (e) SBB-Brücke.

5 Massnahmen

Um die negativen Auswirkungen von transportiertem Schwemmholz im Hochwasserfall zu verringern, sind passive und aktive Massnahmen möglich (Lange und Bezzola 2006). Mit Hilfe von passiven Massnahmen (organisatorisch oder planerisch) kann das Schadenpotential ver-

ringert werden. Zu den aktiven Massnahmen zählen Unterhaltsmassnahmen (regelmässige Entfernung von Totholz, Gewässerunterhalt und -verbau oder Hangsicherung) und bauliche Massnahmen (Schwemmholzurückhalt oder Verminderung des Verklausungsrisikos). Im Folgenden wird die Möglichkeit eines Schwemmholzurückhalts im Einzugsgebiet des Renggbachs näher beschrieben. Unterhaltsmassnahmen im Bereich der Gefährdungsflächen sowie Massnahmen zur schadlosen Weiterleitung bei Brückenquerschnitten sind für eine Verringerung des Verklausungsrisikos jedoch ebenso von Bedeutung.

5.1 Schwemmholzurückhalt

Im Hochwasserfall kann Schwemmholz mit Hilfe eines Rechens zurückgehalten werden. Die verschiedenen Ausführungsmöglichkeiten des Schwemmholzurückhalts werden in Schmocker und Weitbrecht (2013) zusammengefasst. Das Schwemmholz kann entweder über die gesamte Gewässerbreite oder selektiv zurückgehalten werden. Eine V-förmige Anordnung des Schwemmholzrechens über die gesamte Breite wurde von Knauss (1995) entwickelt. Dabei werden die Rückhaltefläche und die Wasseraustrittslinie im Vergleich zu einem horizontal angeordneten Rechen erhöht. Man kann zwischen V-förmig in und gegen Fliessrichtung unterscheiden.

In der vorliegenden Fallstudie eignet sich aufgrund des grossen durchschnittlichen Längsgefälles im Projektperimeter nur der Bereich der Hergiswaldbrücke als Rückhaltestandort (Abb. 2). Dieser Bereich zeichnet sich durch ein geringeres Längsgefälle von $J = 3.5\%$ aus und befindet sich flussaufwärts von Infrastrukturbereichen oder grösseren Siedlungen. Die Anordnung eines V-Rechens gegen Fliessrichtung lenkt die Strömung in Flussmitte, verringert die Gefahr von Ufererosion und eignet sich daher für diesen Standort. Für die Dimensionierung des Schwemmholzrechens können die Rechenhöhe und der Stababstand basierend auf empirischen Gleichungen ermittelt werden (Lange und Bezzola 2006). Der Aufstau Δh (Differenz Abflusstiefe h_2 bei verlegtem und h_o bei unverlegtem Rechen) infolge der Schwemmholzverklausung am Rechen ist eine wichtige Eingangsgrösse für die Bestimmung der Rechenhöhe h_R . Die Berechnung von Δh [m] nach Knauss (1995) ist wie folgt definiert:

$$\Delta h = h_2 - h_o = \alpha \frac{v^2}{2g} \quad [7]$$

mit α = Aufstaufaktor in Abhängigkeit der Schwemmholzart (grob bis sehr fein) = 1.5-2.3 [-] und $v^2/2g$ = Geschwindigkeitshöhe [m]. Für eine eher konservative Bemessung wird $\alpha = 2$ angenommen. Für ein $HQ_{100} = 96 \text{ m}^3/\text{s}$ beträgt die Fliessgeschwindigkeit $v = 4.4 \text{ m/s}$ und die Abflusstiefe $h_o = 1.4 \text{ m}$, womit sich nach Gl. [7] ein Aufstau von ca. 2 m ergibt. Die erforderliche Rechenhöhe ist somit $h_R \geq h_o + \Delta h = 3.4 \text{ m}$.

Ein weiterer Berechnungsansatz für Δh wurde von Schmocker und Hager (2013) entwickelt, welcher primär von der Ausgangs-Froude-Zahl F_o bei unverlegtem Rechen abhängig ist:

$$\Delta h = h_o \cdot (0.4 + 1.9 \cdot F_o) \quad [8]$$

mit h_o = Ausgangswassertiefe [m]. Die Ausgangswassertiefe h_o beträgt für ein HQ_{100} 1.4 m und $F_o = 1.2$. Der resultierende Aufstau beträgt nach Gl. [8] 3.7 m und die Höhe der einzelnen Rechenstäbe ca. $h_R \geq h_o + \Delta h \approx 5 \text{ m}$.

In aktuellen Modellversuchen an der VAW wurden die massgebenden Parameter für den Aufstau an einem Schwemmholzrechen unter Berücksichtigung des Feinanteils systematisch untersucht. Die Forschungsergebnisse zeigen, dass Blätter oder Äste (Feinanteil) in einer Schwemmholzverklaesung den Aufstau wesentlich erhöhen (Abb. 5 und Abb. 6). Der Aufstau wird pro Gewichtsprozent des Feinanteils in einer Schwemmholzverklaesung um ca. 10% erhöht. Für die Abschätzung der Rechenhöhe h_R im Rahmen der Fallstudie wird für die Berücksichtigung des Feinanteils der Aufstau nach Schmocker und Hager (2013) (grösseres Δh ; konservativer Ansatz) angepasst. Unter der Annahme, dass 5 Gew.-% Feinanteil in der Schwemmholzverklaesung vorhanden sind und der Aufstau pro Gew.-% FT um 10% steigt, erhöht sich h_R von 5 m auf ca. 7 m.

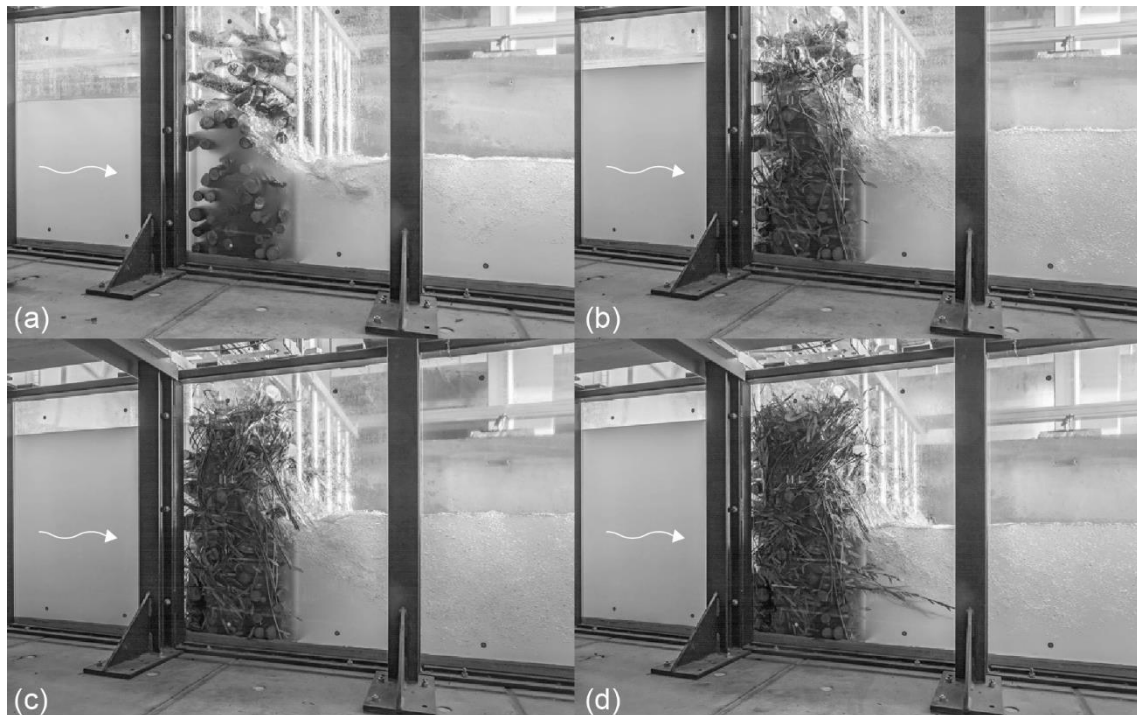


Abb. 5 Modellversuche an der VAW. $Q = 371$ l/s, Kanalbreite $b = 150$ cm, $h_o = 50$ cm, $d = 6.5$ cm, $F_o = 0.3$ und (a) 0%, (b) 5%, (c) 10%, (d) 15% (Gewichtsprozent) Feinanteil (VAW 2015).

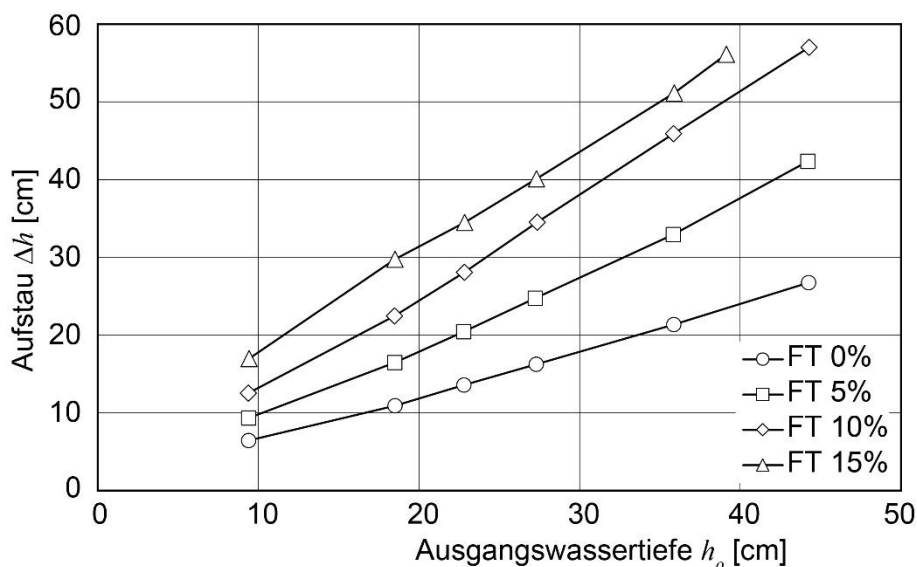


Abb. 6 Aufstau Δh für verschiedene h_o , $F_o = 0.3$ und 0%, 5%, 10%, 15% Feinanteil (Gew.-% FT).

6 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Die Fallstudie Renggbach beschreibt das Vorgehen einer Schwemmholzrisikoabschätzung und die Ableitung geeigneter Gegenmassnahmen. Das Schwemmholzpotential und die Schwemmholzmenge wurden mit einer GIS-Analyse ermittelt und mit den gängigen empirischen Schätzformeln verglichen. Bei der GIS-Analyse können die massgebenden Einflussfaktoren und Eintragsprozesse stärker berücksichtigt werden. Das Schwemmholzpotential wird mit den Schätzformeln [4]-[6] im Vergleich zu $S_{pot} = 28'420 \text{ m}^3$ der GIS-Analyse deutlich unterschätzt und die Grössenordnung der Formeln [5]-[6] entspricht eher einer effektiven Schwemmholzmenge. Für steile und bewaldete Einzugsgebiete ist eine Ermittlung des Schwemmholzpotentials mit Hilfe der GIS-Analyse von wesentlicher Bedeutung. Die ermittelten Gefährdungsflächen ermöglichen zudem die Ausweisung kritischer Bereiche und vereinfachen die Gefahrenbeurteilung sowie die weitere Massnahmenplanung.

Die Machbarkeit eines Schwemmholzrechens im Einzugsgebiet des Renggbachs ist basierend auf einer ersten Abschätzung gegeben. Derzeit werden für die Berechnung des Aufstaus Blätter und Äste (Feinanteil), die Kompaktheit der Schwemmholzverklauung sowie die Schwemmholzeigenschaften (Durchmesser, Länge) vernachlässigt und die resultierende Schwemmholzrechenhöhe unterschätzt. Aktuelle Forschungsergebnisse der VAW zeigen, dass der Einfluss des Feinanteils in einer Schwemmholzverklauung von zentraler Bedeutung ist. Die gegenwärtige Auswertung der Modellversuche soll eine Abschätzung des Aufstaus mit Hilfe eines Bemessungsdiagramms in der Praxis ermöglichen. Diese Ergebnisse werden die Gefahrenbeurteilung bei Querbauwerken und die Risikoabschätzung bei Schwemmholzverklauungen verbessern.

Literatur

Bezzola, G.R.; Hegg, C. (2008). Ereignisanalyse Hochwasser 2005 Teil 2: Analyse von Prozessen, Massnahmen und Gefahrengrundlagen. Bundesamt für Umwelt, BAFU. Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, WSL. Umwelt-Wissen Nr. 0825: 429 S.

- Braudrick, C.A.; Grant, G.E. (2000). When do logs move in rivers? *Water Resources Research* 36(2): 571–583.
- Brändli, U.-B. (Red.) (2010). Schweizerisches Landesforstinventar. Ergebnisse der dritten Erhebung 2004–2006. Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Birmensdorf. Bundesamt für Umwelt, BAFU, Bern. 312 S.
- Hunziker, Zarn & Partner; VAW; Colenco (2008). Gesamtkonzept für die Kleine Emme und die Reuss, Abschnitt Malters bis Bremgarten. Arbeitsgruppe Kraftwerke, Alarmierung und Holzmanagement Reuss. Schwemmholz – Rückhalt und Entnahme. 18. April 2008. Aarau, Schweiz.
- Ishikawa, Y. (1990). Studies on Disasters Caused by Debris Flows Carrying Floating Logs Down Mountain Streams. Doctoral thesis. Kyoto University, Japan.
- Knauss, J. (1995). Von der oberen zur unteren Isar. Bericht 76: 23-66. TU München.
- Lange, D.; Bezzola, G.R. (2006). Schwemmholz: Probleme und Lösungsansätze. VAW-Mitteilung 188 (H.-E. Minor, ed.), ETH Zürich.
- Mächler, M. (2009). GIS-Modellierung von potentiell Schwemmholzeintrag von Rutschungen. Semesterarbeit Umweltingenieurwesen. ZAHW, Wädenswil. 21 S.
- Parker, G. (1979). Hydraulic geometry of active gravel rivers. *Journal of the Hydraulics Division* 105(9): 1185–1201.
- PlüssMeyerPartner (2009). Basisbericht 1526.10: Instandstellung und Ersatz von Verbauungen im Renggbachgebiet, Gemeinde Kriens. Massnahmen 2010/2011. Im Auftrag des vif. Stand: 01.12.2009
- Rickenmann, D. (1997). Schwemmholz und Hochwasser. *Wasser Energie Luft* 89(5–6): 115–119.
- Rimböck, A. (2003). Schwemmholzrückhalt in Wildbächen. Bericht 94. TU München.
- 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.
- swisstopo (2016). Digitale Geodaten. Reproduziert mit Bewilligung von swisstopo (JA100120).
- Uchiogi, T.; Shima, J.; Tajima, H.; Ishikawa, Y. (1996). Design methods for wood-debris entrapment. Proc. Intl. Symposium "Interpraevent 1996 – Garmisch-Partenkirchen". Band 5: 279–288. Klagenfurt.
- VAW (1999). Risikoanalyse Renggbach. VAW Bericht Nr. 4130. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich.
- VAW (2016). Schwemmholzgutachten Renggbach (LU). VAW Bericht Nr. 4334. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich.
- Waldner et al. (2009). Schwemmholz der Ereignisanalyse des Hochwassers 2005. Schlussbericht des Teilprojekts 'Schwemmholz' zuhanden BAFU/WSL. Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, WSL, Birmensdorf. 72 S.

Anschrift der Verfasser/in

Isabella Schalko

Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich

Hönggerberggring 26, CH-8093 Zürich

schalko@vaw.baug.ethz.ch

Dr. Lukas Schmocker

schmocker@vaw.baug.ethz.ch

Dr. Volker Weitbrecht

weitbrecht@vaw.baug.ethz.ch

Prof. Dr. Robert Boes

boes@vaw.baug.ethz.ch