

**Schweizerisches Talsperrenkomitee**  
**Comité suisse des barrages**  
**Comitato svizzero delle dighe**  
**Swiss Committee on Dams**



## **SCHWEMMGUT AN HOCHWASSERENTLASTUNGSANLAGEN (HWE) VON TALSPERREN**

Bericht des Schweizerischen Talsperrenkomitees STK über den  
Stand der Schwemmgutproblematik an Talsperren



<b>Inhalt</b>	<b>Seite</b>
<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>4</b>
<b>1. Einleitung</b> .....	<b>5</b>
1.1 Motivation und Hintergrund.....	5
1.2 Ziele.....	5
1.3 Methodik.....	5
1.4 Abgrenzung zu Flusskraftwerken.....	6
1.5 Definition Schwemmholz und Schwemmgut.....	6
1.6 Gesetzliche Rahmenbedingungen in der Schweiz.....	6
<b>2. Konzepte zum Umgang mit Schwemmgut an Stauanlagen</b> .....	<b>9</b>
2.1 Einleitung.....	9
2.2 Übersicht HWE-Einlaufbauwerke.....	9
2.3 Massnahmen im Einzugsgebiet.....	12
2.4 Durchleiten.....	13
2.5 Entnahme im Speicher.....	14
<b>3. Regelungen und Stand der Technik</b> .....	<b>16</b>
3.1 Schweiz.....	16
3.2 International.....	17
3.3 Numerische Modellierung.....	20
<b>4. Umfrage und Fallbeispiele</b> .....	<b>22</b>
4.1 Umfrage bei Betreibern von Wasserkraftanlagen in der Schweiz.....	22
4.2 Fallbeispiele.....	25
<b>5. Kriterien zur Beurteilung der HWE hinsichtlich Gefahrenpotential</b> .....	<b>26</b>
5.1 Mobilisierung und Transport von Schwemmholz.....	26
5.2 Schwemmholzaufkommen im natürlichen Einzugsgebiet.....	26
5.3 Einfluss des Speichers und seiner Zubringer auf das Schwemmholzaufkommen an der HWE.....	31
5.4 Verklausungswahrscheinlichkeit der HWE.....	32
5.5 Aufstau infolge Verklausung.....	35
5.6 Krafteinwirkungen auf die HWE.....	37
<b>6. Massnahmen</b> .....	<b>39</b>
6.1 Bauliche Massnahmen zum Durchleiten von Schwemmholz.....	39
6.2 Rückhaltmassnahmen.....	42
6.3 Betriebliche Massnahmen.....	49
<b>7. Schlussfolgerungen und Empfehlungen</b> .....	<b>51</b>
<b>8. Literatur</b> .....	<b>54</b>
<b>Anhang 1: Fragebogen</b> .....	<b>57</b>
<b>Anhang 2: Fallbeispiele</b> .....	<b>59</b>



Im Jahre 2012 wurde vom Schweizerischen Talsperrenkomitees (STK) die Gründung der Arbeitsgruppe „Schwemmholz an Hochwasserentlastungen von Stauanlagen“ beschlossen mit der Zielsetzung die aktuelle Situation der Schweizer Talsperren in Bezug auf dieses Phänomen zu untersuchen.

Der vorliegende Bericht wurde durch die Arbeitsgruppe erarbeitet und am 15.11.2017 durch die Technische Kommission (TEKO) des Schweizerischen Talsperrenkomitees genehmigt und in Kraft gesetzt.

Mitglieder der Arbeitsgruppe waren:

Robert M. 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

## 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. 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 Zuge der Arbeiten wurde eine Umfrage zum Thema Schwemmgut bei Betreibern von rund 60 Schweizerischen Stauanlagen durchgeführt. Daraus geht hervor, dass an den meisten Anlagen Schwemmgut anfällt und auch entnommen wird. An mehreren Anlagen traten zudem in der Vergangenheit Probleme mit Schwemmgut auf. Anhand von Fallbeispielen wurden diese Anlagen vertieft untersucht, um aus den Erfahrungen für die Zukunft zu lernen. Zusätzlich wurden durch die Arbeitsgruppe gezielt Erfahrungen und Richtlinien aus dem Ausland sowie der internationale Stand der Technik zusammengetragen.

Die Arbeitsgruppe erarbeitete schliesslich Empfehlungen für die Betreiber von Stauanlagen zu: (1) der Beurteilung der HWE hinsichtlich des Gefahrenpotentials durch Schwemmgut, z.B. Schwemmholzaufkommen im Einzugsgebiet oder Verklausungswahrscheinlichkeit der HWE; (2) möglichen Konzepten 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 HWE) und der Ausbildung der HWE können in einem ersten Schritt die Verklausungswahrscheinlichkeit und die Verklausungsfolgen abgeschätzt werden. Aufgrund des resultierenden Gefahrenpotentials für die Stauanlage können dann mögliche Massnahmen getroffen werden (Anpassungen HWE, Rückhalt, Durchleiten). Schliesslich werden die wichtigsten Empfehlungen für Planer, Behörden und Betreiber zusammenfassend dargestellt.



# 1. Einleitung

## 1.1 Motivation und Hintergrund

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. Insbesondere Verklausungen an den Wehrkronen oder Einlaufschützen reduzieren die Abflusskapazität unter Umständen massgeblich und können unzulässig hohe Wasserspiegel im Stauraum bewirken, so dass das erforderliche Freibord allenfalls nicht mehr gewährleistet ist. Zudem kann Schwemmgut 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 Schwemmgut zurückgehalten oder durchgeleitet werden soll. Beides bedingt eine entsprechende Auslegung der Einlaufbauwerke der HWE bzw. Massnahmen im Stauraum.

## 1.2 Ziele

Der aktuelle internationale Stand der Richtlinien und des Umgangs mit Schwemmgut an Stauanlagen wird aufgezeigt. Daraus werden unter Berücksichtigung analytischer und experimenteller Untersuchungen sowie Erfahrungen mit beobachteten Verklausungen an HWE Empfehlungen zu folgenden Aspekten erarbeitet:

- Beurteilung der HWE hinsichtlich des Gefahrenpotentials durch Schwemmgut; Abschätzung der Verklausungswahrscheinlichkeit;
- Mögliche Konzepte zum Umgang mit Schwemmgut an Talsperren, z.B. Durchleiten oder Rückhalt;
- Möglichkeiten für die hydraulisch-konstruktive Optimierung von Einlaufbauwerken;
- Möglichkeiten für betriebliche Massnahmen.

Der vorliegende Bericht fasst die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen zusammen und gibt Empfehlungen zum Umgang mit Schwemmgut bei HWE für Planer, Behörden und Betreiber von Stauanlagen.

## 1.3 Methodik

Um möglichst breit abgestützte Aussagen treffen zu können, wurde für die Untersuchung folgende Methodiken angewandt:

- Literaturrecherche;
- Fragebogen an Betreiber von rund 60 Schweizerischen Stauanlagen;
- Auswertung konkreter Fallbeispiele aus der Vergangenheit;
- Vorträge von Experten während den Sitzungen;
- Sammeln von Erfahrungen aus dem benachbarten Ausland.

An den regelmässigen Sitzungen wurden die Erkenntnisse jeweils diskutiert und durch Erfahrungen der Mitglieder der Arbeitsgruppe ergänzt.

## 1.4 Abgrenzung zu Flusskraftwerken

Die Betrachtungen der Arbeitsgruppe beschränken sich auf Stauanlagen, für welche die Bestimmungen des Schweizerischen Stauanlagengesetzes (StAG) und der Schweizerischen Stauanlagenverordnung (StAV) anwendbar sind ([www.admin.ch](http://www.admin.ch)). Für kleinere Stauanlagen, die dem StAG unterstellt werden, weil ein besonderes Gefährdungspotential vorliegt, muss die Anwendbarkeit der Empfehlungen fallweise abgeklärt werden. Dies gilt insbesondere für Hochwasser- und Geschieberückhaltebecken, die über eine Entlastungssektion verfügen.

Übliche Flusskraftwerke ohne nennenswerten Stauraum (im Vergleich zur Abflussfracht) werden durch die vorliegende Studie nicht abgedeckt. Die Schwemmgutprozesse in Flüssen unterscheiden sich insbesondere aufgrund der Fliessgeschwindigkeit von den Prozessen in Speichern. Die vorliegenden Empfehlungen können somit nicht uneingeschränkt für Flusskraftwerke übernommen werden.

## 1.5 Definition Schwemmholz und Schwemmgut

Schwemmholz und natürliches, organisches Geschwemmsel kann während eines Hochwasserereignisses oberhalb der Stauanlage mobilisiert werden – sofern das Einzugsgebiet bewaldet ist – und tritt in unterschiedlichen Formen auf (Lange und Bezzola 2006):

- Natürliche Baumstämme und Wurzelstöcke (Tot- oder Frischholz);
- Wirtschaftsholz aus Holzlagern oder infolge Abholzung;
- Bauholz von z.B. Brückenkonstruktionen oder Bachverbauungen.

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 stromab transportiert.

Neben organischem Schwemmholz führen Gewässer im Hochwasserfall meist auch beträchtliche Mengen an anthropogenem Schwemmgut mit. Dieses besteht z.B. aus Abfällen, Sperrmüll und Siloballen (**Abbildung 1**), die in Gewässernähe gelagert oder entsorgt werden, und kann sogar Boote (**Abbildung 2**) Autos oder Häuser umfassen. Im Folgenden wird unter den Begriffen „Schwemmgut“, „Geschwemmsel“ und „Treibgut“, sofern nicht anderweitig spezifiziert, sowohl natürliches Schwemmholz als auch anthropogenes Schwemmgut verstanden (vgl. auf Englisch „floating debris“). Eis wird in der vorliegenden Untersuchung nicht betrachtet.

## 1.6 Gesetzliche Rahmenbedingungen in der Schweiz

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 ans 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.

Meist wird der Unterhalt der Restwasserstrecke unterhalb der Stauanlage dem Betreiber übertragen. Zur Bewirtschaftung gehört die Vermeidung eines hohen Bestockungsgrads im Gewässerraum. Bei Hochwasser kann die Restwasserstrecke überflutet werden, und Probleme durch Schwemmgut stromab hervorrufen.



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.



**Abbildung 1:** Durch Siloballen verkleaste Hochwasserentlastung in Trondelag, Norwegen (Foto: L. Lia, NTNU).



**Abbildung 2:** Schwemmgut vor der HWE des Thurnbergspeichers am Fluss Kamp, Niederösterreich, beim Extremhochwasser 2002 (Foto: Bundesamt für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Österreich).



## 2. Konzepte zum Umgang mit Schwemmgut an Stauanlagen

### 2.1 Einleitung

Generell gibt es drei Möglichkeiten zum Umgang mit Schwemmgut an Stauanlagen:

- (1) Massnahmen im Einzugsgebiet zur Minimierung des Schwemmholaufkommens;
- (2) Durchleiten über die HWE;
- (3) Rückhalt und Entnahme im Speicher.

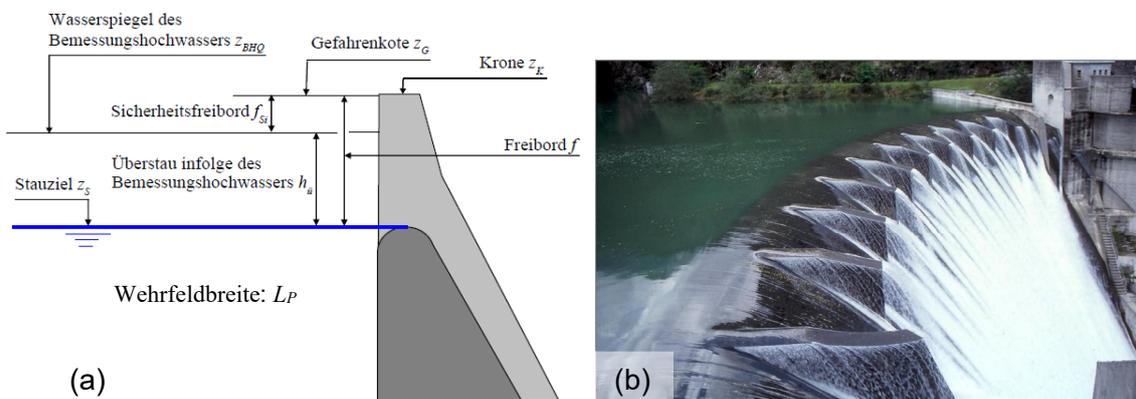
Je nach Art der HWE kommt Massnahme (2) in Frage (ggf. erst nach Umbau-/Anpassungsmassnahmen), oder aber es sind nur die Massnahmentypen (1) und (3) aus Sicht der Gefahrenbeurteilung zulässig, so dass Schwemmgut zuverlässig von der HWE ferngehalten werden muss. Auf diese drei Massnahmentypen wird in den nachfolgenden Kapiteln eingegangen. Betriebliche Massnahmen werden zudem in Kap. 6.3 behandelt.

### 2.2 Übersicht HWE-Einlaufbauwerke

In Abhängigkeit der Art der HWE kommen die Massnahmentypen (2) Durchleiten und (3) Rückhalt und Entnahme im Speicher zur Anwendung. Nachfolgend werden die gängigen Arten von Einlaufbauwerken an HWE aufgezeigt (**Abbildung 3** bis **Abbildung 8**) und die wichtigsten Parameter dargestellt.

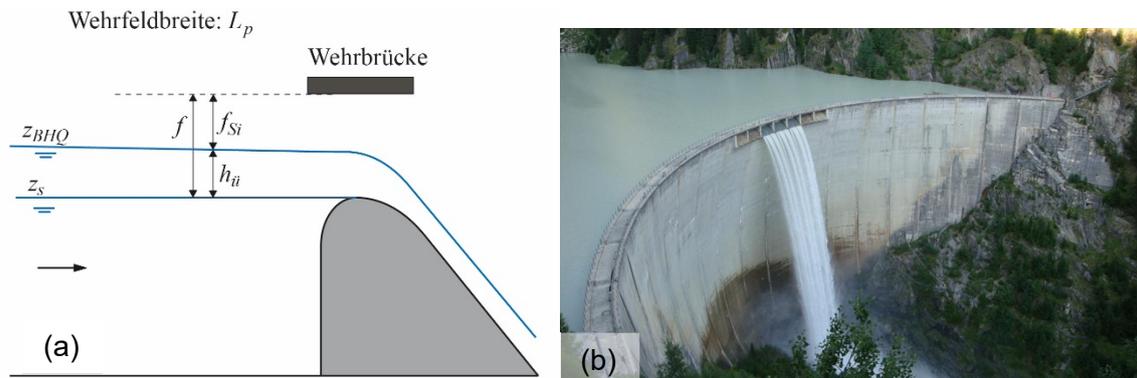
#### 2.2.1 Freier Überfall

Wehrfelder ohne Wehrbrücke/Aufbauten:



**Abbildung 3:** (a) Prinzipskizze HWE-Einlaufbauwerk als freier Überfall ohne Wehrbrücke/Aufbauten, (b) HWE der Stauanlage Palagnedra, Schweiz (Foto: Helga Ammann).

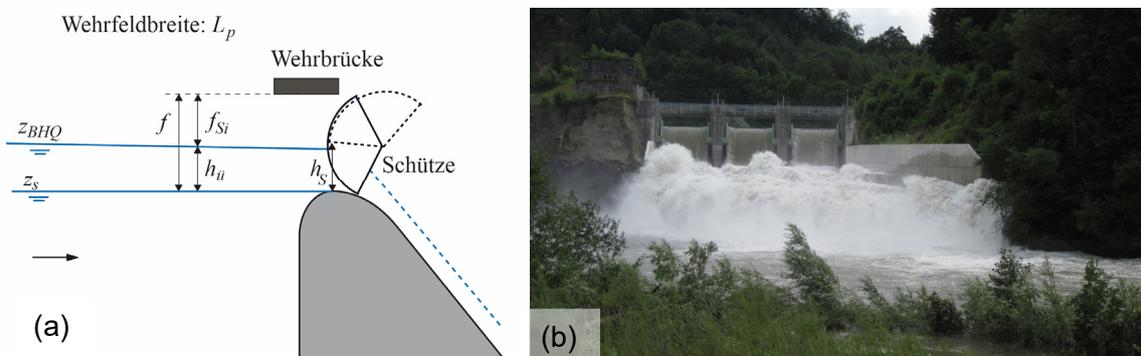
### Wehrfelder mit Wehrbrücke/Aufbauten:



**Abbildung 4:** (a) Prinzipskizze HWE-Einlaufbauwerk als freier Überfall mit Wehrbrücke/Aufbauten, (b) HWE-Auslaufbauwerk an der Stauanlage Gebidem, Wallis, Schweiz (Foto: VAW).

$f$	Freibord
$f_{Si}$	Sicherheitsfreibord
$L_p$	Wehrfeldbreite
$h_{ü}$	Überstau infolge Bemessungshochwasser
$z_{BHQ}$	Wasserspiegel des Bemessungshochwassers
$z_s$	Stauziel

### 2.2.2 Schützenregulierter Überfall

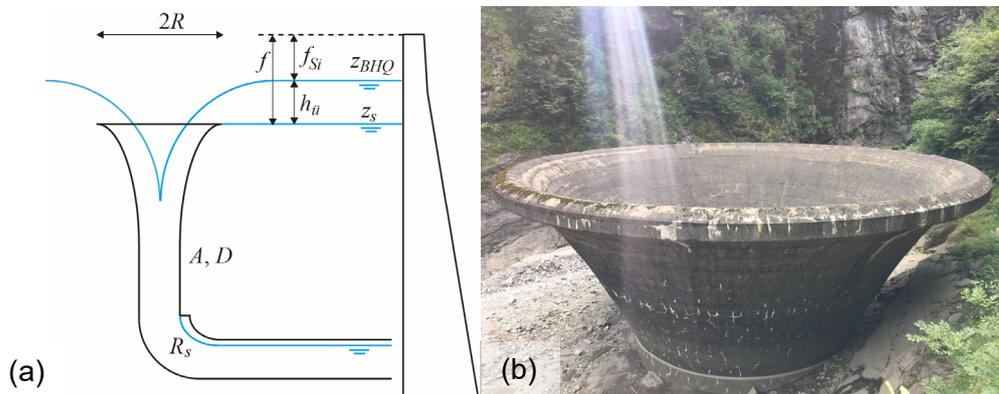


**Abbildung 5:** (a) Prinzipskizze HWE als regulierter Überfall, (b) schützenregulierte HWE der Stauanlage Maigrage, Schweiz (Foto: Group e).

$f$	Freibord
$f_{Si}$	Sicherheitsfreibord
$h_s$	Schützenöffnungshöhe
$L_p$	Wehrfeldbreite
$h_{ü}$	Überstau infolge Bemessungshochwasser
$z_{BHQ}$	Wasserspiegel des Bemessungshochwassers
$z_s$	Stauziel



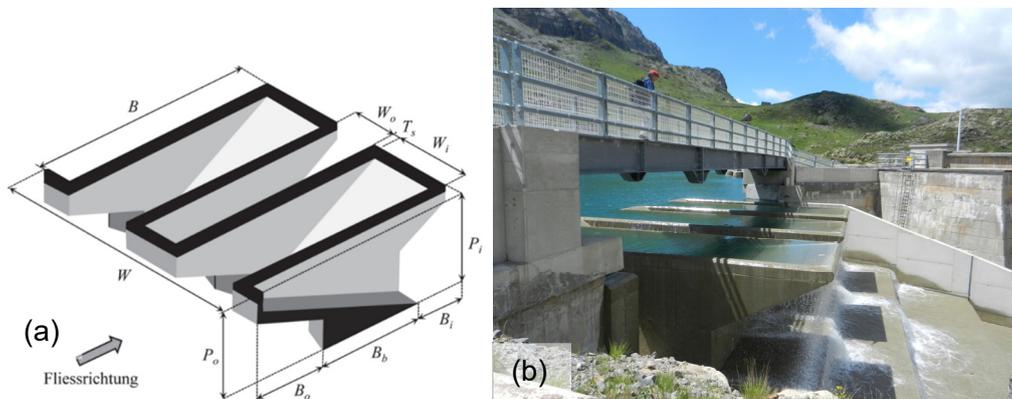
### 2.2.3 Überfalltulle



**Abbildung 6:** (a) Prinzipskizze HWE als Überfalltulle (b) Überfalltulle der HWE an der Stauanlage Malvaglia, Schweiz (Quelle: VAW).

$A$	Querschnittsfläche im Schacht
$D$	Schachtdurchmesser
$f$	Freibord
$f_{Si}$	Sicherheitsfreibord
$h_{\bar{u}}$	Überstau infolge Bemessungshochwasser
$z_{BHQ}$	Wasserspiegel des Bemessungshochwassers
$z_s$	Stauziel
$R$	Tulpenradius
$R_s$	Radius Schachtkrümmen

### 2.2.4 Klaviertastenwehr

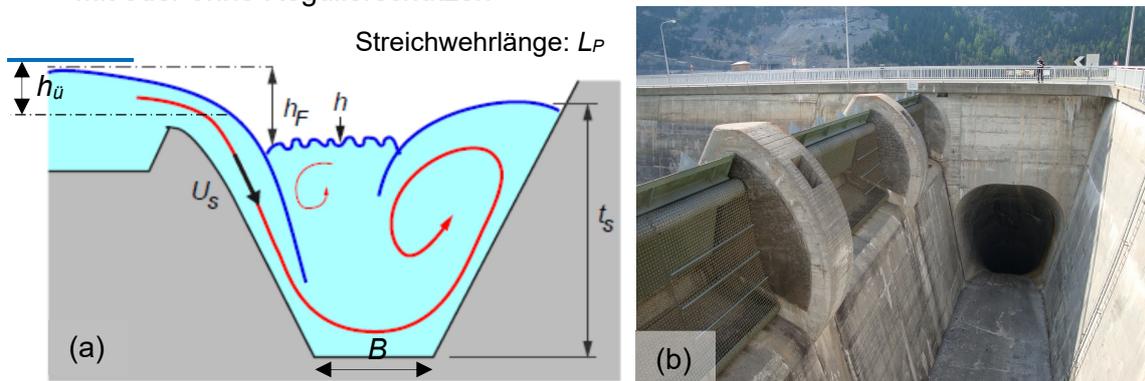


**Abbildung 7:** (a) Prinzipskizze des HWE-Einlaufbauwerks als Klaviertastenwehr, (b) Klaviertastenwehr der Stauanlage Gloriette in Frankreich (Foto: La Fourmi des Montagnes)

$B$	Länge in Strömungsrichtung
$b$	Aufstandsbereich
$L$	Abwicklungslänge der Krone
$P$	Höhe der Wände
$T_s$	Dicke der Wände
$W$	Gesamte Wehrbreite
$i$	Einlaufbereich ( <i>inlet</i> )
$o$	Auslaufbereich ( <i>outlet</i> )

## 2.2.5 Streichwehr und Sammelrinne

Mit oder ohne Regulierschützen



**Abbildung 8:** (a) Prinzipskizze HW-Einlaufbauwerk als Sammelrinne, (b) schützenregulierte Sammelrinne der Stauanlage Punt dal Gall, Schweiz (Quelle: Michael Mülheim)

$B$	Breite Sammelrinne an der Sohle
$h$	Abflusstiefe in Sammelrinne
$h_u$	Überfallhöhe
$h_F$	Fallhöhe bezogen auf Abflusstiefe in der Sammelrinne
$L_p$	Streichwehrlänge
$t_s$	Seitlicher Aufstau in der Sammelrinne
$U_s$	Geschwindigkeit Seitenzufluss

## 2.3 Massnahmen im Einzugsgebiet

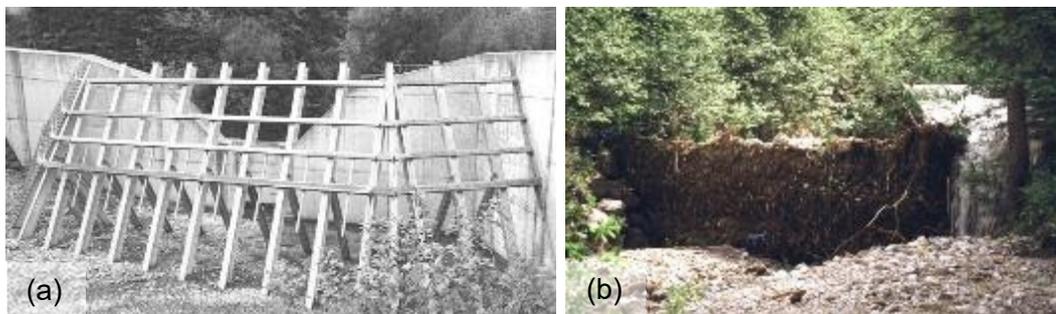
Um das Schwemmholaufkommen im Einzugsgebiet zu minimieren, ist eine präventive Schutzwaldpflege notwendig (Covi 2009). Dazu müssen Rutschungen und Seitenerosionen vermieden und mittelfristig stabile Uferbereiche und Bacheinhänge wie auch gut strukturierte Waldbestände in Ufernähe des Speichers angestrebt werden. Der Boden soll auf diese Weise durch Baumwurzeln verfestigt werden. Stabile und gut verankerte Bäume sollen erhalten bleiben. Hingegen sollen stark unterspülte und sturzgefährdete Bäume beseitigt werden. Bei Bäumen im Bachbett und Totholz wird meist aus Hochwasserschutzgründen beurteilt, ob sie liegen gelassen und/oder entfernt werden sollen. Diese „Aufräumarbeiten“ können im Widerspruch zum ökologischen Nutzen des im Bach verbleibenden Holzes stehen.

Allgemein ist die Bewirtschaftung an Bacheinhängen und an den Ufern von Speichern schwierig, technisch aufwändig und meist sehr kostenintensiv. Um dem Bedürfnis der Sicherheit sowie der Ökologie Rechnung zu tragen, ist eine enge Zusammenarbeit zwischen Forstdienst, Naturschutzbeauftragten und weiteren Beteiligten von grosser Bedeutung.

Als technische Massnahmen können Schwemmholtzrückhalteanlagen im Einzugsgebiet und in den Bächen oberhalb der Stauanlage vorgesehen werden. Der Schwemmholtzrückhalt kann direkt im Gerinne geschehen oder in einem dafür bestimmten Rückhalteraum, wie z.B. in einem Geschiebesammler und/oder im Gerinne mithilfe von Rechenkonstruktionen, Schwemmholtznetzen, selektivem Schwemmholtzrückhalt, etc. (**Abbildung 9**; Zollinger 1983, Bänziger 1990, Rimböck 2003).



In schwer zugänglichem Gelände sind die Kosten für das Ausfliegen von Baumstämmen per Helikopter unverhältnismässig hoch. In diesen Fällen werden Stämme mitunter auf ungefährliche Längen gekürzt (üblich z.B. im Kanton Bern). Es ist offensichtlich, dass auch mittels Schutzwaldpflege und Schwemmholzurückhalt im Einzugsgebiet ein Schwemmgutaufkommen im Hochwasserfall nicht ausgeschlossen werden kann.



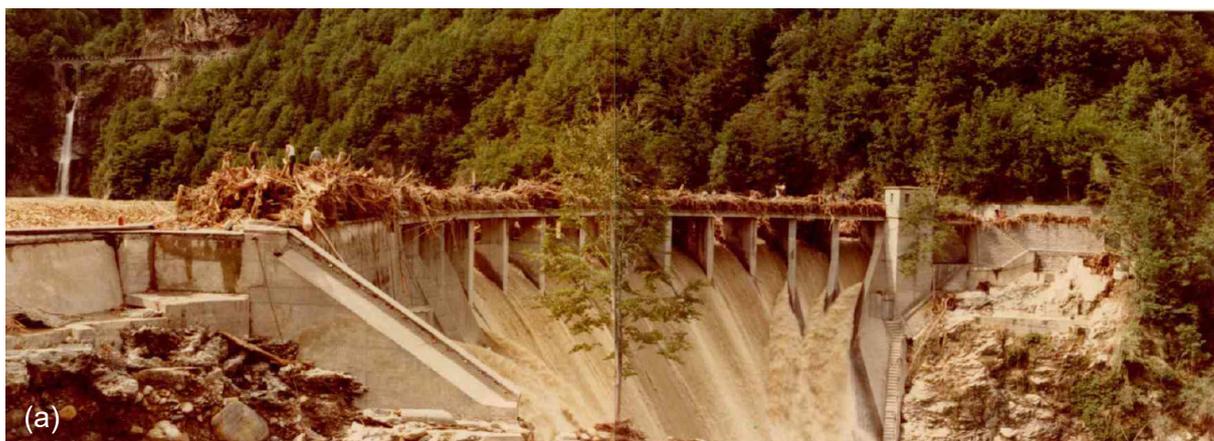
**Abbildung 9:** Schwemmholzurückhalt mittels (a) Stahlrechen im Geschiebesammler am Dorfbach Sachseln, Kanton Obwalden (Foto: VAW), (b) Netzsperrre am Faulengraben, Oberbayern, Deutschland (Foto: Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU München) sowie (c) Kombination Schwemmholz-/Seilrechen an der Chiene in Kien, Kanton Bern (Foto: Emch + Berger AG).

## 2.4 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 möglich, wenn die Möglichkeit einer Verklausung an der HWE (**Abbildung 10a**) ausgeschlossen werden kann. Dazu müssen entweder die Öffnungen des HWE-Einlaufbauwerks entsprechend gross sein (siehe Kapitel 3.1, 3.2 und 5.3), oder es muss sich um einen freien Überfall mit genügender Breite ohne Aufbauten handeln (**Abbildung 10b**). Die konstruktive Gestaltung

der HWE muss das Durchleiten von Schwemmholz begünstigen (glatte Flächen, Ausrundungen, trompetenförmige Einläufe). Gegebenenfalls kann die Längsausrichtung von quer zur Strömungsrichtung anschwimmenden Baumstämmen durch einen frei stehenden Pfeiler vor der HWE (Engstelle) erreicht werden (siehe Kap. 6.1.2). Hierdurch kann der Baumstamm die HWE passieren. Mögliche betriebliche Massnahmen wie z.B. eine entsprechende Wehrsteuerung bei schützenregulierten HWE werden in Kap. 6.2 beschrieben.

Mit dem Durchleiten des Schwemmguts wird zwar die Verklausungsgefahr bei der HWE entschärft, jedoch ins Unterwasser verlagert. Die Auswirkungen des Durchleitens auf den Flussabschnitt stromabwärts der Stauanlage sind zu prüfen – insbesondere Engstellen, Brücken und andere verklausungsgefährdete Bauwerke.



**Abbildung 10:** (a) Verklausung des HWE-Einlaufbauwerks (freier Überfall mit Wehrbrücke) an der Stauanlage Palagnedra, Kanton Tessin, 1978 (b) neues HWE-Einlaufbauwerk ohne Wehrbrücke (Fotos: Ofima).

## 2.5 Entnahme im Speicher

Generell bieten Speicher die Möglichkeit, anfallendes Schwemmgut zu entnehmen, sofern die Zugänglichkeit für Grossgeräte gegeben ist. Aufgrund der geringen Fließgeschwindigkeiten kann das Geschwemmsel meistens mittels Booten eingesammelt werden. Dadurch kann verhindert werden, dass 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.



Schwemmholz ist meist nicht über den gesamten Speicher verteilt, sondern wird durch Wind in Buchten oder an bestimmte Uferbereiche getrieben. Schwimmketten haben sich für das Einsammeln von Holz auf dem Stausee bewährt. Im Hochwasserfall selbst sind die Kräfte aufgrund des hohen Schwemmholzaufkommens jedoch meistens zu gross und die Zuverlässigkeit der Schwimmketten zu klein. Es sind bereits vermehrt Probleme aufgrund gerissenen Schwimmketten aufgetreten.

Im Hochwasserfall mit hohem Schwemmgutaufkommen ist die Entnahme fast unmöglich, da die Leistungen von Greifern oder Rechenreinigungsmaschinen meist zu gering sind (**Abbildung 11**). Eine bereits verklauste HWE mittels Greifern freizuräumen ist aufgrund der Geschwemmselmenge sowie der Strömungsgeschwindigkeiten und der daraus resultierenden Verkeilung des Geschwemmsels praktisch unmöglich. Es empfiehlt sich deshalb, das Schwemmgut von Anfang an genügend weit vor der HWE zurückzuhalten, falls es nicht durchgeleitet werden kann. Zurückgehaltenes Treibgut kann nach einem Hochwasser aus dem Speicher entfernt werden, was mit entsprechenden Kosten für Bergung, Transport und Entsorgung verbunden ist.



**Abbildung 11:** Treibgutentnahme durch Bagger an der Stauanlage Yarzagyo, Myanmar, während dem Hochwasser 2015 (Foto: M. Wieland).

### 3. Regelungen und Stand der Technik

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. Die nachfolgenden Gleichungen und Empfehlungen wurden grösstenteils basierend auf hydraulischen Modellversuchen oder anhand von Erfahrungen abgeleitet. Die jeweiligen Formeln sind somit auf die getesteten Verhältnisse oder spezifische Stauanlagen limitiert, können jedoch für eine erste generelle Abschätzung verwendet werden.

#### 3.1 Schweiz

Gemäss der Basisdokumentation zur Sicherheit der Stauanlagen (BFE 2016) sollen bei der konstruktiven Ausbildung von HWE die Durchlässe/Wehrfelder genügend breit sein, damit eine Verklausung durch Bäume und Geschwemmsel vermieden werden kann. Eine Breite von 10 m kann - sofern es die topographischen 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.

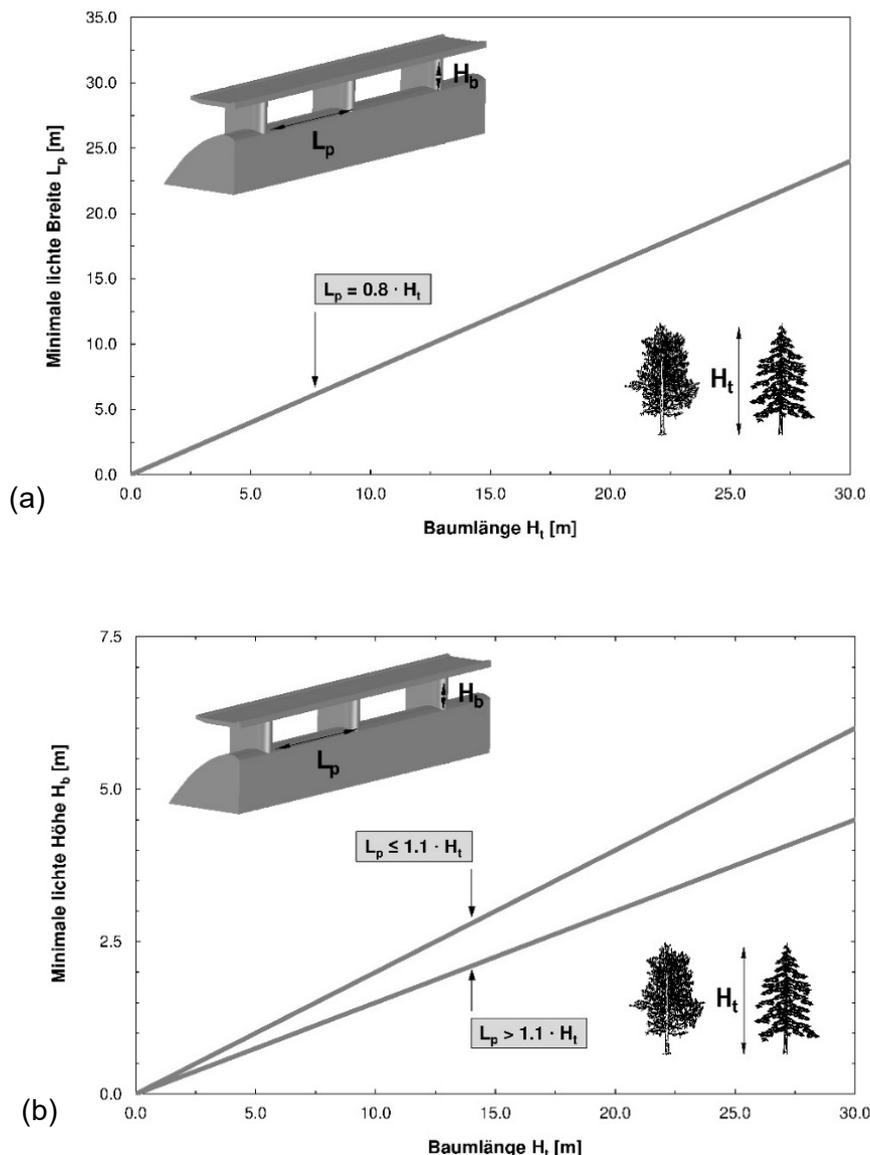
Bei Wehren an grösseren Flüssen und im Flachland soll die Breite mehr als 10 m betragen. Des Weiteren ist bei der Gestaltung der HWE darauf zu achten, dass ein ausreichendes Freibord unter einer Wehrbrücke oder einer Aufbaute vorhanden ist, in der Regel mindestens 1.5 bis 2 m. Ein Wehrsteg sollte gegebenenfalls so konzipiert sein, dass er bei ausserordentlichen Hochwassern entfernt oder fortgespült werden kann. Das BFE (2016) 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  $H_t$  (**Abbildung 12**) ab:

$$L_p \geq 0.8H_t \quad (1)$$

$$H_b \geq 0.15H_t \quad \text{für } L_p > 1.1H_t \quad (2a)$$

$$H_b \geq 0.2H_t \quad \text{für } L_p \leq 1.1H_t \quad (2b)$$

Die Empfehlungen basieren auf der Untersuchung von Godtland & 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](http://www.lfi.ch)). Alternativ können die bei vergangenen Hochwassern beobachteten Baumängen als Anhaltspunkt genommen werden (z.B. Bezola & Hegg 2007, 2008).



**Abbildung 12:** Kennwerte zur Festlegung der (a) minimalen lichten Wehrfeldbreite  $L_p$ ; (b) minimalen lichten Wehrfeldhöhe  $H_b$ .

## 3.2 International

### 3.2.1 Frankreich

Das *Comité français des barrages et reservoirs* (Cfbr) schätzt HWE mit Wehrbrücken und Aufbauten als verklausungsgefährdet ein, falls beim Bemessungshochwasser BHQ (HQ<sub>1000</sub> für Beton- und Mauerwerk-Talsperren, z.T. HQ<sub>5000</sub> für Gewichtsstaumauern und HQ<sub>10'000</sub> für Schüttdämme) eines der folgenden Kriterien zutrifft (Cfbr 2013):

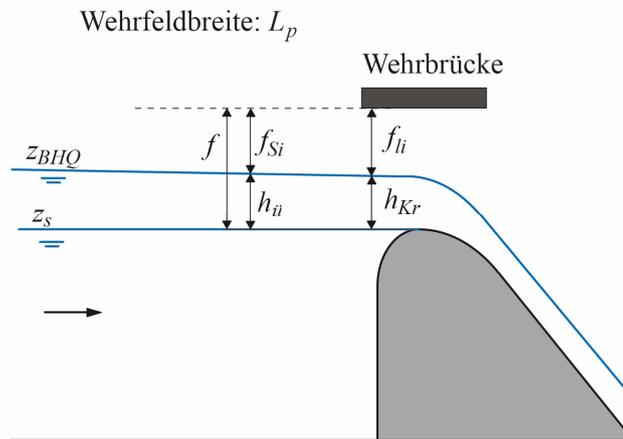
$$h_{Kr} < 0.5 \text{ m} \quad (3a)$$

oder

$$f_{\bar{u}} < 2 \text{ m} \quad \text{falls } 0.5 \text{ m} < h_{Kr} < 2 \text{ m} \quad (3b)$$

$$f_{Si} < 1.5 \text{ m} \quad \text{falls } h_{Kr} > 2 \text{ m} \quad (3c)$$

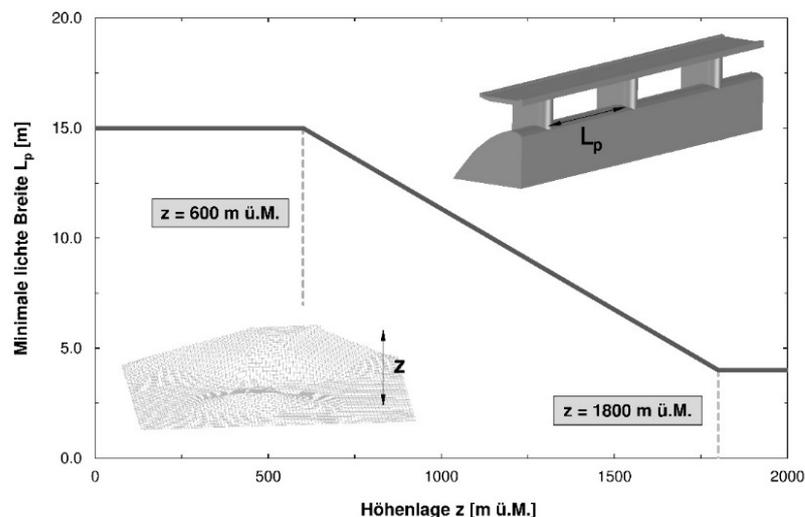
mit  $f_{li}$  = kleinster lichter vertikaler Abstand zwischen dem Wasserspiegel und der Unterkante des querenden Bauwerks im Bereich der Wehrkrone und  $h_{Kr}$  = Überfallhöhe im massgebenden Schnitt (von  $f_{li}$ ) im Bereich der Wehrkrone (**Abbildung 13**). In der Regel gilt  $h_{Kr} \approx h_{cr} \approx 2/3 h_{üi}$ , mit  $h_{cr}$  = kritische Abflusstiefe, welche sich im Wehrkronenbereich einstellt.



**Abbildung 13:** Prinzipskizze HWE-Einlaufbauwerk mit querender Wehrbrücke.

Bei Neubauten wird eine minimal lichte Wehrfeldbreite von 10 bis 15 m empfohlen. Bei der Festlegung der erforderlichen Breite  $L_p$  der HWE ist nach Cfbr (2013) die Höhenlage  $z$  [m ü.M.] der Stauanlage zu berücksichtigen (**Abbildung 14**):

- |                            |                                |      |
|----------------------------|--------------------------------|------|
| $L_p \geq 15$ m            | für $z \leq 600$ m ü.M.        | (4a) |
| $L_p \geq 20.5 - 11z/1200$ | für $600 < z \leq 1800$ m ü.M. | (4b) |
| $L_p \geq 4$ m             | für $z > 1800$ m ü.M.          | (4c) |



**Abbildung 14:** Minimal erforderliche lichte Wehrfeldbreite  $L_p$  in Abhängigkeit der Höhenlage  $z$  der Stauanlage (nach Cfbr 2013).



### 3.2.2 Österreich

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

### 3.2.3 Deutschland

In Deutschland sind keine generellen Regelungen bezüglich Schwemmgut an HWE vorhanden. Der Ruhrverband führte eine Umfrage bei 23 Betreibern und für 83 Stauanlagen zur Verklausung der HWE von Stauanlagen bei Hochwasser durch (Roesler & Bettzieche 2000). Die Umfrage hat gezeigt, dass an 88% der Talsperren noch nie eine Verlegung der HWE festgestellt wurde und das Schwemmgutaukommen bis dato sehr gering war. An 10 Stauanlagen wurde bereits eine Verlegung beobachtet, wobei nie mehr als 10% der HWE verlegt wurden. Eine realistische Gefährdung für HWE durch Schwemmgut konnte aus der Umfrage nicht abgeleitet werden. Bei dieser Studie ist aber zu beachten, dass die grossen Hochwasser in Deutschland nach 1999 nicht enthalten sind, so dass diese Problematik vermutlich heute stärker gewichtet würde. Der Dambruch von Glashütte im August 2002 ist u.a. auf einen durch Schwemmgut verklausen Grundablass zurückzuführen (Bornschein et al. 2002).

### 3.2.4 Italien

Bezüglich der Funktionstüchtigkeit der Verschlussorgane von HWE gelten in Italien die folgenden Empfehlungen (Ruggeri 2015):

- Die HWE muss so gestaltet werden, dass die Durchleitung von Schwimmkörpern zwischen Wasserspiegel und allfälligen Überbauten gewährleistet wird.
- Bei **regulierten Anlagen mit  $n$  Schützen** wird für die Berechnung der Abflusskapazität der Ausfall von (einer ganzen Zahl an) Schützen angenommen, und zwar:  
 $\geq 0.5n$  bei Schüttdämmen,  
 $\geq 0.2n$  bei Betonsperren.
- Es ist für diesen Fall nachzuweisen, dass beim Abführen eines Bemessungshochwassers BHQ (HQ<sub>1000</sub> für Betonsperren, HQ<sub>3000</sub> für Schüttdämme) das effektiv vorhandene Sicherheitsfreibord  $f_{Si}$  (**Abbildung 5**) bei Geschwemmselanfall und Verklausung immer noch mindestens  $f/3$  beträgt, d.h.  $f_{Si} \geq f/3$ .
- Bei **Anlagen mit unterströmten Schützen** muss bei der Abflusskapazitätsberechnung angenommen werden, dass mindestens 30% der Schützenöffnung  $h_S$  (**Abbildung 5**) verklauset sind. Im Falle von Wehrfeldbreiten  $L_p < 12$  m müssen mindestens 50% der Schützenöffnung  $h_S$  als verklauset angenommen werden.
- Bei **festen Überfällen** muss bei der Abflusskapazitätsberechnung angenommen werden, dass mindestens 20% der lichten Höhe des Freibords  $f$  (**Abbildung 4**) verklauset sind. Im Falle von Wehrfeldbreiten  $L_p < 12$  m müssen mindestens 50% der lichten Höhe  $f$  als verklauset angenommen werden.

### 3.2.5 Norwegen

In Norwegen wurde mittels Modellversuchen das Verklausungsrisiko an einer HWE mit fester Überfallkante und einer Wehrbrücke mit mehreren Pfeilern untersucht (Godtland & Tesaker 1994). Die folgenden Empfehlungen wurden aus den Modellversuchen abgeleitet und in BFE (2016) übernommen (siehe Kapitel 3.1):

- Die minimale Breite der HWE  $L_p$  sollte mindestens 80% der zu erwartenden Stammlänge  $H_t$  betragen;
- Die minimale lichte Höhe  $H_b$  der HWE (**Abbildung 12b**) sollte mindestens 15% der zu erwartenden Stammlänge  $H_t$  betragen;
- Falls keine Aufbauten vorhanden sind, werden Bäume ab einer Überfallhöhe von ca. 10-15% der Stammlänge  $H_t$  über den Wehrrücken abgeschwemmt, ohne hängenzubleiben (siehe auch Kap. 5.3.2).

### 3.2.6 Vergleich der Regelungen

Die pauschalen Werte bzgl. minimaler Wehrfeldabmessungen gemäss österreichischer Empfehlung können als grobe Faustformel verwendet werden. Die Richtlinie der Schweizer Aufsichtsbehörde BFE wurden von den norwegischen Empfehlungen übernommen, die auf nur einer Modelluntersuchung basieren. Die Datengrundlage für die minimal erforderlichen Abmessungen der Wehrfelder ist somit sehr bescheiden. Bei der französischen Richtlinie ist die minimale Wehrfeldbreite von der Höhenlage der Talsperre und den dort vorhandenen Stammlängen abhängig. Eine direkte Anwendung auf die Schweiz ist wegen der z. T. unterschiedlichen klimatischen Bedingungen (Temperatur, Niederschlag, etc.), welche massgeblich den Baumwuchs bestimmen, somit nicht sinnvoll. In der italienischen Praxis werden nicht nur geometrische Kriterien betrachtet, sondern auch Abflusskapazitäten. Es wird von einer gewissen Verklausung ausgegangen.

In erster Linie sind die minimal erforderlichen Abmessungen der HWE von den Dimensionen des transportierten Schwemholzes abhängig. Insbesondere die Stammlänge spielt für die Verklausungsgefahr der HWE eine entscheidende Rolle. Da für Sicherheitsbetrachtungen der HWE Extremereignisse im Vordergrund stehen, sollte insbesondere auch eine konservative Annahme bezüglich der maximal zu erwartenden Stammlänge getroffen werden.

### 3.3 Numerische Modellierung

Frühe Ansätze zur numerischen Simulation des komplexen Systems Flussvegetation-Ufervegetation-Fliessverhalten stammen typischerweise aus der Periode um 1990 bis 2000, wie Bertoldi & Ruiz-Villanueva (2015) aufzeigen. Diese Ansätze konzentrieren sich oft auf das Zusammenspiel von Vegetation, biologischem Wachstum, Holzformen, Flussmorphologie und vereinfachter Hydrodynamik. Als Referenzfläche dient oft das gesamte Einzugsgebiet (Lancaster & Hayes 2001). Technische Bauwerke und ihre komplexen Strömungsverhältnisse werden nur selten betrachtet. Die Studien beziehen sich meist auf naturnahe und nicht verbaute Einzugsgebiete. Neuere Ansätze berücksichtigen den Holztransport unter Beachtung der Interaktion zwischen den Stämmen und der Strömung, und dies für verschieden Holzformen (Braudrick & Grant 2000, Bocchiola et al. 2002). Die Resultate der numerischen Simulationen sind meist vereinfachte 1D oder 2D Ansätze, die nur selten mit physikalischen Modellversuchen verglichen werden. Ein deterministisches hydrodynamisches Modul wurde von Ruiz-Villanueva et al. (2014) vorgestellt. Es koppelt hydrodynamische 2D Berechnungen mit dem Holztransport.

Die Darstellung der Holzgeometrie ist wie bei anderen physikalischen Modellversuchen herausfordernd. Allen & Smith (2012) untersuchten, wie sich geometrische Vereinfachungen auf die Interaktion mit der Strömung auswirken. Sie konzentrierten sich auf Habitate von Fischen im Wurzelwerk und nicht auf die Interaktion der Holzstämme mit technischen Bauwerken.



Nebst dem Schwemholztransport wurde auch der Verklausungsprozess an Brücken numerisch modelliert (Mazzorana et al. 2010, Ruiz-Villanueva et al. 2014). Dabei konnten Brücken-Verklausungsprozesse in Modellversuchen sowie am Prototyp mit dem numerischen Modell zufriedenstellend nachgebildet werden. Durch mehrfache Simulationen desselben Ereignisses mit unterschiedlichen Holzdimensionen und Brückenabmessungen konnten Aussagen über die Verklausungswahrscheinlichkeit gemacht werden. Die numerische Modellierung kann also beispielsweise für eine Risikoanalyse an Talsperren verwendet werden, um verklausungsgefährdete HWE frühzeitig zu identifizieren.

Die Aussagekraft numerischer Modelle bezüglich hydrodynamischer Prozesse bei Verklausungen ist jedoch bescheiden. Oft werden die hydrodynamischen Berechnungen während der Verklausung nur schrittweise angepasst. Zudem wird die Restkapazität der HWE, bei einer Verklausung sowie der resultierende Überstau nur unzureichend genau abgebildet.

Die Stärke der numerischen Simulation liegt eher in der Modellierung des Schwemholzaufkommens- und transports auf Einzugsgebietsebene bis in den Speicher oder in der Vorhersage, wohin das Holz in Funktion des Windes und des Wellenschlages im Speicher driftet. Für die Verklausungsprozesse auf kleinmassstäblicher Ebene sowie die Einwirkung des Holzes auf die HWE ist die Aussagekraft der Modelle hingegen noch sehr vage.

## 4. Umfrage und Fallbeispiele

### 4.1 Umfrage bei Betreibern von Wasserkraftanlagen in der Schweiz

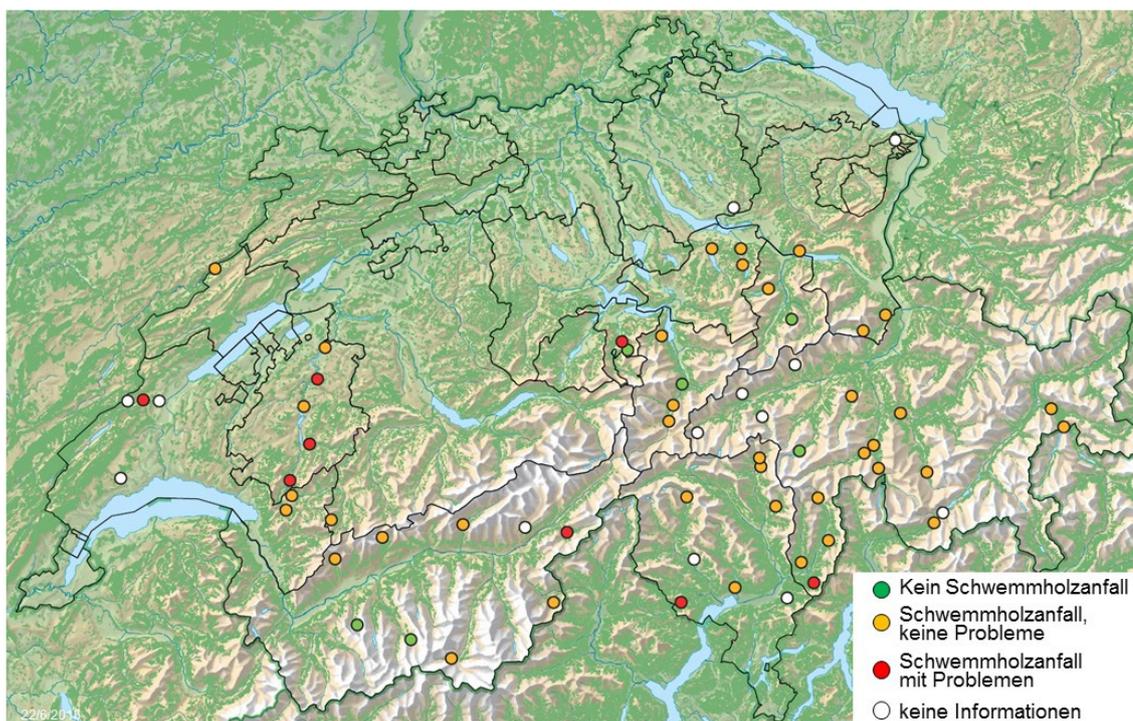
Im Dezember 2013 wurden Fragebögen an 60 Betreiber von Wasserkraftanlagen mit Speicherseen (keine Flusskraftwerke) verteilt, wovon 52 ausgefüllt retourniert wurden. Der Fragebogen ist im Anhang 1 zu finden und setzt sich folgendermassen zusammen: Der erste Teil beinhaltet Angaben zur Stauanlage, zur Hochwasserentlastungsanlage und zur Hydrologie. Der zweite Teil befasst sich mit dem Schwemmholzaufkommen, dem Umgang mit dem Schwemmholz und allfälligen Problemen sowie Schäden infolge von Schwemmholz. Die Ergebnisse der Umfrage können wie folgt zusammengefasst werden:

- An 46 von 52 (88%) Stauanlagen fällt Schwemmholz an;
- An 32 von diesen 46 (70%) Anlagen wird Schwemmholz entnommen;
- An 18 von diesen 46 (39%) Anlagen wird Schwemmholz über die HWE abgeführt (an 7 Anlagen wird auch entnommen);
- An 5 Anlagen sind die Kubaturen der Entnahme bekannt;
- An 7 Anlagen sind die Abmessungen des Schwemmholzes bekannt (davon ist an einer Anlage auch die Kubatur bekannt);
- An 8 von 52 Anlagen (17%) traten schon Probleme auf (meist Verklausung), an 5 Anlagen sind Schäden dokumentiert.

In **Abbildung 15** ist eine geographische Übersicht zur Situation in der Schweiz dargestellt. Von den 52 erfassten Stauanlagen verfügen alle über ein bewaldetes Einzugsgebiet (Höhenlage < 2000 m ü.M.). Somit tritt an praktisch allen Stauanlagen unterhalb der Waldgrenze Schwemmholz auf.

Da nur an 8 von 52 Stauanlagen bereits Schäden aufgetreten sind, ist die Stichprobe zu klein, um eine detaillierte statistische Auswertung zum Gefahrenpotential durchzuführen. Zudem gibt es viele kleinere Stauanlagen, die bei der Umfrage nicht berücksichtigt wurde (z.B. Schlattli, wo es in 2010 Probleme gab).

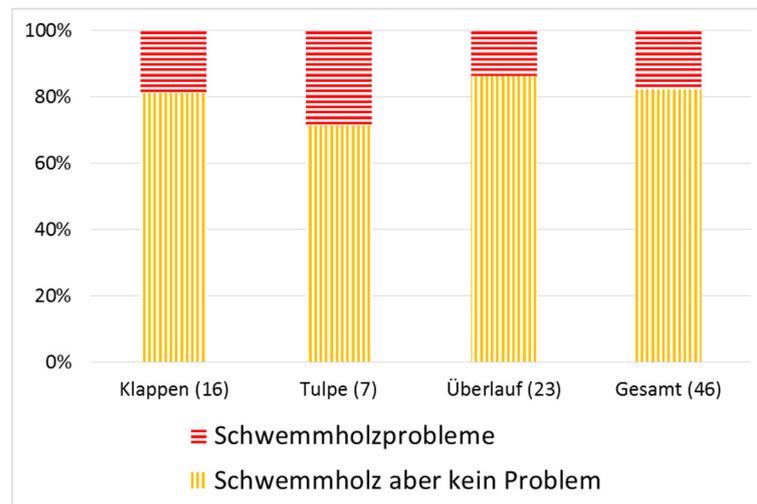
Die Fallbeispiele in Kapitel 4.2 zeigen, dass bei hohem Schwemmholzaufkommen die Situation häufig nicht mehr kontrolliert werden kann und dadurch die Gefahr von Verklausungen sowie Schäden schnell ansteigt. Ein Vergleich mit den Richtlinien zeigt zudem, dass viele HWE die minimal empfohlenen Abmessungen nicht einhalten. 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.



**Abbildung 15:** Resultate der Umfrage bei Stauanlagenbetreibern aufgeteilt nach den Kriterien „Kein Schwemmholtzanfall“; „Schwemmholtzanfall, aber keine Probleme“ und „Schwemmholtzanfall mit Problemen“. Von acht Anlagen erfolgte keine Rückmeldung.

Die Rückmeldungen wurden ausgewertet, um Korrelationen zwischen den Haupteigenschaften der Stauanlage und den Schwemmholtzproblemen zu finden. Aus den verfügbaren Daten wurden der Typ der Hochwasserentlastung, die Grösse des Einzugsgebietes sowie die Höhenlage der Stauanlage als Kriterien gewählt. In **Abbildung 16** und **Abbildung 17** sind die Auswirkungen dieser Kriterien auf das Schwemmholtzaufkommen und das Auftreten von Problemen an der HWE dargestellt. Daraus können folgende Aussagen abgeleitet werden:

- Generell traten bei Einlauftulpen öfters Probleme auf als bei anderen HWE-Einlauftypen. Bei freien Überfällen traten am wenigsten Probleme auf. Aufgrund der konstruktiven Ausbildung ist bei Tulpen ein höheres Verklausungsrisiko zu erwarten.
- Probleme infolge Schwemmholtz traten unabhängig von der Grösse des Einzugsgebietes auf. Bei grösseren Einzugsgebieten nimmt deren Anzahl jedoch zu, da das Schwemmholtzpotential u.a. mit der Einzugsgebietsgrösse zunimmt (Kap. 5.1.1). Da bereits ein kleines Schwemmholtzvolumen zu Problemen an der HWE führen kann, ist das Gefahrenpotential an HWE mit kleinen Einzugsgebieten nicht generell niedriger.
- Stauanlagen in tieferen Lagen sind generell gefährdeter. Dies hängt einerseits mit der grösseren Waldfläche im Einzugsgebiet und andererseits mit den grösseren zu erwartenden Baumängen in tieferen Lagen zusammen.

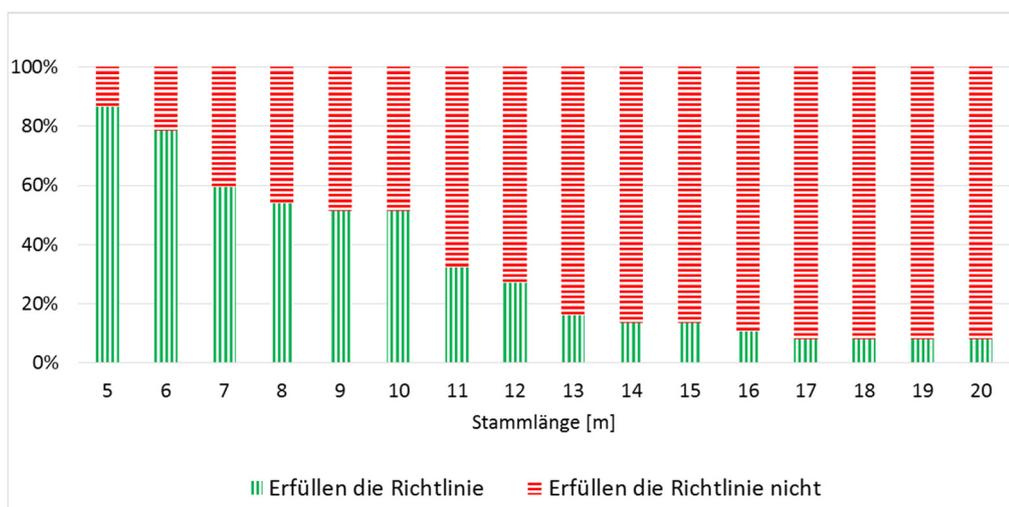


**Abbildung 16:** Einfluss des Typs der HWE auf das Auftreten von Problemen mit Schwemmholz. Zahl in Klammer: Anzahl Stauanlagen mit dem jeweiligen HWE-Typ.



**Abbildung 17:** Einfluss der Höhenlage der Stauanlage auf das Auftreten von Problemen mit Schwemmholz.

Gemäss Umfrage traten in der Schweiz an 17% der Anlagen Probleme und Schäden mit Schwemmholz auf (siehe oben). Um zusätzlich das vorhandene Gefahrenpotential abzuschätzen, können die empfohlenen minimalen Dimensionen von HWE gemäss den vorhandenen Richtlinien (Kapitel 3) mit den tatsächlichen Dimensionen verglichen werden. In **Abbildung 18** ist dargestellt, welcher Anteil der Hochwasserentlastungsanlagen die minimal erforderliche Breite gemäss der Schweizerischen Richtlinie ( $L_p \geq 0.8H_i$ ) erfüllt. Dabei wurde die zu erwartende Stammlänge zwischen 5 und 20 m variiert. Bei einer Stammlänge von 10 m erfüllen nur ca. 50% der HWE die Empfehlungen der Schweizerischen Richtlinie. Bei einer Stammlänge von 15 m sind es nur noch knapp 15%. Somit besteht generell ein hohes Gefahrenpotential, falls im Hochwasserfall hoher Schwemmholzanfall mit langen Stämmen auftritt und die HWE anspricht.



**Abbildung 18:** Prozentualer Anteil der Anlagen, welche die Schweizerischen Richtlinie (BFE 2016) der minimalen Wehrfeldbreite erfüllen bzw. nicht erfüllen in Funktion der zu erwartenden Stammlänge.

## 4.2 Fallbeispiele

Anhand der Fragebögen wurden mehrere Fallbeispiele aus der Schweiz ausgewählt und im Detail aufgearbeitet (Anhang 2). Dabei wurden folgende Stauanlagen und Hochwasserereignisse mit Schwemmholzanfall und die daraus entstandenen Probleme genauer betrachtet:

- Käppelistutz, Hochwasserereignis August 2005;
- Schlattli, Hochwasserereignis Juli 2010;
- Palagnedra, Hochwasserereignis August 1978;
- Montsalvens, Hochwasserereignis Mai 2015.

Zusätzlich werden einzelne Fallbeispiele aus dem Ausland diskutiert (Anhang 2).

## 5. Kriterien zur Beurteilung der HWE hinsichtlich Gefahrenpotential

### 5.1 Mobilisierung und Transport von Schwemmholz

Im einem Gewässer können glatte Stämme mit einer mittleren Holzdichte von  $500 \text{ kg/m}^3$  mobilisiert und transportiert werden, wenn die Abflusstiefe grösser ist als der halbe Stammdurchmesser  $d$  (Lange & Bezzola 2005), d.h.  $h > d/2$ . In Modellversuchen zum Riemenstaldnerbach mit schiessendem Abfluss (Froudezahl  $Fr = 2$ ) wurden glatte Stämme ab einer Abflusstiefe von  $1.0d$  bis  $1.2d$  transportiert. Um beastete Stämme in Bewegung zu setzen, waren Abflusstiefen von  $1.2d$  bis  $1.5d$  erforderlich. Stämme mit Wurzelstöcken gelangten erst ab Abflusstiefen von  $1.7d$  in Bewegung (Bezzola et al., 2002). Gemäss Braudrick & Grant (2000) werden für strömenden Abfluss mit  $Fr = 0.75$  und Holzdichten von  $500 \text{ kg/m}^3$  für parallel zur Strömung angeordnete Baumstämme folgende Abflusstiefen  $h$  zur Mobilisierung benötigt: (i) für ast- und wurzelfreie Einzelstämme mit Relativlängen von  $L/d = 15$  gilt  $h = 0.45d$ ; (ii) für Einzelstämme mit Wurzelsteller (Index R) der Abmessungen  $d_R/d = 2$  und Relativlängen von  $L/d = 15$  und  $20$  gilt  $h = (0.6 \dots 0.65)d$ ; (iii) für Einzelstämme mit Wurzelsteller der Abmessungen  $d_R/d = 4$  und Relativlängen von  $L/d = 20$  gilt  $h = 0.9d$ . Ein Vergleich der minimal erforderlichen relativen Abflusstiefen ergibt für strömenden Abfluss kleinere Schwemmholzmobilisierung als bei Schiessen. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Fliesstiefen bei Strömen grösser sind als im schiessenden Abfluss bei identischem Abfluss, Rauheiten und Gefällen (Boes et al. 2013).

Für ast- und wurzelfreie Einzelstämme ist der Effekt der relativen Stammlänge  $L/d$  auf die erforderliche Relativwassertiefe  $h/d$  für  $L/d > 15$  gering. Mit der Holzdichte nimmt die erforderliche Relativwassertiefe zu. Für Stämme mit  $L/d = 30$  und Holzdichten von  $750 \text{ kg/m}^3$  nimmt  $h/d$  um rund 20-30% gegenüber einer Dichte von  $500 \text{ kg/m}^3$  zu (Braudrick & Grant 2000). Der obere Bereich gilt dabei für wurzelfreie Stämme, der untere Bereich für solche mit Wurzeln.

### 5.2 Schwemmholzaufkommen im natürlichen Einzugsgebiet

Als Grundlage für die Gefahrenbeurteilung ist abzuklären, mit welchem Schwemmholzaufkommen im Hochwasserfall zu rechnen ist. Im Hochwasserfall kann Schwemmholz infolge Seitenerosion oder Rutschungen in den Zufluss oder direkt in den Speicher eingetragen werden. Zudem wird bereits im Gewässerraum vorhandenes Totholz mobilisiert. Die Bestimmung des Schwemmholzpotentials ist mit grossen Unsicherheiten behaftet. Abschätzungen der effektiven Schwemmholzmenge können durchaus um den Faktor zwei oder mehr von den effektiv verfrachteten Schwemmholzmengen abweichen. Für eine Verklauung 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 Fliesstrecke 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 einerseits mit Abschätzformeln bestimmt werden, welche auf Datengrundlagen beobachteter Holzvolumina beruhen (Kap. 5.2.1). Andererseits muss für die massgebenden Lastfälle des Bemessungs- und Extremhochwassers mit aussergewöhnlichem Schwemmholzeintrag gerechnet werden. Hierzu empfiehlt sich – analog zu hydrologischen Extremwertbetrachtungen – eine Verwendung von Hüllkurven (Kap. 5.2.2). Die aufwändigste, aber genaueste Methode ist eine detaillierte Analyse des Einzugsgebietes mit Feldbegehungen und unter Zuhilfenahme von GIS-Analysen (Schalko et al. 2017a). Daneben werden neben dem Schwemmholzaufkommen auch Informationen zu dessen Abmessungen (Kap. 5.2.3) und zur Schwimmfähigkeit und Verweildauer (Kap. 5.2.4) benötigt.

Aufgrund der Hochwassergeschichte des Einzugsgebiets können bereits kleinere Hochwasserereignisse einen Schwemmholzanfall hervorrufen, während nachfolgende grössere Hochwasser weniger Schwemmholz verfrachten können, wenn das verbleibende Schwemmholzpotential kleiner ist. Deswegen müssen für die Abschätzung des Schwemmholzaufkommens mittels empirischen Formeln oder einer Feldbeurteilung immer unterschiedliche Szenarien betrachtet werden, u.a. der zeitliche Abstand zum letzten Hochwasser mit markantem Schwemmholztransport.

### 5.2.1 Empirische Schätzformeln

Rickenmann (1997) hat dokumentierte Schwemmholzmengen während der Hochwasserereignisse 1987 und 1993 für mehrere Einzugsgebiete in der Schweiz ausgewertet und basierend darauf empirische Schätzformeln für die effektive Schwemmholzmenge und das Schwemmholzpotential abgeleitet. Diese Datengrundlage wurde durch dokumentierte Hochwasserereignisse in Japan, Deutschland und den USA (Ishikawa 1989 und Uchiogi et al. 1996) erweitert. Mit empirischen Schätzformeln lässt sich das effektive **Schwemmholzvolumen**  $H$  [m<sup>3</sup>] basierend auf den folgenden Eigenschaften des Einzugsgebiets bzw. des Hochwasserereignisses abschätzen:

- Grösse des Einzugsgebiets (Rickenmann 1997):

$$H = 45 \cdot EG^{2/3} \quad (5)$$

mit  $EG$  = Einzugsgebietsgrösse in [km<sup>2</sup>]. Gültigkeitsbereich:  $EG = 0.054 - 6'273$  km<sup>2</sup>. Die Schwemmholzmenge  $H$  [m<sup>3</sup>] beschreibt das lockere Holzvolumen (Auflockerungsfaktor  $a = V_L/V_F = 2$  mit  $V_L$  = Lockervolumen und  $V_F$  = Festvolumen).

- Abflussfracht (Rickenmann 1997):

$$H = 4 \cdot V_W^{2/5} \quad (6)$$

mit  $V_W$  = Abflussfracht des Hochwassers in [m<sup>3</sup>]. Gültigkeitsbereich:  $V_W = 2.16 - 390 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup>.

- Feststofffracht (Ishikawa 1989 und Uchiogi et al. 1996):

$$H = 0.02 \cdot F \quad (7)$$

mit  $F$  = Feststofffracht des Hochwassers in [m<sup>3</sup>]. Gültigkeitsbereich:  $F = 380 - 50'000$  m<sup>3</sup>.

Zudem sind empirische Schätzformeln vorhanden, mit denen das vorhandene **Schwemmholtzpotential**  $H_{pot}$  [ $m^3$ ] basierend auf Eigenschaften des Einzugsgebiets abgeschätzt werden kann:

- Vegetationstyp im Einzugsgebiet (Ishikawa 1989 und Uchiogi et al. 1996):

$$H_{pot} = C \cdot EG \quad (8)$$

mit  $C$  = dimensionsloser Beiwert in Abhängigkeit des Vegetationstyps. Beim Vegetationstyp wird zwischen Nadelwald ( $10 < C < 1000$ ) und Laubwald ( $10 < C < 100$ ) unterschieden. Gültigkeitsbereich:  $EG < 100 \text{ km}^2$ .

- Bewaldetes Einzugsgebiet (Rickenmann 1997):

$$H_{pot} = 90 \cdot EG_W \quad (9)$$

mit  $EG_W$  = bewaldetes Einzugsgebiet in [ $\text{km}^2$ ], gültig für  $EG = 0.76 - 78 \text{ km}^2$  und  $EG_W = 0.3 - 21.1 \text{ km}^2$ .

- Bewaldete Uferlänge (Rickenmann 1997):

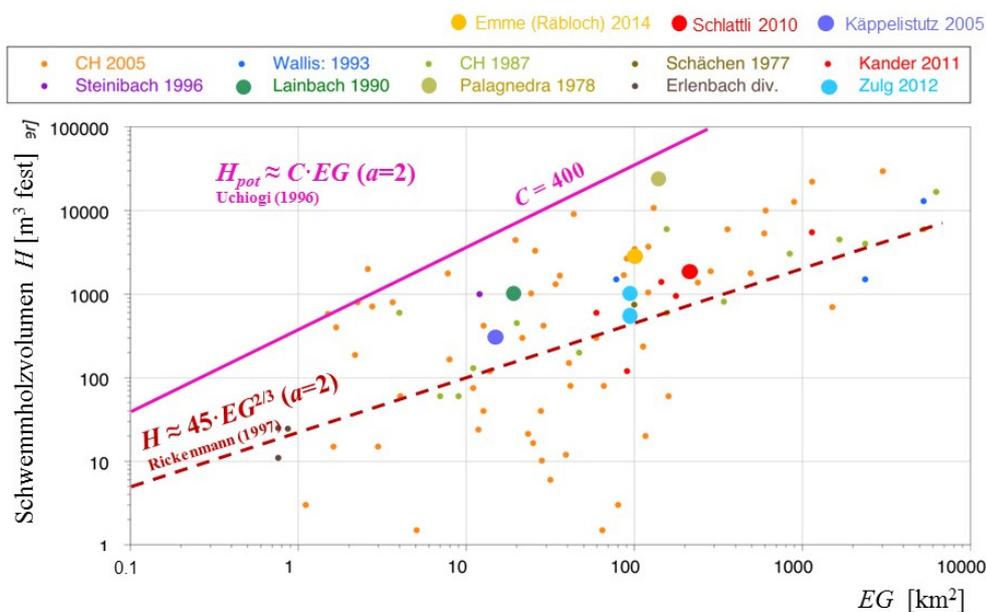
$$H_{pot} = 40 \cdot L_W^2 \quad (10)$$

mit  $L_W$  = bewaldete Uferlänge in [ $\text{km}$ ], gültig für  $L_W < 20 \text{ km}$ .

Weitere Erklärungen zu den empirischen Schätzformeln geben Lange & Bezzola (2006). Generell zeigen die Formeln grosse Streuungen und sind mit Unsicherheiten behaftet, da Faktoren wie beispielsweise Jährlichkeit des Hochwassers, Geschichte des Einzugsgebiets (letztes 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.

## 5.2.2 Analyse vergangener Ereignisse

Die Analyse vergangener Hochwasserereignisse bezüglich des effektiv transportierten Schwemmholtzvolumens liefert gute Anhaltspunkte für die Gefahrenabschätzung. Falls im betrachteten Einzugsgebiet keine Hochwasserereignisse mit Schwemmholtztransport bekannt sind, können Daten vergleichbarer Einzugsgebiete mit ähnlicher Hydrologie, Topographie und Bestockungsgrad herangezogen werden. Angaben zu beobachteten Schwemmholtzmengen sind z.B. in den Ereignisanalysen der Hochwasser 1987 und 1993 (Rickenmann 1997) sowie 2005 (Bezzola & Hegg 2008) zu finden. **Abbildung 19** zeigt beobachtete Schwemmholtzvolumina (fest) in Abhängigkeit des Einzugsgebietes sowie die Hüllkurven von Uchiogi et al. (1996, Gl. 8), und die Abschätzung nach Rickenmann (1997, Gl. 5). Extremereignisse wie 1978 in Palagnedra kommen nahe an die Obergrenze für Nadelwald nach Uchiogi et al. (1996). Für Schweizer Verhältnisse mit  $EG < 300 \text{ km}^2$  erscheinen Vorfaktoren bis zu  $C \approx 400$  in Gl. (8) als erste Anhaltswerte für ein Extremhochwasser durchaus realistisch.

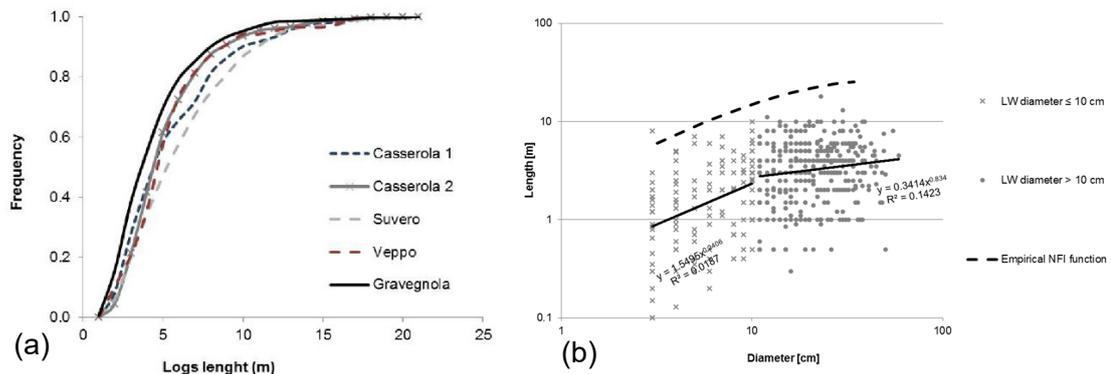


**Abbildung 19:** Beobachtete Schwemmholzvolumen (Festvolumen) bei vergangenen Hochwasserereignissen sowie Schätzformeln nach Rickenmann (1997) und Uchiogi (1996) (Auflockerungsfaktor  $a = 2$ ).

### 5.2.3 Schwemmholzabmessungen

Gemäss Zollinger (1983) ist Schwemmholz während des Transportes enormen Kräften ausgesetzt. Dadurch wird dieses in Gebirgsbächen bereits nach wenigen Metern entastet, geschält und meist in 1 - 5 m lange Stücke zerkleinert. In **Abbildung 20a** ist die Verteilung der nach einem Hochwasser abgelagerten Stammgrössen entlang verschiedenen italienischen Flüssen dargestellt (Lucía et al. 2015). Ungefähr 50% der aufgenommenen Stämme waren dabei länger als ca. 5 m. Steeb et al. (2016) schätzen ab, dass insbesondere in Wildbächen die eingetragenen und transportierten Bäume im Mittel auf ca. 20% ihrer ursprünglichen Länge verkleinert werden (**Abbildung 20b**). Die physikalischen Kräfte (hohes Gefälle, Schluchtstrecken) oder der Eintragsprozess (Rutschungen, Murgäng) spielen für die Verkleinerung die grössere Rolle als die Transportdistanz. Zudem besteht ein Zusammenhang zwischen Stammlängen und Stammdurchmessern. Für die Ereignisanalyse des Hochwassers 2005 wurde abgelagertes Schwemmholz systematisch vermessen (Bezzola & Hegg 2007). Ca. 35% der Stämme waren 4 - 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 (**Abbildung 20a, Abbildung 21**). Insbesondere bei Rutschungen in einen Speicher wird die Stammlänge kaum reduziert. In vielen Fällen reicht zudem ein grosser Stamm oder Wurzelstock aus, um den Querschnitt einer HWE zu blockieren und eine Verklauung zu initiieren. Bei der Gefahrenbeurteilung beim schwedischen Speicher Trängslet wurden deshalb Stammlängen bis 25 m berücksichtigt (Boes et al. 2013). Für eine Abschätzung des Gefahrenpotentials oder der Verklauungswahrscheinlichkeit (Kapitel 5.3) sollten somit die Abmessungen der Bäume in Ufer- oder Speichernähe verwendet werden.



**Abbildung 20:** (a) Häufigkeitsverteilung der Stammlängen, die nach einem Hochwasser im Gerinne abgelagert werden (Lucia et al. 2015); (b) Vergleich der Stammlängen und -durchmesser von bei Hochwasser transportierten Bäumen mit der empirischen NFI-Gleichung (Beziehung zwischen Stammlänge und Durchmesser auf Brusthöhe) (Steeb et al. 2016).



**Abbildung 21:** Schwemmholz, das aus dem Speicher Gebidem entfernt wurde, mit Stammlängen bis 15 m (Foto: VAW).

#### 5.2.4 Schwimmfähigkeit und Verweildauer von Schwemmholz

Nach Zollinger (1983) bleibt Frischholz meist über mehrere Monate schwimmfähig, womit eine halbjährliche Entnahme aus dem Speicher ausreicht. Betreffend Schwimmfähigkeit von Holz macht Zollinger (1983) des Weiteren folgende Angaben:

- Fichtenholz sinkt praktisch nie;
- Kiefer- und Lärchenholz sinkt mit der Zeit möglicherweise;
- Tannenholz sinkt im Vollsaft nach 2 - 4 Wochen, in trockenerem Zustand nach mehreren Wochen, wenn es im Wasser liegt;
- Buchenholz schwimmt nur selten, im besten Fall schwebt es im Wasser.

Bei Hochwasser eingetragenes Totholz ist jedoch teilweise nicht mehr schwimmfähig und kann absinken. Weiterführende Literatur zur Dichte von im Fluss vorhandenem Holz findet sich z.B. in Ruiz-Villanueva et al. (2016). Wurzelstöcke, die zusätzlich mit viel Geschiebe beladen sind, verlieren teilweise auch ihre Schwimmfähigkeit. Dieses



Schwemmholz kann auch Einlaufbauwerke sowie Mittel- und Grundablässe gefährden. Der Verklauungsprozess dieser Einlaufbauwerke ist jedoch nicht Bestandteil der vorliegenden Untersuchung.

### 5.3 Einfluss des Speichers und seiner Zubringer auf das Schwemmholzaufkommen an der HWE

Die Lage und Charakteristik des Speichers kann das Gefahrenpotential betreffend Schwemmholz beeinflussen. Je nach Höhenlage ist das vorhandene Schwemmholzpotential gering (oberhalb der Waldgrenze praktisch null) und in tieferen Lagen hoch. Zudem nehmen die Abmessungen des Schwemmholzes mit zunehmender Höhenlage ab. Steile bewaldete Speicherböschungen begünstigen den Holzeintrag infolge von Wind, Hangrutschungen oder umgestürzten Bäumen. Rutschungen können sich in mässig bis steil geneigtem Gelände ereignen. Das Risiko von Hangrutschungen ist ab einer Hangneigung von typischerweise  $> 25^\circ$  deutlich erhöht. Wind und Wellen sowie schnelle Speicherabsenkungen können die Ufer zusätzlich destabilisieren und so zu einem Schwemmholzeintrag in den Speicher führen.

Die Speicherzubringer haben einen weiteren Einfluss auf das Schwemmholzaufkommen. Im Alpenraum sind Bäche häufig schmal und schluchtartig und die angrenzenden Böschungen steil. In das Bachbett gestürzte Bäume können über Jahre im Gewässer verbleiben und auch zusätzliches Holz am Weitertransport hindern (**Abbildung 22**). Bei Hochwasser können sich diese Holzansammlungen schlagartig lösen und in den Speicher verfrachtet werden (siehe Fallbeispiel Palagnedra).



**Abbildung 22:** Wildbach im Joffre Lake Provincial Park, British Columbia, Kanada (Foto: Boes 2009).

Befindet sich Holz im Speicher, kann es nicht nur durch die Strömung, sondern auch durch Wind massgeblich transportiert werden. Die Form und Ausrichtung des Speichers hat somit direkt einen Einfluss, ob eingetragenes Holz bereits ohne Strömungseinwirkung in Richtung HWE verfrachtet werden kann. Holz kann sich infolge Wind auch über längere Zeit im hinteren Teil des Speichers oder in Uferbereichen ansammeln und erst im Hochwasserfall zur Sperre transportiert werden. Zudem kann die Lage der verschiedenen Speicherzuflüsse das Strömungsbild und somit auch den Schwemmholztransport im See beeinflussen. Bei Stauanlagen, welche hinsichtlich Verlandung aufgrund von Spülzyklen abgesenkt werden, müssen auch Mittel- und Grundablässe in die Gefahrenbeurteilung miteinbezogen werden. Aufgrund der tiefen Wasserspiegel sind die Fliessgeschwindigkeiten verhältnismässig hoch, womit Holz verfrachtet oder auch in Grundablässe eingezogen werden kann.

## 5.4 Verklausungswahrscheinlichkeit der HWE

In der Vergangenheit wurden verschiedene physikalische Modellversuche zur Verklausung von HWE infolge Schwemmholz durchgeführt. Viele Versuche konzentrierten sich jedoch auf eine bestimmte Anlage. Deshalb sind meist keine allgemeingültigen Aussagen möglich. Weiter ist zu unterscheiden zwischen HWE-Einlaufbauwerken, die sich im Allgemeinen auf Höhe des Stauziels befinden, und Stollenentlastungen, deren Einlaufbauwerke zum Teil deutlich unter dem Speicher-Wasserspiegel liegen, d.h. unter Druck angeströmt werden. Nachfolgend werden zunächst generelle Erkenntnisse zur Mobilisierung und zum Transport von Schwemmholz aufgelistet. Dann werden der Schwemmholztransport über Wehrbauwerke und dessen Verklausungswahrscheinlichkeit betrachtet, wobei zwischen frontal und radial bzw. seitlich angeströmten Wehren unterschieden wird. Schliesslich werden Besonderheiten von Klaviertastenwehren diskutiert. Zudem wird für HWE mit Wehrbauwerken, über welche Wehrbrücken oder Stege führen, ein Analogieschluss zur Verklausungswahrscheinlichkeit von Brücken über Gewässer gezogen.

Die Verklausung von Wasserfassungen und Entnahmebauwerken wird hier nicht behandelt. Zudem beschränken sich die Untersuchungen auf Verklausungen infolge Schwemmholz und allgemeines Schwemmgut. Verklausungen infolge grossen schwimmenden Objekten wie z.B. Siloballen, Autos etc. wurden bis jetzt nach Wissen der Autoren nicht systematisch untersucht.

### 5.4.1 Verklausungswahrscheinlichkeit an Wehren

Bei kleinen Überfallhöhen kann Schwemmholz auf der HWE liegen bleiben. Die erforderlichen Fliesstiefen am Wehrbauwerk einer HWE zum sicheren Durchleiten sind nur ansatzweise bekannt. Nach Zollinger (1983) sind folgende minimalen Abflusstiefen  $h$  zum Transport von Holz mit Relativlängen bis zum zwölffachen Stammdurchmesser, d.h. für  $L/d < 12$ , über Überfallsektionen erforderlich: (i)  $h_{Wehr} = 1.0d$  für Einzelstämme; und (ii)  $h_{Wehr} = (2...4)d$  für relativ lose Schwemmholzpakete. Dabei stellt  $h_{Wehr}$  die Fliesstiefe auf dem breitkronigen Wehr, dessen Kronenlänge definitionsgemäss mindestens das Dreifache der Überfallhöhe  $h_{\bar{u}}$  beträgt, d.h.  $h_{Wehrkronen} \geq 3h_{\bar{u}}$ . Da sich auf dem breitkronigen Wehr kritischer Abfluss mit  $h_{Wehrkronen} = h_{cr} = 2/3H$ , mit  $H$  = Energiehöhe bezogen auf den Wehrscheitel, einstellt, können die erforderlichen Wassertiefen bei vernachlässigbar kleiner Anströmgeschwindigkeit oberstrom der Wehrkronen auch wie folgt angegeben werden: (i)  $h_{\bar{u}}/d = 1.5$  für Einzelstämme; und (ii)  $h_{\bar{u}}/d = 3...6$  für relativ lose Schwemmholzpakete.

Gemäss Johansson & 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 Verklauungswahrscheinlichkeit. Grundsätzlich steigt die Verklauungsgefahr mit zunehmendem Verhältnis von Stammlänge zu Wehrbreite.

Hartlieb (2012) hat anhand von Modellversuchen die Gefahr von Verklauung an Hochwasserentlastungsanlagen mit Segmentschützen untersucht. Von den verschiedenen Eigenschaften des Schwemmholzes (Länge, Dichte, Anzahl und Länge der Äste) hatte die 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 mit der Strömung ausrichteten. Bei Gruppen von fünf Stämmen stieg die Verklauungswahrscheinlichkeit an. Mit zunehmender Anzahl und Länge der Äste wurde die Verklauungswahrscheinlichkeit grösser. Die Dichte hatte jedoch keinen signifikanten Einfluss auf die Verklauungswahrscheinlichkeit.

Für HWE mit freiem Überfall und Schützen präsentierte Hartlieb (2015) die folgende Formel zur Bestimmung der Verklauungswahrscheinlichkeit  $P$  eines frontal angeströmten Wehrs:

$$P = (L/W - 0.96) * 0.73 \quad (11)$$

mit  $L$  = Stammlänge und  $W$  = Wehrfeldbreite.

#### 5.4.2 Verklauungswahrscheinlichkeit von Klaviertastenwehren

Zur Abschätzung der Verklauungswahrscheinlichkeit von Klaviertastenwehren (Engl. *Piano Key Weir* PKW, **Abbildung 7**), einer Weiterentwicklung der Labyrinthwehre, haben Pfister et al. (2013a, b) Modellversuche durchgeführt. PKW sind, wie von Pfister (2015) beschrieben, Überfälle mit einer relativ zur lichten Wehrbreite überproportionalen Abwicklungslänge. Entsprechend weisen sie eine verhältnismässig effiziente Abfluss-Pegel-Beziehung auf (Leite Ribeiro et al. 2012). Die komplexe Kronengeometrie könnte, intuitiv gesehen, ungünstig sein für Schwemmholzanfall und die Verklauungswahrscheinlichkeit eher erhöhen, zumindest im Vergleich zu konventionellen Überfällen. Die Modellversuche haben aber gezeigt, dass diese Vermutung nicht zutrifft. Zwei umfangreiche Testreihen im Modell haben zu diesem Ergebnis geführt. Im Rahmen dieser Testreihen wurden folgende Aspekte untersucht:

- Verklauungswahrscheinlichkeit von Einzelholz, um den Beginn der Verklauung festzustellen.
- Überstau im Speicher in Funktion der Verklauung für den Anfall eines Schwemmholzteppichs.

Werden in Bezug auf die Verklauungswahrscheinlichkeit nur einzelne Stämme (ohne Äste und Wurzeln) betrachtet und wird ein Speicher mit vernachlässigbaren Abflussgeschwindigkeiten angenommen (kein Flusstauraum), lassen die Modellbeobachtungen folgende Aussagen bezüglich PKW zu:

- Ist der Durchmesser eines Stammes grösser als die Überfallhöhe  $h_{ii}$  bzw. die Anströmenergiehöhe  $H$ , d.h. für  $h_{ii}/d < 1$ , so bleibt der Stamm in der Regel hängen.
- Entspricht der Stammdurchmesser ungefähr 2/3 der Überfallhöhe und damit der kritischen Abflusstiefe auf dem Wehr, d.h. für  $h_{ii}/d \approx 1.5$ , so beträgt die Verklauungswahrscheinlichkeit ca. 50%. Diese Beobachtung wurde von Fachleuten bereits vor der Untersuchung diskutiert, jedoch nach Wissen der Verfasser nie publiziert.

- Ist der Stammdurchmesser geringer als ungefähr 1/3 der Überfallhöhe, d.h. für  $h_u/d > 3$ , so wird der Stamm typischerweise über das Wehr gespült, ohne zu verklausen.

Die Länge der Stämme ist nicht relevant, da die lichte Wehrbreite von PKW meist deutlich grösser ist als der längste anfallende Stamm. Wurzelstücke blockieren bereits bei geringeren Überfallhöhen als Stämme. Die Daten der Modellversuche streuen allerdings, da die möglichen Formen von Wurzelstöcken unüberschaubar sind. Tendenziell kann beobachtet werden, dass sich die massgeblichen, oben für Stämme beschriebenen relative Überfallhöhen in etwa halbieren. Auf den Aspekt bezüglich des Überstaus wird im Kapitel 5.4.2 eingegangen.

### 5.4.3 Verklausungswahrscheinlichkeit von Wehrbrücken

Godtland & Tesaker (1994) untersuchten unter anderem den Einfluss von Brückenaufbauten an einer unregulierten HWE. Die Verklausungsgefahr war bei vorhandenem Brückenaufsatz höher als ohne. Zudem konnte Schwemmholz an den Aufbauten hängen bleiben und entsprechende Kräfte hervorrufen. Mangels Literatur zur allgemeinen Verklausungswahrscheinlichkeit an Wehren mit Wehrbrücken wird nachstehend ein Vergleich mit entsprechenden Untersuchungen an Brücken über Gewässer gezogen. Für die Verklausung von Brücken oder Brückenpfeilern an Fliessgewässern sind in der Literatur verschiedene Formeln vorhanden (Melville & Dongol 1992, Bezzola et al. 2002, Schmocker & Hager 2011). Diese Formeln können verwendet werden, um die Verklausungswahrscheinlichkeit an einer HWE grob abzuschätzen. Die meisten Versuche an Brücken wurden jedoch bei hohen Froudezahlen und Fliessgeschwindigkeiten durchgeführt, wie sie insbesondere bei Hochwasser in Wildbächen und Flüssen auftreten. Grosses Schwemmgut wie z.B. Baumstämme ist daher meist schon in Fliessrichtung ausgerichtet, womit das Verklausungsrisiko generell abnimmt. Die Fliessgeschwindigkeit bei der Anströmung von HWE ist meist deutlich geringer und der Gleichrichtungseffekt ist nicht vorhanden, was auch die Verklausungswahrscheinlichkeit erhöht. Die Wahrscheinlichkeit einer Verklausung ist bei kleinen Geschwindigkeiten und Froudezahlen tendenziell grösser, da Stämme bereits infolge der Äste an den Brücken- und Wehrstrukturen hängen bleiben können. Die unten angegebenen Formeln geben somit nur einen Anhaltspunkt und sollten in Bezug auf HWE mit Vorsicht angewandt werden.

Die Gleichungen nach Lange & Bezzola (2006) wurden mit Hilfe von 1'200 Modellversuchen empirisch ermittelt. Dabei wurden verschiedene Brückenquerschnitte und Schwemmholzabmessungen betrachtet und statistisch ausgewertet. Die Verklausungswahrscheinlichkeit nach Lange & Bezzola (2006) für einzelne Stämme  $P_L$  ist primär vom Verhältnis zwischen Stammlänge  $L$  und Breite des Brückenquerschnitts  $B$  abhängig und wird wie folgt definiert:

$$P_L = 0 \quad \text{für} \quad \frac{L}{B} < 0.5 \quad (12a)$$

$$P_L = 0.133 \frac{L}{B} - 0.066 \quad \text{für} \quad \frac{L}{B} \geq 0.5 \quad (12b)$$

Die Wahrscheinlichkeitsberechnung des Verhängens einzelner Wurzelstöcke  $P_R$  ist abhängig vom Verhältnis zwischen der mittleren Abmessung des Wurzelstellers  $D_R^*$  sowie der lichten Höhe  $H$  des Brückenquerschnitts und kann beschrieben werden mit:



$$P_R = 0 \quad \text{für} \quad \frac{D_R^*}{H} < 0.6 \quad (13a)$$

$$P_R = 1 \quad \text{für} \quad \frac{D_R^*}{H} \geq 1.0 \quad (13b)$$

$$P_R = 2 \frac{D_R^*}{H} - 1.2 \quad \text{für} \quad 0.6 \leq \frac{D_R^*}{H} < 1.0 \quad (13c)$$

mit  $D_R^* = (D_{RM}^2 \cdot D_{Rm} \cdot L_R)^{1/3}$  und  $D_{RM}^2 =$  Maximale Abmessung des Wurzelstellers [m],  $D_{Rm} =$  Minimale Abmessung des Wurzelstellers [m] sowie Stammlänge  $L_R$  [m].

Bei der Berechnung der Verklauungswahrscheinlichkeit nach Schmocker & Hager (2011) werden vier Brückentypen unterschieden: (a) Balkenbrücke, (b) Fachwerkbrücke, (c) Brücke mit Geländer und (d) Brücke mit Staukragen. Die grösste Wahrscheinlichkeit des Verhängens einzelner Stämme  $P_{LM}$  und einzelnen Wurzelstöcken  $P_{RM}$  kann in Abhängigkeit der Zuflussfroudezahl  $Fr$  und der Abflusstiefe  $h$  wie folgt ausgedrückt werden:

$$P_{LM} = 0 \quad \text{für} \quad \frac{h}{H} \leq 0.9 \quad (14a)$$

$$P_{LM} = 0.25z + (4 - z)(Fr - 0.8)^2 \quad \text{für} \quad \frac{h}{H} = 1 \quad (14b)$$

$$P_{LM} = 1 - y(Fr - 0.3)^2 \quad \text{für} \quad \frac{h}{H} = 1.07 \quad (14c)$$

$$P_{RM} = 1.17 - 0.55Fr \quad \text{für Balken, Fachwerk und Geländer} \quad (14d)$$

$$P_{RM} = 0.91 - 0.69Fr \quad \text{für Brücke mit Staukragen} \quad (14e)$$

Mit  $h =$  Abflusstiefe, und  $H =$  Lichte Brückenhöhe und den Konstanten  $z = 2$  und  $y = 1$  für Balkenbrücken, Fachwerkbrücken und Brücken mit Geländer sowie  $z = 0$  und  $y = 2.5$  für Brücken mit Staukragen.

## 5.5 Aufstau infolge Verklauung

Die Durchlässigkeit einer Verklauung 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 Vollverklauung der HWE kann mittels Retentionsberechnung abgeschätzt werden. Annahmen für Teilverklauungen können z.B. den italienischen Empfehlungen (Ruggieri 2015) entnommen werden (Kap. 3.2.4). Infolge der Verklauung erhöht sich der entsprechende Wasser- und Holzdruck auf die HWE. Für die statische Bemessung ist dieser Lastfall zu berücksichtigen (Kap. 5.5).

### 5.5.1 Frontal angeströmte Wehre

Über den Aufstau infolge einer Schwemmholzverklauung an einer HWE sind in der Literatur kaum allgemeingültige Angaben vorhanden. Yang et al. (2009) führten Modellversuche für die Hochwasserentlastung des Laxede Damms in Schweden durch. Infolge der Verklauung der dreifeldrigen HWE ergab sich ein Aufstau im Oberwasser von 16-27% im Vergleich zum Zustand ohne Verklauung. In ähnlichen Versuchen beobachtete Hartlieb (2015) einen verklauungsbedingten Aufstau von 20-30% im Oberwasser. Schmocker (2017) untersuchte den Aufstau infolge Verklauung einer zweifeldrigen HWE und beobachtet einen verklauungsbedingten Aufstau von ca. 30%. Schalko et al. (2017b) haben für Verklauungen an Brücken die Abhängigkeit des Auf-

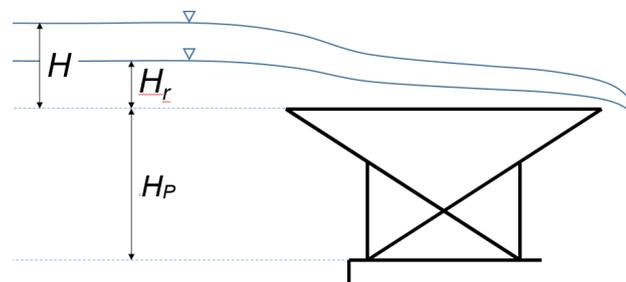
staus von der Zufluss-Froudezahle, dem Stammdurchmesser und dem Auflockerungsfaktor der Verklausung untersucht. Die Ergebnisse können als ersten Anhaltspunkt herangezogen werden, sind jedoch eher für hohe Zuflussgeschwindigkeiten  $v > 1.0$  m/s gültig.

### 5.5.2 Klaviertastenwehre

Für Klaviertastenwehre hat die Untersuchung von Pfister et al (2013a, b) gezeigt, dass der Überstau im Speicher (**Abbildung 23**) wider Erwarten eher gering ist. Als Gründe dafür können folgende Aspekte angeführt werden (Pfister et al. 2015):

- Klaviertastenwehre sind horizontal aufgefächert. Der erste Kontakt des Schwemmholzes mit dem Wehr, und damit typischerweise auch der Ort des Verklausens, liegt im Oberwasser des überwiegenden Anteils der Wehrkronenlänge. Der Strömungsdruck in diesem Bereich ist noch gering und ein möglicher Schwemmholzteppich wird kaum komprimiert oder vorangeschoben, sondern bleibt lose und einlagig.
- Ein bedeutender Anteil des zufließenden Wassers steigt vor dem Klaviertastenwehr steil auf und gelangt hauptsächlich in die Einlauftraste. Das Wasser kann somit unter der Verklausung hindurchfließen und wird von dieser nur wenig beeinflusst.
- Bisher gebaute Klaviertastenwehre weisen meist keine Pfeiler auf und sind häufig breiter als die transportierten Baumstämme.

Erfahrungen in der Praxis haben gezeigt, dass sich ein ähnliches Verklausungsmuster ergibt wie im Modell (Pfister et al. 2015).



**Abbildung 23:** Überstau bei einem Klaviertastenwehr für einen gegebenen Abfluss, mit  $H_r$  für den Überstau ohne Schwemmholz,  $H$  für den Überstau mit Schwemmholzanfall und  $H_P$  für die Wehrhöhe einer Klaviertaste.

Der durch ein verklaustes Klaviertastenwehr erzeugte relative Überstau  $H/H_r$  im Speichersee, hängt ab vom spezifisch zufließenden Schwemmholzvolumen  $V/W$  (mit  $V$  als Festholzvolumen, und  $W$  als gesamte Wehrbreite), und vom Überstau  $H$  (lotrechter Abstand zwischen Wasserspiegel und Wehrkrone mit Schwemmholz). Der lotrechte Abstand zwischen dem Wasserspiegel- und der Wehrkrone ohne Schwemmholz wird als Referenz-Überstau  $H_r$  bezeichnet (für den gleichen Abfluss wie  $H$ , Leite Ribeiro et al. 2012). Es gilt:

$$\frac{H}{H_r} \cong 1 + \tanh\left(0.007 \cdot \frac{V}{H_r^2 W}\right) \quad (15)$$



Dieser Überstau wird durch mehrere zufließende Schwemmholzhaufen erzeugt, welche eine repräsentative Verteilung von Stammlängen und von Wurzelstöcken beinhalten. Allgemein kann beobachtet werden, dass bereits der erste Haufen zu einer Verklauung führt. Die Verklauungswahrscheinlichkeit  $P$  beträgt rund:

$$P = \tanh\left(0.15 \cdot \frac{V}{H_r^2 W}\right) \quad (16)$$

Gleichung (13) erlaubt eine Abschätzung, ob ein Haufen zu einer Verklauung führt. Falls dies der Fall ist, kann sein Einfluss, und jener aller folgenden Schwemmholzhaufen auf den Speicherseespiegel mit Gleichung (12) abgeschätzt werden. Die Anwendungsgrenzen beider Gleichungen sind in Pfister et al. (2013a) gegeben.

Klaviertastenwehre scheinen wenig sensibel in Bezug auf Schwemmholz, da der Anpressdruck des Schwemmholzes gegen die Struktur gering ist, und ein sich bildender Teppich locker und horizontal gelagert bleibt. Schwebende Baumstämme können sich allerdings unter den Überhängen verfangen, wie erste Versuche gezeigt haben (BAW 2016).

## 5.6 Kräfteinwirkungen auf die HWE

Schwemmholz kann die betriebliche Sicherheit von HWE auf verschiedene Arten gefährden: (1) Schaden infolge Anprall und Druck aufgrund angeströmter Verklauung bei erhöhtem Wasserspiegel; (2) Blockieren von Klappen, Schützen oder anderen Absperrorganen inkl. ihrer Antriebe (z.B. automatische Regulierung); oder (3) Verminderung der Entlastungsleistung infolge Verklauung und Aufstau im Speicher.

Die HWE und alle dazugehörigen Anlageteile müssen dem Anprall von Schwemmholz standhalten. Je nach Form des Speichers und Anordnung der HWE können die Geschwindigkeiten insbesondere in der Nähe der Überfall- oder Durchlassektion stark zunehmen (z.B. Stauwehr Schlattli, siehe Anhang 2). Der Lastfall „Anprall Baumstamm“ sollte daher bei Hochwasserentlastungen überprüft werden, wenngleich er meist nicht massgebend ist (z.B. Kälin et al. 2005).

Einzelne Stämme können allerdings bereits die Betriebssicherheit von Klappen und Schützen gefährden. Ein verkeilter Baumstamm reicht in den meisten Fällen aus, um den Antriebsmechanismus zu blockieren oder die automatische Regelung zu beeinflussen. Aufgrund des Anströmdrucks ist die Entfernung von verkeiltem Holz während eines Hochwasserereignisses nicht mehr möglich. Bei hohem Schwemmholzanfall sollte deshalb möglichst auf bewegliche und regulierbare Organe verzichtet werden.

Bei einer Teil- oder Vollverklauung der HWE nimmt die Durchflusskapazität ab und es bildet sich ein Rück- und Aufstau im Speicher (Kap. 5.4). Dadurch kann eine Zusatzbelastung auf die Rückhalte- und Wehrstrukturen entstehen.

Durch eine Verklauung entstehen an der HWE zusätzliche Kraftweirwirkungen. Godtland & Tesaker (1994) schlagen basierend auf Modellversuchen folgende empirische Formel für die zusätzliche Kräfteinwirkung  $F$  (Staudruck, Unterströmung des Verklauungskörpers und Windeinwirkung auf Verklauungskörper) auf eine Wehranlage infolge Verklauung vor:

$$F = C_w b_k (30 \cdot T + L_K) \rho_w \frac{v_s^2}{2} \quad (17)$$

mit:

$C_w$	Widerstandsbeiwert
$C_w$	0.06 für $v_s < v_{su}$ ; $C_w = 0.08$ für $v_{su} < v_s < 1.1 \cdot v_{su}$ ; $C_w = 0.1$ für $v_s > 1.1 \cdot v_{su}$
$v_s$	Anströmgeschwindigkeit an der Wasseroberfläche [m/s]
$v_{su}$	Anströmgeschwindigkeit unter dem Verklauungskörper [m/s]
$b_k$	Breite des Verklauungskörpers [m]



$T$	Höhe des Verkläusungskörpers [m]
$L_k$	Länge des Verkläusungskörpers [m]
$\rho_w$	Wasserdichte [kg/m <sup>3</sup> ]

Infolge hoher Fließgeschwindigkeiten nehmen nicht nur die Kompaktheit des Verkläusungskörpers und der Anstieg des Oberwasserstandes zu, sondern es steigt auch die zusätzliche Krafteinwirkung an. Ab einer Fließgeschwindigkeit von ca.  $v = 0.4$  m/s steigt die Krafteinwirkung aufgrund des beginnenden Abtauchens des Verkläusungskörpers deutlich an.



## 6. Massnahmen

### 6.1 Bauliche Massnahmen zum Durchleiten von Schwemmholz

#### 6.1.1 Anpassung der lichten Öffnungsabmessungen

Eine Methode zur Minimierung von Schwemmholzverklausungen sind 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 unregulierte HWE (z.B. freier Überfall) weist bei sonst gleichen Randbedingungen kleinere Verklausungswahrscheinlichkeiten auf als eine regulierte HWE. Stämme können sich zwar bei kleinen Abflusstiefen auf der Wehrkrone ablagern (siehe Kap. 5.3.2), werden jedoch bei steigendem Abfluss in der Regel abtransportiert. Zwischenpfeiler, Klappen, Schützen, Wehrbrücken etc. 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- und Sektorwehre 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 & Knauss 1976). Klappen sind vorteilhaft zur Erzeugung lokal grösserer Fliesstiefen, welche die Wahrscheinlichkeit des Hängenbleibens von Holz verringern (Boes et al. 2013, **Abbildung 24**).



**Abbildung 24:** HWE-Einlaufbauwerk in eine Sammelrinne mit Klappen. Links: Draufsicht auf ein Modell der HWE des Trängslet-Damms in Schweden mit einfeldriger Klappe am unterstromigen Wehre (Lucas et al. 2015); rechts: mehrfeldriges Wehr mit Klappen und Strahlaufreisser an der Staumauer Punt dal Gall (Foto: Boes, 2009).

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

- Entfernung von Trennpfeilern zur Vergrösserung der lichten Wehrfeldbreite (Bsp. Speicher Gstins, siehe Anhang 2);
- Zurückversetzte Wehrbrücke zur Vergrösserung der lichten Höhe (Bsp. Speicher Palagnedra, siehe **Abbildung 10**);

- Verzicht auf bewegliche Regulierorgane und Ersatz durch eine feste, dafür längere Überfallkante (**Abbildung 25**).



**Abbildung 25:** HWE-Einlaufbauwerk in Form eines Labyrinthwehres mit grosser Abwicklungslänge und lichter Weite am Sternenweiher (Kanton Zürich) (Foto: Boes, 2015).

Insbesondere bei neuen Projekten, bei welchen die Gefahr einer Verklausung der HWE besteht, ist die Überprüfung im hydraulischen Modellversuchen vorteilhaft.

#### 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 & Knauss 1976, USBR 1987, Gotland & Tesaker 1994, Wallerstein et al. 1996):

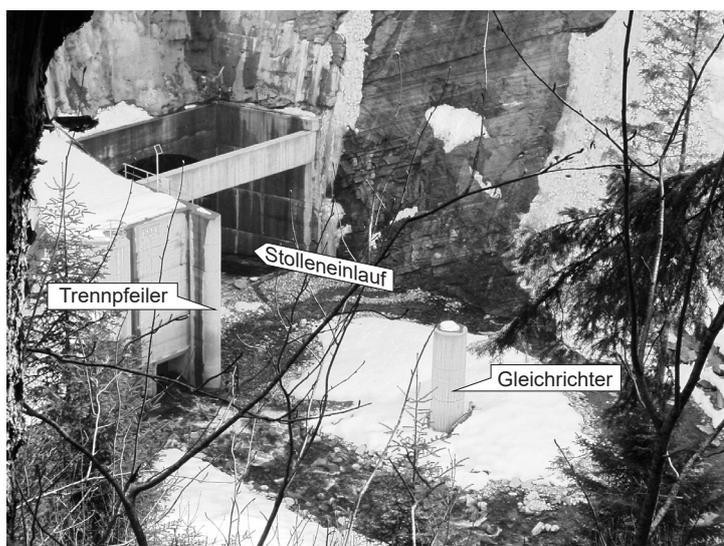
- Generell sollte die HWE möglichst glatt, ausgerundet und ohne Einbauten ausgeführt werden. Verklausungsgefährdete Anlageteile sollten z.B. mit Verschaltungen versehen werden;
- Antriebswelle, Zylinder, Hydraulikleitungen etc. von Verschlüssen sollten ausserhalb des Einflussbereichs des Schwemmholzes 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 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 sollten auch die Wehraufbauten dem Anprall von Schwemmholz standhalten (Kap. 5.5);
- Generell sollten Grobrechen nicht unmittelbar bei der Wehrkrone angeordnet werden, da dadurch eine Verklausung eher gefördert wird und somit die Entlastungskapazität bereits bei wenig Schwemmholz reduzieren 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 Verklauung;
- 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 oder abgespült werden können;
- Nach Rickenmann (1997) sollen Neu- oder Umbauten von Wehranlagen mit lichten Wehbreiten 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 & Knauss 1976). Für nicht-kreisförmige Stollenquerschnitte der Fläche  $A_{St}$  kann ein rechnerischer äquivalenter Mindestdurchmesser  $d_{eq,min} = (4 A_{St}/\pi)^{0.5}$  angesetzt werden;
- 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 Verklauung und ein grosses Schadenpotential bestehen, der Entwurf der HWE mittels hydraulischer Modellversuche inkl. Schwemmholz überprüft und ggf. optimiert werden.

Nach Hartung & Knauss (1976) und Hartlieb (2015) kann Schwemmholz auch mittels einem einzelnen oder wenigen Pfeiler(n) zurückgehalten oder in Längsrichtung ausgerichtet und so über die HWE abgeführt werden. **Abbildung 26** zeigt einen solchen Pfeiler als Gleichrichter vor einem Umleitstollen an der Rovana (Kanton Tessin). Die Pfeiler sollten mit genügender Distanz zur HWE gebaut werden. Da die Pfeilerform einen geringen Einfluss auf die Wirksamkeit zur Ausrichtung von Hölzern hat, ist ein kreisförmiger zylindrischer Pfeiler aus Kosten- und Bauverfahrensgründen ratsam (Waller et al. 1996).



**Abbildung 26:** Gleichrichter vor dem Umleitstollen an der Rovana (Lange & Bezzola 2006).

### 6.1.3 Ausbildung der Energieumwandlungsanlage

Bei der Durchleitung von Schwemmholz muss auch das Energiedissipationsbauwerk betrachtet werden. Die mit hohen Geschwindigkeiten transportierten Schwemmhölzer würden z.B. in die Strömung ragende Einbauten in Tosbecken wie Störkörper und Zahnreihen beschädigen. Hartung & Knauss (1976) empfehlen räumliche (dreidimensionale) Tosbecken mit in Fliessrichtung ansteigender Sohle (**Abbildung 27**). Strahlteiler (engl. *chute blocks*) am Ende des Zulaufgerinnes ins Tosbecken sind in der Regel unproblematisch gegenüber Schwemmholz, da sie nach oberstrom bündig mit der Sohle auslaufen und somit das Treibgut über sie hinweg transportiert wird. Insbesondere an Stufenkanten und Endschwellen besteht jedoch die Gefahr von Abrasionschäden infolge Schwemmholzanfall.

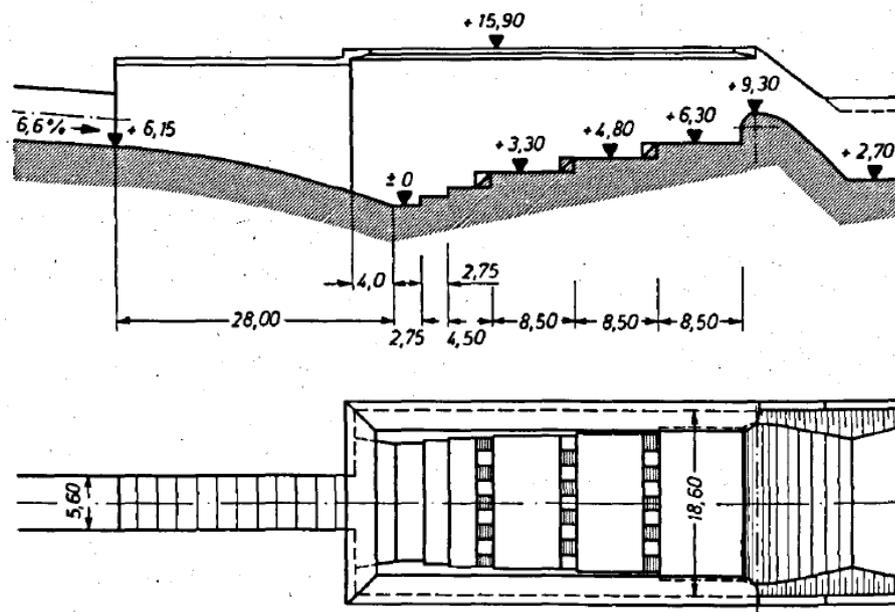


Abbildung 27: Beispiel eines räumlichen Tosbeckens (Hartung & Knauss 1976).

## 6.2 Rückhaltmassnahmen

### 6.2.1 Schutz der HWE mittels vorgelagerter Rechenkonstruktionen

Generell sollten Grobrechen vor HWE nur angebracht werden, wenn eine anderweitige Anpassung der Form/Ausbildung der HWE unmöglich ist und/oder ein Durchleiten nicht zulässig ist. Rechen können insbesondere die Verlegung von beweglichen Teilen verhindern und so die betriebliche Sicherheit von Schützen, Klappen, etc. garantieren. Zudem wird die vollständige Verklausung der HWE verhindert. Im Hochwasserfall kann jedoch der Rechen selbst verlegt werden, womit von einem Aufstau im Speicher auszugehen ist. Um den Aufstau klein zu halten, sollte der Rechen eine entsprechende grosse Rechenfläche aufweisen und der HWE deutlich vorgelagert werden. Damit kann selbst bei vollständiger Rechenverlegung Wasser neben oder unter dem Rechen in Richtung HWE abfliessen. Die mittlere Fliessgeschwindigkeit im Rechenquerschnitt sollte kleiner als 1.0 m/s sein. Verschiedene Beispiele sind in **Abbildung 28** bis **Abbildung 31** dargestellt.

Hartlieb (2015) führte hydraulische Modellversuche mit einem Schrägrechen (im Aufriss) vor einer HWE durch. Der Rechen war flach geneigt ( $15^\circ$  bis  $30^\circ$ ) und der Stab-



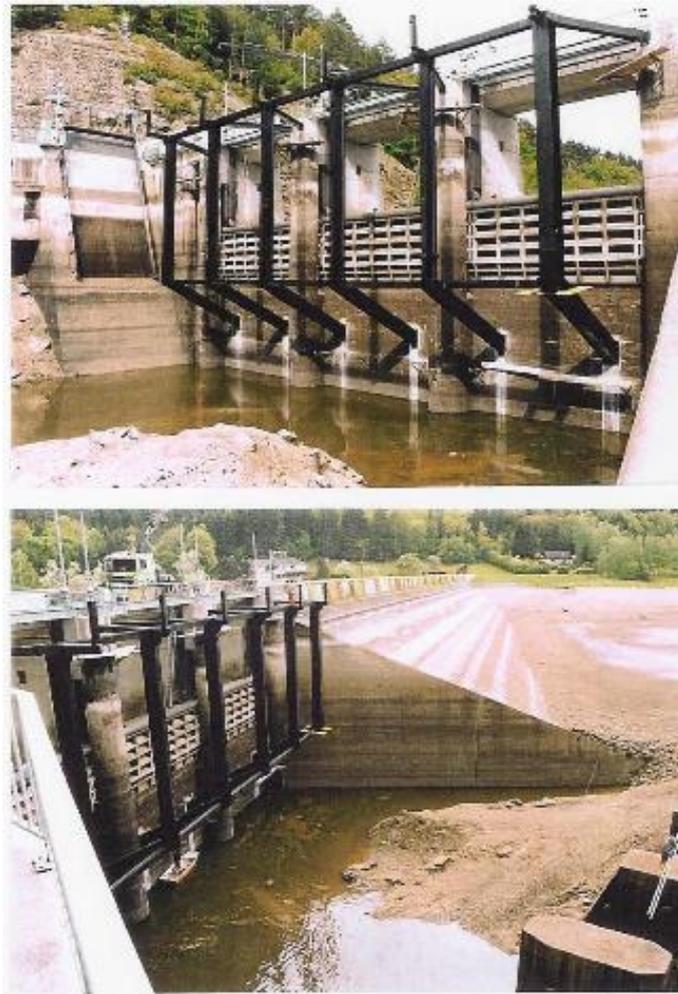
abstand entsprach der halben Wehrfeldbreite. Dadurch konnte der Aufstau im Vergleich zu einer Wehrverklauung bis um die Hälfte verkleinert werden. Grund dafür sind die kleineren Fließgeschwindigkeiten, die auf den vorgelagerten Rechen wirken, so dass sich Holz eher in Form eines lockeren, einlagigen Teppichs ablagert.

Anstelle eines Rechens direkt vor dem Einlauf der Hochwasserentlastung (**Abbildung 31a**) wurden von Hartlieb und Overhoff (2006) für die Stauanlage Grüntensee (Bayern) im hydraulischen Modell zehn vertikale Rechenpfeiler angebracht. Diese sind im Grundriss halbkreisförmig angeordnet und weisen einen grossen Abstand zum Einlauf auf (**Abbildung 31b**). Der lichte Abstand der Pfeiler beträgt rund 1.6 m (entspricht etwa der Breite der engsten Stelle der HWE). Im Vergleich zum bestehenden Rechen sind die Anströmgeschwindigkeiten wie auch die Rechenverluste viel geringer. Dadurch wird verhindert, dass Schwemmholz nach unten gezogen und so der Rechenquerschnitt vollständig verlegt wird. An der Wasseroberfläche bildet sich ein Schwemmholzteppich, der immer weiter anwächst. Sollten einzelne Schwemmholzstämmen trotzdem das Rückhaltebauwerk resp. die HWE passieren, so sind diese bereits in Fließrichtung ausgerichtet und können ins Unterwasser transportiert werden. Nach einem Hochwasser muss das Schwemmholz entfernt werden.

Der lichte Stababstand von Schwemmholzrechen sollte keineswegs zu klein gewählt werden. Kleinholz und Feinmaterial, welches unkritisch für die HWE ist, sollten nicht zurückgehalten, sondern weitergeleitet werden. Es sollten aber die grossen Hölzer, welche die Abmessungen der kleinsten lichten Weite der HWE überschreiten, am Rechen verbleiben. Nach Lange & 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.



**Abbildung 28:** Vorgelagerter Schwemmholzrechen an der Talsperre Paalbach in Österreich (Foto: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft Österreich).



**Abbildung 29:** Vorgelagerter Schwemmholzrechen am Thurnbergspeicher am Kamp in Österreich (Fotos: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Österreich).

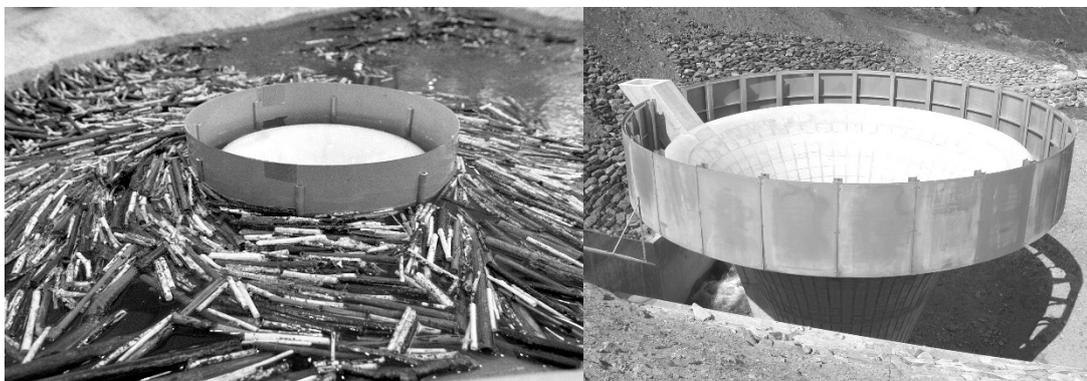


**Abbildung 30:** Vorgelagerter Schwemmholzrechen am Rotlech in Österreich (Foto: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Österreich).



**Abbildung 31:** (a) Alter Schwemmholzrechen der HWE Grüntensee sowie (b) neue vorgelagerte Rechensäulen (Foto: Hartlieb 2015).

Alternativ zu Rechen kann Schwemmholz mittels Tauchwänden zurückgehalten werden. Bei der Überfalltulpe am Kelchbach in Naters hat sich die Anordnung einer vorgelagerten Tauchwand als geeignete Massnahme erwiesen, um den Eintrag von Holz in die Hochwasserentlastung zu verhindern (**Abbildung 32**).



**Abbildung 32:** Tulpe mit Tauchwand im Geschiebesammler am Kelchbach in Naters, Durchmesser der Tulpe ca. 14 m. Links: Modellversuch; rechts: Prototyp (Fotos: Lange & Bezzola 2005).

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 Wand hindurch transportiert wird.

### 6.2.2 Rückhalt mittels Schwimmketten

Nach Hartung & Knauss (1976) sind Schwimmketten (**Abbildung 33**) ein Element, um Schwemmholz vor einer Hochwasserentlastung zurückzuhalten. Beispiele sind (Perham 1987, 1988):

- Miteinander verbundene lange Holzstämme sowie schwimmende Stahlrohre mit Durchmessern von mindestens 0.25 m. Typische Durchmesser betragen 0.6 m bis 1.0 m. Insbesondere Holzstämme zeigen einen ausgeprägten Verschleiss im Bereich der Befestigung und eignen sich nur als temporäre Massnahme;
- Leichte und begehbare Stahlbrücken auf Schwimmelementen. Diese dienen auch als Arbeitsplattform für die Entnahme des Schwemmholzes nach einem Ereignis. Plattformen zeigen die Tendenz, bei grossem Schwemmholzanfall auf den Schwemmholzteppich gehoben zu werden.

Schwimmketten können mit einem (vertikal nur wenig tiefen) Unterwassernetz aus Ketten ausgestattet werden, um die Durchlässigkeit von Holz im Allgemeinen und von schwebendem Grünholz im Besonderen zu reduzieren. Schwimmketten können zum Rückhalt von Schwemmholz oder zu dessen Ablenkung in eine bestimmte Richtung verwendet werden. Die Ablenkung dient dazu, das Schwemmholz zu einem Durchgang zu leiten, oder dieses von kritischen Bereichen fernzuhalten.



**Abbildung 33:** Schwemmholzsperrungen auf dem Brienersee während des Hochwasserereignisses 2005 (Foto: Bundesamt für Umwelt, Schweiz).

Bradley et al. (2005) geben eine Übersicht von Massnahmen zum Rückhalt von Schwemmholz und erwähnen auch Schwimmketten (engl. *boom*). Ihrer Ansicht nach sind diese nur sehr beschränkt einsetzbar. Sie eignen sich als Massnahme bei «geringen» und «mittleren» Schwemmholzabmessungen und -volumen. Perham (1987) schildert detailliert aus der Praxis zusammengetragene Erfahrungen mit Schwimmketten.



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.

Der Aspekt 3 kann nur beschränkt durch physikalische Modellversuche beantwortet werden. Im Modell werden meist nur Strömungskräfte angesetzt, während Wind und Wellenschlag typischerweise vernachlässigt werden. Trotzdem zeigen Modellversuche auf, welche Anordnung eine hohe Rückhaltekapazität aufweist. Die Modellversuche von Perham (1987) geben Hinweise zur Form der Schwimmkette, deren Rückhaltevermögen und der zulässigen Abflussgeschwindigkeit.

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. 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.

Die Kräfte, welche auf eine verklauste Schwimmkette einwirken, sind beachtlich. Sie sind durch Wellenschlag, den Strömungsdruck des Wassers und durch Wind induziert. Die Kette und auch deren Befestigung (Widerlager, Anker, Bojen etc.) sind entsprechend zu dimensionieren. Nebst dem statischen Aspekt ist auch auf die Flexibilität der Kette zu achten, da die Wasserspiegel mitunter stark schwanken können.

Ein Versagen der Schwimmkette entspricht dem plötzlichen Anfall eines grossen und kompakten Schwemmholzvolumens. Dies ist erfahrungsgemäss eines der sensibelsten 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. Bei einigen Sperrern am Kamp in Österreich werden sogenannte Schwimmrechen (Schwimmkörper mit abgehängtem, ca. 1 m tief unter der Wasseroberfläche liegendem Spannseil) verwendet (**Abbildung 34**). Hier wurden jedoch Probleme festgestellt, da das Spannseil zu schwach dimensioniert war und beim Hochwasser riss (Czerny, 2015). Dies bewirkte, dass die Schwemmholzansammlung konzentriert zur HWE gelangte.



**Abbildung 34:** Schwimmrechen (Foto: H. Czerny, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Österreich).

Erfahrungen bei der Anwendung von Schwemmholtzsperrern auf dem Thuner-, Briener- und Bielersee haben folgendes gezeigt:

- Aufgrund der zu starken Strömung werden die Schwemmholtzsperrern nicht direkt vor den Wehren, sondern stromauf im See angeordnet;
- Die Befestigungsbojen müssen bei grossen Seen oft im flacheren Uferbereich gesetzt werden, wo die Strömungen noch sehr gross sind. Schwemmholtz kann dann eher unter der Schwimmkette hindurchtauchen;
- Die Schwimmketten werden nur bei Tageslicht und bei geringem Wind (max. 3-4 Beaufort resp. 3.5 bis 8 m/s) befestigt, da die Arbeiten sonst zu gefährlich sind und die Bojen durch die Wellen vom Schwemmholtz angehoben oder heruntergedrückt werden;
- Da der Wind häufig nach Starkniederschlägen dreht, wird das Holz möglichst schnell aus dem See entnommen. Ansonsten kann das Holz vom Wind aus der Sperre weggetrieben und über den gesamten See verteilt werden.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass Schwimmketten bei kleinen Fließgeschwindigkeiten als Instrument zur Rückhaltung und Leitung von Schwemmholtz eingesetzt werden können. Im Hochwasserfall und bei hohem Schwemmholtzaufkommen kann die Robustheit von Schwimmketten jedoch nicht gewährleistet werden, was mehrere Versagensfälle von Schwimmketten zeigen (**Abbildung 35**); siehe auch Speicher Montsalvens im Anhang 2). Ein Versagen ist jedoch auch bei Extremereignissen unter allen Umständen auszuschliessen, da dieses das Verklauungsrisiko an der HWE massiv verschärfen und die Talsperrensicherheit negativ beeinflussen könnte.



**Abbildung 35:** a) Schwemmholzsperrre an der Talsperre Montsalvens (Kanton Fribourg), die beim Hochwasserereignis 2015 gebrochen ist (Anhang 2, Foto: Groupe e); b) Wasserkraftanlage Tulu Ter., Malaysia: Schwimmkette bei massivem Schwemmholzanzahl am Einlauf des Umleitstollens (Foto: Worthington).

### 6.3 Betriebliche Massnahmen

Zur Vermeidung von Verklausungen ist bei mehrfeldrigen regulierten Wehranlagen eine vollständige Öffnung von wenigen Wehrfeldern der Teilöffnung von mehreren Feldern vorzuziehen. Bei Wehrfeldern mit Schützen sollte sich die Strömung in der Mitte der Wehrfelder konzentrieren, um die Wahrscheinlichkeit von Verklausungen an den Pfeilern zu verringern. Optional kann bei mehreren Wehrfeldern ein asymmetrischer Betrieb angestrebt werden, d.h. es werden nur nicht-benachbarte Wehrfelder geöffnet (**Abbildung 36**), so lange es der Abfluss zulässt. Damit richten sich die Stämme eher in Strömungsrichtung aus und die Wahrscheinlichkeit wird kleiner, dass sie am Trennpfeiler zwischen zwei Wehrfelder hängenbleiben. Generell sind jedoch ausser durch Hartlieb (2015) keine systematischen Untersuchungen zur Wehrsteuerung bei HWE bekannt und die Wirksamkeit der Massnahmen ist somit nicht abschliessend nachgewiesen. Im Extremfall werden zudem meist alle Wehrfelder benötigt und ein asymmetrischer Betrieb ist nicht mehr möglich.



**Abbildung 36:** Verklausung bei geöffneten äusseren Wehrfeldern einer dreifeldrigen Wehranlage (Hartlieb 2015)



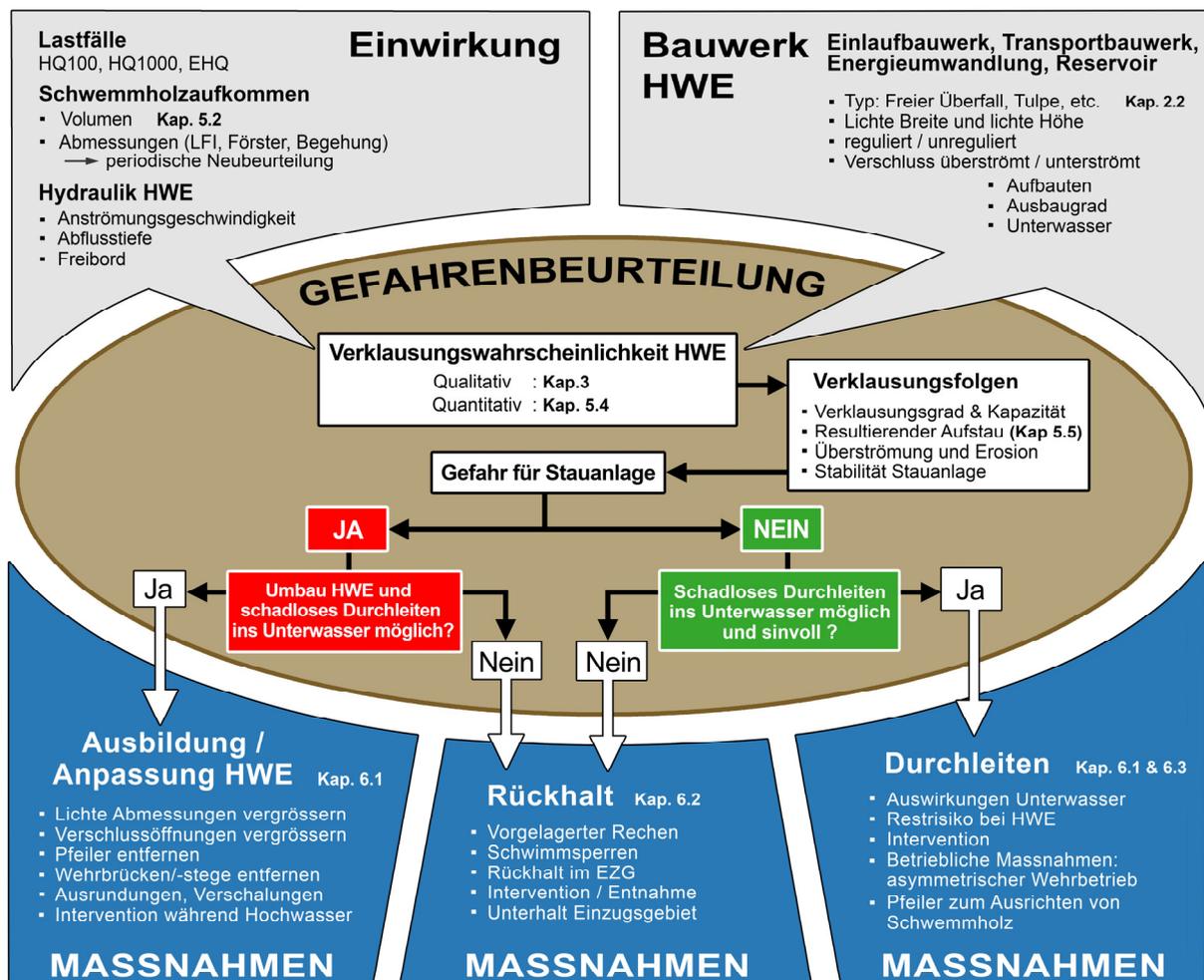
## 7. Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Zusammenfassend werden folgende Empfehlungen gemacht:

### Gefahrenbeurteilungsdiagramm

Bei der Untersuchung einer bestehenden HWE sowie beim Bau einer neuen HWE wird die Verwendung des Gefahrenbeurteilungsdiagrammes (**Abbildung 37**) 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, Abmessung, etc.) sowie für die Bestimmung der Einwirkung (Lastfälle Hochwasser, Schwemmholaufkommen, Hydraulik HWE)
2. Überprüfung der Richtlinien zu den minimal erforderlichen Abmessungen der HWE und Abschätzung der Verklauungswahrscheinlichkeit
3. Abschätzung der Verklauungsfolgen
4. Genereller Entscheid, ob eine Gefahr für die Stauanlage infolge Schwemmholz besteht.
5. Erarbeiten von Massnahmen, um die Gefahr für die Stauanlage zu senken



**Abbildung 37:** Gefahrenbeurteilungsdiagramm bzgl. Schwemmgut an Hochwasserentlastungen von Talsperren.

## Einwirkungen

- Die HWE muss eine sichere Hochwasserabfuhr bis zum Extremereignis (Sicherheitshochwasser) gewährleisten und darf die Wahrscheinlichkeit des Versagens der Stauanlage nicht erhöhen. Ein Komplettersagen der Stauanlage ist nicht zulässig. Beim Sicherheitshochwasser dürfen aber Schäden an der HWE auftreten, solange diese nicht zu grösseren Wasseraustritten führen. Als Belastungsannahme muss somit auch mit einem extremen Schwemmholzaufkommen gerechnet werden. Für das Schwemmholzpotential kann für Schweizer Verhältnisse die Gleichung 8 (Kap. 5.1.1) von Uchiogi et al. (1996) mit einem Vorfaktor von  $C \approx 400$  als erster Anhaltswert verwendet werden. Eine detaillierte Analyse des Einzugsgebiets ist jedoch zwingend notwendig, um verlässliche Werte für das Schwemmholzaufkommen zu erhalten. Nebst Schwemmholz muss auch mit grossen Auftriebskörpern, wie beispielsweise Boote, Siloballen, Container etc. gerechnet werden.
- Zur Berechnung der Verklausungswahrscheinlichkeit geben Abschätzgleichungen aus dem Schutzwasserbau erste Anhaltspunkte. Die Abmessungen der Baumstämme sollten konservativ gewählt werden. Im Extremfall entspricht dies der maximal im Uferbereich des Speichers oder im näheren Einzugsgebiet vorhandenen Baumhöhe.
- Zur Abschätzung des Aufstaus im Speicher infolge einer Verklausung ist für den Extremfall von einem vollständig verlegten Rechen, der angeströmt wird, auszugehen. Die Abschätzung der Kraftweinstwirkung auf das Rechenbauwerk und die HWE ist auf dieser Grundlage vorzunehmen.
- Unsicherheiten in Bezug auf das Schwemmholzaufkommen und die Verklausungsprozesse bleiben auch mit aufwendigen Studien bestehen. Hinsichtlich Verklausungsprozessen sind hydraulische Modellversuche von Vorteil.

## Ausbildung/Anpassung HWE

- Breite feste Überfälle ohne Aufbauten weisen das kleinste Risiko für Verklausungen auf und sind gegenüber regulierten Wehren mit schmalen Schützen und Wehrbrücken zu bevorzugen.
- An glatten, abgerundeten Bauteilen bleibt weniger Holz hängen. Verschaltungen von verklausungsgefährdeten Anlageteilen erhöhen die Durchleitwirkung.
- Wenn möglich, sind Massnahmen vorzusehen, damit die Stauanlage auch bei Verklausungen der HWE ganz oder teilweise überlastfähig bleibt. Dazu kann z.B. eine separate Not-HWE zählen, die erst bei noch höheren Wasserspiegeln beaufschlagt wird.
- Die geometrischen Abmessungen der HWE sind vorzugsweise nach Kap. 3.1 festzulegen.

## Rückhalt

- Bei der Wahl von Rückhaltebauwerken sind die lokalen Gegebenheiten (Schwemmholzaufkommen, Ausbildung HWE, Fliessgeschwindigkeiten, etc.) zu berücksichtigen. Ebenfalls sind die Entnahme und der Abtransport des Schwemmguts (insbesondere Aufwand und Zugänglichkeit), die Entsorgung sowie die Rechenreinigung in die Betrachtungen/Planungen einzubeziehen;
- Unmittelbar vor oder auf der Wehrkrone sollten keine Rechen angeordnet werden. Der Rechen soll mit genügend Abstand zur Überfallkante der HWE angeordnet werden und sowohl eine genügende Stabeintauchtiefe als auch Stabhöhe über dem höchsten Speicherspiegel aufweisen. Die mittlere Fliessge-



schwindigkeit im Rechenquerschnitt sollte kleiner als 1.0 m/s sein. Für Rechenbauwerke ist ein adäquater Stababstand zu wählen. Der lichte Stababstand sollte  $s \leq L/1.5$  betragen, um Schwemmholz mit der Länge  $L$  zurückzuhalten.

- Schwimmketten werden für die Anwendung an HWE, welche auch bei Extremereignissen sicher funktionieren müssen, nicht empfohlen.
- Besteht eine von der HWE weg gerichtete Strömungskomponente (z.B. Teilabfluss bei Hochwasser zu einer weiteren HWE), so kann für Speicher mit wenig variablem Wasserspiegel (ca.  $\pm 0.3$  m) eine Abweisung von Schwemmgut mittels Tauchwänden interessant sein. Diese sollten mindestens 1.0 m unter den Wasserspiegel ragen, um Holztransport unter der Tauchwand zu verhindern.
- Das Rückhaltevolumen ist entsprechend der abgeschätzten Schwemmholzmenge vorzusehen.
- Durch Massnahmen im Einzugsgebiet kann der Schwemmholzanfall in einem Speicher im Hochwasserfall nicht ausgeschlossen werden.

### **Durchleiten**

- Sofern es die Verhältnisse im Unterwasser der Stauanlage und die Beschaffenheit der HWE erlauben, ist ein Durchleiten des Schwemmgutes anzustreben.
- Der Umgang mit dem Restrisiko resp. der sogenannte Überlastfall sind in die Betrachtungen miteinbeziehen.

## 8. Literatur

- Allen, J.B., Smith, D.L. (2012). Characterizing the Impact of Geometric Simplification on Large Woody Debris Using CFD. *International Journal of Hydraulic Engineering* 2012, 1(2): 1-14
- Bänziger, R. (1990). Schwemmholz im Unwettersommer 1987. *Schweizer Ingenieur und Architekt*, 108(47): 1354–1358.
- Bertoldi, W., Ruiz-Villanueva, V. (2015). Physical and numerical modelling of wood and vegetation. *Gravel Bed Rivers* 8, Kyoto and Takayama, Japan.
- BAW (2016). Persönliche Kommunikation. Bundesanstalt für Wasserbau BAW, Karlsruhe, Deutschland.
- 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 (H.-E. Minor, ed.), ETH Zürich, Zürich: 87-97.
- 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*, Venice, Italy: Paper A8.
- Bornschein, A., Aigner, D., Pohl, R. (2002). Der Bruch des Hochwasserrückhaltebeckens Glashütte. WWT-awt, HUSS-Medien GmbH, Verlag für Bauwesen Berlin, Ausgabe 7.
- Bocchiola, D., Catalano, F., Menduni, G., Passoni, G. (2002). An analytical–numerical approach to the hydraulics of floating debris in river channels. *Journal of Hydrology* 269: 65–78
- Bradley, J.B., Richards, D.L., Bahner, C.D. (2005). Debris Control Structures, Evaluation and Countermeasures. Publication No. FHWA-IF-04-016, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration FHWA, Salem, Oregon.
- Braudrick C.A., Grant G.E. (2000). When do logs move in rivers? *Water Resour. Res.* 36(2): 571–583.
- Bruschin, J., Bauer, S., Delley, P., Trucco, G. (1981). The overtopping of the Palagnedra Dam. *Water Power & Dam Constructions* 34: 13-19.
- BWG (2002). *Sicherheit der Stauanlagen*. Bundesamt für Energie BFE.
- Covi, S. (2009). Schwemmholzrisiken reduzieren. *TEC21*, (31/32): 22–25.
- Czerny, H. (2015). Persönliche Kommunikation. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien, Österreich.
- Flussbau AG (2009). Schwemmholzstudie Sihl. *Bericht* Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kanton Zürichs, 87 S.
- Godtland, K., Tesaker, E. (1994). Clogging of spillways by trash. *Proc. 18<sup>th</sup> ICOLD Kongress*, Durban: 543–557.
- Hartlieb, A., Kanuss, J., Strobel, T. (1996). Sylvensteinspeicher – alte Entlastungsanlage. *Versuchsbericht* Nr. 320 der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU München (unveröffentlicht).
- Hartlieb, A., Overhoff, G. (2006). Die geplante Ertüchtigung der Hochwasserentlastungsanlage an der Talsperre Grüntensee im Allgäu. *Wasserbausymposium*:



- Stauhaltungen und Speicher - Von der Tradition zur Moderne, Graz. Bd. 2. Technische Universität Graz. Verlag der Technischen Universität Graz: 67–79.
- Hartlieb, A. (2012). Modellversuche zur Verklauung von Hochwasserentlastungsanlagen mit Schwemmholz. *Wasserwirtschaft*, 102(6): 15–19.
- Hartlieb, A. (2015). Schwemmholz in Fließgewässern - Gefahren und Lösungsmöglichkeiten. *Berichte des Lehrstuhls und der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Technischen Universität München*, Heft 133 (Monographie).
- Hartung, F., Knauss, J. (1976). Considerations for Spillways Exposed to Dangerous Clogging Conditions. *Proc. 12th ICOLD Congress, Mexico*: 741-749.
- Ishikawa, Y. 1989. Studies on Diasters Caused by Debris Flows Carrying Floating Logs Down Mountain Streams, *PhD dissertation*, Kyoto University, 121 pp.
- Johansson, N., Cederström, M. (1995). Floating debris and spillways. *Proc. of the International Conference on Hydropower. AMER SOC Civil Engineers*: 2106–2115.
- Kälin, R., Ballini, D., Meier, J. (2005). Abspülen von Geschwemmseleppichen: Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit von Stahlwasserbauten. *Wasser, Energie, Luft* 97(1/2): 11-13.
- Lancaster, S.T, Hayes, S.K. (2001). Modeling Sediment and Wood Storage and Dynamics in Small Mountainous Watersheds. *Water Sci. and Application* 4: 85-102.
- Lange, D., Bezzola, G. R. (2006). Schwemmholz - Probleme und Lösungsansätze. *VAW-Mitteilung* 188 (H.-E. Minor, ed.), Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich.
- Leite Ribeiro, M., Pfister, M., Schleiss, A.J., Boillat, J.-L. (2012). Hydraulic design of A-type Piano Key Weirs. *Journal of Hydraulic Research* 50(4): 400-408, DOI: 10.1080/00221686.2012.695041.
- Lucas, J., Lutz, N., Lais, A., Hager, W.H. & Boes, R.M. (2015). Side-channel flow. *Jl. of Hydr. Engineering* 141(9): 11 pages, [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001029](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001029).
- 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.
- Mazzorana B., Hübl J., Zischg A., Largiader A. (2010). Modelling woody material transport and deposition in alpine rivers. *Nat. Hazards* 56: 425–449.
- Melville, B.W., Dongol, D.M. (1992). Bridge pier scour with debris accumulation. *Journal Hydraul. Engng.* 118(9), 1306-1310.
- Meyer, J. (2013). Entwicklung eines GIS- basierten Verfahrens zur Abschätzung des Schwemmholzpotenzials in Wildbacheinzugsgebieten. *Magisterarb.* Ludwig-Maximilians-Universität München. Paper Wasserbausymposium, Band 2
- Perham, R. E. (1986). Floating Debris Control Systems for Hydroelectric Plant Intakes. *The REMR Bulletin*, 3(2).
- Perham, R.E. (1987). Floating debris control; A literature review. *Final report REMR-HY-2*. US Army Corps of Engineers, Washington, DC.
- Perham, R.E. (1988). Elements of floating-debris control systems. *Final report REMR-HY-3*. US Army Cold Regions Research and Engineering, Hanover, NH, USA.
- 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.
- Pfister, M. (2015). Das Klaviertastenwehr (PKW) als effizientes Einlaufbauwerk zur Erhöhung der Abflusskapazität bestehender Hochwasserentlastungsanlagen. *KW Korrespondenz Wasserwirtschaft* 8(11): 673-679, DOI: 10.3243/kwe2015.11.001.

- Pfister, M., Tullis, B., Schleiss, A.J. (2015). Closure to Debris blocking sensitivity of Piano Key weirs under reservoir type approach flow. *Journal of Hydraulic Engineering* 141(10), 07015013. DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001035.
- Rickenmann, D. (1997). Schwemmholz und Hochwasser. *Wasser, Energie, Luft* 89(5/6): 115-119.
- Rimböck, A. (2001). Luftbildbasierte Abschätzung des Schwemmholzpotentials (LASP) in Wildbächen *Bericht* Nr. 91, Lehrstuhl f. Wasserbau, TU München, Deutschland: 202-213.
- Rimböck, A., Strobl, T. (2001). Schwemmholzpotential und Schwemmholzurückhalt am Beispiel Partnach/Ferchenbach (Oberbayern). *Wildbach- und Lawinenverbau* 145(65): 15-27.
- Rimböck, A. (2003). Schwemmholzurückhalt in Wildbächen. *Doktorarbeit, Bericht* Nr. 94, Lehrstuhl f. Wasserbau, TU München, Deutschland.
- Roesler, F., Bettzieche, V. (2000). Verlegung der Entlastungsanlagen von Talsperren bei Hochwasser. *Wasserwirtschaft* 90(5): 1-6.
- Ruggeri, G. (2014). Persönliche Kommunikation.
- Ruiz-Villanueva V., Bladé-Castellet E., Sánchez-Juny M., Martí B., (2014). Two dimensional numerical modelling of wood transport. *J. Hydroinform.* 16: 1077–1096.
- Ruiz-Villanueva V., Piégay, H., Gartner, V., Perret, F., Stoffel, M. (2016). Wood density and moisture sorption and its influence on large wood mobility in rivers. *Catena* 140: 182-194.
- Schalko, I., Schmocker, L., Weitbrecht, V., Boes, R. (2017a). Schwemmholz: Gefahrenbeurteilung und Massnahmenplanung am Fallbeispiel Renggbach, Kanton Luzern. *Wasser, Energie, Luft* 109(4): 271-278.
- Schalko, I., Schmocker, L., Weitbrecht, V., Boes, R. (2017b). Verklausungswahrscheinlichkeit und Aufstau – Aktuelle Forschung zum Thema Schwemmholz an der VAW. *Proc. Fachtagung „Naturgefahren – von der Sturzflut zur Schwemmholzverklausung“*, TU München: 75-84.
- Schmocker, L. Hager, W.H. (2011). Probability of drift blockage at bridge decks. *Journal Hydraul. Engng.* 137(4): 480-492.
- Schmocker, L. (2017). Floating debris retention racks at dam spillways. Proceedings of the 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. *River Flow* 2016, 2320-2325.
- Uchiogi, T., Shima, J., Tajima, H., Ishikawa, Y. (1996). Design methods for wood-debris entrapment. *Intl. Symp. Interpraevent* 5: 279-288.
- U.S. Bureau of Reclamation. (1987). Design of Small Dams, 3rd Edition, 860 pp.
- VAW (2008). Ereignisanalyse Hochwasser 2005: Teilprojekt Schwemmholz. *Bericht* 4240, VAW, ETH Zürich, Zürich.
- VAW (2016). Schwemmholzgutachten Renggbach (LU). *Bericht* 4334, VAW, ETH Zürich, Zürich (unveröffentlicht).
- 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, USA.
- 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.
- Zollinger, F. (1983). Die Vorgänge in einem Geschiebeablagerungsplatz. *Doktorarbeit* Nr. 7419, ETH Zürich, <https://www.research-collection.ethz.ch/handle/20.500.11850/138150>.



# Anhang 1: Fragebogen

## Fragebogen

### 1. Allgemeine Daten

Name der Sperre (ggfs. des Sees):

Name des Flusses:

Betreiber:

Kontaktperson:

### 2. Hydrologie und Wasserwirtschaft

bitte angeben, ob gemessen (M), berechnet (R) oder geschätzt (S)

Niedrigwasser NQ [m<sup>3</sup>/s]:

Mittelwasser MQ [m<sup>3</sup>/s]:

Hochwasser HQ<sub>i</sub> [m<sup>3</sup>/s]:

Hochwasser HQ<sub>100</sub> [m<sup>3</sup>/s]:

Bemessungshochwasser HQ<sub>1000</sub> [m<sup>3</sup>/s]:

Sicherheitshochwasser SHQ [m<sup>3</sup>/s]:

Einzugsgebiet der Sperre [km<sup>2</sup>]:

Stauziel [m ü.M.]:

Absenkziel [m ü.M.]:

Stauvolumen bei Vollstau (Wasserspiegel auf Stauziel) [m<sup>3</sup>]:

### 3. Angaben zur Hochwasserentlastungsanlage (HWE)

Art des Einlaufbauwerks (z.B. Tulpe, frontal/seitlich angeströmtes Wehr, ...):

Reguliert/Unreguliert (wenn reguliert, wie?):

Anzahl  $n$  der Entlastungen der HWE (z.B.  $n=3$  Wehrfelder,  $n = 1$  Tulpe, ...):

Sonstige Entlastungsanlagen (ohne Wasserfassung, z.B. Grundablass, Mittelauslass, ...):

Kapazität der HWE bei Vollstau [m<sup>3</sup>/s] (ohne Grund- oder Mittelablässe):

Rechnerische Stauhöhe beim Bemessungshochwasser über  $n$  Entlastungen (ohne Grund- oder Mittelablässe) [m]:

Rechnerische Stauhöhe beim Sicherheitshochwasser [m]:

Abmessungen Querschnitt HWE, B x H oder D [m]:

Wassertiefe vor der Hochwasserentlastung [m]:

Neigung der HWE zum Wasser [-]:



Wie oft ist die HWE durchschnittlich in Betrieb?

Kapazität Grundablass bei Vollstau [m<sup>3</sup>/s]:

Abmessungen Grundablass B x H oder D in [m]:

Wie oft ist der Grundablass durchschnittlich in Betrieb?

Kapazität allfälliger sonstiger Entnahmeanlagen (z.B. Mittelauslass) [m<sup>3</sup>]:

#### 4. Schwemmholz / Geschwemmsel

Tritt Schwemmholz an der Anlage auf? Ja  Nein

Wenn Ja, wird Schwemmholz an der Anlage entnommen? Ja  Nein

Wenn Ja, Art, Ort und Häufigkeit der Entnahme?

Wird Schwemmholz über die HWE abgeführt? Ja  Nein

Wenn Ja, welche betrieblichen Massnahmen (falls zutreffend) werden dabei getroffen?

Sind Angaben zu den Kubaturen der Schwemmholzentnahme vorhanden? Ja  Nein

Wenn Ja, bitte Daten separat beifügen (Menge, Datum)

Sind Angaben zur Dimension des Schwemmholzes vorhanden? Ja  Nein

#### 5. Schäden

Traten jemals Probleme mit Schwemmholz an der HWE auf? Ja  Nein

Wenn Ja, Beschreibung der Probleme bzw. Schäden?

Sind die Schäden dokumentiert (Fotos, Skizzen, etc.) Ja  Nein

#### 6. Unterlagen

Ist es möglich, Pläne der HWE zu erhalten? Ja  Nein

Ist es möglich, Dokumentationen der Schäden zu erhalten? Ja  Nein

#### 7. Sonstiges / Anmerkungen

Ist eine Schwemmholz-Rechenanlage geplant? Ja  Nein

Wenn Ja, gibt es Pläne / Skizzen dazu? (bitte beilegen)

Ausgefüllt am (Datum): von (Name)

Unterschrift



## Anhang 2: Fallbeispiele

### 1) Käppelistutz

#### Käppelistutz

Name der Sperre	Käppelistutz
Name des Gewässers	Secklisbach
Betreiber	Kantonales Elektrizitätswerk Nidwalden
Stauvolumen	60'000 m <sup>3</sup>
Seefläche auf Stauziel	10'050 m <sup>2</sup>

Hydrologie		Einzugsgebiet	
Hochwasser HQ <sub>100</sub>	96 m <sup>3</sup> /s	Fläche	24.2 km <sup>2</sup>
Bemessungshochwasser HQ <sub>1000</sub>	118 m <sup>3</sup> /s	Bestockungsgrad	28%
Stauziel	795.50 m ü.M.	Höhenlage Sperrenkrone	795.5 m ü.M.

**Hochwasserentlastung (HWE)** (Art, Einlaufbauwerk, reguliert/unreguliert, Anzahl Entlastungen, Grundablass etc.)

Art:	Fester Überfall, unreguliert
Abmessungen	3 Wehrfelder, (BxH)= 8.25 m x 1.9 m, 9.5 m x 1.9 m, 8.25 m x 1.9 m
Kapazität	130 m <sup>3</sup> /s

Die Hochwasserentlastung besteht aus einem frontal angeströmten, festen Überfall auf einer Höhe von 795.5 m ü.M. (Abbildung 1). Die lichte Höhe wird aufgrund der Wehrbrücke beschränkt. Zudem ist ein Grundablass mit einer Kapazität von 24 m<sup>3</sup>/s und Abmessungen von (BxH) 1.8 m x 2 m vorhanden, die Einlaufkote liegt auf 781.7 m ü.M.

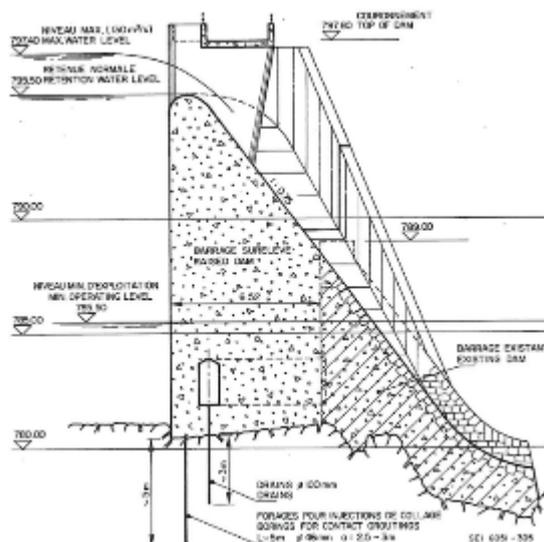


Abbildung 1: Querschnitt durch die Staumauer Käppelistutz, Quelle: Stamm (1984)

**Schwemholz** (Wird SH über HWE abgeführt oder entnommen? Massnahmen gegen SH vorhanden?)

Bei der Anlage tritt Schwemmholz auf und wird höchstens bei bzw. nach Extremereignissen entnommen. Bei Hochwasser wird Schwemmholz über die HWE abgeführt. Bei Hochwasser und Schwemmholzaufkommen erfolgt eine Überwachung vor Ort.

### Hochwasserereignis August 2005

Jährlichkeit	$\approx \text{HQ}_{30}$ , maximaler Abfluss im Secklibach ca. 30-40 m <sup>3</sup> /s
Schwemmholzaufkommen	300 m <sup>3</sup>
Beschrieb Ereignis	Infolge Hangmuren, Ufererosion und Hangrutschungen wurden grosse Mengen an Geschiebe und Schwemmholz mobilisiert. Das Staubecken Käppelistutz wirkte dabei wie ein Geschiebesammler und es wurden insgesamt ca. 60'000 m <sup>3</sup> Geschiebe und 300 m <sup>3</sup> Schwemmholz (Festvolumen) abgelagert (Abb. 2-4). Beim Schwemmholz handelt es sich vorwiegend um Frischholz mit Stammlängen bis 10 m und Wurzelstöcken mit Durchmessern bis 3 m. Ebenfalls wurde viel Kleinholz aus Holzbeigen mobilisiert.
Probleme HWE	Ein Teil des Holzes wurde über die Hochwasserentlastungsanlage abgeleitet. Jedoch kam es auch zu Verklausungen an den Wehrfeldern (Abb. 3).
<b>Beurteilung</b>	<p>Vorgaben Richtlinien CH:</p> <p><math>L_p \geq 0.80 * H_t = 8 \text{ m} \rightarrow</math> erfüllt  <math>H_b \geq 0.20 * H_t = 2 \text{ m} \rightarrow</math> nicht erfüllt</p> <p>Vorgaben Richtlinien FR:</p> <p><math>L_p \geq 13 \text{ m} \rightarrow</math> nicht erfüllt  <math>H_b \geq 2.0 \text{ m} \rightarrow</math> nicht erfüllt</p> <p>(<math>L_p</math> = lichte Wehrbreite = 8.25 m, <math>H_b</math> = lichte Wehröffnungshöhe = 1.9 m, <math>H_t</math> = Stammlänge = 10 m)</p> <p>Gemäss den Richtlinien sind die Abmessungen der Wehrfelder zu klein und es muss mit einer Verklausung gerechnet werden. Dies hat das HW 2005 bestätigt. Da die Abflussmengen mit knapp einem <math>\text{HQ}_{30}</math> verhältnismässig gering waren, konnte das Wasser trotzdem über die teilverklaute HWE abgeführt werden.</p>
<b>Massnahmen / Erfahrungen</b>	<p>Das Schwemmholz im Käppelistutz wurde nach dem Hochwasser maschinell entfernt. In mehreren unter Umweltauflagen durchgeführten Spülungen und zusätzlichen maschinellen Kiesentfernungen wurde ein Teil des Stauvolumens bis heute wieder hergestellt.</p> <p>Um präventiv bei aufkommenden Gefahren agieren zu können, werden neu die Alarmdienste „Wetteralarm“ (Meteoschweiz) und das Naturgefahrenbulletin des BAFU (hydrodaten.admin.ch) aktiv genutzt. Dies erlaubt in Gefahrensituationen (Stufen „gross“ und „sehr gross“), präventive Massnahmen (z.B. Kontrollgänge an den Anlagen, Bereitstellen von Gerätschaften, usw.) anhand von Checklisten einzuleiten. Eine gewisse Vorbereitung auf allfällige Verklausungen und der Schutz der Kraftwerksanlagen vor Überflutungen durch Hochwasser werden damit möglich.</p>



**Fotos**



Abbildung 2: Schwemmholzverklausung an der HWE wahrend des Hochwassers 2005 (Quelle: EW Nidwalden)



Abbildung 3: Schwemmholzverklausung an der HWE wahrend des Hochwassers 2005 (Quelle: EW Nidwalden)



Abbildung 4: Geschiebeablagerungen im Staubecken Käppelistutz nach dem Hochwasser 2005 (Quelle: EW Nidwalden)



## 2) Schlattli

Schlattli			
Name der Sperre	Schlattli		
Name des Gewässers	Muota		
Betreiber	ebs Energie AG		
Stauvolumen	ca. 350'000 m <sup>3</sup>		
Seefläche auf Stauziel	ca. 100'000 m <sup>2</sup>		
<b>Hydrologie</b>		<b>Einzugsgebiet</b>	
Hochwasser HQ <sub>100</sub>	280 m <sup>3</sup> /s	Fläche	210 km <sup>2</sup>
Bemessungshochwasser HQ <sub>1000</sub>	610 m <sup>3</sup> /s	Bestockungsgrad	ca. 16 %
Stauziel	550.0 m ü.M.	Höhenlage Sperrenkronen	552.0 m ü.M.
<b>Hochwasserentlastung (HWE)</b> (Art, Einlaufbauwerk, reguliert/unreguliert, Anzahl Entlastungen , Grundablass etc.)			
Art:	1) Durchlass, reguliert (Haupt- und Regulierschütz) 2) Überfall, reguliert (Stauklappe) 3) Umleitstollen, reguliert		
Abmessungen:	1) Durchlass, (BxH) = 7.0 m x 6.0 m 2) Überfall, (BxH) = 6.0 m x 3.0 m 3) Umleitstollen (BxH) = 4.0 m x 4.5 m		
Kapazität:	(1) 530 m <sup>3</sup> /s + (2) 12 m <sup>3</sup> /s + (3) 194 m <sup>3</sup> /s = 736 m <sup>3</sup> /s		
<p>Das Stauwehr Schlattli ist mit insgesamt drei Hochwasserentlastungsanlagen ausgerüstet. In der Wehranlage befinden sich ein frontal angeströmter Durchlass auf einer Höhe von 537.00 m ü.M. und ein ebenfalls frontal angeströmter Überfall auf einer Höhe von 549.00 m ü.M. Der Durchlass ist mit einem Haupt- und Regulierschütz und der Überfall mit einer 1.0 m hohen Stauklappe verschlossen (Abb. 2).</p> <p>Im orographisch linken Ufer ist ein Umleitstollen vorhanden (Abb. 1). Des Weiteren verfügt das Stauwehr über zwei Grundablässe mit einer Kapazität von insgesamt ca. 62 m<sup>3</sup>/s und Abmessungen von (BxH) 1.2 m x 1.9 m resp. 0.8 m x 1.9 m. Die Einlaufkote der Grundablässe liegt auf 534.00 m ü.M.</p>			

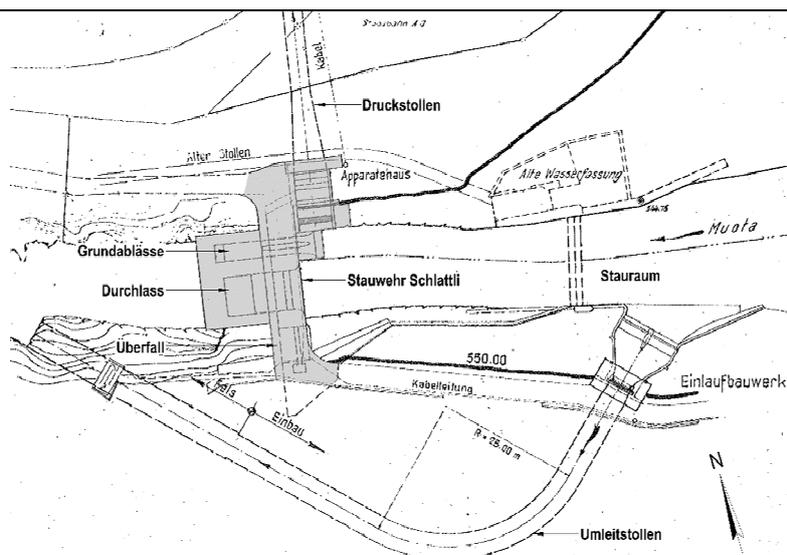


Abbildung 1: Situation des Stauwehrs Schlattli (Quelle: ebs Energie AG)

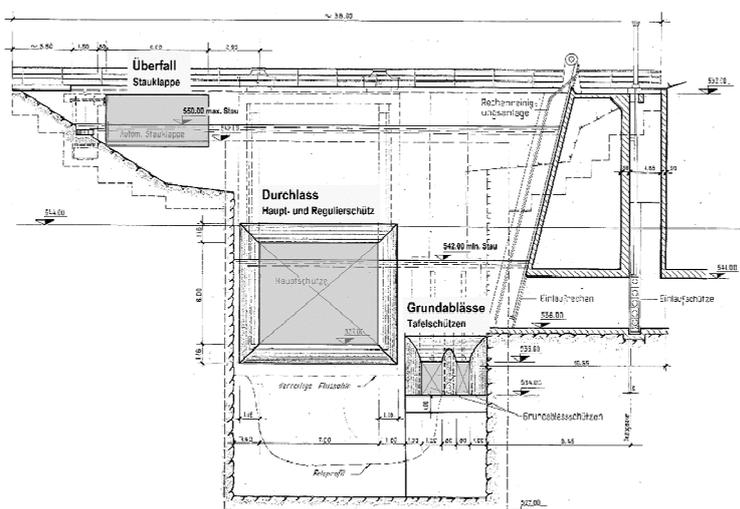


Abbildung 2: Ansicht des Stauwehrs Schlattli vom Oberwasser (Quelle: ebs Energie AG)

**Schwemmholz** (Wird SH über HWE abgeführt oder entnommen? Massnahmen gegen SH vorhanden?)

Bei der Anlage tritt Schwemmholz auf und wird höchstens bei bzw. nach Extremereignissen entnommen. Bei Hochwasser wird Schwemmholz über die HWE (Durchlass) abgeführt. Bei Hochwasser und Schwemmholzaufkommen erfolgt eine Überwachung vor Ort.

**Hochwasserereignis Juli 2010**

Jährlichkeit	≈ HQ <sub>60</sub> , maximaler Abfluss in der Muota ca. 258 m <sup>3</sup> /s
Schwemmholzaufkommen	ca. 1'800 m <sup>3</sup> (Festvolumen)
Beschrieb Ereignis	Am 12. Juli 2010 zogen heftige Gewitter über die Schweiz, bei welchen unter anderen der Kanton Schwyz in Mitleidenschaft gezogen wurde. Insbesondere im Raume Muotatal entluden sich schwere Gewitter, welche zu grossen Schäden führten. Innert kürzester Zeit wurden diverse Strassen von Bächen überschwemmt, was teilweise von massiven Geschiebe- und Schwemmholzverfrachtungen begleitet war.



Die kurze Konzentrationszeit eines Gewitters im Einzugsgebiet der Muota führte zu einem sehr raschen Abflussanstieg (Abb. 3), wobei die Muota einen Spitzenabfluss von ca. 258 m<sup>3</sup>/s erreichte.

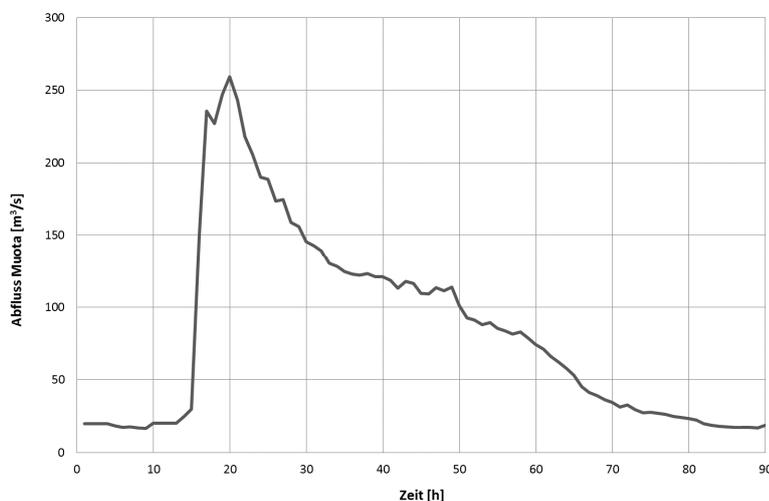


Abbildung 3: Abflussganglinie des HW 2010 beim Stauwehr Schlattli (Quelle: ebs Energie AG)

Der rasche Abflussanstieg bewirkte eine ungewöhnlich schnelle Mobilisation und Verfrachtung von Schwemmholz. Dies führte beim Stauwehr Schlattli zu einem Verklemmen von Schwemmholz im Öffnungsspalt des Regulierschütz, was eine weitere Öffnung des Durchlasses verunmöglichte.

Aufgrund des blockierten Durchlasses stieg der Wasserspiegel im Stauraum relativ rasch an. Wegen technischen Problemen und aufgrund des hydrostatischen Drucks konnte der Dichtungsschütz des Umleitstollens nicht geöffnet werden. Somit wurde das in den Stauraum fliessende Wasser lediglich über die Grundablässe und den Überfall abgeleitet, wodurch nahezu alles Schwemmholz im Stauraum zurückgehalten wurde (Abb. 4).

Probleme HWE

Es kam zu Verklausungen beim Regulierschütz (Abb. 5), was die Hochwasserentlastungskapazität wesentlich reduzierte.

**Beurteilung**

Vorgaben Richtlinien CH:

$L_p \geq 0.80 \cdot H_t = 8 \text{ m} \rightarrow$  nicht erfüllt

$H_b \geq 0.20 \cdot H_t = 2 \text{ m} \rightarrow$  erfüllt

Vorgaben Richtlinien FR:

$L_p \geq 13 \text{ m} \rightarrow$  nicht erfüllt

$H_b \geq 2.0 \text{ m} \rightarrow$  erfüllt

( $L_p$  = lichte Wehrbreite = 6.0 m,  $H_b$  = lichte Wehröffnungshöhe = 3.0 m (Stauklappe),  $H_t$  = Stammlänge = 10 m)

Gemäss den Richtlinien sind die Abmessungen des Durchlasses zu klein und es muss mit Verklausungen gerechnet werden, was das HW 2010 bestätigt hat. Auch wenn nach dem Versagen des Durchlasses noch der Überfall und die Grundablässe in Betrieb waren, war primär die nach rund zwei Stunden abklingende Hochwasserwelle ausschlaggebend, dass es nicht zu einem Überströmen des Stauwehrs kam.

	<p>Üblicherweise werden bei Hochwässern Stauraumpülung durchgeführt, indem der Regulier- und Hauptschütz geöffnet und das Schwemmholz gemeinsam mit dem Geschiebe durch den Durchlass ins Unterwasser transportiert werden. In diesem Fall ist das Schwemmholz oberwasserseitig des Stauwehrs strömungsparallel ausgerichtet und wird so durch den Durchlass geleitet. Die Spülmethode resp. die Abmessungen des Durchlasses haben seit der Inbetriebnahme der Anlage im Jahr 1966 bis zum Hochwasserereignis 2010 keine Probleme verursacht.</p>
<b>Massnahmen / Erfahrungen</b>	<p>Das im Stauraum des Stauwehrs Schlattli zurückgehaltene Schwemmholz wurde nach dem Hochwasser maschinell entfernt (Abb. 6). In mehreren unter Umweltauflagen durchgeführten Spülungen wurden die Sedimente ins Unterwasser abgespült und das Stauvolumen wieder hergestellt.</p> <p>Mittlerweile hat die ebs Energie AG Planungen zur baulichen Anpassung der HWE durchführen lassen.</p>
<b>Fotos</b>	 <p>Abbildung 4: Schwemmholzteppich im Stauraum des Stauwehr Schlattli nach dem Hochwasserereignis 2010 (Quelle: ebs Energie AG)</p>



Abbildung 5: Schwemmholzverklausung beim Durchlass nach dem Hochwasser 2010 (Quelle: ebs Energie AG)



Abbildung 6: Maschinelle Entnahme des Schwemmholzes nach dem Hochwasserereignis 2010 im Bereich der Wasserfassung (Quelle: ebs Energie AG)

### 3) Palagnedra

#### Palagnedra

Name der Sperre	Palagnedra		
Name des Gewässers	Melezza		
Betreiber	Ofima		
Stauvolumen	4'260'000 m <sup>3</sup>		
Seefläche auf Stauziel	255'000 m <sup>2</sup>		
<b>Hydrologie</b>	<b>Einzugsgebiet</b>		
Hochwasser HQ <sub>100</sub>	1050 m <sup>3</sup> /s	Fläche	140 km <sup>2</sup> / 444 km <sup>2</sup> inklusive Überleitungen
Bemessungshochwasser HQ <sub>1000</sub>	1800 m <sup>3</sup> /s	Bestockungsgrad	unbekannt
Stauziel	486.70 m ü.M.	Höhenlage Sperrenkrone	487.50 m ü.M.

**Hochwasserentlastung (HWE)** (Art, Einlaufbauwerk, reguliert/unreguliert, Anzahl Entlastungen, Grundablass etc.)

Art:	Fester Überfall, unreguliert
Abmessungen	L = 80 m Wehrfelder Alte HWE: 13 Öffnungen von je 5.40 m lichter Weite und 0.80 m starken Zwischenpfeilern mit einem Abflussvermögen von 450 m <sup>3</sup> /s
Kapazität	2'200 m <sup>3</sup> /s

Die Hochwasserentlastung besteht aus einem frontal angeströmten, festen Überfall mit einer Länge von 80 m. Nach dem Hochwasserereignis 1978 wurde die HWE umgebaut. Die alte HWE bestand aus 13 Öffnungen von je 5.40 m lichter Weite mit 0.80 m starken Zwischenpfeilern, lichte Höhe von 3 m und mit einem Abflussvermögen von 450 m<sup>3</sup>/s (Abbildung 1). Die Rückgabe in die Melezza erfolgt über einen Skisprung auf Kote ca. 455.00 mit einer Breite von 23.80 m.

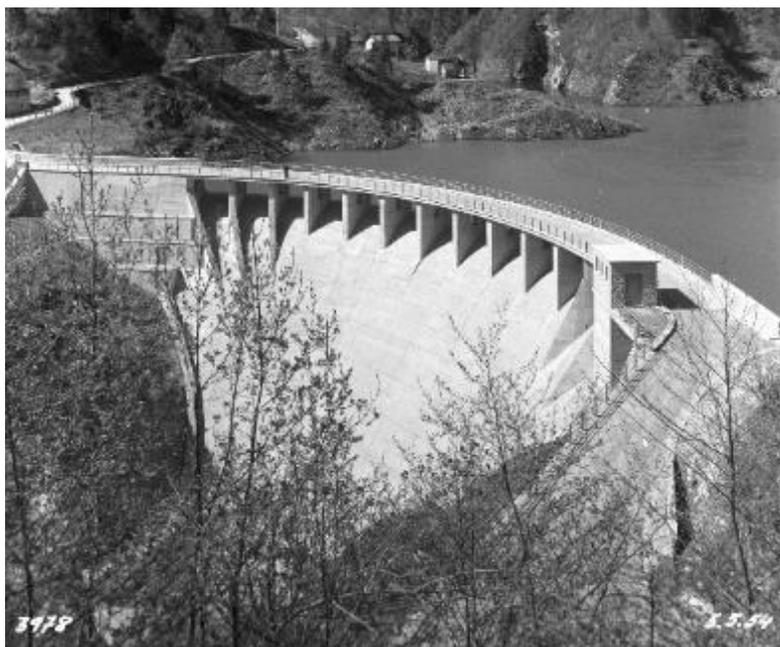


Abbildung 1: Alte HWE der Staumauer Palagnedra (Quelle: Ofima 1954)



**Schwemmholz** (Wird SH über HWE abgeführt oder entnommen? Massnahmen gegen SH vorhanden?)

Bei der Anlage tritt Schwemmholz auf, wird jedoch nicht entnommen, sondern über die HWE abgeführt.

**Hochwasserereignis 7.8.1978** (siehe auch Bruschin et al 1981)

Jährlichkeit	≈HQ <sub>100</sub> , maximaler Abfluss Melezza ca. 900 m <sup>3</sup> /s				
Schwemmholzaufkommen	30'000 m <sup>3</sup>				
Beschrieb Ereignis	<p>Gegen Abend des 7. August 1978 wurden grosse Teile des Kantons Tes-sin und des Misox sowie angrenzende italienische Gebiete von einem nach Menschengedenken noch nie in dieser Stärke aufgetretenen Orkan heimgesucht. Im Gebiet von Palagnedra begann der Regen bereits um 4 Uhr in der Frühe des 7. August und dauerte 23 Stunden, wodurch am Regenschirm der Kraftwerke Maggia 314 mm registriert wurden. Ein Wert, der seit der Zeit der Installation dieser Messstation im Jahre 1964 nur 1965 mit 348 mm überschritten worden war. Der Zufluss der Melezza aus dem Einzugsgebiet im benachbarten Italien, gemessen an der Messstation in der Nähe von Camedo, zeigte folgende Werte:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• am 6. August 1978 ca. 10 m<sup>3</sup>/s</li> <li>• stieg am 7. August 1978 auf             <table style="margin-left: 20px;"> <tr><td>150 m<sup>3</sup>/s um 13:30 Uhr</td></tr> <tr><td>240 m<sup>3</sup>/s um 15:30 Uhr</td></tr> <tr><td>500 m<sup>3</sup>/s um 18:00 Uhr</td></tr> <tr><td>900 m<sup>3</sup>/s um 19:00 Uhr</td></tr> </table> </li> </ul> <p>Dabei erreichte der Stausee die Kote 490.00 m ü.M. der Fahrbahn der Strassenbrücke, die über die Sperre führte. Nach einem Augenzeugenbericht sei ungefähr zu dieser Zeit eine gewaltige Welle von Wasser und Holz 2÷3 m über die Brücke hinweg geflossen. Anschliessend sei die Seeoberfläche zur Gänze mit Baumstämmen abgedeckt worden. Die Schätzungen des zugeschwemmten Holzes belaufen sich auf ca. 30'000 m<sup>3</sup>. Der Wasserdurchfluss, nachträglich aufgrund von Spuren an den Flussrändern bestimmt, wird auf 2000 m<sup>3</sup>/s geschätzt. Die Holzstämmen verklemmten sich in den 5.40 m schmalen Öffnungen der Hochwasserentlastung und bildeten eine Sperre. Andere Stämme formten Sperren auf der Strassenbrücke (Abb. 2 und 3). Der aussergewöhnliche Starkregen hat dabei, wie vom Helikopterflug aus markant festgestellt werden konnte, im hinteren kesselartig steil ansteigenden Tal der Melezza mit seinen zahllosen Zuflüssen und Nebentälern ausgedehnte Weide- und Grasflächen bis zu Waldplätzen weggerissen und weggeschwemmt. Strassen, die Bahn und Brücken wurden weggerissen und in das Staubecken von Palagnedra geschwemmt. Die zugeführte Materialmenge dürfte ca. 2 Mio m<sup>3</sup> betragen haben, wodurch das ursprünglich ca. 4.8 Mio m<sup>3</sup> aufweisende Stauvolumen mit total 3.2 Mio m<sup>3</sup> Feststoffen, meist Sand, aufgefüllt wurde. Die Ablagerungen an der Sperre erreichten eine Höhe von 456.00 m ü.M.</p> <p>Unglücklicherweise wurde auf Befehl der kantonalen Polizei zum Zeitpunkt des grössten Wasser- und Feststoffzuflusses der Spülstollen geschlossen. Dadurch wurde die Fassung bis gegen Kote 487.00 verlegt, der Grundablass bis 27.0 m und der Zwischenablass bis auf 13.0 m mit</p>	150 m <sup>3</sup> /s um 13:30 Uhr	240 m <sup>3</sup> /s um 15:30 Uhr	500 m <sup>3</sup> /s um 18:00 Uhr	900 m <sup>3</sup> /s um 19:00 Uhr
150 m <sup>3</sup> /s um 13:30 Uhr					
240 m <sup>3</sup> /s um 15:30 Uhr					
500 m <sup>3</sup> /s um 18:00 Uhr					
900 m <sup>3</sup> /s um 19:00 Uhr					

	<p>Material überdeckt und teilweise durch Holz versperrt. Der für die Sicherheit der Stauanlage aber bedenklichste Schaden entstand durch die Überflutung der 3 m starken Kernmauer am orografisch rechten Ufer. Die Mauer wurde ca. 8.00 m überströmt und das Wasser riss eine Breche in die talseitige Lockergesteinsmasse von 20.0 bis 25.0 m Breite, 33.0 m Höhe und einem Volumen von ca. 50'000 m<sup>3</sup> (Abb. 3). An der Hauptstrasse hingegen entstanden keine die Sicherheit bedrohenden Schäden.</p>
<p>Probleme HWE</p>	<p>Die HWE wurde durch das Schwemmholz komplett verklaust. (Abb. 2).</p>
<p><b>Beurteilung</b></p>	<p>Alte HWE: Vorgaben Richtlinien CH: <math>L_p \geq 0.80 * H_t = 8 \text{ m} \rightarrow</math> nicht erfüllt <math>H_b \geq 0.20 * H_t = 2 \text{ m} \rightarrow</math> erfüllt</p> <p>Vorgaben Richtlinien FR: <math>L_p \geq 15 \text{ m} \rightarrow</math> nicht erfüllt <math>H_b \geq 2.0 \text{ m} \rightarrow</math> erfüllt</p> <p>(<math>L_p</math> = lichte Wehrbreite = 5.4 m, <math>H_b</math> = lichte Wehröffnungshöhe = 3 m, <math>H_t</math> = Stammlänge = 10 m)</p> <p>Gemäss den Richtlinien war die Breite der alten Wehrfelder eindeutig zu klein. Bei der neuen HWE sind aufgrund des freien Überfalls alle Bedingungen erfüllt.</p>
<p><b>Massnahmen / Erfahrungen</b></p>	<p><b>Umbau HWE</b> Grundlage des Umbau-Projektes der HWE im November 1978 war die Annahme einer maximalen Hochwasserspitze von 2'200 m<sup>3</sup>/s und die daraus sich ergebende Spiegellage des Stausees auf Kote ca. 492.00 m ü.M. Diese neue maximale Spiegelkote verlangte eine Höhenänderung der Strassenbrücke (Kote 490.00 m ü.M.). Um die gewünschte Hochwasserspitze abzuführen musste die lichte Öffnung der Durchflussöffnung vergrössert und vor allem mit Sicherheit vor Verstopfung durch zugeschwemmte Baumstämme ausgeführt werden. Diese beiden Bedingungen führten zum Abbruch der bestehenden Strassenbrücke und ihrer Pfeiler bis auf die Höhe der Überfallkrone. Die neue Brücke überspannt die Melezza 25.0 m talwärts der alten Brücke (Abb. 4). Am rechtsseitigen Brückenkopf liegt die Strasse auf Kote 492.80 m ü.M. Die neue Spannbetonbrücke überquert das Tal ohne Zwischenpfeiler mit einer Länge von 60.0 m. Die Pfeiler sind auf Fels fundiert. Die Brücke wird so an die bestehende Strasse angeschlossen und mit seitlichen Mauern versehen, dass dieselben seitliches Überfluten bei max. Wasserstand verhindern.</p>



**Fotos**



Abbildung 2: Schwemmholzverklausung an der HWE nach dem Hochwasser 1978 (Quelle: Ofima)



Abbildung 3: Schwemmholzverklausung an der HWE und teilerodierte Kernmauer nach dem Hochwasser 1978 (Quelle: Ofima)



Abbildung 4: Schwemholzverklausung im Stausee nach dem Hochwasser 1978 (Quelle: Ofima)

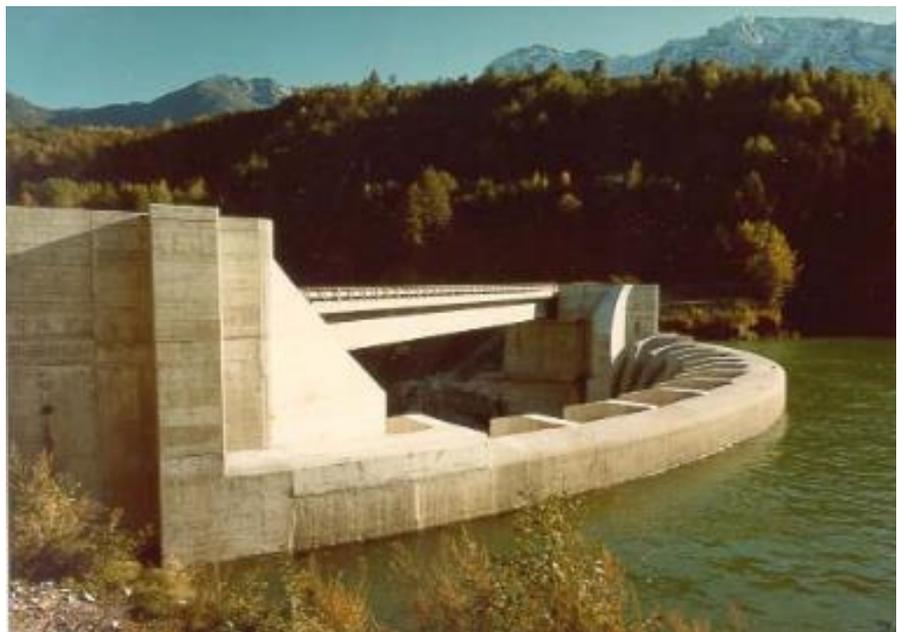


Abbildung 5: Neue HWE ohne Pfeiler und mit vorgelagerter Brucke (Quelle: Ofima)



Abbildung 6: Neue HWE im Betrieb (Quelle: Ofima)

## 4) Montsalvens

### Montsalvens

Name der Sperre	Montsalvens		
Name des Gewässers	la Jogne		
Betreiber	Groupe E SA		
Stauvolumen	9.257 Mio m <sup>3</sup>		
Seefläche auf Stauziel	693'000 m <sup>2</sup>		
<b>Hydrologie</b>		<b>Einzugsgebiet</b>	
Hochwasser HQ <sub>100</sub>	267 m <sup>3</sup> /s	Fläche	173 km <sup>2</sup>
Bemessungshochwasser HQ <sub>1000</sub>	346 m <sup>3</sup> /s	Bestockungsgrad	31%
Stauziel	800.80 m ü.M.	Höhenlage Sperrenkrone	802.30 m ü.M.

**Hochwasserentlastung (HWE)** (Art, Einlaufbauwerk, reguliert/unreguliert, Anzahl Entlastungen , Grundablass etc.)

Art:	1) Grundablasschütze 2) Umleitstollen, reguliert 3) 4 „hausses fusibles“ Hydroplus
Abmessungen	1) Durchlass,(BxH) = 1.098 x 1.8 2) Durchlass (BxH) = 5.05 x 4.42 3) Durchlass (BxH) = 10.3 x 5.85
Kapazität	1) 56.5 m <sup>3</sup> /s 2) 134 m <sup>3</sup> /s 3) 309 m <sup>3</sup> /s

Die Staumauer Montsalvens ist mit drei Hochwasserentlastungsanlagen ausgerüstet.

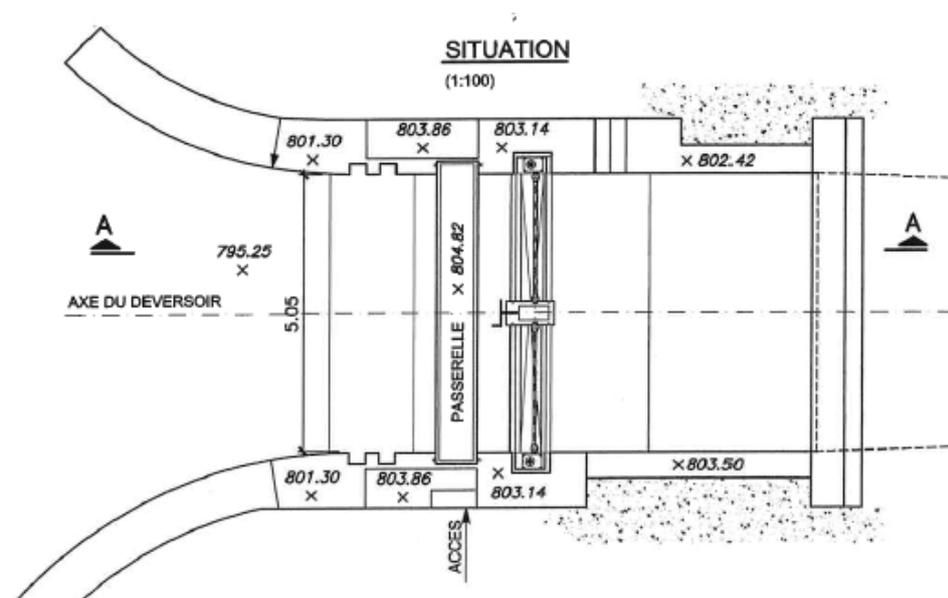


Abbildung 1: Situation des Umleitstollen mit einer Gleitschütze ausgerüstet

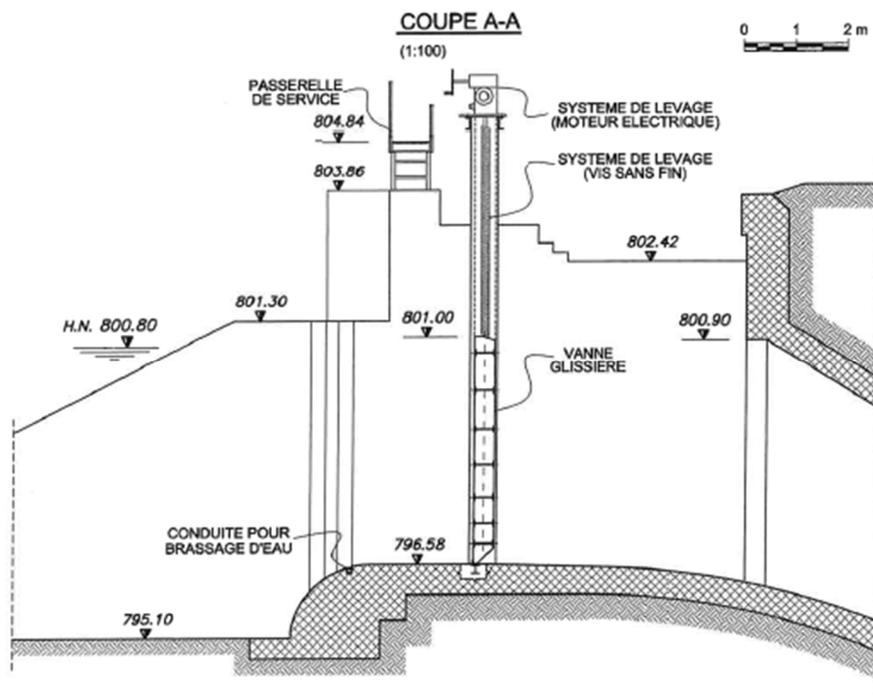


Abbildung 2: Querschnitt des Umleitstollen mit einer Gleitschütze ausgerüstet

Der Grundablassstollen ist mit zwei Grundablassschütze ausgerüstet. Der Umleitstollen ist mit einer Gleitschütze reguliert.

Die 4 „hausses fusibles“ kippen sich auf die verschiedene Kote um: 802.04, 802.13, 802.18 und 802.21 müM.

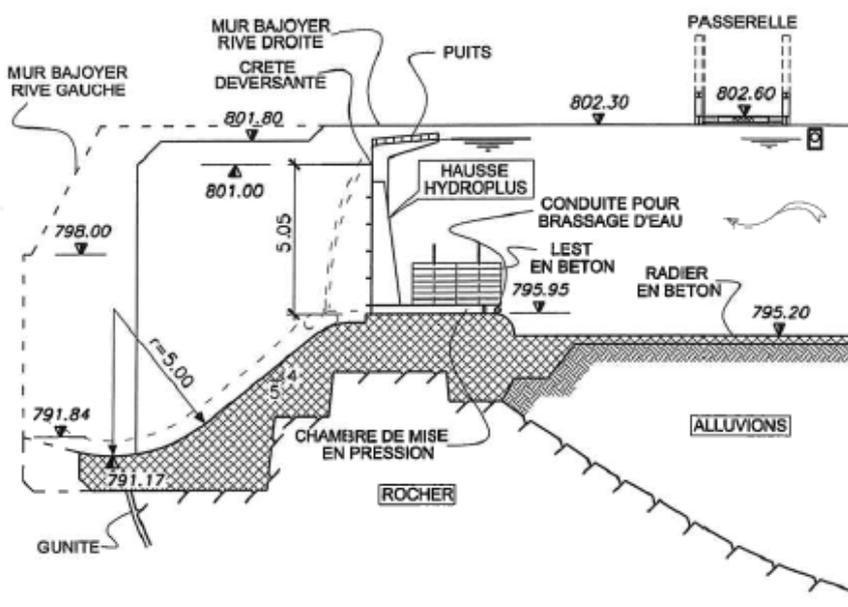


Abbildung 3: Querschnitt des Überfalls mit der „hausses fusibles“ ausgerüstet



**Schwemmholz** (Wird SH über HWE abgeführt oder entnommen? Massnahmen gegen SH vorhanden?)

Bis 2015 wurde die Überlaufschütze des rechten Ufers mittels einem *TuffBoom* geschützt. Wegen der Orientierung der Staumauer (West – Ost) ist es sehr schwierig das Schwemmholz in einem Ort zu versammeln und zu entnehmen. Es ist möglich nur mit der Unterstützung eines Stoss-Bootes und einem Kran-Lastwagen.

**Hochwasserereignis Mai 2015**

Jährlichkeit	HQ 137 m <sup>3</sup> /s (<HQ <sub>10</sub> )		
Schwemmholzaufkommen	300 m <sup>3</sup>		
Beschrieb Ereignis	Das Hochwasser vom Mai 2015 ist nach einer Periode von 7 Jahren ohne grosse Abflüsse ( $Q_{\text{Abfluss}} < 80 \text{ m}^3/\text{s}$ ) eingekommen. Die Überlaufschütze wurde geöffnet. L'écoulement est passé d'un type d'écoulement sous vanne à un écoulement libre, ce qui a provoqué une augmentation de débit brusque de 20 m <sup>3</sup> /s. les ancrs qui retenaient la bouée centrale ont lâchés. Un ancrage a également lâché. Les éléments du barrage anti-bois <i>TuffBoom</i> sont passés sous la vanne de surface. Le barrage anti-bois a été scié pour pouvoir refermer la vanne.		
Probleme HWE	Un barrage anti-bois a été installé pour protéger la galerie de déviation et en particulier le passage de la vanne contre une obturation et pour assurer sa fermeture. Avec la destruction du barrage anti-bois, la situation en cas de crue n'est pas suffisamment garantie et une solution plus adaptée doit être trouvée.		
<b>Beurteilung</b>	<p>Vorgaben Richtlinien CH:</p> $L_p > 0.80 * H_t = 20\text{m} \rightarrow$ nicht erfüllt $H_b > 0.20 * H_t = 5 \text{ m} \rightarrow$ erfüllt	<p>Vorgaben Richtlinien FR:</p> $L_p \geq 13.2 \text{ m} \rightarrow$ nicht erfüllt $H_b \geq 2.0 \text{ m} \rightarrow$ erfüllt	<p>(<math>L_p</math> = lichte Wehrbreite = 5.05 m, <math>H_b</math> = lichte Wehröffnungshöhe = 5 m, <math>H_t</math> = Stammlänge = 25 m)</p> <p>Gemäss den Richtlinien sind die Abmessungen der Wehrfelder zu klein und es muss mit einer Verklausung gerechnet werden. Dies hat das HW 2015 bestätigt</p>
<b>Massnahmen / Erfahrungen</b>	Selon les expériences faites, un HQ <sub>10</sub> pourrait entraîner des complications pour la manoeuvre de la vanne de surface et entraîner des risques d'obturation de la galerie de déviation. Une solution permettant de dévier ou de retenir les longs bois (25m) est recherchée.		

**Fotos**



Abbildung 4: Situation vor dem *TuffBoom*-Bruch vom Mai 2015



Abbildung 5: Volumen vom Schwemmh Holz beim Montsalvens-See während eines Hochwassers

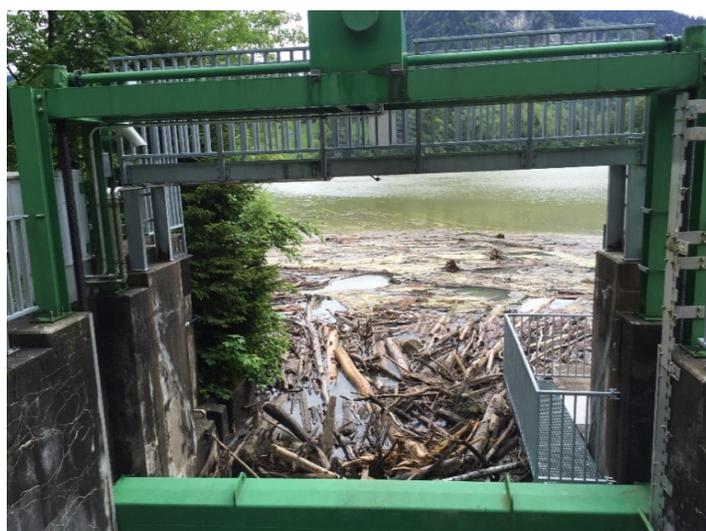
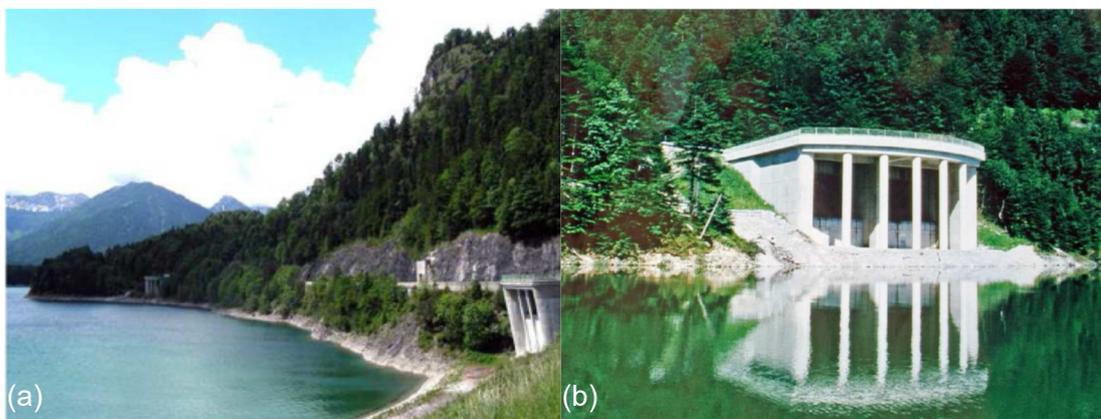


Abbildung 6: Aktuelle Situation in Hochwasserfall; das Verkläunungsrisiko bleibt unzulässig gross

## 5) Sylvensteinspeicher (D)

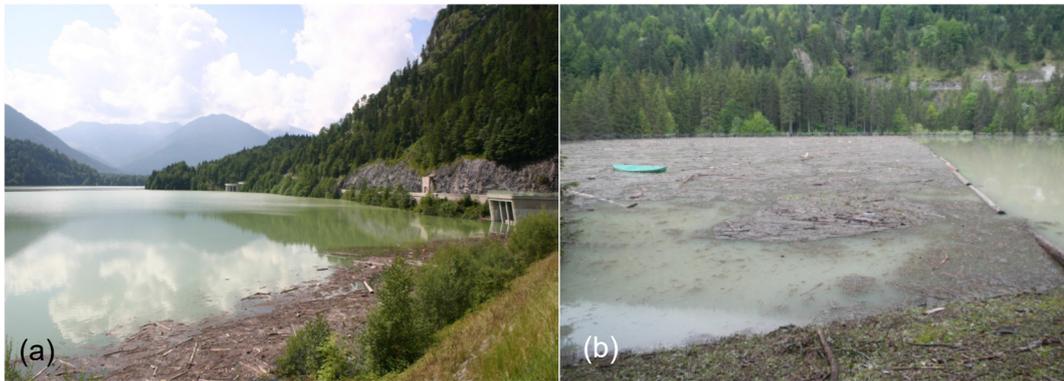
Der Sylvensteinspeicher (Steinschüttdam,  $H = 44$  m, Stauvolumen =  $124 \text{ hm}^3$ , EZG =  $1'138 \text{ km}^2$ , Höhenlage =  $767$  m ü.M., Einzugsgebiet grösstenteils bewaldet) wurde in den 1950er Jahren hauptsächlich zum Hochwasserschutz und zur Niedrigwasseraufhöhung errichtet. Im Zeitraum von 1994-2001 wurde zur Vergrößerung des Hochwasserschutzraums die bestehende HWE angepasst und eine zweite HWE gebaut. Da die Hochwasserentlastung mittels Stollen erfolgt und das Schwemmholzpotential im Einzugsgebiet sehr hoch ist, mussten beide Einläufe der HEW vor Schwemmholz geschützt werden (Hartlieb 2014). Dazu wurden Modellversuche durchgeführt (Hartlieb et al. 1996). Die bestehende HWE hat einen Stollenquerschnitt von  $B = 5.1$  m und  $H = 4.7$  m. Der Einlauf wurde mittels zwei Rechensäulen mit einer lichten Weite von  $4$  m vor Schwemmholz geschützt (**Abbildung 38a**). Holzgruppen und Stämme mit grossen Abmessungen werden dadurch zuverlässig zurückgehalten. Einzelne Stämme können den Rechen passieren und werden dabei sogar häufig durch die Säulen in Fliessrichtung ausgerichtet.

Die neue HWE wurde ebenfalls im hydraulischen Modell an der TU München optimiert. Sie besteht aus einem Einlauf mit zwei jeweils  $12$  m breiten Überlaufschwellen und einem  $6.5$  m hohen und  $5.0$  m breiten Stollen. Dem Einlauf vorgelagert wurden fünf vertikale Rechenstäbe mit einem Durchmesser von  $1.0$  m und einem lichten Stababstand von  $4.0$  m (**Abbildung 38b**). Der Rechen ist wiederum für einzelne Stämme passierbar, wobei die Stämme ausgerichtet werden und den Einlauf gefahrlos passieren können. Gefährliche Holzgruppen werden mit ausreichendem Abstand vor der Überlaufschwelle zurückgehalten. Durch die grosse Anströmfläche und die dadurch geringe Geschwindigkeit entsteht ein weniger kompakter Verkläusungskörper und die Abflusskapazität der HWE wird somit in vertretbarem Masse reduziert (Hartlieb 2014).



**Abbildung 38:** (a) Alte und (b) neue HWE des Sylvensteinspeichers mit vorgelagertem Holzrechen (Fotos: Hartlieb 2014)

Während dem Hochwasserereignis vom August 2005 wurde im Sylvensteinspeicher ein sehr grosses Schwemmholzaufkommen verzeichnet (**Abbildung 39a**). Probleme infolge Verkläusungen traten jedoch keine auf. In letzter Zeit wurden zudem vermehrt Schwemmholzsperrern im Zuflussbereich eingesetzt (**Abbildung 39b**).



**Abbildung 39:** (a) Schwemmholz während dem Hochwasser vom August 2005 (Foto: A. Hartlieb) und (b) Schwemmholzsperrungen während dem Hochwasser im Juni 2013 (Foto: Bayrisches Landesamt für Umwelt)

## 6) Speicher am Kamp (Ö)

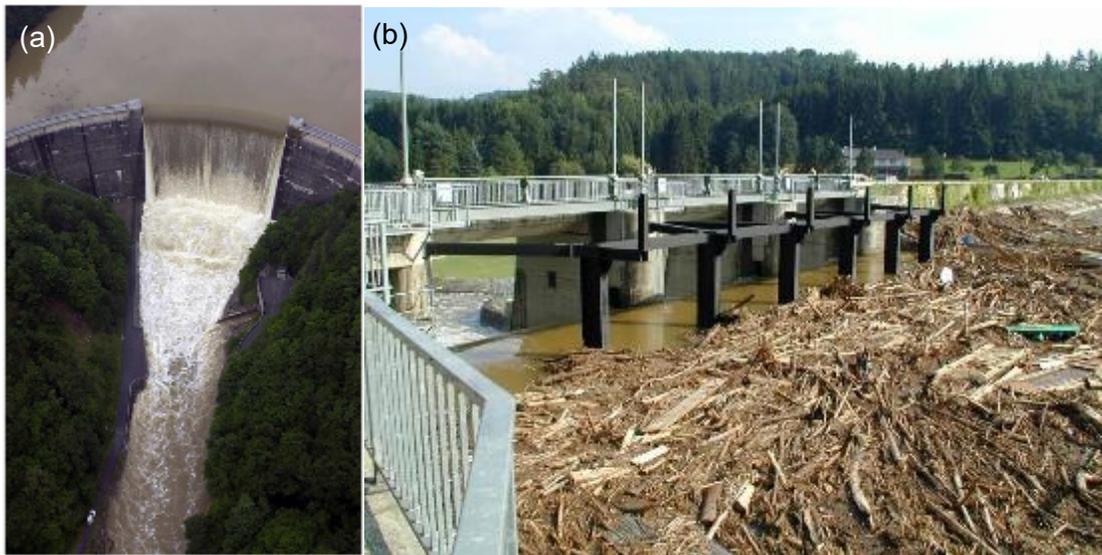
Entlang des Flusses Kamp befinden sich die folgenden drei Sperren:

Ottenstein: EZG = 889 km<sup>2</sup>  
Bogenmauer,  $H = 69$  m  
Stauvolumen = 73 hm<sup>3</sup>  
HWE: 2 Überlaufklappen auf Sperrenkrone,  $B = 26$  m  
BHQ = HQ<sub>5000</sub> = 650 m<sup>3</sup>/s

Dobra: EZG = 940 km<sup>2</sup>  
Bogengewichtsmauer  
Stauvolumen = 20 hm<sup>3</sup>  
HWE: Freier Überfall,  $B = 65$  m  
BHQ = HQ<sub>5000</sub> = 680 m<sup>3</sup>/s

Thurnberg: EZG = 1011 km<sup>2</sup>  
Schüttdamm,  $H = 15$  m  
Stauvolumen = 0.8 hm<sup>3</sup>  
HWE: 3 Wehrfelder mit Senkschützen;  $B = 8.6$  m,  $H = 3.4$  m inkl. Grobrechen  
BHQ = HQ<sub>5000</sub> = 720 m<sup>3</sup>/s

Beim Hochwasser im August 2002 wurden an den Kampsperrn Zuflüsse in der Größenordnung zwischen HQ500 - HQ1000 (bereichsweise sogar höher) verzeichnet. Zusätzlich wurde viel Schwemmholz transportiert. Dabei traten bei den Sperren Ottenstein und Dobra aufgrund der grosszügigen Abmessungen der HWE sowie der Ausführung als freier Überfall keine Probleme auf (**Abbildung 40a**). An der Sperre Thurnberg bildete sich jedoch eine grosse Schwemmholzansammlung. Der Grobrechen wurde 12 Jahre vorher vor den schmalen Wehrfeldern der HWE installiert und verhinderte eine Verklausung der Wehrfelder (**Abbildung 40b**). Da das Wehrbauwerk einen relativ langen Anschlussdamm besitzt, hätte eine Verklausung der Wehrfelder ein Überströmen des Dammes bedeuten können. Weitere solche Grobrechen wurden inzwischen auch an zwei anderen Sperren mit schmalen Wehröffnungen eingerichtet.



**Abbildung 40:** (a) Dobraspeicher mit freiem Überfall bei der HWE und (b) Schwemmh Holz beim Grobrechen der HWE Thurnbergspeicher während dem Hochwasser 2002 (Fotos: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Österreich).

## 7) Speicher Gstins (Ö)

Der Speicher Gstins befindet sich am Fluss Lutz in Voralberg auf einer Höhenlage von ca. 900 m ü.M. Das Einzugsgebiet beträgt 184 km<sup>2</sup> und ist grösstenteils bewaldet. Die Hochwasserentlastung besteht aus zwei Wehrfeldern mit je 10 m breiten Stauklappen (**Abbildung 41a**). Beim Hochwasser vom August 2005 wurde ein Abfluss von 300 m<sup>3</sup>/s (< BHQ, >>HQ100) verzeichnet. Zudem wurden ca. 3'000 m<sup>3</sup> Holz in den Speicher transportiert. Infolgedessen sind beide Wehrfelder vollständig verklaust (**Abbildung 41b**). Mittels Holzgreifer wurde noch versucht, das linke Wehrfeld wieder freizuräumen. Um künftige eine Verklausung an der Staumauer zu verhindern, wird die HWE umgebaut. Durch Entfernung des zwischen den beiden Wehrfeldern angeordneten Pfeilers wird ein Wehrfeld mit einer Breite von 20 m geschaffen. Die beiden Stauklappen bleiben permanent gelegt, bis weitere Überlegungen bezüglich der Gestaltung der HWE abgeschlossen sind.



**Abbildung 41:** Speicher Gstins: (a) HWE mittels zwei Stauklappen (Foto: VAW) und (b) Verklausung während des Hochwassers 2005 (Fotos: Vorarlberger Illwerke AG).