

Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 109 (2017)
Heft: 4

Artikel: Schwemmholtz: Gefahrenbeurteilung und Massnahmenplanung am Fallbeispiel Renggbach, Kanton Luzern
Autor: Schalko, Isabella / Schmocke, Lukas / Weitbrecht, Volker
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-941630>

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: 24.02.2026

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

Schwemmholz: Gefahrenbeurteilung und Massnahmenplanung am Fallbeispiel Renggbach, Kanton Luzern

Isabella Schalko, Lukas Schmocker, Volker Weitbrecht, Robert Boes

Zusammenfassung:

Bei Hochwasser wird neben Geschiebe auch häufig Schwemmholz transportiert, das bei Engstellen zu Verklausungen führen kann. Das Überflutungsrisiko sowie das Schadenpotenzial können infolge einer Schwemmholzverklausung stark zunehmen. Daher sollten bei der Erarbeitung von Hochwasserschutzprojekten die Auswirkungen von Schwemmholz eingehend untersucht werden. Im vorliegenden Artikel werden die Gefahrenbeurteilung von Schwemmholz und die Massnahmenplanung am Fallbeispiel des Renggbachs im Kanton Luzern vorgestellt. Das generelle Vorgehen kann beispielhaft für viele Wildbäche in der Schweiz übernommen und wie folgt zusammengefasst werden: In einem ersten Schritt werden die massgebenden Eintragsprozesse von Schwemmholz im Einzugsgebiet definiert. Danach werden das Schwemmholzpotenzial und die effektive Schwemmholzmenge mit Hilfe einer GIS-Analyse (Einzugsgebietsbetrachtung) und den empirischen Schätzformeln aus der Literatur ermittelt. Basierend auf den Schwemmholz-Querschnittsabmessungen statt Brückenabmessungen wird die Verklausungsgefahr von Engstellen (z.B. Brücken oder Durchlässe) im Projektperimeter beurteilt. Abschliessend werden unter Berücksichtigung der neuesten Forschungserkenntnisse der VAW geeignete Schutzmassnahmen (Unterhaltsmassnahmen, Massnahmen zur schadlosen Weiterleitung sowie zum Schwemmholzrückhalt) abgeleitet. Das Vorgehen soll die Beurteilung der Schwemmholzsituation und die Massnahmenplanung in der Praxis vereinfachen und den aktuellen Stand der Technik zusammenfassen.

1. Einleitung

In bewaldeten Einzugsgebieten können im Hochwasserfall erhebliche Schwemmholzmengen mobilisiert und transportiert werden. Bei Engstellen, wie zum Beispiel bei Brücken, kann es zu Verklausungen kommen. Aufgrund der damit verbundenen Reduktion des Fließquerschnitts entsteht ein Rückstau flussaufwärts der Engstelle, welcher zu Überschwemmungen

führen kann (Bild 1). Die Hochwasserereignisse der letzten Jahre haben gezeigt, dass das Überflutungsrisiko in Kombination mit ausgeprägtem Schwemmholztransport aufgrund von Verklausungen deutlich zunimmt. Für bewaldete und steilere Einzugsgebiete wird daher eine Beurteilung der Schwemmholzsituation empfohlen. In diesem Artikel soll das Vorgehen für die Gefahrenbeurteilung von Schwemmholz

und die Massnahmenplanung beispielhaft für viele andere Wildbäche in der Schweiz gezeigt werden.

Angrenzend an die Gemeinde Luzern befindet sich der Renggbach, der während grosser Hochwassereignisse immer wieder zu Schäden im Siedlungsgebiet geführt hat. Der Renggbach besitzt ein grosses Geschiebepotenzial, das im Wesentlichen durch Hangrutsche oder Sohlenerosion mobilisiert werden kann. Der Grossteil des Einzugsgebiets ist deshalb durch Sperranlagen verbaut, die, in Kombination mit fortwährender Waldbewirtschaftung, den Geschiebetransport und das Verklausungsrisiko vermindern und somit das Überflutungsrisiko reduzieren sollen. Bei einer Überflutung im Bereich zwischen Blattigbrücke und Fussgängersteg in Richtung Kriens bzw. Luzern (Bild 2) besteht ein Schadenpotenzial von rund 200 Mio. CHF (Plüss Meyer Partner, 2009).

Am Beispiel des Renggbachs werden die erforderlichen Schritte zur Gefahrenbeurteilung von Schwemmholz für die Gewährleistung der Hochwassersicherheit vorgestellt (Schalko et al., 2016; VAW, 2016a). In einem ersten Schritt werden die massgebenden Eintragsprozesse von Schwemmholz in den Renggbach definiert. Das im Hochwasserfall zu erwartende Schwemmholzvolumen wird mit Hilfe verschiedener Ansätze für das Ein-



© Tiefbauamt Kanton OW



© T. Gschritter

Bild 1. (a) Verklausung der Eisenbahnbrücke Sarnen, Kanton OW, und (b) Verklausung bei einem Brückenpfeiler, Tirol, Österreich.

zugsgebiet ermittelt. Anschliessend wird die Verklausungsgefahr der Brücken beurteilt. Basierend auf dieser Gefahrenbeurteilung und den aktuellen Forschungsergebnissen einer laufenden Studie an der VAW, werden geeignete Schutzmassnahmen vorgestellt. Die Studie ist Teil des interdisziplinären Forschungsprojekts WoodFlow: Schwemmholtzmanagement an Fließgewässern. WoodFlow wird vom BAFU finanziert und gemeinsam mit dem Dendrolab, der WSL und der Berner Fachhochschule bearbeitet (Ruiz-Villanueva et al., 2016).

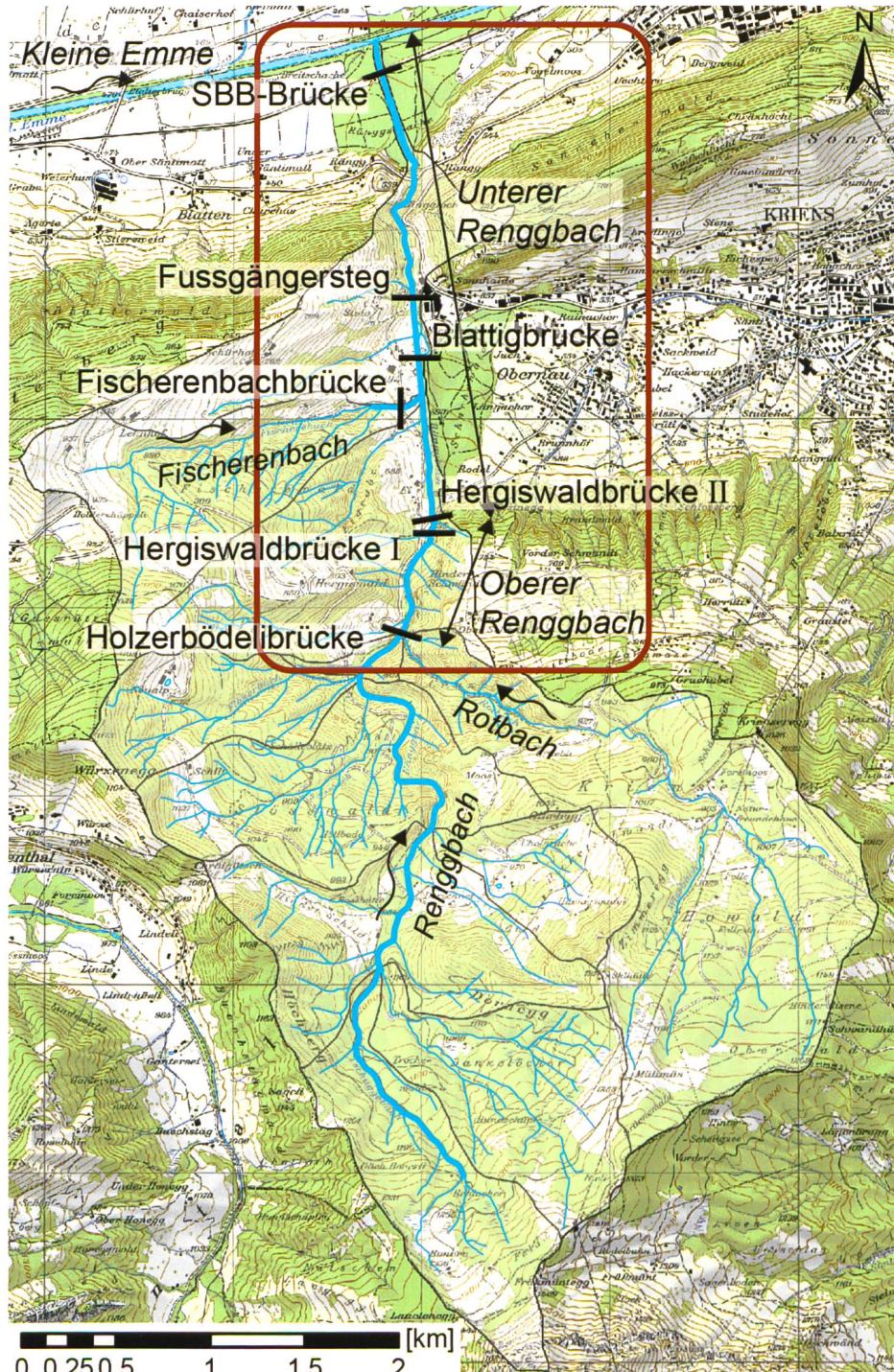


Bild 2. Einzugsgebiet des Renggbachs (schwarze Umrundung) und Projektperimeter (rote Umrundung); die untersuchten Brücken sind in Schwarz dargestellt (nach swisstopo, 2016).

2. Der Renggbach

Der Renggbach entspringt am nördlichen Abhang des Pilatusmassivs und mündet nach 7 km in die Kleine Emme (Bild 2). Er weist ein Einzugsgebiet von $EG = 12.5 \text{ km}^2$ und ein durchschnittliches Längsgefälle von $J = 14\%$ auf (Plüss Meyer Partner, 2009). Mit Hilfe von rund 700 Schutzbauten (Querbauwerke, Ufermauern) sowie ergänzenden Unterhaltsmassnahmen wird die Hochwassergefahr im EG reduziert (VAW, 1999). Die Abflussspitzen für den Renggbach betragen für das $HQ_{100} = 96 \text{ m}^3/\text{s}$ und $HQ_{300} = 136 \text{ m}^3/\text{s}$. Die Ein-

zugsgebietseigenschaften des Renggbachs sind charakteristisch für Wildbäche mit bewaldeten Einzugsgebieten und mit dem Chämtnerbach (Kanton ZH, $EG = 13.4 \text{ km}^2$; Lange und Bezzola, 2006), Steinibach (Kanton OW, $EG = 12 \text{ km}^2$), Saxonibach (Kanton BE, $EG = 20 \text{ km}^2$) (Rickenmann, 1997) oder der Kleinen Schliere (Kanton OW, $EG = 21 \text{ km}^2$; VAW, 2016b) vergleichbar. Beim Hochwasserereignis im August 2005 wurden bei einem HQ_{30} im Renggbach $20\text{--}50 \text{ m}^3$ abgelagertes Festvolumen Schwemmholtz (V_F) erfasst (Hunziker, Zarn & Partner et al., 2008). Weitere Angaben zu der Zusammensetzung und Art des Schwemmholtzes liegen nicht vor. Das Schwemmholtzpotenzial wird aufgrund der Flächennutzung (große Waldflächen) und Topografie (steiles Gelände) als hoch eingeschätzt. Die vielen Brücken im EG stellen ein Verklausungsrisiko dar. Der Projektperimeter (Bild 2) umfasst die Abschnitte Oberer Renggbach (Mündung Rotbach bis Hergiswaldbrücke) und Unterer Renggbach (Hergiswaldbrücke bis Einmündung in die Kleine Emme) sowie den seitlichen Zufluss Fischerenbach. Das Schwemmholtzvolumen wird für das gesamte EG ermittelt. Die Verklausungsgefahr wird für sieben Brücken im Projektperimeter beurteilt.

3. Schwemmholtzvolumen

Im folgenden Abschnitt wird das Schwemmholtzvolumen im EG mit einer GIS-Analyse sowie den gängigen empirischen Schätzformeln aus der Literatur ermittelt und als Grundlage für die weitere Beurteilung der Verklausungsgefahr der Brücken verwendet (Abschnitt 4). Generell kann zwischen der effektiven Schwemmholtzmenge und dem Schwemmholtzpotenzial unterschieden werden. Die effektive Schwemmholtzmenge entspricht der tatsächlichen Holzmenge, die während eines Hochwasserereignisses in das Gewässer eingetragen wird. Im Gegensatz dazu beschreibt das Schwemmholtzpotenzial den Holzvorrat in einem EG, der theoretisch während eines Hochwasserereignisses das Gewässer durch Eintragsprozesse erreichen kann.

3.1 GIS-Analyse

Gemäss der Gefahrenkarte treten im EG des Renggbachs vorrangig Rutschungen auf (Geoinformation Kanton Luzern, 2015). Zusätzlich kann Schwemmholtz im Hochwasserfall infolge Seitenerosion in das Gewässer eingetragen werden. Mit Hilfe einer GIS-Analyse werden die Gefährdungsflächen infolge Rutschungen und Seitenero-

sion unter Berücksichtigung der Flächenutzung, Hangneigung und Durchflusscharakteristika ermittelt (Rimböck, 2003; Mächler, 2009). Diese Gefährdungsflächen werden mit dem Holzvorrat multipliziert und so das Schwemmholtypotenzial S_{pot_GIS} in [m^3] als Festvolumen (V_F) für das EG berechnet. Die effektive Schwemmholtmenge S_{eff_GIS} wird mit Hilfe eines Abminderungsfaktors von S_{pot_GIS} abgeleitet.

Das Vorgehen zur Ermittlung des Schwemmholtypotenzials wurde von Mächler (2009) adaptiert und kann wie folgt zusammengefasst werden:

- 1. Zusammenstellung der erforderlichen Grundlagendaten:** Für die GIS-Analyse werden ein digitales Höhenmodell (DHM25) sowie eine Landeskarte im Pixel- (PK25) und im Vektorformat (PRI25) verwendet. Mittels PRI25 können die Waldflächen und das Gewässernetz analysiert werden.
- 2. Definition des Perimeters:** Das EG des Renggbachs wird als Perimeter gewählt, und die Grundlagendaten werden darauf zugeschnitten. Die Analyse kann auch für Teil-EG durchgeführt werden.
- 3. Berechnung der Hangneigungen:** Mittels DHM25 können die Hangneigungen im EG ermittelt werden. Sie variieren im EG des Renggbachs zwischen 0–62°. Nach Bezzola und Hegg (2008) sind beim Hochwasserereignis 2005 Rutschungen bei Hangneigungen von 20–50° aufgetreten. In einem nächsten Schritt werden diese Gebiete ausgeschieden. Da eine Rutschung bei einer Hangneigung von weniger als 20° nicht sofort zum Stillstand kommt, werden die definierten «Rutschgebiete» um eine Auslaufstrecke von 25 m erweitert (Rickli et al., 2008).
- 4. EG $\geq 1 \text{ km}^2$ im Gewässernetz ausscheiden:** Falls es zu Rutschungen kommt, ist die Durchflusskapazität des Gewässers massgebend dafür, ob eingeschlagenes Schwemmholt weitertransportiert werden kann. Da dieser Parameter schwierig abzuschätzen ist, wurde nach Waldner et al. (2009) definiert, dass der Schwemmholttransport ab einer Teileinzugsgebietsgröße von $\geq 1 \text{ km}^2$ möglich ist. Mittels PRI25 können diese Einzugsgebietsflächen berechnet werden.
- 5. Definition von Waldflächen:** Mit Hilfe von PK25 werden die Waldflächen im EG definiert. Insgesamt beträgt die Waldfläche im EG des Renggbachs 8.9 km^2 und entspricht einem Flächenanteil von $\approx 70\%$.

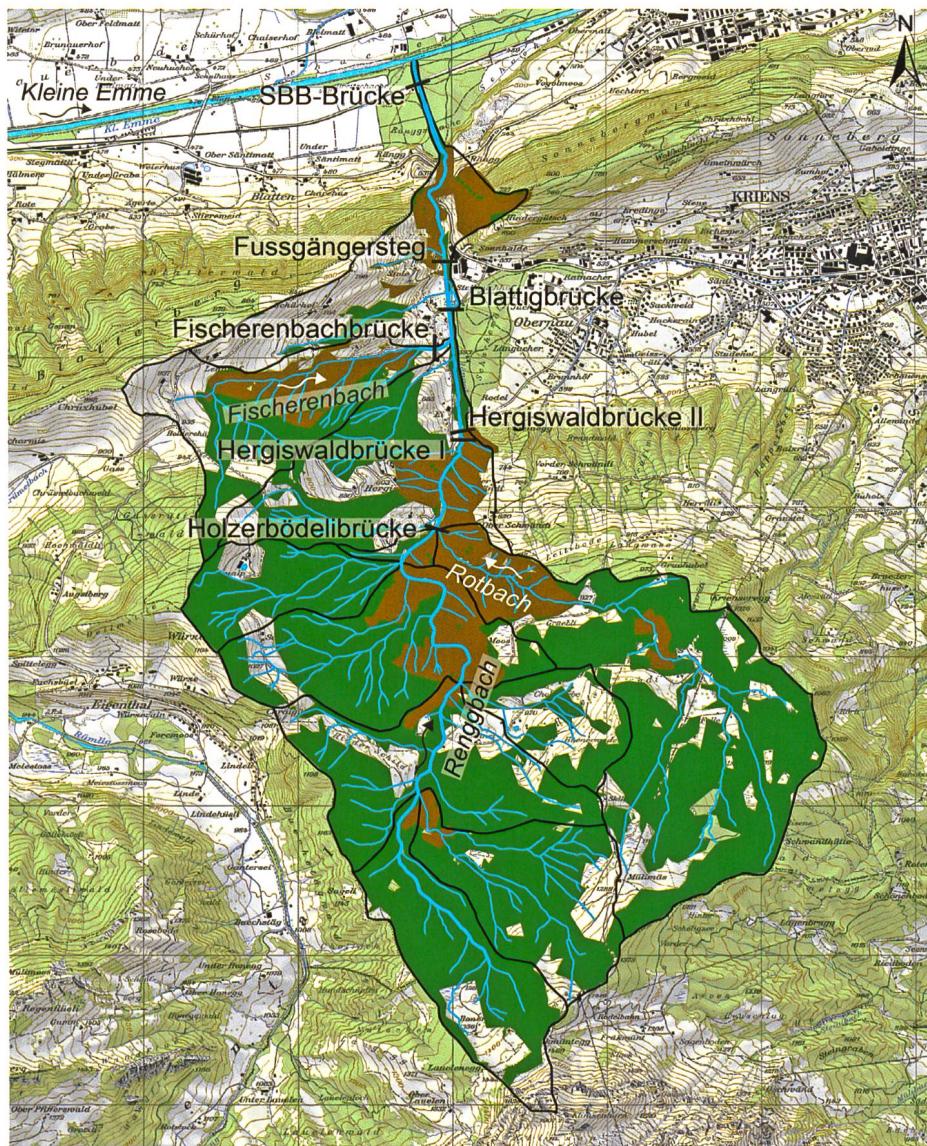


Bild 3. Ermittelte Gefährdungsflächen infolge Rutschungen (braune Schraffur) im Einzugsgebiet; die schwarzen Umrandungen stellen die Teileinzugsgebiete dar und die grüne Schraffur stellt die Waldflächen dar (nach swisstopo, 2016).

- 6. Ermittlung der Gefährdungsflächen infolge Rutschungen:** Für die Ausweisung der Gefährdungsflächen infolge Rutschungen werden nun Waldflächen mit einer Hangneigung zwischen 20–50° (unter Berücksichtigung der Auslaufstrecke) ermittelt, die ein Gewässer mit einem $EG \geq 1 \text{ km}^2$ überlagern. Als Ergebnis wird für das EG des Renggbachs eine Gefährdungsfläche von $A_R = 1.6 \text{ km}^2$ ausgewiesen, was einem Flächenanteil von $\approx 13\%$ entspricht (Bild 3). Aufgrund der stabilisierenden Wirkung der Baumwurzeln wird nicht die gesamte ermittelte Fläche zu Rutschungen führen. Basierend auf Empfehlungen von Rimböck (2003), wird dies mit Hilfe eines Abminderungsfaktors $f_R = 0.4$ berücksichtigt.
- 7. Bestimmung der Gefährdungsflächen infolge Seitenerosion:** Bei einem HQ_{30-100} stellt sich in einem unverbauten Wildbach in erster Näherung die

Regimebreite ein, und es kommt infolge Seitenerosion zum Schwemmholtzeintrag. 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. Schluchtstrecken oder andere Abschnitte mit Felsufern müssen bei dieser Betrachtung separat ausgewiesen und von der Berechnung ausgenommen werden.

$$B_{Parker} = 4.4 \cdot \sqrt{\frac{Q}{g \cdot (s-1) \cdot d_{50,D}}}, \quad (1)$$

mit B_{Parker} = Regimebreite [m], Q = Durchfluss bei HQ_{100} [m^3/s], g = Erdbeschleunigung [m/s^2], s = relative Feststoffdichte des Sohlenmaterials ≈ 2.65 [-] und $d_{50,D}$ = charakteristischer Korndurchmesser der Deckschicht mit $d_{50,D} \approx d_{90} \approx 36.3 \text{ cm}$ (Renggbach). Die Differenz zwischen der Regime-

breite und der mittleren Flussbreite wird mit der bewaldeten, unbefestigten Uferlänge L_W für Abschnitte ohne Rutschgefährdung multipliziert, womit sich eine potentielle Gefährdungsfläche infolge Seitenerosion für den Renggbach von $A_{SE} = 0.05 \text{ km}^2$ ergibt.

8. **Berechnung des Schwemmholtzpotenzials:** Für die Berechnung des Schwemmholtzpotenzials müssen die Gefährdungsflächen infolge Rutschungen und Seitenerosion mit dem Holzvorrat v_H multipliziert werden, welcher für das EG des Renggbachs mit $v_H = 0.04 \text{ m}^3/\text{m}^2$ (Gesamtvorrat für das Schweizer Mittelland) angenommen wird (Brändli, 2010). Somit ergibt sich ein Schwemmholtzpotenzial infolge Rutschungen und Seitenerosion von $S_{pot_GIS} = 28420 \text{ m}^3$. Dabei beträgt der Anteil des Schwemmholtzpotenzials infolge Rutschungen 93 % und infolge Seitenerosion 7 %.

Mit Hilfe von dokumentierten Schwemmholtzmengen während Hochwasserereignissen kann die effektive Schwemmholtzmenge abgeschätzt werden. Beim Hochwasserereignis 2005 (HQ₃₀) wurden 50 m^3 Festvolumen Schwemmholtz in den Renggbach eingetragen (Hunziker, Zarn & Partner et al., 2008). Dies entspricht 0.2 % des Schwemmholtzpotenzials der GIS-Analyse. Im Vergleich dazu wurden beim Hochwasserereignis 2005 (HQ₁₀₀) bei der Kleinen Emme 0.01 % und bei der Grossen Melchaa 0.5 % des berechneten Schwemmholtzpotenzials infolge Rutschungen (ohne Seitenerosion) in das Gewässer eingetragen (Mächler, 2009). Unter der konservativen Annahme,

dass im Hochwasserfall (HQ₁₀₀) 1.0 % des Schwemmholtzpotenzials im Renggbach mobilisiert wird, ergibt sich die effektive Schwemmholtzmenge zu $S_{eff_GIS} \approx 280 \text{ m}^3$ (Bild 4). Die Festlegung dieses Abminderungsfaktors beinhaltet die grösste Unsicherheit bei der Abschätzung der effektiven Schwemmholtzmenge. Der Abminderungsfaktor ist stark von den Unterhaltsmassnahmen (z.B. Art und Ausmass der Waldflege) und des Zustands des Bachverbaus abhängig. Werden Rückhaltemassnahmen projektiert, sollte der Abminderungsfaktor im Sinne einer Sensitivitätsanalyse variiert und entsprechend Reserven im Rückhalterraum eingeplant werden.

3.2 Empirische Schätzformeln

Neben der GIS-Analyse kann das Schwemmholtzvolumen in einem EG auch mit Hilfe empirischer Schätzformeln berechnet werden. Rickenmann (1997) hat aufgenommene Schwemmholtzmengen während der Hochwasserereignisse der Jahre 1987 und 1993 für mehrere EG in der Schweiz ausgewertet und, basierend darauf, empirische Schätzformeln für die effektive Schwemmholtzmenge und das Schwemmholtzpotenzial ableitet. Seine Datengrundlage wurde durch Hochwasserereignisse in Japan, Deutschland und den USA erweitert (Ishikawa, 1990; Uchiogi et al., 1996). Die empirischen Schätzformeln berechnen die effektive Schwemmholtzmenge S_{eff_emp} und das Schwemmholtzpotenzial S_{pot_emp} in [m^3] als Lockervolumen (V_L), basierend auf den folgenden Eigenschaften des Einzugsgebiets bzw. des Hochwasserereignisses:

- Grösse des Einzugsgebiets (Rickenmann, 1997):
 $S_{eff_emp} = 45 EG^{2/3}$, gültig für $EG = 0.054\text{--}6273 \text{ km}^2$ (erfüllt), (2)
mit EG = Einzugsgebiet in [km^2].

- Abflussfracht (Rickenmann, 1997):
 $S_{eff_emp} = 4 V_W^{2/5}$, gültig für $V_W = 21.6\text{--}390 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ (erfüllt), (3)
mit V_W = Abflussfracht in [m^3]. Bei einem HQ₁₀₀ im Renggbach wurde dieser Wert zu ca. $V_W = 925\,000 \text{ m}^3$ abgeschätzt.

- Feststofffracht (Ishikawa, 1990; Uchiogi et al., 1996):
 $S_{eff_emp} = 0.02 F$, gültig für $F = 380\text{--}50\,000 \text{ m}^3$ (erfüllt), (4)
mit F = Feststofffracht in [m^3]. Bei einem HQ₁₀₀ im Renggbach beträgt dieser Wert rund $F = 17\,000 \text{ m}^3$ (VAW, 1999).

- Vegetationstyp im Einzugsgebiet (Ishikawa, 1990; Uchiogi et al., 1996):
 $S_{pot_emp} = C EG$, gültig für $EG < 100 \text{ km}^2$ (erfüllt), (5)

mit C = dimensionsloser Beiwert, in Abhängigkeit des Vegetationstyps. Die tatsächlich aufgenommenen Schwemmholtzmengen während des Hochwasserereignisses 2005 entsprechen für EG mit $\approx 10 \text{ km}^2$ maximal einem Beiwert $C = 400$ (Bezzola und Hegg, 2008). Für eine konservative Berechnung wird für den Renggbach $C = 400$ angenommen. Bei der Wahl des C-Beiwerts können zum Beispiel die Erfahrungswerte des Hochwasserereignisses vom August 2005 herangezogen werden.

- Waldanteil des Einzugsgebiets (Rickenmann, 1997):
 $S_{pot_emp} = 90 EG_W$, gültig für $EG = 0.76\text{--}78 \text{ km}^2$; $EG_W = 0.3\text{--}21.1 \text{ km}^2$ (erfüllt), (6)

mit EG_W = bewaldetes Einzugsgebiet in [km^2]. Der Waldanteil im Renggbach-Einzugsgebiet beträgt ca. 70 %, d.h. $EG_W = 8.9 \text{ km}^2$.

- Bewaldete Uferlänge (Rickenmann, 1997):
 $S_{pot_emp} = 40 L_W^2$, gültig für $L_W < 20 \text{ km}$ (erfüllt), (7)
mit L_W = bewaldete Uferlänge in [km]. Für den Renggbach beträgt $L_W = 6.6 \text{ km}$.

Je nach Schätzformel beträgt das Schwemmholtzvolumen für den Renggbach bei einem HQ₁₀₀ zwischen ca. 240–5000 m^3 (Lockervolumen). In der Literatur werden die Schätzformeln (2)–(4) als effektive Schwemmholtzmenge für ein betrachtetes Hochwasserereignis und (5)–(7) als Schwemmholtzpotenzial definiert. Das Schwemmholtzpotenzial von Gl. (5)–(7) ist

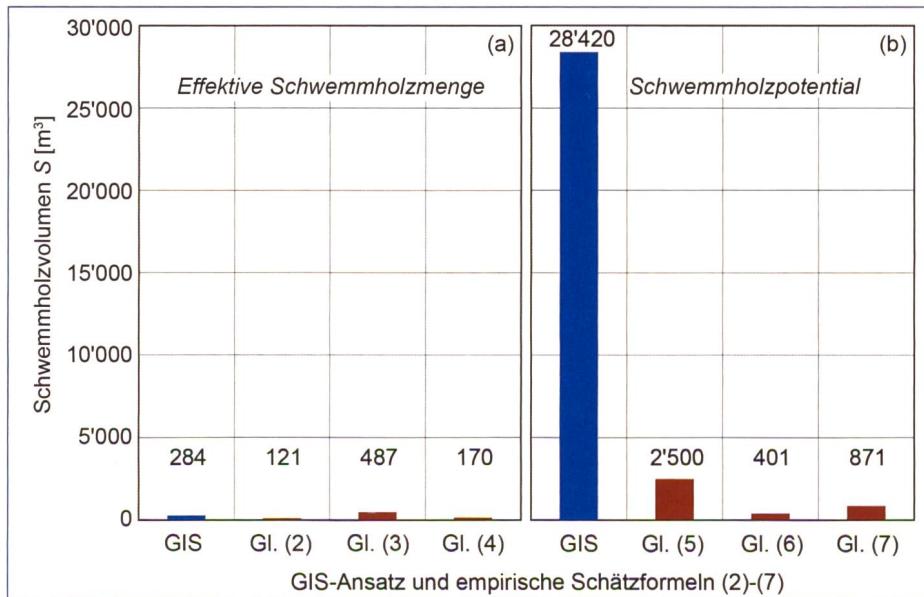


Bild 4. Schwemmholtzvolumen (Festvolumen), berechnet mit der GIS-Analyse und den empirischen Schätzformeln: (a) effektive Schwemmholtzmenge und (b) Schwemmholtzpotenzial.

jedoch nur eine Funktion des Uferbereichs (L_w) respektive des Vegetationstyps (C, EG_w) im EG. Die Ergebnisse von Gl. (5)–(7) entsprechen somit nicht dem gesamten mobilisierbaren Holzvorrat im EG. Die Gegebenheiten im EG können mit Hilfe der GIS-Analyse besser berücksichtigt werden. Die Ergebnisse der GIS-Analyse sind in Bild 4 den Resultaten der empirischen Schätzformeln gegenübergestellt. Für die Vergleichbarkeit der Ergebnisse wurden dabei die Schwemmholtvolumen der Schätzformeln (Lockervolumen) unter der Annahme eines kompakten Schwemmholtörpers (Auflockerungsfaktor $a = V_L/V_F = 2$) in Festvolumen umgerechnet. Basierend auf den Werten in Bild 4, wird für das Schwemmholtpotenzial im EG konservativ das Ergebnis der GIS-Analyse mit $S_{pot_GIS} = 28\,420 \text{ m}^3$ (Festvolumen) verwendet. Für die effektive Schwemmholtmenge wird anstelle des Maximalwerts (Gl. (3) = 487 m^3) jedoch der Mittelwert aller Ansätze (Gl. (2)–(4) und GIS-Analyse) mit $S_{eff_m} \approx 270 \text{ m}^3$ (Festvolumen) verwendet, da die umfangreiche Waldflege im EG des Renggbachs die effektive Schwemmholtmenge reduziert. Es wird jedoch empfohlen, bei EG mit geringen Unterhaltsmassnahmen den berechneten Maximalwert zu verwenden. Für die Beurteilung des Überlastfalls könnte als Richtwert die doppelte effektive Schwemmholtmenge des HQ₁₀₀ angenommen werden, wie beispielsweise bei der Engelberger Aa (VAW, 2011), Sihl (VAW, 2012) oder Kleinen Schliere (VAW, 2016b).

4. Gefahrenbeurteilung

Für die Gefahrenbeurteilung werden die Brücken im Projektperimeter (Bild 2) näher betrachtet. In einem ersten Schritt wird überprüft, ob eingetragenes Schwemmholt im Hochwasserfall mobilisiert wer-

den kann und somit die Brücken erreicht. Die Schwemmholtabmessungen basieren auf Daten, die nach dem Hochwasserereignis 2005 (Bezzola und Hegg, 2007) erhoben wurden und repräsentativ für verschiedene EG sind. Sie entsprechen einer ersten Abschätzung und können wie folgt zusammengefasst werden:

- Stammlänge $L = 10 \text{ m}$
- Stammdurchmesser $d = 0.5 \text{ m}$
- Maximaler Durchmesser des Wurzelellers $d_{Wmax} = 2 \text{ m}$
- Minimaler Durchmesser des Wurzelellers $d_{Wmin} = 1 \text{ m}$

Nach Lange und Bezzola (2006) können glatte Stämme mit einem Durchmesser d ab einer Wassertiefe $h > d/2$ transportiert werden. Dieses Kriterium wird im Renggbach bei einem HQ₁₀₀ im Projektperimeter erfüllt. Unter Berücksichtigung der Rutschungsflächen (Abschnitt 3.1 sowie Bild 3) kann im Hochwasserfall ein Schwemmholtzeintrag bis in die Kleine Emme nicht ausgeschlossen werden.

Die Verklausungsgefahr der Brücken wird mit Hilfe von drei Faktoren beurteilt. Neben (1) der Verklausungswahrscheinlichkeit sind (2) das Freibord und (3) die Energiehöhe die massgebenden Parameter. Die Verklausungswahrscheinlichkeit wird nach Lange und Bezzola (2006) sowie Schmocke und Hager (2011) ermittelt. Die erforderlichen Eingangsgrößen sind die hydraulischen Parameter, die Brückenabmessungen und die Schwemmholtabmessungen. Bei beiden Berechnungsmethoden wird zwischen der Verklausung einzelner Stämme und einzelner Wurzelstücke unterschieden. Fällt das Schwemmholt schubweise an, erhöht sich die Verklausungswahrscheinlichkeit (Lange und Bezzola, 2006; Schmocke und Hager, 2011), was jedoch bei beiden Ansätzen nicht rechnerisch berücksichtigt

wird. Die Verklausungswahrscheinlichkeiten p_{S_LB} für einzelne Stämme (Index S) sind in Bild 5a nach Lange und Bezzola (2006) (Index LB) in Abhängigkeit der Stammlänge L zur Breite des Brückenquerschnitts B dargestellt. In Bild 5b sind die Verklausungswahrscheinlichkeiten p_{W_LB} für einzelne Wurzelstücke (Index W) nach Lange und Bezzola (2006) in Abhängigkeit von d_w/H (geometrisches Mittel der Abmessungen des Wurzelellers und der Stammlänge L) zur lichten Höhe des Brückenquerschnitts H abgebildet. Im Vergleich dazu sind in Bild 5c die Verklausungswahrscheinlichkeiten für einzelne Wurzelstücke p_{W_SH} nach Schmocke und Hager (2011) (Index SH) in Abhängigkeit der Zufluss-Froude-Zahl F_o dargestellt. Je nach Berechnungsansatz (Bild 5b versus Bild 5c) sind die Verklausungswahrscheinlichkeiten sehr unterschiedlich. p_{S_LB} schwankt zwischen 0–25 % und $p_w = 0–100 \%$, wobei p_{W_LB} tendenziell grösser ist als p_{W_SH} . Um abzuschätzen, ob eine Brücke nun tatsächlich verklausungsgefährdet ist, werden zusätzlich das vorhandene Freibord und die Energiehöhe betrachtet. Das erforderliche Freibord wird nach KOHS (2013) ermittelt und die Energiehöhe beim HQ₁₀₀ für jeden Brückenquerschnitt berechnet. Die Verklausungsgefahr wird als mittel bis hoch eingestuft, wenn die Verklausungswahrscheinlichkeit $p \geq 0.25$, das Freibord gering ($f_e \leq 1.0 \text{ m}$) und sich die Energiehöhe im Bereich der Brückenunterkante befindet. Brücken mit einer ungünstigen Geometrie (Fachwerkkonstruktion) können die Verklausungsgefahr zusätzlich erhöhen (Bild 6). Damit resultiert bei einem HQ₁₀₀ für vier von sieben Brücken eine mittlere bis hohe Verklausungsgefahr (Bilder 5a–c in Rot dargestellt).

5. Schutzmassnahmen

Um die negativen Auswirkungen von transportiertem Schwemmholt im Hochwasserfall zu verringern, sind passive und aktive Schutzmassnahmen möglich (Lange und Bezzola, 2006). Mit Hilfe von passiven Massnahmen (organisatorisch oder planerisch) kann das Schadenpotenzial verringert werden. Aktive Massnahmen sind zum Beispiel (1) Unterhaltsmassnahmen, (2) Massnahmen zur Verminderung des Verklausungsrisikos oder (3) Schwemmholtrückhalt. Im Folgenden werden mögliche aktive Massnahmen für den Renggbach vorgestellt.

5.1 Unterhaltsmassnahmen

Derzeit wird das Schwemmholtrisiko im EG des Renggbachs mit Hilfe von Unter-

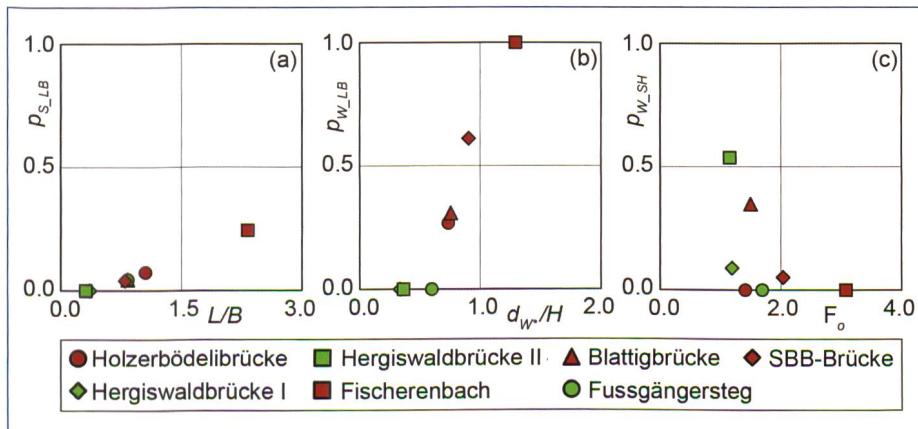


Bild 5. Verklausungswahrscheinlichkeiten (a) p_{S_LB} für einzelne Stämme nach Lange und Bezzola (2006), (b) p_{W_LB} für einzelne Wurzelstücke (Index W) nach Lange und Bezzola (2006) und (c) p_{W_SH} nach Schmocke und Hager (2011); Brücken mit einer hohen Verklausungsgefahr sind in Rot dargestellt.

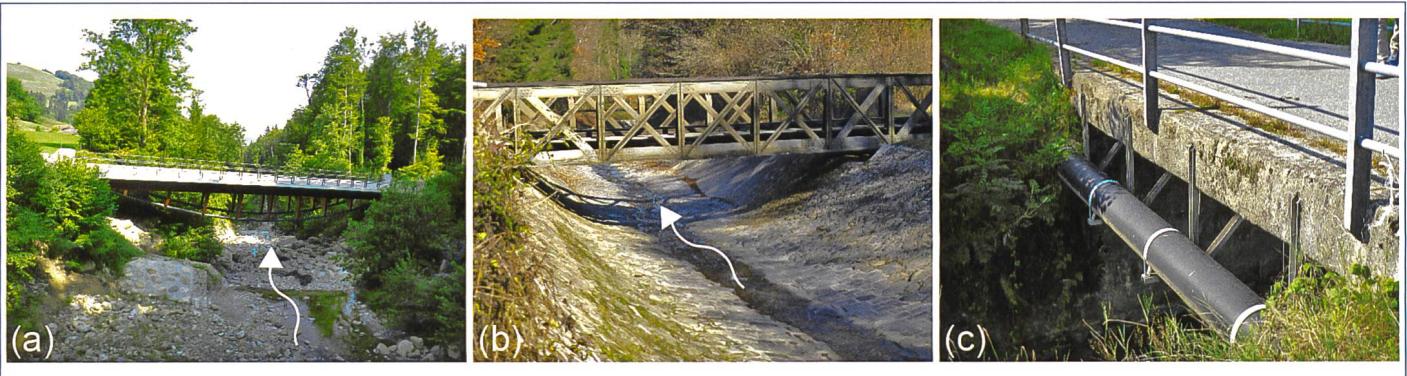


Bild 6. Beispiele für Brücken im Projektperimeter mit einer ungünstigen Geometrie: (a) Unterzugkonstruktion der Hergiswaldbrücke II, (b) Fachwerkkonstruktion der SBB Brücke, (c) Werkleitung an der Fischerenbachbrücke.

haltsmassnahmen reduziert. Der Zustand des Renggbachs und der Seitenbäche wird regelmässig sowie nach grösseren Abflussereignissen vom Bachmeister überprüft. Die umliegenden Waldfächen werden aktiv beobachtet. Neben der regelmässigen Räumung des Bachbetts (Schwemmholt sowie Geschiebe) werden kritische Bereiche vom Forstbetrieb ausgeholt (Plüss Meyer Partner, 2009). Die aktuellen Unterhaltsmassnahmen verringern die effektive Schwemmholtmenge und somit die Gefahr einer Verklausung. Für die Hochwassersicherheit sind diese Massnahmen von grosser Bedeutung und sollten so weitergeführt werden. Vor allem die Bereiche stromabwärts der Rutschungsflächen (Bild 3) weisen eine hohe Verklausungsgefahr auf und sollten regelmässig überprüft werden. Aufgrund der ökologischen Bedeutung von Totholz im Gewässer wird empfohlen, Bachabschnitte mit einem geringen Verklausungsrisiko (Abschnitte ohne Engstellen, mit geringen Rutschungsflächen oder entfernt von Infrastrukturbereichen) weniger zu bewirtschaften. Die Unterhaltsmassnahmen im EG sollten einerseits die Risikominimierung von Schwemmholtverklausungen gewährleisten und andererseits zu den positiven morphologischen und ökologischen Auswirkungen von Totholz im Gewässer beitragen.

5.2 Verminderung des Verklausungsrisikos

Mit Hilfe von technischen Massnahmen kann das Verklausungsrisiko bei Brücken minimiert werden. Die Brücken im Projektperimeter weisen teilweise eine ungünstige Geometrie auf, die das Verhängen von Stämmen oder Wurzelstöcken begünstigt (Bild 6). Die Hergiswaldbrücke II (Bild 6a) weist mit der Unterzugkonstruktion zwar eine ungünstige Geometrie auf, besitzt jedoch genügend Freibord, sodass das Risiko einer Verklausung eher klein ist. Bei

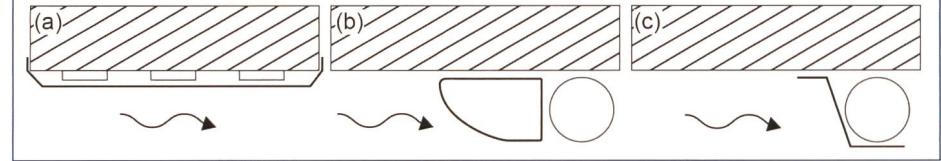


Bild 7. Massnahmen zur Verminderung des Verklausungsrisikos: (a) Vollverschalung; (b) Einzelverschalung Typ Nase; (c) Einzelverschalung Typ Leitblech (nach Lange und Bezzola, 2006).

offenen Konstruktionen (Bild 6b) ist eine Vollverschalung (Bild 7a) eine geeignete Gegenmassnahme, während bei Brücken mit einer festigen Werkleitung (Bild 6c) Einzelverschalungen, wie zum Beispiel Nasen oder Leitbleche, besser geeignet sind und an der stromaufwärts gerichteten Brückenunterkante befestigt werden sollten (Lange und Bezzola, 2006; Bilder 7b und 7c).

5.3 Schwemmholtrückhalt

Ist das Risiko einer Verklausung und gleichzeitigen Überschwemmung auch mit Unterhaltsmassnahmen oder Massnahmen an Brücken noch immer zu gross, kann Schwemmholt oberstrom von gefährdeten Gebieten zurückgehalten werden. Die verschiedenen Ausführungsmöglichkeiten des Schwemmholtrückhalts werden in Schmocke und Weitbrecht (2013) zusammengefasst. Im Fallbeispiel Renggbach eignet sich der Bereich der Hergiswaldbrücke II (Bild 2) als Rückhaltestandort, da er für den Projektperimeter ein eher geringes Längsgefälle von $J = 3.5\%$ aufweist und sich flussaufwärts von grösseren Siedlungen oder Infrastrukturbereichen befindet.

Im vorliegenden Fall würde sich die Anordnung eines V-Rechens gegen Fliessrichtung anbieten (Knauss, 1995). Für die Dimensionierung des Schwemmholtrechens können die Rechenhöhe und der Stababstand, basierend auf empirischen Gleichungen, ermittelt werden. Der Aufstau Δh infolge einer Schwemmholtverklausung ist eine wichtige Eingangsgröße für die Bestimmung der Re-

chenhöhe h_R . Die Berechnung von Δh [m] wird nach Knauss (1995, Index K) sowie nach Schmocke und Hager (2013) für ein $HQ_{100} = 96 \text{ m}^3/\text{s}$ durchgeführt. Der resultierende Aufstau für ein HQ_{100} nach Knauss (1995) ergibt $\Delta h_K = 2.0 \text{ m}$, während er nach Schmocke und Hager (2013) $\Delta h_{SH} = 3.7 \text{ m}$ beträgt. Die Höhe der einzelnen Rechenstäbe h_R sollte grösser sein als die Summe der Ausgangswassertiefe h_o und dem zu erwartenden Aufstau Δh ; $h_R \geq h_o + \Delta h$ sollte demnach 3.4–5.1 m betragen. Der erforderliche Stababstand s [m] kann in Abhängigkeit der Stammlänge L [m] nach Lange und Bezzola (2006) berechnet werden mit $L \geq 1.5 \text{ s}$. (8)

Unter der Annahme, dass Stammlängen ab 2.5 m zurückgehalten werden sollen, ergibt sich $s \leq 1.70 \text{ m}$. Der Schwemmholtrechen sollte in der Lage sein, die ermittelte effektive Schwemmholtmenge S_{eff_m} mit einem Festvolumen $\approx 270 \text{ m}^3$ zurückzuhalten und noch genügend Reserve aufzuweisen, falls das Schwemmholtzaufkommen grösser ist. Je nach Kompaktheit der Verklausung kann das Lockervolumen $\approx 500 \text{ m}^3$ ($a = 2$) bis $\approx 700 \text{ m}^3$ ($a = 4$) betragen. Bei einem V-förmigen Schwemmholtrechen gegen die Fliessrichtung im Bereich der Hergiswaldbrücke wäre unter Annahme der Bildung eines einlagigen Schwemmholtteppichs der vorhandene Rückhalteraum ausreichend gross. Hinsichtlich der Gewährleistung der Geschiebedurchgängigkeit wäre allenfalls ein selektiver Rückhalt besser geeignet, wie z.B. beim Riemenstaldnerbach (Kanton Uri) im Rahmen von Modellversuchen an

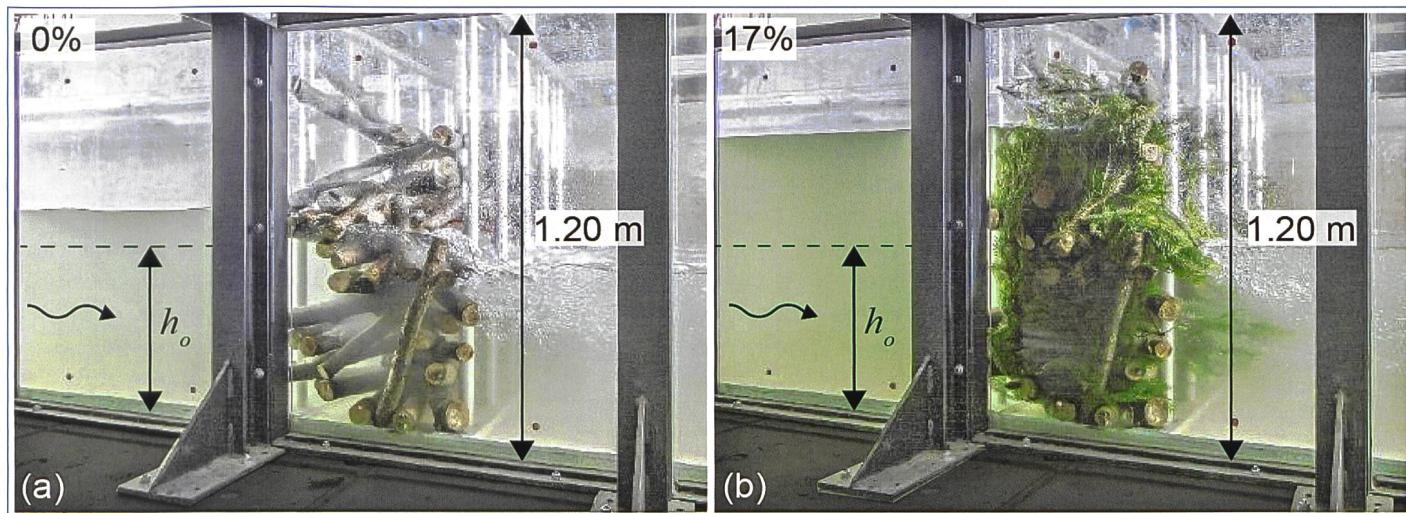


Bild 8. Modellversuche an der VAW mit $Q = 371 \text{ l/s}$, Kanalbreite $b = 150 \text{ cm}$, $h_o = 45 \text{ cm}$, Stammdurchmesser $d = 6.5 \text{ cm}$, (a) 0% und (b) 17% (Volumenprozent) Feinanteil.

der VAW untersucht wurde (VAW, 2001). Eine weiterführende Dimensionierung, verschiedene Ausführungsmöglichkeiten oder der Überlastfall waren nicht Teil der vorliegenden Untersuchung. Für die Überprüfung dieser Aspekte müssten zusätzliche Untersuchungen bzw. Modellversuche durchgeführt werden.

Im Rahmen des WoodFlow-Projekts werden an der VAW die massgebenden Parameter für den Aufstau an einem Schwemmholtrechen unter Berücksichtigung von Blättern und Ästen (Feinanteil) untersucht. Die Forschungsergebnisse der VAW zeigen, dass der Feinanteil in einer Schwemmholtverklausung den Aufstau wesentlich erhöht (Bild 8). Der Aufstau Δh wird pro Volumenprozent des Feinanteils in einer Schwemmholtverklausung um ca. 9 % erhöht. Unter der Annahme, dass beim Renggbach im Hochwasserfall etwa 5 % Feinanteil in der Schwemmholtverklausung vorhanden sind, erhöht sich der Aufstau Δh um ca. 45 %. Die erforderliche Rechenhöhe h_R beträgt daher unter Berücksichtigung des Feinanteils $h_R \approx 4.9 - 7.4 \text{ m}$ statt $\approx 3.4 - 5.1 \text{ m}$.

6. Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Am Fallbeispiel Renggbach werden das Vorgehen bei der Gefahrenbeurteilung von Schwemmholt und die Massnahmenplanung für steile und bewaldete Einzugsgebiete beschrieben. Das Vorgehen kann anhand der folgenden vier Schritte durchgeführt werden:

1. Definition und Analyse der massgebenden Eintragsprozesse von Schwemmholt im Einzugsgebiet;
2. Ermittlung des Schwemmholtpotenzials und der Schwemmholtmenge mit Hilfe einer GIS-Analyse (Einzugsge-

bietsbetrachtung) und Vergleich mit Ergebnissen empirischer Schätzformeln aus der Literatur;

3. Beurteilung der Verklausungsgefahr der massgebenden Brücken unter Berücksichtigung
 - a) der Verklausungswahrscheinlichkeit
 - b) des Freibords
 - c) der Lage der Energiehöhe, und
 - d) der Brückengeometrie und des Standorts;
4. Ableitung geeigneter Schutzmassnahmen (Präventiv- und Unterhaltsmaßnahmen, Massnahmen zur schadlosen Weiterleitung sowie Schwemmholtrückhalt).

Das Schwemmholtpotenzial im Einzugsgebiet des Renggbachs wird, basierend auf den Berechnungen, als gross eingestuft, beträgt anhand der GIS-Analyse $S_{pot_GIS} = 28\,420 \text{ m}^3$ und dient als Richtwert für den potenziell mobilisierbaren Holzvorrat infolge Rutschungen und Seitenerosion. Im Vergleich zur GIS-Analyse wird das Schwemmholtpotenzial mit den empirischen Schätzformeln (Gl. (5) bis (7)) auf andere Weise bewertet und ist deutlich kleiner. Weiter können mit Hilfe der GIS-Analyse kritische Bereiche im Projektperimeter infolge Rutschungen und Seitenerosion identifiziert werden, die in einem weiteren Schritt als Grundlage für die Massnahmenplanung dienen können. Unter Berücksichtigung von beobachteten Schwemmholtmengen, kann basierend auf dem Schwemmholtpotenzial der GIS-Analyse, eine effektive Schwemmholtmenge bei Bemessungshochwassern (typisch HQ₁₀₀) abgeschätzt werden, die bei ca. 0.5–1 % des ermittelten Schwemmholtpotenzials liegt. Für die Beurteilung des Überlastfalls kann als Richtwert die

doppelte effektive Schwemmholtmenge des HQ₁₀₀ angenommen werden. Die Ergebnisse der GIS-Analyse sollten mit Hilfe der empirischen Schätzformeln auf Plausibilität geprüft und wenn möglich mit Daten aus vorhergehenden Hochwasserereignissen verglichen werden.

Das Einzugsgebiet des Renggbachs ist durch zahlreiche Sohlsicherungsmassnahmen und mehrere Brücken charakterisiert. Für vier von sieben Brücken resultiert eine mittlere bis hohe Verklausungsgefahr, da sie eine Verklausungswahrscheinlichkeit $p \geq 0.25$, ein geringes Freibord und eine Energiehöhe im Bereich der Brückenunterkante aufweisen. Weiter befinden sich diese Brücken in der Nähe von potenziellen Rutschungsflächen mit grossem Schwemmholtzeintrag.

Aufgrund der effektiven Schwemmholtmenge und der Verklausungsgefahr bei den Brücken wurden verschiedene Schutzmassnahmen für ein HQ₁₀₀ geprüft. Die derzeit durchgeföhrten Unterhaltsmaßnahmen im Renggbach sind für die Reduktion der effektiven Schwemmholtmenge notwendig. Die Verklausungsgefahr kann bei den Brückenquerschnitten durch Massnahmen zur schadlosen Weiterleitung verringert werden. Es ist zu berücksichtigen, dass bereits eine geringe Schwemmholtmenge im Hochwasserfall zu einer Verklausung und folglich zu Überschwemmungen führen kann. Basierend auf einer ersten Abschätzung, ist die Machbarkeit eines Schwemmholtrechens im Bereich der Hergiswaldbrücke gegeben. Im Überlastfall sollten Rückhaltemassnahmen robust reagieren und Siedlungsgebiete sowie Sonderstandorte, zum Beispiel wichtige Infrastrukturbereiche, speziell geschützt werden.

Der Aufstau infolge Schwemmholtverklausung ist ein wesentlicher Parameter für die Dimensionierung eines Schwemmholtrechens (Rechenhöhe). Die gängigen Schätzformeln zur Ermittlung des Aufstaus vernachlässigen jedoch die Kompaktheit der Schwemmholtverklausung sowie die Schwemmholtzeigenschaften (Abmessungen, Zusammensetzung, Feinanteil). Dies könnte dazu führen, dass die resultierende Rechenhöhe unterschätzt wird. Somit können die Rückhalteleistung und das Verhalten im Überlastfall nicht ohne Weiteres ermittelt werden. Es empfehlen sich für solche Bauwerke zusätzliche Untersuchungen, z.B. mit Hilfe von Modellversuchen.

Eine aktuelle Studie an der VAW zeigt, dass der Feinanteil in einer Schwemmholtverklausung den resultierenden Aufstau wesentlich erhöht. Zukünftig sollte die Berechnung des Aufstaus infolge Schwemmholtverklausung sowohl die Zuflussbedingungen als auch die Schwemmholtzeigenschaften berücksichtigen. Eine entsprechende Bemessungsgleichung ist zurzeit in Entwicklung. Mit Hilfe dieser Gleichung kann die Gefahrenbeurteilung von Schwemmholtverklausungen in der Praxis weiter verbessert werden und eine Risikoabschätzung für Hochwasserereignisse mit hohem Schwemmholtzaufkommen durchgeführt werden.

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.
Brändli, U.-B. (Red.) (2010). Schweizerisches Landesforstinventar. Ergebnisse der dritten Erhebung 2004–2006. Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, WSL. Bundesamt für Umwelt, BAFU. 312 S.
Geoinformation Kanton Luzern (2015). <http://www.geo.lu.ch/map/gefahrenkarte/>. Stand: 14.12.2015, 15:50 Uhr.
Hunziker, Zarn & Partner; VAW; Colenco (2008). Gesamtkonzept für die Kleine Emme und die Reuss, Abschnitt Malters bis Bremgarten. Arbeitsgruppe Kraftwerke, Alarmierung und Holzmanagement Reuss. Schwemmholt – Rückhalt und Entnahme. 18. April 2008. Aarau, Schweiz.
Ishikawa, Y. (1990). Studies on disasters caused by debris flows carrying floating logs down mountain streams. Doktorarbeit. Kyoto University, Japan.
Knauss, J. (1995). Von der oberen zur unteren Isar. Bericht 76: 23–66. Lehrstuhl und Versuchs-

anstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU München.

- KOHS** (2013). Freibord bei Hochwasserschutzprojekten und Gefahrenbeurteilungen. «Wasser Energie Luft» 105(1): 43–53.
Lange, D.; Bezzola, G.R. (2006). Schwemmholt: Probleme und Lösungsansätze. VAW-Mitteilung 188 (H.-E. Minor, Ed.), ETH Zürich.
Mächler, M. (2009). GIS-Modellierung von potenziellem Schwemmholtzeintrag von Rutschungen. Semesterarbeit Umweltingenieurwesen. ZHAW, Wädenswil. 21 S.
Parker, G. (1979). Hydraulic geometry of active gravel rivers. Journal of the Hydraulics Division 105(9): 1185–1201.
Plüss Meyer Partner (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). Schwemmholt und Hochwasser. «Wasser Energie Luft» 89(5–6): 115–119.
Rickli, C.; Kamm, S.; Bucher, H. (2008). Flachgründige Rutschungen. Projektbericht Ereignisanalyse Hochwasser 2005. Bundesamtes für Umwelt, BAFU, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, WSL. 114 S.
Rimböck, A. (2003). Schwemmholtrückhalt in Wildbächen. Bericht 94. Lehrstuhl und Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU München.
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.; Schmocker, L.; Weitbrecht, V.; Boes, R.M. (2016). Schwemmholtrisiko und Massnahmenplanung am Fallbeispiel Renggbach. Wasserbau – mehr als Bauen im Wasser. 18. Gemeinschafts-Symposium der Wasserbau-Institute TU München, TU Graz und ETH Zürich. Lehrstuhl und Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU München.
Schmocker, L.; Hager, W.H. (2011). Probability of drift blockage at bridge decks. Journal of Hydraulic Engineering 137(4): 480–492.
Schmocker, L.; Hager, W.H. (2013). Scale modelling of wooden debris accumulation at a debris rack. Journal of Hydraulic Engineering 139(8): 827–836.
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». Klagenfurt, Österreich. Band 5: 279–288.

VAW (1999). Risikoanalyse Renggbach. VAW-Bericht Nr. 4130. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich (unveröffentlicht).

VAW (2001). Schwemmholt Riemenstaldnerbach. VAW-Bericht Nr. 4138. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich (unveröffentlicht).

VAW (2011). Geschiebe- und Holzrückhalt Bannwald, Engelberger Aa. VAW-Bericht Nr. 4279. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich (unveröffentlicht).

VAW (2012). Schwemmholtzrückhalt Sihl, Standort Rütiboden. VAW-Bericht Nr. 4293. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich (unveröffentlicht).

VAW (2016a). Schwemmholtzgutachten Renggbach (LU). VAW-Bericht Nr. 4334. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich (unveröffentlicht).

VAW (2016b). Geschiebesammler Chlewigen, Kleine Schliere. VAW-Bericht Nr. 4328. 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). Schwemmholt der Ereignisanalyse des Hochwassers 2005. Schlussbericht des Teilprojekts «Schwemmholt» zuhanden BAFU/WSL. Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, WSL. 72 S.

Verdankungen

Die Autorin und die Autoren bedanken sich für die Bereitstellung der Datengrundlagen und die Zusammenarbeit bei der Renggbach-Gemeinschaft, Kriens, dem Baudepartement Kriens, der Schubiger AG Bauingenieure, Hergiswil, sowie dem Fachbereich Schutzwald (lawa) und der Abteilung Naturgefahren (vif) des Kantons Luzern. Die Doktorarbeit der Autorin wird vom Schweizer Bundesamt für Umwelt (BAFU) finanziert (Projektnummer: 15.0018.PJ / O192-0202) und ist Teil des Forschungsprojekts WoodFlow.

Anschrift der Verfasser

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

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

