

# Schwemmholz an Hochwasserentlastungsanlagen von Talsperren

*Arbeitsgruppe des Schweizerischen Talsperrenkomitees:*

*Lukas Schmocker, Robert Boes, Marius Bühlmann, Heinz Hochstrasser, Jean-Claude Kolly, Guido Lauber, Judith Monney-Ueberl, Michael Pfister, Riccardo Radogna, Adrian Stucki, Fathen Urso*

## Zusammenfassung

Bei Hochwasser wird meist Treib- und Schwemmholz mobilisiert und transportiert, das dann an den Hochwasserentlastungsanlagen (HWE) von Talsperren zu Problemen führen kann. Insbesondere eine partielle oder vollständige Verklausungen der HWE reduziert die Abflusskapazität unter Umständen massgeblich. Aufgrund des resultierenden Aufstaus kann das erforderliche Freibord allenfalls nicht mehr gewährleistet werden. Im Extremfall muss mit einer unkontrollierten Überströmung der Talsperre gerechnet werden.

In der Schweiz sind zurzeit keine allgemeingültigen und detaillierten Richtlinien zum Umgang mit Schwemmholz an HWE vorhanden. Deshalb wurde eine neue Arbeitsgruppe des Schweizer Talsperrenkomitees gebildet. Ziel der Arbeitsgruppe ist es, den heutigen internationalen Stand der Richtlinien und des Umgangs mit Schwemmholz an Stauanlagen zusammenzustellen und Empfehlungen für die Betreiber von Stauanlagen hinsichtlich folgender Punkte zu erarbeiten: (1) Beurteilung der HWE hinsichtlich des Gefahrenpotentials durch Schwemmholz, z.B. Schwemmholzaufkommen im Einzugsgebiet oder Verklausungswahrscheinlichkeit der HWE; (2) Mögliche Konzepte zum Umgang mit Schwemmholz an Talsperren (Durchleiten oder Rückhalt und Entnahme); und (3) Möglichkeiten für die Bauwerksoptimierung von Einlaufbauwerken sowie für allfällige betriebliche Massnahmen. Der vorliegende Artikel gibt einen Auszug aus dem Abschlussbericht, der zurzeit durch die Arbeitsgruppe verfasst wird und Ende 2016 in seiner Endversion vorliegen soll.

## 1 Einleitung

### 1.1 Motivation und Ziel

Neben Feststoffen wie Geschiebe und Schwebstoffen werden bei Hochwasser meist auch Schwimmstoffe wie Treib- und Schwemmholz oder Zivilisationsmüll mitgeführt, die an Einlaufbauwerken von Hochwasserentlastungsanlagen (HWE) zu Problemen führen können (Abb. 1 und 2). 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. Zudem kann Schwemmholz die Einlaufrechen der Fassungsbauwerke verlegen und zu einer generell erhöhten Belastung der Stauanlage führen. Neben der Beurteilung des Verklausungsrisikos stellt sich grundsätzlich die Frage, ob Schwemmholz zurückgehalten oder durchgeleitet werden soll. Beides bedingt eine entsprechende Auslegung der Einlaufbauwerke der HWE bzw. Massnahmen im Stauraum.

Der aktuelle internationale Stand der Richtlinien und des Umgangs mit Schwemmholz an Stauanlagen wurde durch die Arbeitsgruppe unter Berücksichtigung analytischer und experimentel-

ler Untersuchungen sowie Erfahrungen mit beobachteten Verklausungen an HWE zusammengestellt. Nachfolgend werden die Erkenntnisse der Arbeitsgruppe präsentiert.

## 1.2 Abgrenzung zum flussbaulichen Schutzwasserbau

Die Betrachtungen beschränken sich primär auf Talsperren, für welche die Bestimmungen des Schweizer Stauanlagengesetzes und der Schweizer Stauanlagenverordnung anwendbar sind. Flusskraftwerke und Stauräume mit Kurzzeitspeichern werden durch die vorliegende Studie nicht abgedeckt. Die Schwemmholzprozesse in Flüssen unterscheiden sich insbesondere aufgrund der Fliessgeschwindigkeit von den Schwemmholzprozessen in Stauseen.

## 1.3 Definition Schwemmholz

Schwemmholz oder Geschwemmsel kann während eines Hochwassers oberhalb der Talsperre mobilisiert werden – sofern das Einzugsgebiet bewaldet ist – und tritt in verschiedener Form auf (Lange und Bezzola 2006): Natürliche Baumstämme und Wurzelstöcke; Wirtschaftsholz aus Holzlagern oder infolge Abholzung; Bauholz von z.B. Brückenkonstruktionen oder Bachverbauungen; Boote, Autos oder sogar Häuser; Abfälle, Sperrmüll oder Strohballen, die in Bachnähe gelagert oder entsorgt werden. Totholz ist meist bereits im Gerinne vorhanden und wird bei Hochwasser mobilisiert. Frischholz oder anthropogenes Geschwemmsel wird bei Hochwasser infolge Seitenerosion oder Hangrutschungen ins Gerinne eingetragen und stromab transportiert.



**Abb. 1** Verklausung der HWE Palagnedra 1978 (Foto: Ofima, CH)



**Abb. 2** Schwemmholz und Geschwemmsel vor der HWE des Thurnbergspeichers 2002 (Foto: Bundesamt für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, A).

## 2 Konzepte beim Umgang mit Schwemmholz an Talsperren

### 2.1 Allgemeine Richtlinien

Generell gibt es drei Möglichkeiten mit Schwemmholz an Talsperren umzugehen: (1) Massnahmen im Einzugsgebiet zur Minimierung des Schwemmholzaufkommens; (2) Durchleiten über die HWE; oder (3) Rückhalt und Entnahme im Stausee. Das Schweizerische Gewässerschutzgesetz (GSchG, 2016) besagt (Artikel 41): (i) Wer ein Fliessgewässer staut, darf Treibgut, das er aus betrieblichen Gründen dem Gewässer entnommen hat, nicht ins Gewässer zurückgeben. Die Behörde kann Ausnahmen bewilligen; (ii) Der Inhaber der Stauanlage muss das Treibgut nach den Anordnungen der Behörde im Bereich seiner Anlagen periodisch einsammeln und fachgerecht entsorgen. Aus ökologischer Sicht ist das Belassen von Holz im

Gewässer wünschenswert, da die im GSchG angestrebte Durchgängigkeit nicht nur für Sedi-  
ment 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.

## **2.2 Massnahmen im Einzugsgebiet**

Um das Schwemmholzaufkommen im Einzugsgebiet zu minimieren, ist eine präventive  
Schutzwaldpflege notwendig. Dazu müssen Rutschungen und Seitenerosionen vermieden und  
mittelfristig stabile Uferbereiche und Bacheinhänge wie auch gut strukturierte Waldbestände in  
Ufernähe des Speichers angestrebt werden. Allgemein ist die Bewirtschaftung an Bacheinhän-  
gen und an den Ufern des Stausees jedoch schwierig, technisch aufwändig und meist nicht  
kostendeckend. Bei Bäumen im Bachbett und Totholz ist meist aus Hochwasserschutzgründen  
zu beurteilen, ob sie liegen gelassen oder entfernt werden sollen. Als technische Massnahmen  
können Schwemmholzrückhalteanlagen im Einzugsgebiet und in den Bächen oberhalb der  
Talsperre vorgesehen werden (Zollinger 1983, Bänziger 1990, Rimböck 2003, Lange und Bez-  
zola 2006, Schmocker und Weitbrecht 2014, Hartlieb 2015). Es ist offensichtlich, dass im  
Hochwasserfall der Schwemmholztransport in eine Talsperre auch trotz Schutzwaldpflege und  
Schwemmholzrückhalt im Einzugsgebiet nie zur Gänze ausgeschlossen werden kann.

## **2.3 Durchleiten**

Insbesondere bei Hochwasser mit hohem Schwemmholzanfall ergibt sich meistens ein Durch-  
leiten des Schwemmholzes über die HWE als einzige Option, da das Holz durch die Strömung  
im Speicher zur HWE geleitet wird. Damit wird das Problem jedoch nur lokal gelöst und ins  
Unterwasser verlagert. Die Auswirkungen des Durchleitens auf den Flussabschnitt unterstrom  
des Speichers sind entsprechend zu prüfen. Ein Durchleiten ist zudem nur möglich, wenn die  
Möglichkeit einer Verklausung an der HWE explizit ausgeschlossen werden kann. Dazu müs-  
sen entweder die Öffnungen der HWE entsprechend gross sein, oder es muss sich um einen  
freien Überfall ohne Aufbauten handeln (Boes et al. 2013; vgl. auch Abb. 3 mit Abb. 1). Ein  
Restrisiko kann jedoch selbst mit diesen Massnahmen nicht ausgeschlossen werden.

## **2.4 Rückhalt und Entnahme im Stausee**

Generell bieten Stauseen die Möglichkeit, Schwemmholz zurückzuhalten und zu entfernen  
(Abb. 4). Aufgrund der geringen Fliessgeschwindigkeiten kann das Holz meistens mittels Boo-  
ten auf dem See eingesammelt werden. Hierdurch kann verhindert werden, dass das Holz im  
Hochwasserfall zur HWE gelangt oder absinkt und Triebwassereinflüsse sowie Grundablässe  
verklaust. Frischholz bleibt meist über mehrere Monate schwimmfähig (Zollinger 1983), womit  
eine etwa halbjährliche Entnahme ausreicht. Schwemmholz ist meist nicht über den gesamten  
Speicher verteilt, sondern treibt infolge Wind meist in einen Teilbereich, z.B. eine Bucht.

Im Hochwasserfall ist es aufgrund des hohen Schwemmholzanfalls meist nicht möglich, alles  
Geschwemmsel während des Ereignisses zu entnehmen. Oftmals ist die Kapazitätsleistung  
von Greifern oder Rechenreinigungsmaschinen dazu zu gering. Eine bereits verklauste HWE  
als Notfallmassnahme mittels Greifern zu räumen, ist aufgrund der Strömungsgeschwindigkei-  
ten und der Holzmenge praktisch unmöglich. Falls die HWE anspringt, kann ein zumindest par-  
tieller Transport von Schwemmholz über die HWE zudem kaum verhindert werden.



**Abb. 3** Neue HWE der Stauanlage Palagnedra als freier Überfall (Foto: VAW, ETH Zürich).



**Abb. 4** Einsatz von Schwimmsperren im Sylvensteinspeicher (Foto: Bayerisches Landesamt für Umwelt, D).

### 3 Regelungen und Stand der Technik

In verschiedenen Ländern sind Richtlinien und Regelungen in Bezug auf Schwemmholz an HWE verfügbar. In den meisten Fällen beziehen sich diese auf minimal einzuhaltende Abmessungen der HWE.

#### 3.1 Schweiz

Gemäss der Basisdokumentation zur Sicherheit der Stauanlagen (BFE 2008) sollen bei der konstruktiven Ausbildung von HWE die Durchlässe/Wehrfelder genügend breit sein, damit deren Verklausung durch Bäume und Geschwemmsel vermieden wird. Eine Breite von 10 m kann (sofern es die topographischen Bedingungen gestatten) erfahrungsgemäss als ausreichend betrachtet werden, da aufgrund der Beobachtungen bei Hochwasser mitgeführte Baumstämme in Gebirgsbächen rasch auf maximale Längen von 10 m gekürzt 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 einem Steg vorhanden ist, in der Regel mindestens 1.5 bis 2 m. Ein Steg sollte gegebenenfalls so konzipiert sein, dass er bei ausserordentlichen Hochwassern entfernt oder fortgespült werden kann.

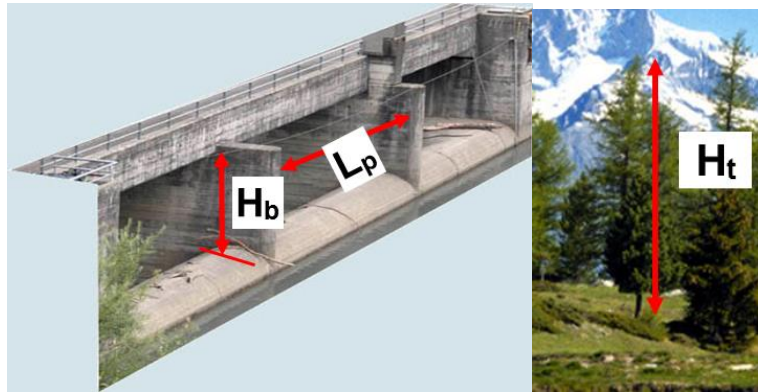
In Anlehnung an die Untersuchung von Godtland & Tesaker (1994) gibt das BFE (2008) Empfehlungen für die minimale lichte Breite  $L_p$  und die minimale lichte Höhe  $H_b$  der einzelnen Wehrfelder einer HWE in Abhängigkeit der zu erwartenden Baumlänge  $H_t$  (Abb. 5) ab:

$$L_p \geq 0.8 H_t$$

$$H_b \geq 0.15 H_t \quad \text{für } L_p > 1.1 H_t$$

$$H_b \geq 0.2 H_t \quad \text{für } L_p \leq 1.1 H_t$$

Die zu erwartende Baumlänge  $H_t$  kann im Feld anhand der ufernahen Bestockung abgeschätzt werden. Alternativ können die bei vergangenen Hochwassern beobachteten Baumlängen als Anhaltspunkt genommen werden.



**Abb. 5** Kennwerte zur Festlegung der minimalen Breite und Höhe der Durchlässe/Wehrfelder einer HWE.

### 3.2 Frankreich

Das *Comité français des barrages et reservoirs* (Cfbr) schätzt HWE mit Wehrbrücken und Aufbauten als verklausungsgefährdet ein, falls beim Bemessungshochwasser eines der folgenden Kriterien zutrifft (Cfbr 2013):

$$f < 2 \text{ m falls } h_{\bar{u}} < 2 \text{ m}$$

$$f < 1.5 \text{ m falls } h_{\bar{u}} > 2 \text{ m}$$

$$f < 0.5 \text{ m}$$

mit  $f$  = Freibord = lichter Abstand zwischen Wasserspiegel und UK des querenden Bauwerks und  $h_{\bar{u}}$  = Überfallhöhe Wehr. Die erforderliche Breite  $L_p$  der HWE wird als Funktion der Höhenlage  $z$  [m ü.M.] der Talsperre angegeben zu:

$$L_p \geq 15 \text{ m} \quad \text{für } z \leq 600 \text{ m ü.M.}$$

$$L_p \geq 20.5 - 11z/1200 \quad \text{für } 600 < z \leq 1800 \text{ m ü.M.}$$

$$L_p \geq 4 \text{ m} \quad \text{für } z > 1800 \text{ m ü.M.}$$

In der Regel gilt, dass französische Einzugsgebiete tiefer liegen als schweizerische und stärker bewaldet sind. Sie sind daher eher vergleichbar mit schweizerischen Flusstauhaltungen.

### 3.3 Österreich

In Österreich sind keine generellen Regelungen bezüglich Schwemmholz an HWE vorhanden. HWE mit einer Breite  $L_p$  kleiner als 20 m werden jedoch als potentiell verklausungsgefährdet eingestuft. 15 m breite Wehrfelder sind je nach Einzugsgebiet und ihrer lichten Höhe  $H_b$  (falls eine Brücke darüber führt) tolerabel. Geringere Werte werden erfahrungsgemäss als verklausungsanfällig angesehen (Czerny 2015).

### 3.4 Deutschland

In Deutschland sind keine generellen Regelungen bezüglich Schwemmholz an HWE vorhanden. Der Ruhrverband führte eine Umfrage bei 34 Betreibern zur Verlegung der HWE von Talsperren bei Hochwasser durch (Roesler und Bettzieche 2000). Die Umfrage (Rücklaufquote 68%) ergab, dass an 88% der 83 betrachteten Talsperren noch nie eine Verlegung der HWE festgestellt wurde und das Schwemmholzaufkommen bisher sehr gering war. An 10 Talsperren

(12%) wurde bereits eine Verlegung beobachtet, wobei nie mehr als 10% der HWE verklaust wurden. Eine realistische Gefährdung für HWE durch Schwemmholz konnte aus der Umfrage nicht abgeleitet werden.

### 3.5 Italien

Bezüglich der Funktionstüchtigkeit der Ablassorgane von HWE gelten in Italien die folgenden Empfehlungen (Ruggieri, 2014): Die HWE muss so gestaltet werden, dass die Durchleitung von Schwimmkörpern mit genügend Lichtraum zwischen Wasserspiegel und allfälligen Überbauten gewährleistet wird. Bei schützensgeregelten Anlagen mit  $n$  Wehrfeldern wird der Ausfall von ( $\geq 0.5n$ ) Wehrfeldern bei Schüttdämmen bzw. ( $\geq 0.2n$ ) Wehrfeldern bei Betonsperren, jeweils auf die nächste ganze Zahl aufgerundet, angenommen. Es ist weiter nachzuweisen, dass das effektive Freibord  $f$  nicht unter  $f/3$  sinkt.

Bei festen Überfällen muss bei der Kapazitätsberechnung eine Verklausung von  $\geq 20\%$  bzgl. der lichten Höhe zwischen OK Wehrkrone und UK Überbau angesetzt werden. Die Verklausungsrate steigt im Falle von Wehrfeldbreiten  $< 12$  m auf  $\geq 50\%$  der lichten Höhe. Bei Anlagen mit Schützen muss zusätzlich zu dem o.g. Ausfall von Wehrfeldern bei der Kapazitätsberechnung an den verbliebenen Wehrfeldern eine Verklausung von  $\geq 30\%$  bzgl. der lichten Schützenshöhe angesetzt werden. Die Verklausungsrate steigt im Falle von Wehrfeldbreiten  $< 12$  m auf  $\geq 50\%$  der lichten Schützenshöhe.

## 4 Umfrage bei Wasserkraftanlagen in der Schweiz

Im Dezember 2013 wurden Fragebögen an 60 Betreiber von Wasserkraftanlagen geschickt, von denen 52 Rückmeldungen machten (Rücklaufquote 83%). Der Fragebogen beinhaltete einerseits Angaben zur Talsperre, zur Hochwasserentlastungsanlage sowie zur Hydrologie und andererseits zum Schwemmholzaufkommen, dem Umgang mit Schwemmholz und allfälligen Problemen sowie Schäden infolge von Schwemmholz. Die Ergebnisse der Umfrage können wie folgt zusammengefasst werden:

- An 46 von 52 Talsperren (88%) fällt Schwemmholz an
- An 32 von diesen 46 Anlagen (70%) wird Schwemmholz entnommen
- An 18 von den 46 Anlagen (39%) wird Schwemmholz über die HWE abgeführt (an 7 Anlagen (15%) wird sowohl entnommen als auch durchgeleitet)
- An 5 der 32 Anlagen mit Entnahmen (16%) sind die Kubaturen der Entnahme bekannt
- An 7 Anlagen mit Entnahmen (22%) sind die Abmessungen des Schwemmholzes bekannt (davon ist an einer Anlage auch die Kubatur bekannt)
- An 8 der 46 Anlagen mit Schwemmholzaufkommen (17%) traten schon Probleme auf (meist Verklausung), an 5 Anlagen (11%) sind Schäden dokumentiert

Somit fiel in der Vergangenheit an der Mehrzahl der Schweizerischen Talsperren Schwemmholz an. Ein Gefahrenpotential ist vorhanden, obwohl nur an ca. 17% der Anlagen Probleme aufgetreten sind. Erfahrungen von Betreibern zeigen, dass bei hohem Schwemmholzaufkommen die Situation häufig nicht mehr kontrolliert werden kann und entsprechend das Gefahrenpotential schnell ansteigt. Die Fragebogen werden zurzeit noch vertieft ausgewertet.

## 5 Gefahrenbeurteilung - Verklausungswahrscheinlichkeit

In der Vergangenheit wurden verschiedene physikalische Modellversuche zur Verklausung von HWE durchgeführt. Viele Versuche konzentrierten sich jedoch auf eine bestimmte Anlage,

weswegen meist keine allgemeingültigen Aussagen möglich sind. Nachfolgend werden einige generelle Erkenntnisse aufgelistet:

- Godtland & Tesaker (1994) untersuchten unter anderem den Einfluss von Brückenaufbauten an einer unregulierten HWE. Die Verklauungsgefahr war bei vorhandenem Brückenaufsatz höher als ohne.
- Gemäss Johansson & Cederström (1995) zeigt ein einzelnes Schwemmholzstück bei grosser Wassertiefe an der HWE und bei nur einem geöffneten Wehrfeld die geringste Verklauungswahrscheinlichkeit, da sich das Holz in Strömungsrichtung ausrichten kann. Sind mehrere benachbarte Wehrfelder geöffnet, oder taucht das Schwemmholz schubweise auf, so erhöht sich die Verklauungswahrscheinlichkeit. Grundsätzlich steigt die Verklauungsgefahr mit zunehmendem Verhältnis von Stammlänge zu Wehrbreite.
- Yang et al. (2009) führten Modellversuche für die Hochwasserentlastung des Laxede Damms in Schweden durch. In Folge der Verklauung der dreifeldrigen HWE ergab sich ein Aufstau im Oberwasser von 16-27% im Vergleich zum Zustand ohne Verklauung. In ähnlichen Versuchen erhielt Hartlieb (2015) einen verklauungsbedingten Aufstau von 20-30% im Oberwasser.
- Hartlieb (2012) hat anhand von Modellversuchen die Gefahr von Verklauung an Hochwasserentlastungsanlagen mit Segmentschützen untersucht. Von den Eigenschaften des Schwemmholzes (Länge, Dichte, Anzahl und Länge der Äste) hatte dessen Länge in Bezug auf die Wehrbreite den grössten Einfluss auf die Verklauungswahrscheinlichkeit. Einzelhölzer konnten bei der Variation aller Parameter praktisch immer abgeleitet werden, da sie sich in Strömungsrichtung ausrichteten. Mit zunehmender Anzahl und Länge der Äste wurde die Verklauungswahrscheinlichkeit grösser.
- Für HWE mit freiem Überfall bei geöffneten Schützen präsentierte Hartlieb (2015) die folgende Formel zur Bestimmung der Verklauungswahrscheinlichkeit  $P$  ( $L$  = Stammlänge und  $W$  = Wehrfeldbreite):  $P = (L/W - 0.96) * 0.73$ .

Für die Verklauung von Brücken sind in der Literatur verschiedene Formeln vorhanden (Melville & Dongol 1992, Bezzola et al. 2002, Schmocker & Hager 2011). Diese Formeln können verwendet werden, um die Verklauungswahrscheinlichkeit an einer HWE grob abzuschätzen. Die meisten Versuche wurden jedoch bei hohen Froudezahlen und Fliessgeschwindigkeiten durchgeführt, wie sie bei Hochwasser in Flüssen auftreten. Die Wahrscheinlichkeit einer Verklauungen ist bei kleinen Anströmgeschwindigkeiten wie an HWE von Talsperren tendenziell grösser, da Holz bereits beim Kontakt von Ästen mit Brücken- und Wehrstrukturen hängen bleibt.

## 6 Massnahmen am Bauwerk

### 6.1 Anpassung der lichten Öffnungsweite

Eine Massnahme zur Minimierung von Schwemmholzverklauungen ist die Wahl bzw. Schaffung genügend grosser Abmessungen der HWE. Dabei können die Richtlinien für lichte Breite und Höhe gemäss Kapitel 3 als Entwurfsvorgabe verwendet werden. Eine unregulierte HWE (z.B. freier Überfall) weist eine kleinere Verklauungswahrscheinlichkeit auf als eine regulierte HWE. Stämme können sich bei kleinen Abflusstiefen theoretisch auf der Wehrkrone ablagern, werden jedoch bei steigendem Abfluss abtransportiert (u.a. Boes et al. 2013). Zwischenpfeiler, Schützen, Wehrbrücken etc. vergrössern die Wahrscheinlichkeit einer Verklauung.

Eine Anpassung der lichten Öffnungsabmessungen kann z.B. wie folgt erreicht werden:

- Entfernung von Trennpfeilern zur Vergrößerung der lichten Wehrfeldbreite
- Umdisponieren von Wehrbrücke/Stegen zur Vergrößerung der lichten Höhe (Bsp. Palagnedra, Abb. 3). Brücken und Fussgängerstege sollten bei einem Bemessungshochwasser gemäss BFE (2008) einen Abstand von mindestens 1.5 - 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. längere Überfall

## 6.2 Ausbildung Wehr und Pfeiler

Für die Ausbildung von Wehren und Pfeilern sind in der Literatur verschiedene Empfehlungen vorhanden (Hartung & Knauss 1976, Gotland & Tesaker 1994, Wallerstein et al. 1996, Hartlieb 2015):

- Generell sollte die HWE möglichst glatt, ausgerundet und ohne Einbauten ausgeführt werden. Verklauungsgefährdete Anlageteile sollten z.B. mit Verschalungen versehen werden.
- Generell sollten keine unterströmten Schützen verwendet werden; wenn Regulierorgane notwendig sind, dann in Form überströmbarer Klappen, Sektorschützen oder Segment-schützen mit aufgesetzten Klappen. Klappen sind vorteilhaft zur Erzeugung lokal grösserer Fliesstiefen (Boes et al. 2013).
- Antriebswelle, Zylinder, Leitungen etc. sollten ausserhalb des Einflussbereichs des Schwemmholzes angeordnet werden.
- Verzicht auf selbstregulierende Systeme.
- Bei Wehrfeldern mit Schützen sollte sich die Strömung in der Mitte konzentrieren. Optional ist bei mehreren Wehrfeldern ein asymmetrischer Betrieb anzustreben, d.h. das Öffnen von benachbarten Schützen ist zu vermeiden.
- Im Falle eines Aufstaus infolge Verklauung sollten auch die Wehraufbauten dem Anprall von Schwemmholz standhalten.
- Generell sollten keine Einlaufrechen unmittelbar bei der Wehrkrone vorgesehen werden, da infolge der relativ grossen Fliessgeschwindigkeiten eine Verklauung dadurch eher gefördert wird und somit die Entlastungskapazität bereits bei wenig Schwemmholz abnehmen kann.
- Pfeiler erhöhen das Verklauungsrisiko immer, da infolge der geringen Geschwindigkeit Holz auch an einzelnen Pfeilern hängen bleiben kann. Infolge einer Pfeilerverklauung kann in der Folge ein ganzes Wehrfeld verlegt werden.
- Aus Modelluntersuchungen an Brückenpfeilern geht hervor, dass abgerundete Pfeilerköpfe weniger verklauungsanfällig sind als rechteckige Pfeiler oder Pfeiler mit scharfen Kanten (De Cicco et al. 2015).
- Widerlager, herunterhängende Werkleitungen, Geländer oder Fachwerkstrukturen begünstigen eine Verklauung.
- 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 hindernisfrei ausgeführt werden, z.B. ohne Aufbauten.
- Bei Entlastungsstollen soll auf glatte Auskleidung ohne Verengungen oder Hindernisse und ohne scharfe Kurven geachtet werden (Hartlieb 2015).

Insbesondere bei neuen Projekten, bei welchem die Gefahr einer Verklauung besteht, erfolgt die Überprüfung des HWE-Entwurfs häufig mittels hydraulischer Modellversuche.



### 6.3 Schutz der HWE mittels vorgelagerter Rechenkonstruktionen

Generell sollten vor HWE nur Rechen angebracht werden, wenn eine anderweitige Anpassung der Form/Ausbildung der HWE unmöglich ist. Rechen können insbesondere die Verlegung von beweglichen Teilen verhindern und so die betriebliche Sicherheit von Schützen, Klappen etc. garantieren. Zudem wird die vollständige Verklauung der HWE verhindert. Im Hochwasserfall kann jedoch der Rechen selbst verlegt werden, womit ein Aufstau im Speicher nicht grundsätzlich ausgeschlossen werden kann. Um den Aufstau klein zu halten, sollte der Rechen eine entsprechende grosse Rechenfläche ausweisen und der HWE deutlich vorgelagert werden (Abb. 6). Damit kann Wasser selbst bei vollständiger Rechenverlegung neben oder unter dem Schwemmholzteppich in Richtung HWE abfließen.



**Abb. 6** Vorgelagerter Schwemmholzrechen am Thurnbergspeicher am Kamp in Österreich (Foto: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, A).

Hartlieb (2015) führte hydraulische Modellversuche mit einem Schrägrechen vor einer HWE durch. Der Rechen war flach geneigt ( $15^\circ$  bis  $30^\circ$ ) und der Stababstand entsprach der halben Wehrfeldbreite. Dadurch konnte der Aufstau im Vergleich zu einer Wehrverklauung bis um die Hälfte verkleinert werden. Grund dafür sind die kleineren Fließgeschwindigkeiten, die auf den vorgelagerten Rechen wirken, so dass sich Holz eher in einem lockeren, einlagigen Teppich ablagert.

### 6.4 Schwimmketten

Nach Hartung und Knauss (1976) sind Schwimmketten ein nützliches Element, um Schwemmholz vor einer HWE zurückzuhalten. Beispiele sind miteinander verbundene Holzstämme (Abb. 4), schwimmende Stahlrohre oder leichte Stahlbrücken auf Schwimmelementen. Beim Hochwasser 2005 wurden in der Schweiz auch Ölsperren für den Rückhalt von Schwemmholz verwendet (Abb. 7).

Bei sehr langen Schwimmketten im Stausee besteht die Gefahr, dass das Schwemmholz unter der Sperre hindurchtaucht, insbesondere, wenn das Holz bereits lange im Wasser schwimmt und eine höhere Dicht aufweist. Ebenfalls kann Holz bei starker Strömung unter der Absperzung hindurch transportiert werden. Zu beachten sind auch die entsprechenden Kräfte des Schwemmholzes auf die Rückhalteelemente. Für Sperren, an denen im Winter nicht mit Hochwassern zu rechnen ist, sollten Schwimmketten in der Frostperiode entfernt werden, da eine mögliche Eisdrift die Kette beschädigen oder zerstören könnte. Bei einer allfälligen Entleerung des Speichers muss die Schwimmkette entfernt werden.

Bei einigen Sperren am Kamp in Österreich werden sogenannte Schwimmrechen (Schwimmkörper mit abgehängtem, ca. 1 m tief unter der Wasseroberfläche liegendem Spannseil) verwendet (Abb. 8). Hier wurden jedoch Probleme festgestellt, da das Spannseil zu schwach dimensioniert war und beim Hochwasser riss (Czerny, 2015). Dies bewirkte dann, dass die Schwemmholzansammlung konzentriert zur HWE gelangte.



**Abb. 7** Schwemmholzsperrern auf dem Brienzensee während des Hochwasserereignisses 2005 (Foto: Bundesamt für Umwelt, CH).



**Abb. 8** Schwimmrechen (Foto: H. Czerny, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, A)

## 7 Schlussfolgerungen und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde der aktuelle Stand der Richtlinien und Technik im Umgang mit Schwemmholz an Hochwasserentlastungen von Stauanlagen 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 Verklauungsrisikos werden in den meisten Ländern minimale Breiten sowie Höhen der Durchlässe/Wehrfelder einer HWE empfohlen bzw. vorgeschrieben. Das Verklauungsrisiko 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.

Aufgrund dieser Erkenntnisse soll in einem nächsten Schritt ein Gefahrenbeurteilungsdigramm zur Abschätzung der Verklauungsgefahr einer HWE erarbeitet werden.

### 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), S. 1354–1358.
- Bezzola, G.R., Gantenbein, S., Hollenstein, R., Minor, H.-E. (2002). Verklausung von Brückenquerschnitten. Intl. Symp. Moderne Methoden und Konzepte im Wasserbau, *VAW-Mitteilung 175*, 87-97, H.-E. Minor, ed., VAW, ETH Zürich.
- BFE (2008). Sicherheit der Stauanlagen - *Basisdokument zum Nachweis der Hochwassersicherheit*. Bundesamt für Energie BFE.
- 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.
- Czerny, H. (2015). Persönliche Kommunikation.
- CFBR, Comité Français des Barrages et Réservoirs (2013): Recommandations pour le dimensionnement des évacuateurs de crues de barrages. *Documentation CFBR*, 166 Seiten.
- De Cicco, P.N., Enio, P., Solari, L. (2015). Flume experiments on bridge clogging by woody debris: The effect of shape of piers. E-proceedings of the 36<sup>th</sup> IAHR World Congress, The Hague, the Netherlands
- Gewässerschutzgesetz (GSchG) Schweiz vom Januar 1991, Stand 2016):<https://www.admin.ch/opc/de/classified-compilation/19910022/index.html>
- Godtland, K., Tesaker, E. (1994). Clogging of spillways by trash. *Proc. 18<sup>th</sup> ICOLD Kongress*, Durban, Südafrika, S. 543-557.
- Hartlieb, A. (2012). Modellversuche zur Verklausung von Hochwasserentlastungsanlagen mit Schwemmholz. *Wasserwirtschaft*, 102(6), S. 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, p 447.
- Johansson, N., Cederström, M. (1995). Floating debris and spillways. *Proc. of the International Conference on Hydropower*. AMER SOC Civil Engineers, 2106–2115.
- Lange, D., Bezzola, G. R. (2006). Schwemmholz - Probleme und Lösungsansätze. *VAW-Mitteilung 188*, H.-E. Minor, ed., VAW, ETH Zürich.
- Melville, B.W., Dongol, D.M. (1992). Bridge pier scour with debris accumulation. *Journal Hydraulic Engineering* 118(9), 1306-1310.

- Rickenmann, D. (1997). Schwemmholz und Hochwasser. *Wasser, Energie, Luft* 89(5/6), 115-119.
- Rimböck, A. (2003). Schwemmholzrückhalt in Wildbächen. *Doktorarbeit* TU München, Deutschland.
- Rimböck, A. (2003). Schwemmholzrückhalt in Wildbächen. Grundlagen zu Planung und Berechnung von Seilnetzsperrern. *Bericht* des Lehrstuhls u. der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft d. Techn. Univ. München, hrsg. v. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Theodor Strobl; Band 94, 184 S.
- Roesler, F., Bettzieche, V. (2000). Verlegung der Entlastungsanlagen von Talsperren bei Hochwasser. *Wasserwirtschaft* 90(5), 1-6.
- Ruggieri, G. (2015). Persönliche Kommunikation.
- Schmocker, L. Hager, W.H. (2011). Probability of drift blockage at bridge decks. *Journal of Hydraulic Engineering* 137(4), 480-492.
- Schmocker, L., Weitbrecht, V. (2013). Driftwood: Risk analysis and engineering measures. *Journal of Hydraulic Engineering* 139(8), 894-904.
- 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

### *Mitglieder der Arbeitsgruppe:*

Prof. Dr. Robert Boes (Präsident) VAW, ETH Zürich; Marius Bühlmann VAW, ETH Zürich; 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, EPF Lausanne / HEIA Fribourg; Riccardo Radogna, Ofima SA; Adrian Stucki, AF-Consult Switzerland AG; Fathen Urso, Holinger AG