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

Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband

Band: 110 (2018)

Heft: 2

Artikel: Schwemmgut an Hochwasserentlastungsanlagen (HWE) von Talsperren

Autor: Schmocker, Lukas / Boes, Robert

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-941579

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: 11.02.2026

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

Schwemmgut an Hochwasserentlastungsanlagen (HWE) von Talsperren

Lukas Schmocker, Robert Boes

Zusammenfassung

Neben Feststoffen wie Geschiebe und Schwebstoffen werden bei Hochwasser meist auch Schwimmstoffe wie Treib- und Schwemmholz sowie Zivilisationsmüll mitgeführt, die an Einlaufbauwerken von Hochwasserentlastungsanlagen (HWE) zu Problemen führen können (Bild 1). Insbesondere Verklausungen an den Wehrkronen oder Einlaufschützen reduzieren die Abflusskapazität unter Umständen massgeblich und bewirken unzulässig hohe Wasserspiegel im Stauraum. Das erforderliche Freibord kann allenfalls nicht mehr gewährleistet werden. Neben der Beurteilung des Verklausungsrisikos stellt sich grundsätzlich die Frage, ob Schwemmholz zurückgehalten oder durchgeleitet werden soll. Beides bedingt eine entsprechende Auslegung der HWE bzw. Massnahmen im Stauraum.

Da bis dato keine allgemeingültigen Richtlinien zum Umgang mit Schwemmholz und Schwemmgut an HWE von Stauanlagen bestanden, wurde 2013 eine Arbeitsgruppe des Schweizer Talsperrenkomitees gebildet mit dem Ziel, den internationalen Stand des Regelwerks bzw. der «Best Practice» aufzuzeigen. Im vorliegenden Artikel werden die erarbeiteten Empfehlungen der Arbeitsgruppe zusammengefasst. Der Fokus lag auf folgenden Punkten: (1) Beurteilung der HWE hinsichtlich des Gefahrenpotenzials durch Schwemmgut, z. B. Schwemmholzaufkommen im Einzugsgebiet oder Verklausungswahrscheinlichkeit der HWE; (2) mögliche Konzepte zum Umgang mit Schwemmgut an Stauanlagen (Durchleiten oder Rückhalt); (3) Möglichkeiten für die Bauwerksoptimierung von Einlaufbauwerken sowie für allfällige betriebliche Massnahmen.

Als zentrales Resultat wurde ein Gefahrenbeurteilungsdiagramm erarbeitet. Basierend auf den Einwirkungen (Schwemmholzaufkommen, Hydraulik der HWE) und der Ausbildung der HWE, können in einem ersten Schritt die Verklausungswahrscheinlichkeit und die Verklausungsfolgen abgeschätzt werden. Aufgrund des resultierenden Gefahrenpotenzials für die Stauanlage können dann mögliche Massnahmen getroffen werden (Anpassungen HWE, Rückhalt, Durchleiten). Schliesslich wurden die wichtigsten Empfehlungen für Planer, Behörden und Betreiber zusammenfassend dargestellt.

1. Einleitung

Die vorliegenden Betrachtungen beschränken sich auf Stauanlagen, für welche die Bestimmungen des Schweizerischen Stauanlagengesetztes (StAG) und der Schweizerischen Stauanagenverordnung (StAV) anwendbar sind (www.bfe.admin.ch). Für kleinere Stauanlagen, die dem StAG unterstellt werden, weil ein besonderes Gefährdungspotenzial vorliegt, muss die Anwendbarkeit der Empfehlungen fallweise abgeklärt werden. Dies gilt insbesondere für Hochwasser- und Geschieberückhaltebecken, die über eine Entlastungssektion verfügen. Die vorliegenden Empfehlungen können zudem nicht uneingeschränkt für Flusskraftwerke übernommen werden. Die Schwemmgutprozesse in Flüssen unterscheiden sich insbesondere aufgrund der Fliessgeschwindigkeiten von den Prozessen in Speichern.

Schwemmholz und natürliches, organisches Geschwemmsel können während eines Hochwasserereignisses oberhalb der Stauanlage mobilisiert werden – sofern das Einzugsgebiet bewaldet ist – und treten in unterschiedlichen Formen auf (*Lange* und *Bezzola*, 2006). Totholz ist meist bereits im Gerinne vorhanden und wird bei Hochwasser mobilisiert. Frischholz wird bei Hochwasser aufgrund des steigenden Wasserspiegels sowie infolge Seitenerosion oder Hangrutschungen in Gewässer eingetragen und stromabwärts transportiert. Neben organischem Schwemmholz führen Gewässer im Hochwasserfall meist auch beträchtliche Mengen an anthropogenem Schwemmgut mit (z. B. Abfälle, Sperrmüll, Siloballen, Boote usw.). Eis wurde in der vorliegenden Untersuchung nicht betrachtet.

Bild 1. Verklausung der Hochwasserentlastung der Talsperre Palagnedra, Kanton Tessin, während des Hochwasserereignisses 1978 (Foto: Ofima).

Im Artikel 41 des Bundesgesetzes vom 24. Januar 1991 über den Schutz der Gewässer (GSchG) werden die Modalitäten betreffend der Behandlung von Geschwemmsel bei Stauhaltungen geregelt. Dieser Artikel besagt, dass durch den Stauanlagenbetreiber entnommenes Geschwemmsel nicht an das Unterwasser zurückgegeben werden darf. Inhaber von Stauanlagen sind verpflichtet, im Bereich ihrer Anlagen das Treibgut periodisch einzusammeln. Ausnahmen sind mit dem Einverständnis der zuständigen Behörden möglich. Im Hochwasserfall ist es aufgrund des hohen Schwemmgutanfalls meist unmöglich, alles Geschwemmsel während des Ereignisses zu entnehmen. Falls die HWE anspringt, kann ein partieller Transport von Schwemmgut über die HWE zudem kaum verhindert werden.

Aus ökologischer Sicht ist das Belassen von Holz im Gewässer wünschenswert, da die im GSchG angestrebte Durchgängigkeit nicht nur für Sediment und Fischfauna, sondern auch für natürliche Schwimmstoffe gilt. Schwemmholz trägt zur Bildung von Sohlenstrukturen bei, bietet Schutz sowie Lebensraum und Nahrungsquellen für viele Arten und verbessert generell die ökologische Funktionsfähigkeit eines Gewässers.

2. Konzepte beim Umgang mit Schwemmholz an Talsperren

2.1 Einleitung

Generell gibt es drei Möglichkeiten des Umgangs mit Schwemmgut an Talsperren: (1) Massnahmen im Einzugsgebiet zur Minimierung des Schwemmholzaufkommens; (2) Durchleiten des Schwemmguts über die HWE oder (3) den Rückhalt und die Entnahme im Stausee. Je nach Art der HWE (freier Überfall, schützenregulierter Überfall, Überfalltulpe, Streichwehr, Klaviertastenwehr) kommt Massnahme (2) infrage (ggf. erst nach Umbau-/Anpassungsmassnahmen), oder aber es sind nur die Massnahmentypen (1) und (3) aus Sicht der Gefahrenbeurteilung zulässig, sodass Schwemmgut zuverlässig von der HWE ferngehalten werden muss.

2.2 Massnahmen im Einzugsgebiet

Um das Schwemmholzaufkommen im Einzugsgebiet zu minimieren, ist eine präventive Schutzwaldpflege notwendig (*Covi*, 2009). Dazu müssen Rutschungen und Seitenerosionen vermieden und mittelfristig stabile Uferbereiche und Bacheinhänge wie auch gut strukturierte Waldbestände in Ufernähe des Speichers angestrebt werden. Bei Bäumen im Bachbett und Totholz wird meist aus Hochwasserschutzgründen beurteilt, ob sie liegen gelassen und/oder entfernt werden sollen. Allgemein ist die Bewirtschaftung an Bacheinhängen und an den Ufern von Speichern schwierig, technisch aufwendig und meist sehr kostenintensiv.

Als technische Massnahmen können Schwemmholzrückhalteanlagen im Einzugsgebiet und in den Bächen oberhalb der Stauanlage vorgesehen werden. Der Schwemmholzrückhalt kann direkt im Gerinne geschehen oder in einem dafür bestimmten Rückhalteraum wie z. B. in einem Geschiebesammler und/oder im Gerinne mithilfe von Rechenkonstruktionen, Schwemmholznetzen, selektivem Schwemmholzrückhalt usw. (*Zollinger*, 1983; *Bänziger*, 1990; *Rimböck*, 2003).

Es ist offensichtlich, dass auch mittels Schutzwaldpflege und Schwemmholzrückhalt im Einzugsgebiet ein Schwemmgutaufkommen im Stauraum einer Talsperre im Hochwasserfall nicht ausgeschlossen werden kann.

2.3 Durchleiten

Insbesondere bei Hochwasser mit hohem Schwemmgutanfall ist ein Durchleiten desselben über die HWE die einzige Option, da das Treibgut durch die Strömung im Speicher zur HWE geleitet wird. Ein Durchleiten ist nur zielführend, wenn die Möglichkeit einer Verklausung an der HWE ausgeschlossen werden kann. Dazu müssen entweder die Öffnungen des HWE-Einlaufbauwerks entsprechend gross sein, oder es muss sich um einen freien Überfall mit genügender Breite ohne Aufbauten handeln *(Bild 2)*. Die konstruktive Gestaltung der HWE muss das Durchleiten von Schwemmholz begünstigen (glatte Flächen, Ausrundungen, trompetenförmige Einläufe). Die Auswirkungen des Durchleitens auf den Flussabschnitt stromabwärts der Stauanlage sind zu prüfen – insbesondere Engstellen, Brücken und andere verklausungsgefährdete Bauwerke.

2.4 Rückhalt und Entnahme im Stausee

Generell bieten Speicher die Möglichkeit, bei Mittelwasser anfallendes Schwemmgut periodisch zu entnehmen, sofern die Zugänglichkeit für Grossgeräte gegeben ist. Aufgrund der geringen Fliessgeschwindigkeiten kann das Geschwemmsel meistens mittels Booten und z. B. Schwimmketten eingesammelt werden. Dadurch kann verhindert werden, dass das bereits eingetragene Schwemmholz im Hochwasserfall zur HWE gelangt oder absinkt und Triebwassereinläufe sowie Grundablässe verklaust bzw. in ihrer Funktion beeinträchtigt. Frischholz bleibt meist über mehrere Monate schwimmfähig (*Zollinger*, 1983), womit eine etwa halbjährliche Entnahme ausreicht.

Im Hochwasserfall mit hohem Schwemmgutaufkommen ist die Entnahme fast unmöglich, da die Leistungen von Greifern oder Rechenreinigungsmaschinen meist zu gering sind. Eine bereits verklauste HWE mittels Greifern freizuräumen, ist aufgrund der Geschwemmsel-

Bild 2. Neues HWE-Einlaufbauwerk ohne Wehrbrücke der Stauanlage Palagnedra, Kanton Tessin (Foto: Ofima).

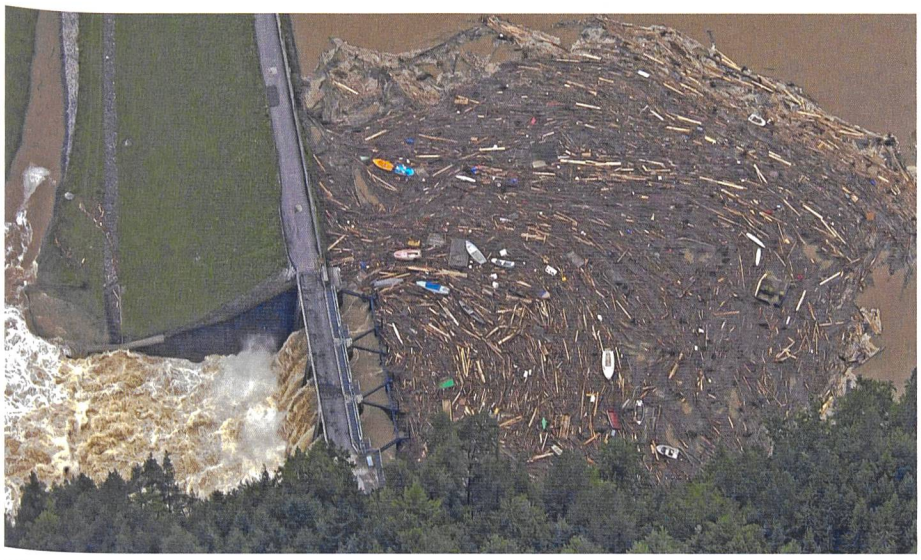

Bild 3. Vorgelagerter Rechen des Thurnberg-Speichers am Fluss Kamp, Niederösterreich, beim Extremhochwasser 2002 (Foto: Bundesamt für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Österreich).

menge sowie der Strömungsgeschwindigkeiten und der daraus resultierenden Verkeilung des Geschwemmsels praktisch unmöglich. Die Zuverlässigkeit von Schwimmketten ist im Hochwasserfall klein, da die Kräfte aufgrund des hohen Schwemmholzaufkommens meistens sehr gross sind. Es sind bereits vermehrt Probleme aufgrund gerissener Schwimmketten aufgetreten. An mehreren Anlagen hat sich ein der HWE vorgelagerter Grobrechen bewährt *(Bild 3)*. Der Rechen sollte jedoch eine entsprechend grosse Rechenfläche aufweisen, um den resultierende Aufstau im Speicher möglichst gering zu halten.

3. Regelungen in der Schweiz

In verschiedenen Ländern sind Richtlinien und Regelungen in Bezug auf Schwemmgut an HWE verfügbar. In den meisten Fällen beziehen sich diese auf minimal einzuhaltende Abmessungen der HWE. Gemäss der Basisdokumentation zur Sicherheit der Stauanlagen (*BFE*, 2017) sollen bei der konstruktiven Ausbildung von HWE die Durchlässe/Wehrfelder genügend breit bzw. hoch sein, damit eine Verklausung durch Bäume und Geschwemmsel vermieden werden kann. Eine Breite von 10 m kann – sofern es die topografischen Bedingungen und die räumlichen Verhältnisse zulassen – erfahrungsgemäss als ausreichend betrachtet werden, da aufgrund von Beobachtungen die bei Hochwasser mitgeführten Baumstämme in Gebirgsflüssen und -bächen rasch auf maximale Längen von etwa 10 m gekürzt werden. In Naturreservaten/Nationalparks oder bei unverbauten, natürlichen Gebirgsflüssen sollte die Situation betreffend Schwemmgut und dessen Abmessungen einzeln beurteilt werden.

Bei Wehren an grösseren Flüssen und im Flachland soll die Breite mehr als 10 m betragen. Des Weiteren ist bei der Gestaltung der HWE darauf zu achten, dass ein ausreichendes Freibord unter einer Wehrbrücke oder einer Aufbaute vorhanden ist, in der Regel mindestens 1.5 bis 2 m. Ein Wehrsteg sollte gegebenenfalls so konzipiert sein, dass er bei ausserordentlichen Hochwassern entfernt oder fortgespült werden kann.

Das *BFE* (2017) gibt Empfehlungen für die minimale lichte Breite L_p und die minimale lichte Höhe H_b der einzelnen Wehrfelder einer HWE in Abhängigkeit der zu erwartenden Baumlänge H_t ab:

$L_p \geq 0.8\, H_t$

$H_b \geq 0.15\, H_t$ für $L_p > 1.1\, H_t$

$H_b \geq 0.2\, H_t$ für $L_p \leq 1.1\, H_t$

Die Empfehlungen basieren auf der Untersuchung von *Godtland* und *Tesaker* (1994). Die zu erwartende Baumlänge H_t kann im Feld anhand der ufernahen Bestockung abgeschätzt werden; entsprechende Informationen sind auch dem Schweizer Landesforstinventar zu entnehmen (www.lfi.ch). Alternativ können die bei vergangenen Hochwassern beobachteten Baumlängen als Anhaltspunkt genommen werden (z. B. *Bezzola* und *Hegg*, 2007, 2008). Da für Sicherheitsbetrachtungen der HWE Extremereignisse im Vordergrund stehen, sollte insbesondere auch eine konservative Annahme bezüglich der maximal zu erwartenden Stammlängen getroffen werden.

Eine Übersicht der Regelungen in Frankreich, Österreich, Deutschland und Italien ist im STK-Bericht angegeben (*STK*, 2017).

4. Umfrage bei Wasserkraftanlagen in der Schweiz

Im Dezember 2013 wurden Fragebögen an 60 Betreiber von Wasserkraftanlagen mit Speicherseen (keine Flusskraftwerke) verteilt, wovon 52 ausgefüllt retourniert wurden. Die Ergebnisse der Umfrage können wie folgt zusammengefasst werden:

- an 46 von 52 (88 %) Stauanlagen ist bereits Schwemmholz angefallen;
- an 32 von diesen 46 (70 %) Anlagen wird Schwemmholz entnommen;
- an 18 von diesen 46 (39 %) Anlagen wird Schwemmholz über die HWE abgeführt (an sieben Anlagen wird auch entnommen);
- an fünf Anlagen sind die Kubaturen der Entnahme bekannt;
- an sieben Anlagen sind die Abmessungen des Schwemmholzes bekannt (davon ist an einer Anlage auch die Kubatur bekannt);
- an acht von 52 Anlagen (17 %) traten schon Probleme auf (meist Verklausung), an fünf Anlagen sind Schäden dokumentiert.

Von den 52 erfassten Stauanlagen verfügen alle über ein bewaldetes Einzugsgebiet (Höhenlage < 2000 m ü. M.). Somit kann an praktisch allen Stauanlagen unterhalb der Waldgrenze Schwemmholz auftreten. Da nur an acht von 52 Stauanlagen bereits Schäden aufgetreten sind, ist die Stichprobe zu klein, um eine detaillierte statistische Auswertung zum Gefahrenpotenzial durchzuführen. Zudem gibt es viele kleinere Stauanlagen, die bei der Umfrage nicht berücksichtigt wurden (z. B. Schlattli, Kanton Schwyz, wo es 2010 Probleme gab).

Die Anlagen mit dokumentierten Schäden zeigen auf, dass bei hohem Schwemmholzaufkommen die Situation häufig nicht mehr kontrolliert werden kann und dadurch die Gefahr von Verklausungen sowie Schäden schnell ansteigt. Ein Vergleich mit den Richtlinien des *BFE* (2017) zeigt zudem, dass viele HWE die minimal empfohlenen Abmessungen nicht einhalten. Bei einer angenommenen Stammlänge von 10 m erfüllen nur ca. 50 % der HWE die Empfehlungen der Schweizer Richtlinie. Es muss somit davon ausgegangen werden, dass bei den meisten Stauanlagen noch kein grosses Hochwasser mit hohem Schwemmholztransport stattgefunden hat und deshalb bisher keine Probleme beobachtet wurden. Bei einem Schwemmholzaufkommen ähnlich dem von Palagnedra 1978 oder Schlattli 2010 würden vermutlich viele HWE in der Schweiz verklausen. Anhand der Fragebö-

gen wurden mehrere Fallbeispiele aus der Schweiz ausgewählt und im Detail evaluiert (*STK*, 2017).

5. Kriterien zur Beurteilung der HWE hinsichtlich Gefahrenpotenzial

5.1 Schwemmholzaufkommen im natürlichen Einzugsgebiet

Als Grundlage für die Gefahrenbeurteilung ist abzuklären, mit welchem Schwemmholzaufkommen und welchen Schwemmholzabmessungen im Hochwasserfall zu rechnen ist. Die Bestimmung des Schwemmholzaufkommens ist dabei mit grossen Unsicherheiten behaftet. Abschätzungen der effektiven Schwemmholzmenge können durchaus um den Faktor zwei oder mehr von den effektiv verfrachteten Schwemmholzmengen abweichen. Für eine Verklausung ist die genaue Schwemmholzmenge von untergeordneter Bedeutung, da bereits einzelne grosse Stämme und Wurzelstöcke ausreichen, um den Querschnitt zu blockieren. Nachfolgendes Holz verkeilt sich in der Holzansammlung des bereits reduzierten Querschnitts.

Hochwasser und Schwemmholzaufkommen korrelieren oftmals kaum, da das Schwemmholzaufkommen und der Schwemmholztransport von vielen unterschiedlichen Faktoren beeinflusst werden. Einerseits haben die Form und Abmessungen des Schwemmholzes einen Einfluss auf den Transportzeitpunkt. Andererseits beeinflusst auch die Beschaffenheit des Gerinnes (z. B. enge Schluchtstrecken) den Zeitpunkt des Transports sowie die zurückgelegte Fliessstrecke des Schwemmholzes. Für den Schwemmholztransport stellt die Abflusstiefe einen wichtigen Faktor dar. So wird beispielsweise die grösste Schwemmholzmenge meist während der Hochwasserspitze sowie kurz davor und danach transportiert.

Das Holzaufkommen im Einzugsgebiet und dessen Eintrag in einen Speicher kann beispielsweise mit Abschätzformeln bestimmt werden, welche auf Datengrundlagen beobachteter Holzvolumina beruhen (*STK*, 2017). Generell zeigen diese Formeln jedoch grosse Streuungen und sind mit Unsicherheiten behaftet, da Faktoren wie beispielsweise Jährlichkeit des Hochwassers, Geschichte des Einzugsgebiets (letzte[s] Hochwasser), Uferbeschaffenheit oder Verlust der Hang- und Uferstabilität infolge von Vernässung nicht berücksichtigt werden. Die empirischen Gleichungen basieren zudem hauptsächlich auf Untersuchungen und Beobachtungen in Gebirgsbächen mit relativ kleinen Einzugsgebieten.

Die Analyse vergangener Hochwasserereignisse bezüglich des effektiv transportierten Schwemmholzvolumens liefert gute Anhaltspunkte für die Gefahrenabschätzung. Falls im betrachteten Einzugsgebiet keine Hochwasserereignisse mit Schwemmholztransport bekannt sind, können Daten vergleichbarer Einzugsgebiete mit ähnlicher Hydrologie, Topografie und ähnlichem Bestockungsgrad herangezogen werden. Angaben zu beobachteten Schwemmholzmengen sind z. B. in den Ereignisanalysen der Hochwasser 1987 und 1993 (*Rickenmann*, 1997) sowie 2005 (*Bezzola* und *Hegg*, 2008) zu finden. Für die massgebenden Lastfälle des Bemessungs- und Extremhochwassers muss mit aussergewöhnlichem Schwemmholzeintrag gerechnet werden. Hierzu empfiehlt sich – analog zu hydrologischen Extremwertbetrachtungen – eine Verwendung von Hüllkurven *(Bild 4)*. Für Schweizer Verhältnisse mit EG < 300 km^2 erscheint ein Schwemmholzpotenzial von H_{pot} [m^3 fest] = 400·*EG* [km^2] nach *Uchiogi et al.* (1996) als erster Anhaltswert für ein Extremhochwasser durchaus realistisch.

5.2 Schwemmholzabmessungen

Gemäss *Zollinger* (1983) ist Schwemmholz während des Transports enormen Kräften ausgesetzt. Dadurch wird dieses in Gebirgsbächen bereits nach wenigen Metern entastet, geschält und meist in 1 bis 5 m lange Stücke zerkleinert. *Lucía et al.* (2015) untersuchten die Verteilung der nach einem Hochwasser abgelagerten Stammgrössen entlang verschiedenen italienischen Flüssen. Ungefähr 50 % der aufgenommenen Stämme waren dabei länger als ca. 5 m. *Steeb et al.* (2016) schätzten ab, dass insbesondere in Wildbächen die eingetragenen und transportierten Bäume im Mittel auf ca. 20 % ihrer ursprünglichen Länge verkleinert werden. Die physikalischen Kräfte (hohes Gefälle, Schluchtstrecken) oder der Eintragsprozess (Rutschungen, Murgänge) spielen für die Verkleinerung die grössere Rolle als die Transportdistanz. Für die Ereignisanalyse des Hochwassers 2005 wurde abgelagertes Schwemmholz systematisch vermessen (*Bezzola* und *Hegg*, 2007). Ca. 35 % der Stämme waren 4 bis 6 m lang. Knapp 10 % waren länger als 8 m.

Die Abflusstiefe sowie die Flussbreite können zudem die maximal transportierbaren Stammlängen begrenzen. Vergangene Hochwasserereignisse zeigen jedoch, dass Schwemmholz durchaus grössere Dimensionen aufweisen kann. Insbesondere bei Rutschungen in einen Speicher wird die Stammlänge kaum reduziert. In vielen Fällen reicht zudem ein einzelner grosser Stamm oder Wurzelstock aus, um den Querschnitt einer HWE zu blockieren und eine Verklausung zu initiieren. Für die Abschätzung des Gefahrenpotenzials oder der Verklausungswahrscheinlichkeit sollten somit die Abmessungen der Bäume in Ufer- oder Speichernähe verwendet werden.

5.3 Verklausungswahrscheinlichkeit der HWE

In der Vergangenheit wurden verschiedene physikalische Modellversuche zur Verklausung von bestimmten HWE-Anlagen infolge Schwemmholz durchgeführt.

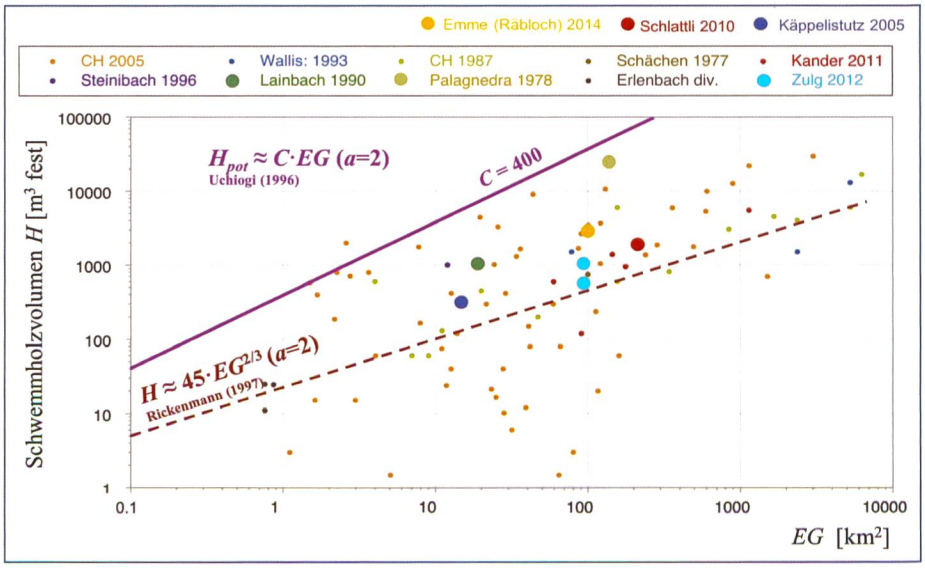

Bild 4. Beobachtete Schwemmholzvolumen (Festvolumen) bei vergangenen Hochwasserereignissen sowie Schätzformeln nach Rickenmann (1997) und Uchiogi (1996) (Auflockerungsfaktor a = 2).

Allgemeingültigen Aussagen sind jedoch nur selten vorhanden. Grundsätzlich steigt die Verklausungsgefahr mit zunehmendem Verhältnis von Stammlänge zu Wehrbreite. Eine unregulierte HWE (z. B. freier Überfall) weist bei sonst gleichen Randbedingungen kleinere Verklausungswahrscheinlichkeiten auf als eine regulierte HWE. Zwischenpfeiler, Klappen, Schützen, Wehrbrücken usw. vergrössern die Wahrscheinlichkeit einer Verklausung. Allerdings hat auch der Verschlusstyp einen Einfluss auf die Verklausungswahrscheinlichkeit. Unterströmte Verschlüsse (z. B. Hub-Senk-Schütz) sind in kritischen Verhältnissen zu vermeiden, hingegen sind überströmbare Verschlüsse wie Klappen-, Trommel-, Sektor- und Schlauchwehre eher weniger anfällig auf Verklausungen. Solche Verschlüsse können sogar von Vorteil sein, indem mit ihnen konzentrierte Schussstrahlen in der Mitte von HWE-Einlaufbauwerken erzeugt werden können. Diese vermögen allfällig verklauste Einzelhölzer infolge der hohen hydrodynamischen Kräfte zu lösen bzw. zu zerkleinern (*Hartung* und *Knauss,* 1976). Klappen sind vorteilhaft zur Erzeugung lokal grösserer Fliesstiefen, welche die Wahrscheinlichkeit des Hängenbleibens von Holz verringern (*Boes et al.*, 2013).

Gemäss *Johansson* und *Cederström* (1995) weist ein einzelnes Schwemmholzstück bei grosser Wassertiefe an der HWE und bei nur einem geöffneten Wehrfeld die geringste Verklausungswahrscheinlichkeit auf, da sich das Holz in Strömungsrichtung ausrichten kann. Sind mehrere benachbarte Wehrfelder geöffnet oder taucht das Schwemmholz schubweise auf, so erhöht sich die Verklausungswahrscheinlichkeit. Angaben zur Verklausungswahrscheinlichkeit von Klaviertastenwehren sind in *Pfister et al.* (2013a, b) vorhanden.

Hartlieb (2012) hat anhand von Modellversuchen die Gefahr von Verklausung an HWE mit Segmentschützen untersucht. Von den verschiedenen Eigenschaften des Schwemmholzes (Stammlänge, Dichte, Anzahl und Länge der Äste) hatte die Stammlänge in Bezug auf die Wehrbreite den grössten Einfluss auf die Verklausungswahrscheinlichkeit. Einzelhölzer konnten bei der Variation aller Parameter praktisch immer abgeleitet werden. Mit zunehmender Anzahl an Stämmen sowie der Länge der Äste wurde die Verklausungswahrscheinlichkeit grösser. Für HWE mit freiem Überfall und Schützen präsentierte *Hartlieb* (2015) die folgende Formel zur Bestimmung der Verklausungswahrscheinlichkeit P eines frontal angeströmten Wehrs:

$P = (L/W - 0.96) * 0.73$

mit L = Stammlänge und W = Wehrfeldbreite.

Für die Verklausung von Brücken oder Brückenpfeilern an Fliessgewässern sind in der Literatur verschiedene Formeln vorhanden (*Melville* und *Dongol*, 1992; *Lange* und *Bezzola*, 2006; *Schmocker* und *Hager*, 2011). Diese Formeln können verwendet werden, um die Verklausungswahrscheinlichkeit an einer HWE grob abzuschätzen. Die meisten Versuche an Brücken wurden jedoch bei hohen Froude-Zahlen und Fliessgeschwindigkeiten durchgeführt, wie sie insbesondere bei Hochwasser in Wildbächen und Flüssen auftreten. Die Fliessgeschwindigkeit bei der Anströmung von HWE ist meist deutlich geringer, was auch die Verklausungswahrscheinlichkeit erhöht, da Stämme bereits mit ihren Ästen an den Brücken- und Wehrstrukturen hängen bleiben können.

5.4 Aufstau infolge Verklausung

Die Durchlässigkeit einer Verklausung kann infolge von Ästen, Laub oder organischem Material sehr klein werden. Für eine Gefahrenbeurteilung ist in einem ersten Schritt davon auszugehen, dass der durch Schwemmholz verlegte Teil der HWE kaum mehr abflusswirksam ist. Der Aufstau im Speicher infolge einer Teil- oder Vollverklausung der HWE kann mittels Retentionsberechnung abgeschätzt werden. Infolge der Verklausung erhöht sich der entsprechende Wasser- und Holzdruck auf die HWE. Für die statische Bemessung ist dieser Lastfall zu berücksichtigen. *Yang et al.* (2009) führten Modellversuche für die HWE des Laxede-Damms in Schweden durch. Infolge der Verklausung des dreifeldrigen HWE-Einlaufbauwerks ergab sich ein Aufstau im Oberwasser von 16–27 % im Vergleich zum Zustand ohne Verklausung. In ähnli-chen Versuchen beobachtete *Hartlieb* (2015) einen verklausungsbedingten Aufstau von 20–30 % im Oberwasser. *Schmocker* (2017) untersuchte den Aufstau infolge Verklausung eines zweifeldrigen HWE-Einlaufbauwerks und beobachtete einen verklausungsbedingten Aufstau von ca. 30 %. Für Klaviertastenwehre hat die Untersuchung von *Pfister et al.* (2013a, b) gezeigt, dass der Überstau im Speicher wider Erwarten eher gering ist. *Schalko et al.* (2018) haben für Verklausungen an Schwemmholzrechen die Abhängigkeit des Aufstaus von der Zufluss-Froude-Zahl, Stammdurchmesser und Auflockerungsfaktor untersucht. Die Ergebnisse können als erster Anhaltspunkt herangezogen werden, sind jedoch eher für hohe Zuflussgeschwindigkeiten $v > 1.0$ m/s gültig.

6. Massnahmen

6.1 Bauliche Massnahmen zum Durchleiten von Schwemmholz

6.1.1 Anpassung der lichten Öffnungsweite

Eine Methode zur Minimierung von Schwemmholzverklausungen ist die Gewährleistung genügend grosser Abmessungen beim Einlaufbauwerk der HWE. Dabei können die Richtlinien für lichte Breite und Höhe gemäss Kapitel 3 als Entwurfsvorgabe verwendet werden. Eine Anpassung der lichten Öffnungsabmessungen kann z. B. wie folgt erreicht werden:

- Entfernung von Trennpfeilern zur Vergrösserung der lichten Wehrfeldbreite:
- Umdisponieren von Wehrbrücken / Stegen zur Vergrösserung der lichten Höhe (Bsp. Palagnedra, *Bild 2*). Brücken und Fussgängerstege sollten bei einem Bemessungshochwasser gemäss *BFE* (2017) einen Abstand von mindestens 1.5 bis 2 m zum Wasserspiegel aufweisen. Zusätzlich sollen Stege so gebaut werden, dass sie im Notfall schnell entfernt werden können:
- Ersatz oder Verzicht auf bewegliche Regulierorgane durch einen festen und unregulierten, dafür ggf. längeren Überfall.

6.1.2 Ausbildung von Einlauf- und Transportbauwerk einer HWE

Bei hohem Schwemmholzaufkommen sollten für die Ausbildung von Wehren, Pfeilern und Transportbauwerken einer HWE verschiedene Empfehlungen aus der Literatur beachtet werden (*Hartung* und *Knauss*, 1976; *USBR*, 1987; *Gotland* und *Tesaker*, 1994; *Wallerstein et al.*, 1996):

- Generell sollte die HWE möglichst glatt, ausgerundet und ohne Einbauten ausgeführt werden. Verklausungsgefährdete Anlageteile sollten z. B. mit Verschalungen versehen werden.
- Antriebswelle, Zylinder, Hydraulikleitungen von Verschlüssen usw. sollten ausserhalb des Einflussbereichs des Schwemmholzes angeordnet werden.
- Auf selbstregulierende Systeme sollte verzichtet werden.
- Bei Wehrfeldern mit Schützen sollte sich die Strömung in der Mitte konzentrieren. Optional ist bei mehreren

Wehrfeldern solange wie möglich ein asymmetrischer Betrieb anzustreben, d. h., zwei benachbarte Schützen sollten nicht gleichzeitig geöffnet werden, um eine geschwemmsellenkende Strömungswirkung zu erzielen.

- Im Falle eines Aufstaus infolge Verklausung (Kap. 5.4) sollten auch die Wehraufbauten dem Anprall von Schwemmholz standhalten.
- Generell dürfen Grobrechen nicht unmittelbar bei der Wehrkrone, sondern müssen mit genügend Abstand vor dieser angeordnet werden (siehe Kap. 6.1.3), da sonst eine Verklausung eher gefördert wird und somit die Entlastungskapazität bereits bei wenig Schwemmholz reduziert wird.
- Pfeiler erhöhen das Verklausungsrisiko immer, da infolge der geringen Geschwindigkeit Holz auch an einzelnen Pfeilern hängen bleiben kann. Infolge einer Pfeilerverklausung kann ein ganzes Wehrfeld verlegt werden.
- Aus Modelluntersuchungen an Brückenpfeilern geht hervor, dass abgerundete Pfeilerköpfe generell weniger anfällig auf Verklausung sind als rechteckige Pfeiler oder Pfeiler mit scharfen Kanten.
- Widerlager, herunterhängende Werkleitungen, Geländer oder Fachwerkkonstruktionen begünstigen eine Verklausung.
- Nach *Rickenmann* (1997) sollen Neu- oder Umbauten von Wehranlagen mit lichten Wehrbreiten von mindestens 10 m, besser aber 15 m dimensioniert werden. Zudem sollen Neubauten im Falle einer Überströmung hindernisfrei für Schwemmholz ausgeführt werden, z. B. ohne Aufbauten.
- Bei kreisförmigen Entlastungsstollen soll der minimale Durchmesser 5 m betragen. Dabei soll auf eine glatte Auskleidung ohne Verengungen oder Hindernisse und ohne scharfe Krümmungen geachtet werden (*Hartung* und *Knauss*, 1976).
- Klaviertastenwehre weisen vermutlich eine gewisse Gutmütigkeit bezüglich Schwemmholz auf. Der zusätzlich bewirkte Überstau bei einem kleinen Abfluss ist eher gering, und Schwemmholz wird bei einem grossen Abfluss tendenziell über das Wehr ins Unterwasser transportiert.

Auch hier gilt, dass insbesondere bei neuen Projekten, sofern die Gefahr einer Verklausung und ein grosses Schadenpotenzial bestehen, der Entwurf der HWE mittels hydraulischer Modellversuche inkl. Schwemmholz überprüft und ggf. optimiert werden soll.

6.1.3 Schutz der HWE mittels vorgelagerter Rechenkonstruktionen

Generell sollten Grobrechen vor HWE-Einlaufbauwerken nur angebracht werden, wenn eine anderweitige Anpassung der Form / Ausbildung der HWE unmöglich und / oder ein Durchleiten nicht zulässig ist. Rechen können insbesondere die Verlegung von beweglichen Teilen verhindern und so die betriebliche Sicherheit von Schützen, Klappen usw. gewährleisten. Zudem wird die vollständige Verklausung der HWE verhindert. Im Hochwasserfall kann jedoch der angeströmte Teil des Rechens selbst verlegt werden, womit von einem Aufstau im Speicher auszugehen ist. Um den Aufstau klein zu halten, muss der Rechen eine entsprechend grosse Rechenfläche aufweisen, der HWE deutlich vorgelagert werden und genügend tief eintauchen *(Bild 5)*. Damit kann selbst bei vollständiger Rechenverlegung Wasser unter dem Rechen in Richtung HWE abfliessen. Die mittlere Fliessgeschwindigkeit im Rechenquerschnitt sollte kleiner als 1.0 m/s sein.

Der lichte Stababstand von Schwemmholzrechen sollte keineswegs zu klein gewählt werden, um Kleinholz und Feinmaterial, welche unkritisch für die HWE sind, nicht zurückzuhalten. Es sollten aber die grossen Hölzer, welche die Abmessungen der kleinsten lichten Weite der HWE überschreiten, am Rechen verbleiben. Nach *Lange* und *Bezzola* (2006) kann für die Bemessung eines Grobrechens als Richtwert davon ausgegangen werden, dass bei einem lichten Stababstand s Holz mit einer Länge $L \geq 1.5 \cdot s$ zurückgehalten werden kann.

Alternativ zu Rechen kann Schwemmholz mittels Tauchwänden zurückgehalten werden. Bei der Überfalltulpe am Kelchbach in Naters (Kanton Wallis) hat sich die Anordnung einer vorgelagerten Tauchwand als geeignete Massnahme erwiesen, um den Eintrag von Holz in die Hochwasserentlastung zu verhindern *(Bild 6)*. Es ist jedoch auf eine genügende Tiefe der Tauchwand von mindestens 1 m unter dem Wasserspiegel zu achten, was bei stark schwankenden Speicherspiegeln nur mit schwimmenden Tauchwänden erreicht werden kann. Trotzdem besteht je nach Verweildauer des Schwemmholzes im Wasser die Gefahr, dass Schwemmgut unter der Tauchwand hindurch transportiert wird.

6.1.4 Schwimmketten

Nach *Hartung* und *Knauss* (1976) sind Schwimmketten *(Bild 7)* ein Element, um Schwemmholz vor einer HWE zurückzu-

Bild 5. Vorgelagerter Schwemmholzrechen am Thurnberg-Speicher am Fluss Kamp, Niederösterreich (Foto: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Österreich).

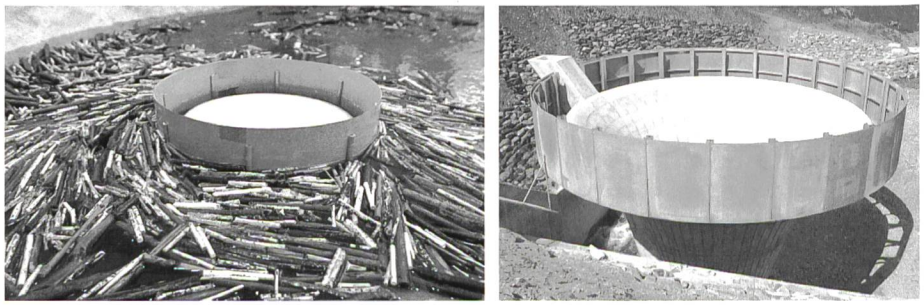

Bild 6. Tulpe mit Tauchwand im Geschiebesammler am Kelchbach in Naters, Kanton Wallis; Durchmesser der Tulpe ca. 14 m. Links: Modellversuch; rechts: Prototyp (Fotos: Lange und Bezzola, 2006).

halten. Die folgenden Aspekte sind beim Einsatz von Schwimmketten zu beachten: (1) Die Stabilität der Kette und deren Befestigung am Ufer; (2) die Abnutzung der Schwimmkörper und die zeitliche Veränderung ihrer Schwimmfähigkeit (Sättigung von Holz); (3) die Rückhaltekapazität bezüglich Schwemmholz; (4) schwankender Wasserspiegel im Stauraum.

Bei sehr langen Schwimmketten im Speicher besteht die Gefahr, dass das Schwemmholz unter der Schwimmsperre hindurchtaucht, insbesondere wenn das Holz bereits lange im Wasser schwimmt und eine höhere Dichte aufweist. Mit unter die Wasseroberfläche reichenden Schwimmrechen *(Bild 7b)* kann diese Gefahr verringert werden. Bei starker Strömung kann das Holz ebenfalls unter der Absperrung hindurch transportiert werden. Zu beachten sind auch die entsprechenden Kräfte des Schwemmholzes auf die Rückhalteelemente. Bei Talsperren, die im Winter nicht durch Hochwasser beansprucht werden, sollten Schwimmketten in der Frostperiode entfernt werden, da eine mögliche Eisdrift die Kette beschädigen oder zerstören könnte. Für die Berechnung der Kettenlänge sollte auf eine allfällige Entleerung des Speichers Rücksicht genommen werden, damit diese nicht in der Luft hängt.

Ein Versagen der Schwimmkette bewirkt einen plötzlichen Anfall eines grossen und kompakten Schwemmholzvolumens. Dies ist erfahrungsgemäss eines der kritischsten Szenarien für eine Verklausung des HWE-Einlaufbauwerks. Zudem kann eine zerstörte Schwimmkette, bestehend aus miteinander befestigten langen Zylindern, selbst eine initiale Verklausung erzeugen und so die Situation zum Negativen hin verstärken. Es stellt sich bei einem solchen Fall die Frage der Haftung.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass Schwimmketten bei kleinen Fliessgeschwindigkeiten als Instrument zur Rückhaltung und Leitung von Schwemmholz eingesetzt werden können. Im Hochwasserfall und bei hohem Schwemmholzaufkommen kann die Robustheit von Schwimmketten jedoch nicht gewährleistet werden, wie mehrere Versagensfälle von Schwimmketten zeigen. Ein Versagen ist jedoch auch bei Extremereignissen unter allen Umständen auszuschliessen, da dieses das Verklausungsrisiko an der HWE massiv verschärfen und die Talsperrensicherheit negativ beeinflussen könnte.

Bild 7. Links: Schwemmholzsperren auf dem Brienzersee, Kanton Bern, beim Hochwasserereignis 2005 (Foto: Bundesamt für Umwelt, Ittigen). Rechts: Schwimmrechen (Foto: H. Czerny, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, A).

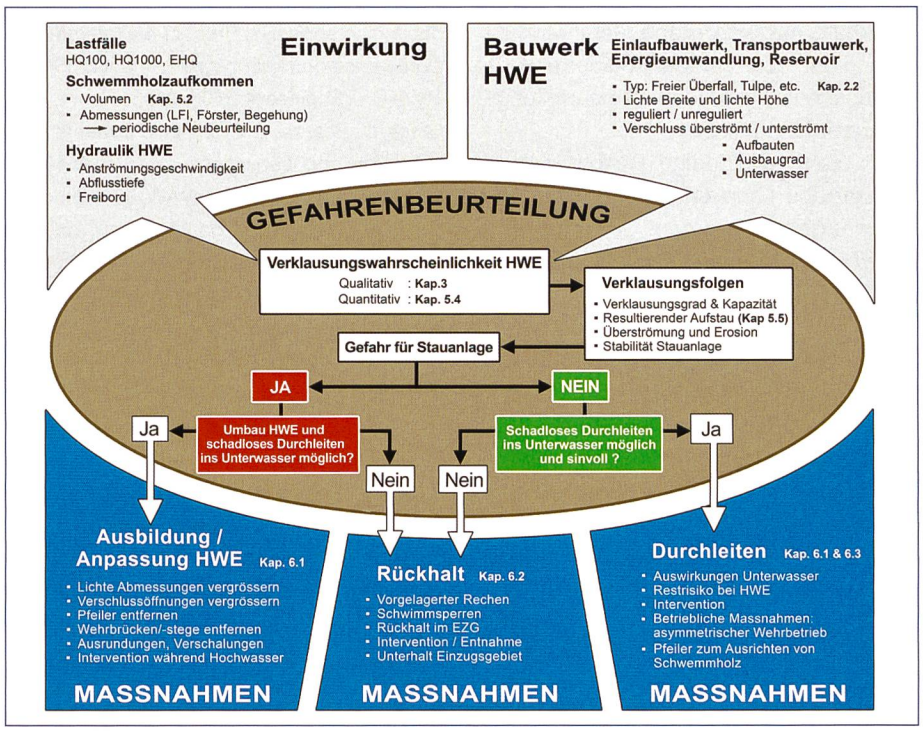

Bild 8. Gefahrenbeurteilungsdiagramm bzgl. Schwemmgut an Hochwasserentlastungsanlagen von Talsperren; die Kap.-Nummern beziehen sich auf STK (2017).

7. Gefahrenbeurteilungsdiagramm

Bei der Untersuchung einer bestehenden HWE sowie beim Bau einer neuen HWE wird die Verwendung des Gefahrenbeurteilungsdiagramms *(Bild 8)* empfohlen. Damit kann eine grobe Gefahrenbeurteilung der Hochwasserentlastung und der Stauanlage durchgeführt werden. Der Ablauf ist wie folgt:

1. Zusammentragen / Ermitteln der Grundlagen der HWE (Typ, Abmessungen usw.) sowie Bestimmung der Einwirkungen (Lastfälle Hochwasser, Schwemmholzaufkommen, Hydraulik der HWE)
2. Überprüfung der Richtlinien zu den minimal erforderlichen Abmessungen der HWE und Abschätzung der Verklausungswahrscheinlichkeit
3. Abschätzung der Verklausungsfolgen
4. Genereller Entscheid, ob eine Gefahr für die Stauanlage infolge Schwemmholz besteht
5. Erarbeiten von Massnahmen, um die Gefahr für die Stauanlage zu senken

8. Schlussfolgerungen

In der STK-Arbeitsgruppe wurde der aktuelle Stand der Richtlinien und der Technik im Umgang mit Schwemmholz an Hochwasserentlastungen von Talsperren zusammengetragen. Generelle Richtlinien betreffend Rückhalt, Durchleiten sowie zur Ausbildung der HWE sind nur bedingt vorhanden. Die Empfehlungen

verschiedener Länder basieren auf Erfahrungen aus vergangenen Ereignissen oder wurden aus hydraulischen Modellversuchen abgeleitet. Zur Minimierung des Verklausungsrisikos werden in den meisten Ländern minimale Breiten sowie Höhen der Durchlässe/Wehrfelder eines HWE-Einlaufbauwerks empfohlen bzw. vorgeschrieben. Das Verklausungsrisiko kann ebenfalls mittels entsprechender konstruktiver Ausbildung der HWE reduziert werden. Der Schutz der HWE durch vorgelagerte Rechen wurde insbesondere in Österreich an mehreren Talsperren realisiert und hat sich bereits bei Hochwasser bewährt. Schwimmketten eignen sich nur bei sehr geringen Fliessgeschwindigkeiten und garantieren bei Wellengang oder grossem Holzanfall keinen vollständigen Rückhalt. Für eine grobe Gefahrenbeurteilung der HWE und der Talsperre wurde schlussendlich ein Gefahrenbeurteilungsdiagramm erarbeitet.

Der vollständige Bericht der Arbeitsgruppe kann unter folgendem Link heruntergeladen werden:
http://www.swissdams.ch/de/publications.

Dank

Der Erstautor wird durch das «Swiss Competence Center for Energy Research – Supply of Electricity (SCCER-SoE)» finanziell unterstützt. Den Schweizer Talsperrenbetreibern wird für ihre Teilnahme an der Umfrage und den Herren *H. Czerny* (A), *G. Ruggieri* (I) und Dr. *H.-U. Sieber* (D) für die zur Verfügung gestellten Unterlagen und Informationen gedankt.

Literatur

Bänziger, R. (1990). Schwemmholz im Unwettersommer 1987. Schweizer Ingenieur und Architekt, 108(47), 1354–1358.

Bezzola, G.R., Hegg, C. (eds.) (2007). Ereignisanalyse Hochwasser 2005 Teil 1: Prozesse, Schäden und erste Einordnung. BAFU, WSL, Umwelt-Wissen 0825, WSL, Birmensdorf.

Bezzola, G.R., Hegg, C. (eds.) (2008). Ereignisanalyse Hochwasser 2005 Teil 2: Analyse von Prozessen, Massnahmen und Gefahrengrundlagen. BAFU, WSL, Umwelt-Wissen 0825, WSL, Birmensdorf.

BFE (2017). Richtlinie über die Sicherheit der Stauanlagen – Teil C2: Hochwassersicherheit und Stauseeabsenkung. Bundesamt für Energie, BFE, Bern.

Boes, R.M., Lutz, N., Lais, A., Lucas, J. (2013). Hydraulic modelling of floating debris conveyance for a spillway upgrade at a large rockfill dam. Proc. 9th ICOLD European Club Symposium, Venedig, Italien.

Covi, S. (2009). Schwemmholzrisiken reduzieren. TEC21, (31/32), 22–25.

Godtland, K., Tesaker, E. (1994). Clogging of spillways by trash. Proc. 18th ICOLD Kongress, Durban, Südafrika, 543–557.

Hartlieb, A. (2012). Modellversuche zur Verklausung von Hochwasserentlastungsanlagen mit Schwemmholz. Wasserwirtschaft, 102(6), 15–19.

Hartlieb, A. (2015). Schwemmholz in Fliessgewässern – Gefahren und Lösungsmöglichkeiten. Bericht 133, Lehrstuhl und Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische Universität München.

Hartung, F., Knauss, J. (1976). Considerations for Spillways Exposed to Dangerous Clogging Conditions. Proc. 12th ICOLD Congress, Mexico City, Mexico, 447.

Johansson, N., Cederström, M. (1995). Floating debris and spillways. Proc. of the International Conference on Hydropower. American SSociety of Civil Engineers, 2106–2115.

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

Lucía, A., Comiti, F., Borga, M., Cavalli, M., Marchi, L. (2015). Dynamics of large wood during a flash flood in two mountain catchments. Natural Hazards and Earth System Sciences 3(2), 1643–1680. doi:10.5194/nhessd-3-1643-2015.

Melville, B.W., Dongol, D.M. (1992). Bridge pier scour with debris accumulation. Journal Hydraulic Engineering 118(9), 1306–1310.

Pfister, M., Capobianco, D., Tullis, B., Schleiss, A.J. (2013a). Debris blocking sensitivity of Piano Key weirs under reservoir type approach flow. Journal of Hydraulic Engineering 139(11), 1134-1141, DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000780.

Pfister, M., Schleiss, A.J., Tullis, B. (2013b). Effect of driftwood on hydraulic head of Piano Key weirs. Intl. Workshop Labyrinth and Piano Key Weirs II (PKW 2013), 255-264, CRC Press, Boca Raton. DOI: 10.1201/b15985-35.

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

Rimböck, A. (2003). Schwemmholzrückhalt in Wildbächen. Doktorarbeit TU München, Deutschland.

Schalko, I., Schmocker, L., Weitbrecht, V., Boes, R.M. (2018). Backwater rise due to large wood accumulations. Journal of Hydraulic Engineering: im Druck. DOI 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001501.

Schmocker, L., Hager, W.H. (2011). Probability of drift blockage at bridge decks. Journal of Hydraulic Engineering 137(4), 480–492.

Schmocker, L. (2017). Floating debris retention racks at dam spillways. Proc. 37th IAHR World Congress, Kuala Lumpur, Malaysia, 2116–2123.

Steeb, N., Rickenmann, D., Rickli, C., Badoux A., Waldner, P. (2016). Size reduction of large wood in steep mountain streams. Proc. River Flow 2016, 2320–2325.

STK (2017): Schwemmgut an Hochwasserentlastungsanlagen (HWE) von Talsperren. Schweizerisches Talsperrenkomitee, www.swissdams.ch, 82 Seiten.

Uchiogi, T., Shima, J., Tajima, H., Ishikawa, Y. (1996). Design methods for wooddebris entrapment. Intl. Symp. Interpraevent 5, 279–288.

USBR. (1987). Design of Small Dams, 3rd Edition, 860 pages, U.S. Bureau of Reclamation, Den-ver.

Wallerstein, N.P., Thorne, C.R., Abt, S.R. (1996). Debris control at hydraulic structures – management of woody debris in natural channels and at hydraulic structures. Report U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.

Yang, J., Johansson, N., Cederström, M. (2009). Handling reservoir floating debris for safe spillway discharge of extreme floods – Laboratory investigations. Proc. 25th ICOLD Congress, Q.91-R.4, Brasilia, Brasilien.

Zollinger, F. (1983). Die Vorgänge in einem Geschiebeablagerungsplatz. Doktorarbeit Nr. 7419, ETH Zürich.

Anschrift der Verfasser

Dr. *Lukas Schmocker,* VAW, ETH Zürich/
Basler & Hofmann AG, Hönggerbergring 26,
CH-8093 Zürich
schmocker@vaw.baug.ethz.ch
Prof. Dr. *Robert Boes*
VAW, ETH Zürich, Hönggerbergring 26
CH-8093 Zürich, boes@vaw.baug.ethz.ch

Mitglieder der Arbeitsgruppe:
Robert Boes (Präsident) VAW, ETHZ
Marius Bühlmann, VAW, ETHZ
Heinz Hochstrasser, im Auftrag des AWEL Kanton Zürich
Jean-Claude Kolly, Groupe E
Guido Lauber, Emch + Berger AG
Judith Monney-Ueberl, AWA Kanton Bern
Michael Pfister, LCH, EPFL/HEIA Fribourg (HES-SO)
Riccardo Radogna, Ofima SA
Lukas Schmocker, VAW, ETHZ/Basler & Hofmann AG
Adrian Stucki, AF-Consult Switzerland AG
Fathen Urso, Holinger AG