# Technische Mitteilung

**TM-211-RN13020**

**Titel** : **Verklausungswahrscheinlichkeit am Stauwehr Beznau bei einem Aareabfluss von 4200 m$^3$/s (HQ=10 000)**

**Sachgebiet:** Externe Überflutung

**Verfasser** : [redacted]

**Block** : 1+2

**Anzahl Seiten** : 13

**Erst. Datum** : 12.04.2013

**Verteiler** : [redacted] [redacted]





| | Name | Unterschrift | Datum |
|---|---|---|---|
| Erstellt | [redacted] | | |
| Geprüft | | | |
| Genehmigt | | | |

***Änderungen siehe Revisionsindex auf der folgenden Seite***

# REVISIONEN

**Es gilt die letzte aufgeführte Revision, die von der zuständigen Stelle visiert ist.**

| Datum | Rev. | Korrektur/Ergänzung | Seiten | Visum |
|---|---|---|---|---|
| 12.04.2013 | 0 | Erstausgabe | alle | [redacted] |
| | | | | |
| | | | | |

Das Dokument unterliegt nicht dem Änderungsdienst.

## Inhaltsverzeichnis

# 1 Motivation

Auf Grund der Ereignisse in Fukushima (Japan) und gemäss verschiedener ENSI-Bescheide [1, 18] erfolgte eine Betrachtung zusätzlicher auslegungsüberschreitender Überflutungsszenarien für das Kernkraftwerkes Beznau. Unter anderem wurden Szenarien mit Verklausung am Wehr in Beznau betrachtet [2, 3, 4]. Einerseits führt Verklausung am Wehr zu deutlich grösseren Fluthöhen, andererseits ist eine Verklausung am Wehr Beznau unwahrscheinlich. Eine vollständige und wasserdichte Verklausung, wie sie im Szenario angenommen wird, ist fast gänzlich auszuschliessen, da meist noch ein kleiner Durchfluss vorhanden ist, auch wenn der ganze Fliessquerschnitt verklaust ist. Dennoch sollen solche Verklausungsszenarien in der laufenden PSA berücksichtigt werden. In diesem Bericht werden Annahmen und Modelle zur Bestimmung der Wahrscheinlichkeit einer Verklausung am Wehr Beznau dargelegt, und die ermittelte Wahrscheinlichkeit einer vollständigen Verklausung angegeben.

# 2 Theorie zur Verklausung

Laut Rissler [5] bezeichnet eine Verklausung das Problem, dass sich Verschlüsse durch Treibzeug (in der Regel Holz) zusetzen können. Das ehem. BUWAL [6] definierte 1998 eine Verklausung ganz einfach als das Verstopfen eines Gerinnes durch Holz, Geschiebe oder Rutschungsmassen, verbunden mit einem Aufstau.

Die Gefahr einer Verklausung ist in alpinen Gebieten bedeutend grösser als im Flachland [5]. Daher sind Studien über Verklausung meist auf alpine Gebiete und Wildbäche bezogen.

In einer Analyse über das Hochwasser 1987 [7] wurde beobachtet, dass Baumstämme während des Transports in alpinen und voralpinen Gewässern rasch auf 10 m verkleinert werden. Für das Flachland wurde keine Aussage gemacht. Das BFE schliesst daraus [8], dass die Öffnungen von Wehren entlang grosser Flüsse im Unterland mehr als 10 m betragen sollen. Andere Quellen [11, 19] sprechen ebenfalls von einem Bereich von 10 m bis 15 m. Beim Wehr in Beznau sind die Öffnungen 20.5 m breit.

Neben der Baumlänge und der Wehrgeometrie ist vor allem noch die Menge des Schwemmholzes entscheidend. Hier kann auf Daten von vergangenen Hochwasserereignissen zurückgegriffen werden [9, 10]. Rickenmann [11] untersuchte hierzu mehrere Hochwasser im In- und Ausland. Er machte die Beobachtung, dass die Schwemmholzmenge mit der Gösse des Einzugsgebiets (EZG) korreliert. Als grobe Abschätzung für das Lockervolumen [m³] von Schwemmholz in Abhängigkeit des Einzugsgebiets, gibt er folgende Beziehung an:

$$V_{Holz\_eff} = 45 \cdot EZG^{2/3} \qquad (1)$$

$V_{Holz\_eff}$ effektives Schwemmholzvolumen [m³]

EZG Einzugsgebiet [km²]

Vom Volumen kann die Anzahl der Schwemmholzstücke abgeleitet werden. Das Ereignis von 2005 [9] liefert hierfür Daten über die Verteilung der Länge von gesammeltem Schwemmholz. Hierbei ist zu erkennen, dass Schwemmholzstücke länger als 10 m selten sind und praktisch nie eine Länge von 15 m erreichen. Die Beobachtungen vom Jahr 1987 werden also bestätigt.

Weiter wurde 2005 beobachtet, dass Schwemmholz aus den alpinen Gebieten oft gar nicht das Flachland erreichte, da es an Stauwehren, Brücken oder in Seen zurückgehalten wurde (aktiv und passiv). Es ist daher anzunehmen, dass nur ein kleiner Teil des Schwemmholzes aus dem Einzugsgebiet in Beznau ankommt und möglicherweise auch zeitlich verzögert zur Hochwasserspitze [9].

Ob ein Stück Schwemmholz der Länge x an einem bestimmten Bauwerk hängen bleibt, wurde ebenfalls in verschiedenen Studien untersucht. Die meisten Untersuchungen beziehen sich dabei auf Brücken, was in diesem Fall von geringerem Interesse ist. Hartlieb [12] hingegen untersuchte dabei Hochwasserentlastungsanlagen. Die Verklausungswahrscheinlichkeit hängt vor allem vom Verhältnis der Baumlänge zur Wehrbreite ab. Die Abhängigkeit beschreibt er als annähernd linear. Bei einen Verhältnis Baumlänge zu Wehrbreite ≤ 1.0 sei die Verklausungswahrscheinlichkeit mit annähernd 0% vernachlässigbar.

# 3 Modell

In unserem vereinfachten Modell zur Bestimmung der Verklausungswahrscheinlichkeit beim Wehr Beznau, wird zuerst die Schwemmholzmenge bestimmt. Aus den Durchschnittswerten bezüglich Länge und Durchmesser der entnommenen Schwemmholzstücke vom Hochwasserereignis 2005 wird die Anzahl Schwemmholzstücke berechnet. Anhand der Daten von 2005 kann eine Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Länge eines Schwemmholzstücks gebildet werden. Somit sind Anzahl und Längenverteilung des Schwemmholzes bekannt. Nur ein Teil der Holzmenge kommt in Beznau an, dies wird mit einem Rückhaltefaktor bzw. einer Rückhaltewahrscheinlichkeit berücksichtigt. Von den ankommenden Bäumen führen wiederum nur eine bestimmte Menge zur teilweisen Verklausung. Die Verklausungswahrscheinlichkeit für eine Wehrschütze berechnet sich daher nach diesem Schema:

$$P_{Verkl.} = \#Bäume \cdot \int_0^\infty P_{Baumlänge}(x) \cdot (1 - P_{Rückhalt.}(x)) \cdot P_{Verkl.Baum}(x)\,dx \qquad (2)$$

| | |
|---|---|
| $P_{Verkl.}$ | Wahrscheinlichkeit für eine Teilverklausung einer Wehrschütze [pro Ereignis] |
| #Bäume | Anzahl Bäume pro Hochwasserereignis |
| $P_{Baumlänge}$ | Wahrscheinlichkeitsverteilung der Baumlängen |
| $P_{Rückhalt.}$ | Wahrscheinlichkeit einer Rückhaltung des Baumes vor Beznau [-] |
| $P_{Verkl.Baum}$ | Wahrscheinlichkeit, dass der Baum am Wehr Beznau verkeilt [-] |

## 3.1 Schwemmholzmenge

Die Aare in Klingnau hat ein Einzugsgebiet von 17 755 km$^2$ [13]. Laut Rickenmann [11] würde nach Formel (1) eine Schwemmholzmenge von nur 10 000 Festmeter[1] resultieren. Beim Hochwasserereignis von 2005 wurden im Einzugsgebiet der Aare und Reuss über 50 000 Festmeter Holz abgelagert oder entnommen. Das zeigt auf, dass die Formel von Rickenmann die Schwemmholzmenge bei grossen Einzugsgebieten tendenziell unterschätzt. Denn bei den 50 000 Festmetern von 2005 ist sicherlich nicht die gesamte verfrachtete Schwemmholzmenge enthalten. Als untere Grenze der Schwemmholzmenge kann deshalb 50 000 Festmeter angenommen werden.

[1] Als Umrechnungsfaktor zwischen Lockervolumen und Festmeter wird ein Faktor 10/3 angewendet. Dieser Faktor basiert auf Auswertungen nach dem Flutereignis 2005 [9].

Als obere Grenze für die Schwemmholzmenge kann das Schwemmholzpotential im Einzugsgebiet betrachtet werden. Hierfür gibt Uchioga [17] eine Formel für das Lockervolumen [m³] des Schwemmholzpotentials an:

$$V_{Holz\_pot} = a \cdot A_{Wald} \tag{3}$$

| | |
|---|---|
| $V_{Holz\_pot}$ | Potentielles Schwemmholzvolumen [m³] |
| a | empirischer Korrekturfaktor [m³/km²] |
| $A_{Wald}$ | Bewaldete Fläche des Einzugsgebiets [km²] |

Er nimmt anstatt des Einzugsgebiets die bewaldete Fläche ($A_{Wald}$). Der empirische Faktor a variiert ziemlich stark. Uchioga gibt einen Bereich von 10–1000 für Nadelwälder und 10–100 für Laubwälder. Die Unsicherheit ist also sehr gross. Rickenmann [11] machte zudem die Beobachtung, dass in der Schweiz maximal der Faktor 100 einzusetzen ist, wobei für grössere Einzugsgebiete (ab 100 km²) der Faktor deutlich kleiner ist. Rickenmann ist allerdings vom gesamten Einzugsgebiet und nicht von der bewaldeten Fläche ausgegangen.

Nimmt man nur das bewaldete Einzugsgebiet[2] (ca. 30%) und setzt a=100, so erhält man 165 000 Festmeter als potentielle Schwemmholzmenge. Setzt man wie Rickenmann die Fläche des Einzugsgebiet ein und nimmt a=50 (bei grossen EZG), so erhält man 265 000 Festmeter als absolute Obergrenze.

Eine Abschätzung der Schwemmholzmenge eines 10 000-jährigen Hochwassers gestaltet sich als schwierig. Es ist von einer effektiven Schwemmholzmenge zwischen 50 000 und 265 000 Festmetern auszugehen. Mit 180 000 Festmetern wird ein konservativer Mittelwert genommen. Das entspricht einem Lockervolumen von ca. 600 000 m³ Holz.

## 3.2 Anzahl der Bäume

Für die Verklausung sind nur die längeren Bäume von Bedeutung. Aus diesem Grund werden nur Bäume ab 8 m Länge betrachtet. Aus Abbildung 1 ist ersichtlich, dass Bäume über 8 m 33% des Volumens bei ungestörten Ablagerungen ausmachen. Die grösseren Bäume sind durchschnittlich 9.7 m lang und haben einen Durchmesser von ca. 0.4 m. Das ergibt ein durchschnittliches Baumvolumen von ca. 1.22 m³ (für alle langen Bäume wurde ein mittlerer Durchmesser angenommen). Es ist also von etwa 49 200 Bäumen grösser als 8 Meter auszugehen.

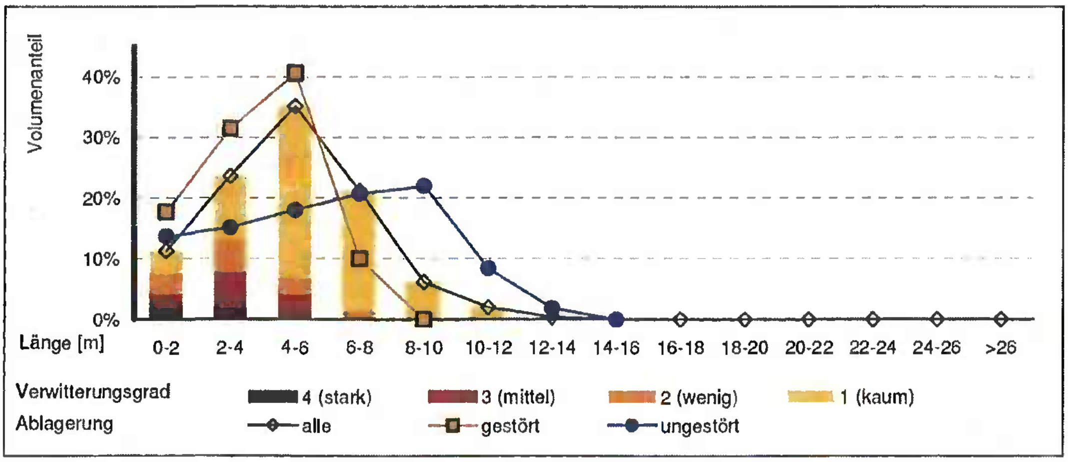


**Abbildung 1 Längenverteilung der Schwemmholzstücke nach dem Hochwasser 2005 [9]**

[2] Laut BAFU sind die Alpen zu 26%, die Voralpen zu 34% und das Mittelland zu 25% bewaldet.

### 3.3 Wahrscheinlichkeitsverteilung der Holzlänge

Abbildung 1 zeigt den Volumenanteil für jede Längenkategorie. Ab 8–10 m fällt der Volumenanteil sehr stark. Ausgehend von einem konstanten Durchmesser für längere Bäume wird der Volumenanteil in einen Mengenanteil umgerechnet.

**Tabelle 1 Längenverteilung der Schwemmholzstücke**

| Länge [m] | Volumenanteil (alle Bäume) | Volumenanteil (Bäume >8m) | Mengenanteil (alle Bäume) | Mengenanteil (Bäume >8m) |
|---|---|---|---|---|
| 8–10 | 0.22 | 0.66 | 0.09 | 0.71 |
| 10–12 | 0.09 | 0.27 | 0.03 | 0.24 |
| 12–14 | 0.02 | 0.06 | 0.005 | 0.045 |
| 14–16 | 0.0025 | 0.01 | 0.001 | 0.005 |

Tabelle 1 zeigt diese Verteilung auf. Der Mengenanteil fällt noch sehr viel stärker ab, da längere Bäume ein grösseres Volumen haben. Um die Wahrscheinlichkeit von noch längeren Bäumen zu berechnen, wird für Holzstücke ab 8 m eine exponentielle Verteilung angenommen. Die zwei grossen Vorteile der Exponentialverteilung sind ihre einfache Handhabung und die wenigen Stichproben, die zur Bestimmung des Parameters λ notwendig sind.

Aus den Daten von Tabelle 1 wird eine um 8 Meter verschobene Exponentialverteilung mit λ=0.8 hergeleitet:

$$P_{Baumlänge}(x) = 0.8 \cdot e^{-0.8 \cdot (x-8)} \tag{4}$$

Diese Verteilung ist für längere Bäume konservativ, da vor allem die Anzahl der Bäume mit einer Länger grösser als 14 m überbewertet wird.

**Tabelle 2 Anzahl sehr langer Holzstücke**

| Länge [m] | Anteil nach Exponentialverteilung [%] | Anzahl Holzstücke |
|---|---|---|
| 18–20 | 0.0268 | 13.2 |
| 20–22 | 0.0054 | 2.66 |
| 22–25 | 0.0012 | 0.61 |
| 25+ | 0.0001 | 0.06 |

Tabelle 2 zeigt die Verteilung sehr langer Schwemmholzstücke auf. Im Bereich von 20 m sind noch einzelne Stücke zu erwarten. Bäume mit mehr als 25 m Länge sind jedoch extrem unwahrscheinlich, beispielsweise beträgt die Wahrscheinlichkeit für Bäume mit einer Länge grösser 35 m weniger als 5.0E-10.

## 3.4 Rückhaltung

Das ganze Einzugsgebiet der Aare und somit auch das potentielle Schwemmholz liegen über die halbe Schweiz verteilt. Zum Teil hat ein Stück Schwemmholz 100 km im Fluss zurückzulegen, ehe es in Beznau ankommt. Dazwischen befinden sich zahlreiche Künstliche (z.B. Brücken, Wehre) und natürliche Hindernisse (z.B. Seen, Flusslauf). Es ist daher anzunehmen, dass nur ein Bruchteil des gesamten Schwemmholzes Beznau erreicht.

Daher wird das Einzugsgebiet in drei Teile aufgegliedert. Die letzten 2.5% des Einzugsgebiets vor Beznau haben keinen Rückhalt mehr. Weitere 25% haben einige Rückhaltungsmöglichkeiten, wie Brücken und Wehre. Die restlichen 72.5% haben sehr viele Rückhaltungsmöglichkeiten, wie zum Beispiel der Zürichsee, Bielersee oder den Thunersee. Dazu kommen noch zahlreichen Bauten.

Um die Rückhaltung zu quantifizieren wird auf Beobachtungen des Hochwasserereignis 2005 zurückgegriffen. Zumsteg [14] hat für das Baudepartement des Kantons Aargau das Hochwassermanagement im Reusstal analysiert. In Abbildung 2 ist qualitativ gut zu sehen, dass an bestimmten Wehren viel Schwemmholz zurückgehalten wird.

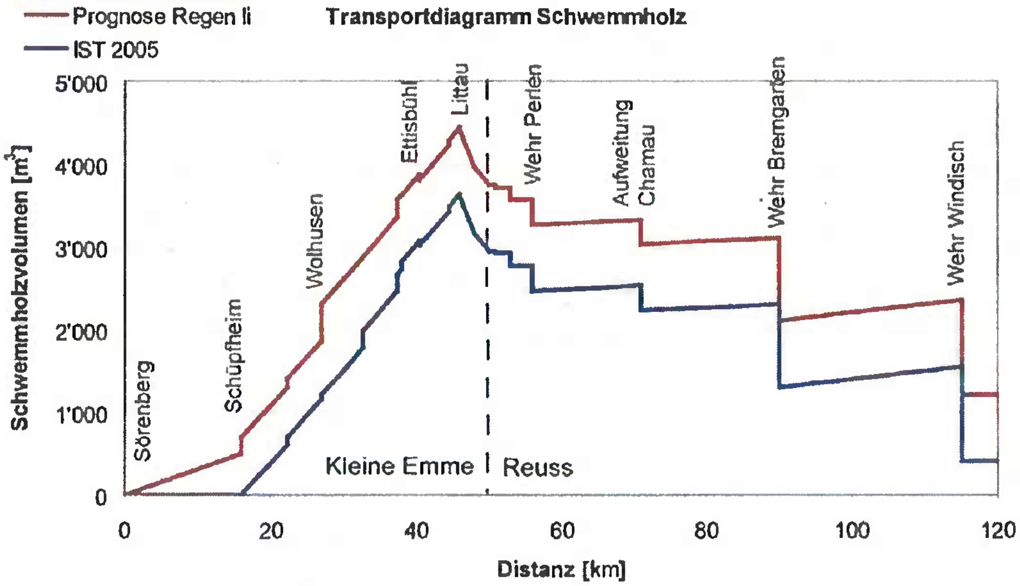


**Abbildung 2 Transport und Rückhaltung von Schwemmholz [14]**

Später im Dokument wird die Rückhalteeffizienz von Wehren im allgemeinen Bereich von 50–80% beziffert. Es ist anzunehmen, dass längere Holzstücke eher hängenbleiben, als kürzere, daher ist die Rückhaltewahrscheinlichkeit abhängig von der Länge. Eine Rückhaltung ist nicht unbedingt mit einer Verklausung gleichzusetzen, es ist entscheidend, ob der Fliessquerschnitt durch die zurückgehaltenen Holzstücke vermindert wird.

Für die untersten 2.5% des EZG wird der Rückhaltungsfaktor auf null gesetzt. Für die mittleren 25% des Einzugsgebiets wird eine Rückhaltewahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von der Baumlänge angenommen:

$$P_{Rückhalt.}(EZG2) = 1 - {}^{2.5}\!/_{L_{Holz}} \qquad (5)$$

| | |
|---|---|
| $L_{Holz}$ | Länge des Schwemmholzstücks [m] |
| EZG2 | Einzugsgebiet mit vereinzelten Rückhaltemöglichkeiten (25% von EZG) [$km^2$] |

Ein 5 m langes Holzstück wird laut Formel (5) zu 50% zurückgehalten, ein 10 m Holzstück zu 75%.

Für das restliche Einzugsgebiet wird eine grössere Rückhaltung angenommen:

$$P_{Rückhalt}(EZG3) = 1 - 1.25 / L_{Holz} \qquad (6)$$

EZG3 Einzugsgebiet mit vielen Rückhaltemöglichkeiten (72.5% von EZG) [$km^2$]

## 3.5 Verklausungswahrscheinlichkeit am Wehr Beznau

Schwemmholzstücke, die in Beznau ankommen, können beim Wehr Beznau hängen bleiben. Aus der Studie von Hartlieb [12] wurde folgende lineare Abhängigkeit zwischen Baumlänge, Wehrbreite und Verklausungswahrscheinlichkeit abgeleitet:

$$P_{Verkl.Baum} = 0.00625 + 0.75 \cdot \left( L_{Holz} / B_{Wehr} - 1 \right) \qquad \text{für } L_{Holz} \geq B_{Wehr} \qquad (7)$$

$$P_{Verkl.Baum} = 0.00625 \qquad \text{für } 0.9\,B_{Wehr} \leq L_{Holz} \leq B_{Wehr} \qquad (8)$$

$B_{Wehr}$ Breite einer Wehrschütze in Beznau (20.5 m)

Laut Hartlieb [12] ist für Bäume kleiner als die Wehrbreite, die Verklausungswahrscheinlichkeit vernachlässigbar. Aufgrund der kleinen Stichprobengrösse wurde eine Nullwertstatistik nach [21] durchgeführt. Es ergab sich ein oberer Grenzwert von 0.0125. Der Mittelwert beträgt somit 0.00625.

Die Versuche für diese Korrelationsbestimmung wurden mit steifen Fichten mit wenigen und kurzen Ästen durchgeführt. Weitere Versuche zeigten, dass biegsameres Holz wesentlich weniger hängen bleibt. Im Gegensatz dazu führen viele lange Äste zu einer erhöhten Verklausungswahrscheinlichkeit.

In Beznau ist eine Mischung von altem, steifem und jungem, biegsamem Holz zu erwarten. Weiter wird Grünholz während dem Transport in Wildbächen schnell entastet und geschält [15]. In Flüssen im Flachland geht das Entasten langsamer vor sich.

Die Versuche von Hartlieb [12] wurden bei anderen hydrodynamischen Bedingungen durchgeführt, als sie beim Wehr in Beznau vorherrschen. Hartlieb variierte die Froudezahl von 0.1–0.35. Bei Hochwasser in Beznau liegt die Froudezahl beim Wehrdurchfluss im Bereich von 0.8. Hierbei ist der entstehende hydrodynamische Druck, der Bäume bis zu einem Durchmesser von 0.55 m brechen kann[3] nicht zu unterschätzen.

[3] Der Druck im offenen Wehrschütz beträgt: $½*(6[m/s])^2*1000[kg/m^3]=18[kN/m^2]$. Ein zwischen zwei hydrodynamischen Wehrpfeilern eingeklemmter Baum wird als Quader mit quadratischem Grundriss von 55 cm Breite modelliert. Es wirkt auf ihn eine Linienkraft von $18[kN/m^2]/0.55[m]=33[kN/m]$ über eine Länge von 20.5 Meter. Das maximale Biegemoment beträgt $1.72*10^6$ Nm. Teilt man dieses Moment durch das Widerstandsmoment ($d*h^2/6 \rightarrow (0.55[m])^3/6=0.028m^3$), so resultiert daraus eine Druckspannung von $62*10^6\ N/m^2$. Die einheimischen Holzarten wie Fichte, Lärche, Buche, Birke oder Eiche haben allesamt eine Druckfestigkeit unter $60*10^6\ N/m^2$. Die Aufenthaltsdauer im Wasser hat zudem mindernde Wirkung auf die Druckfestigkeit [16].

### 3.6 Verklausung über die gesamte Querschnittsfläche

Zwischen dem Hängenbleiben eines einzelnen Baumes und einer vollständigen Verklausung über die gesamte Querschnittsfläche, wie sie in den relevanten Überflutungsszenarien der Beznau-Insel angenommen wurden [4], besteht ein sehr grosser Unterschied. Zwar nimmt die Wahrscheinlichkeit sehr stark zu, dass Schwemmholz am Wehr hängenbleibt, wenn ein blockierter Baum den Durchflussquerschnitt einschränkt. Allerdings steigt auch der hydrostatische Druck auf den Baumstamm und er bricht möglicherweise entzwei. Eine nummerische Aussage ist sehr schwierig. Es wird angenommen, dass in 10% der Fälle eine Verklausung über die ganze Querschnittsfläche resultiert.

### 3.7 Einfluss eines Schwemmholzteppichs

Die Verklausungswahrscheinlichkeit steigt stark an, wenn anstatt einzelne Hölzer eine Gruppe von Schwemmholzstücken (=Schwemmholzteppich) gleichzeitig beim Hindernis auftreffen. Der Versuch von Hartlieb [12] wurde mit fünf Hölzern als eine Art "Miniatur-Schwemmholzteppich" durchgeführt. In der Realität sind natürlich noch viel grössere Schwemmholteppiche zu erwarten. Die Erhöhung eines Schwemmholzteppichs auf die Verklausungswahrscheinlichkeit ist schwierig zu quantifizieren. Als konservativer Schätzwert wird ein Faktor 10 angenommen.

Schwemmholzteppiche sind generell bei tiefen Fliessgeschwindigkeiten (Seen) anzutreffen. Bei einem Hochwasser beträgt die Fliessgeschwindigkeit in der Aare vor Beznau ungefähr 4 m/s. Eine Ankunft eines grossen kompakten Schwemmholzteppichs ist daher unwahrscheinlich. Die Datenvariable UNPRBL (=0.1) aus der BERA 2009 [20] wird für solche Ereignisse eingesetzt.

## 4 Resultate

Tabelle 3 fasst die Resultate aus Kapitel 3 zusammen.

**Tabelle 3 Zusammenfassung der Resultate aus Kapitel 3**

| **Parameter** | **Wert** |
|---|---|
| Schwemmholzmenge | 180 000 Festmeter |
| Anzahl Bäume mit Länge > 8 m | 49180 |
| Wahrscheinlichkeitsverteilung der Baumlänge | $0.8 \cdot e^{-0.8 \cdot (x-8)}$ |
| Rückhaltewahrscheinlichkeit | 0 (EZG nahe Beznau)<br>$1-2.5/L_{Holz}$ (EZG Mitteland)<br>$1-1.25/L_{Holz}$ (EZG Alpen) |
| Verklausungswahrscheinlichkeit Einzelstamm | $0.00625+0.75 \cdot (L_{Holz}/B_{Wehr}-1)$ für $L_{Holz} \geq B_{Wehr}$<br>0.00625 für $0.9B_{Wehr} \leq L_{Holz} \leq B_{Wehr}$<br>0 sonst |
| Faktor vollständige Verklausung | 0.1 |
| Faktor Schwemmholzteppich | 10 |
| Wahrscheinlichkeit Schwemmholzteppich | 0.1 |

Aus dem Integral (2) aus Kapitel 3, entstehen also insgesamt sechs Teilintegrale für drei Einzugsgebiete und zwei Längenklassen bei der Verklausungswahrscheinlichkeit, zusammenfassend dargestellt in Formel (9):

$$49180 \cdot 0.1 \cdot (0.1 \cdot 10 + 0.9) \cdot \int_a^b 0.8 \cdot e^{-0.8 \cdot (x-8)} \cdot \begin{pmatrix} 0.025 \cdot 1 \\ 0.25 \cdot 2.5/x \\ 0.725 \cdot 1.25/x \end{pmatrix} \cdot \left( \frac{0.00625}{0.00625 + 0.75 \cdot \left( x/_{20.5} - 1 \right)} \right) dx \tag{9}$$

$$9344.2 \cdot \int_{18.45}^{20.5} 0.8 \cdot e^{-0.8 \cdot (x-8)} \cdot 0.025 \cdot 0.00625 dx = 0.000275 \tag{10}$$

$$9344.2 \cdot \int_{18.45}^{20.5} 0.8 \cdot e^{-0.8 \cdot (x-8)} \cdot 0.25 \cdot 2.5/_x \cdot 0.00625 dx = 0.000359 \tag{11}$$

$$9344.2 \cdot \int_{18.45}^{20.5} 0.8 \cdot e^{-0.8 \cdot (x-8)} \cdot 0.725 \cdot 1.25/_x \cdot 0.00625 dx = 0.000520 \tag{12}$$

$$9344.2 \cdot \int_{20.5}^{\infty} 0.8 \cdot e^{-0.8 \cdot (x-8)} \cdot 0.025 \cdot \left(0.00625 + 0.75 \cdot \left(x/_{20.5} - 1\right)\right) dx = 0.000551 \tag{13}$$

$$9344.2 \cdot \int_{20.5}^{\infty} 0.8 \cdot e^{-0.8 \cdot (x-8)} \cdot 0.25 \cdot 2.5/_x \cdot \left(0.00625 + 0.75 \cdot \left(x/_{20.5} - 1\right)\right) dx = 0.000606 \tag{14}$$

$$9344.2 \cdot \int_{20.5}^{\infty} 0.8 \cdot e^{-0.8 \cdot (x-8)} \cdot 0.725 \cdot 1.25/_x \cdot \left(0.00625 + 0.75 \cdot \left(x/_{20.5} - 1\right)\right) dx = 0.000879 \tag{15}$$

Die einzelnen Integrale zusammen (10-15) ergeben eine Wahrscheinlichkeit von 3.19E-03. Das ist jedoch nur die Wahrscheinlichkeit für eine vollständige Verklausung einer Wehröffnung. Die Überflutungsszenarien in denen mit Verklausung gerechnet wurde, gehen immer von einer vollständigen Verklausung aller fünf Wehrschützen aus. Um von einer verklausten Öffnung auf fünf verklauste Öffnungen zu kommen, wird ein vereinfachtes Common Cause Modell verwendet. Eine zweite Öffnung fällt mit dem Faktor 10 häufiger aus als die erste und eine Dritte mit dem Faktor 100. Sind drei Öffnungen verklaust, wird das ganze Wehr als verklaust angenommen.

Somit ist die Verklausungswahrscheinlichkeit bei einem 10 000 jährigen Hochwasser am Wehr Beznau:

$$(3.19E-03) \cdot 10 \cdot (3.19E-03) \cdot 100 \cdot (3.19E-03) = 1000 \cdot (3.19E-03)^3 = 3.25E-05 \tag{16}$$

Die errechnete Verklausungswahrscheinlichkeit (16) erscheint auf den ersten Blick sehr tief. Allerdings ist dabei zu beachten, dass dieser Wert die vollständige Verklausung des gesamten Wehrs beschreibt. Ausserdem entspricht das Wehr mit seiner Schützbreite von 20.5 m hervorragend den konstruktiven Regeln zur Vermeidung von Verklausungen. Der Vergleich mit vergangenen Hochwasserereignissen zeigt auf, dass beim Wehr Beznau noch nie Ansätze einer Verklausung vorkamen. Dabei führten die Hochwasser 2005 und 2007 beträchtliche Mengen an Schwemmholz mit.

## 5 Zusammenfassung

In Abhängigkeit von der Grösse des Einzugsgebiets wird die effektive Schwemmholzmenge festgelegt. Anhand von Daten aus einem vergangenen Hochwasserereignis wird daraus die Längenverteilung der Schwemmholzstücke berechnet. Ein Schwemmholzstück hat je nach Länge eine Wahrscheinlichkeit bereits vor Beznau zurückgehalten zu werden und, falls es in Beznau ankommt, am Wehr Beznau hängen zu bleiben. Ein eingeklemmtes Holzstück ist jedoch noch keine vollständige Verklausung der Wehröffnung. Es wird angenommen, dass sich in 10% der Fälle aus einem hängengebliebenen Baum eine vollständige Verklausung entwickelt.

Eine einzelne Wehröffnung verklaust mit einer Wahrscheinlichkeit von 3.19E-03 pro Hochwasserereignis mit einem Aareabfluss von 4200 $m^3/s$. Das gesamte Wehr hat eine Verklausungswahrscheinlichkeit von 3.25E-05 pro Hochwasserereignis. Mit der Eintrittswahrscheinlichkeit für das 10 000 jährliche Hochwasser ergibt sich eine Gesamtwahrscheinlichkeit einer vollständigen Verklausung von 3.25E-09 pro Jahr. Gemäss [3] werden aber selbst bei diesem extrem unwahrscheinlichen Ereignis die zulässigen Wasserhöhen der deterministischen Auslegung nicht überschritten.

Die vorliegende Arbeit zeigt eine Best-Estimate Modellierung der Verklausungswahrscheinlichkeit, wobei möglichst wirklichkeitsnahe Grössen verwendet wurden. In einzelnen Fällen wurden jedoch auch konservative Annahmen getroffen.

## 6 Literatur

[1] ENSI: Verfügung: Massnahmen aufgrund der Ereignisse in Fukushima. Brugg: 18. März 2011

[2] KKB 211D0054: TK-Consult AG: Verklausung des Wehres bei HQ10'000. Zürich, Oktober 2011

[3] KKB 211D0058: TK-Consult AG: Ermittlung der maximalen Überflutungshöhe der Beznau-Insel unter Berücksichtigung von Geschiebetransport. Zürich, Juli 2012

[4] KKB 211D0059: TK-Consult AG: Ermittlung der maximalen Überflutungshöhe der Beznau-Insel nach Bruch des Sihlsees. Zürich, Dezember 2012

[5] Rissler, Peter (1998) Talsperrenpraxis. Oldenbourg, ISBN 3-486-26428-1

[6] Kienholz, H., Zeilstra, P., Hollenstein K. Definitionen Naturgefahren. Buwal, Eidg. Forstdirektion, September 1998, Bern

[7] Bundesamt für Wasserwirtschaft BWW, Bundesamt für. Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL, Landeshydrologie und -geologie LHG, 1991: Ursachenanalyse der Hochwasser 1987: Ergebnisse der Untersuchungen. Mitteilungen des Bundesamtes für Wasserwirtschaft, 4; Mitteilungen der Landeshydrologie und -geologie, 14, Bern.

[8] Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bundesamt für Energie BFE, Sektion Talsperren, SICHERHEIT DER STAUANLAGEN, BASISDOKUMENT ZUM NACHWEIS DER HOCHWASSERSICHERHEIT, Juni 2008

[9] Schlussberichts des WSL-Teilprojekts Schwemmholz der Ereignisanalyse BAFU/WSL des Hochwassers 2005, P. Waldner et al.

[10] Die Hochwasser 1993 im Wallis und im Tessin, Mitteilung Nr. 19, BUWAL, Bern (1994)

[11] Rickenmann, D. (1997): Schwemmholz und Hochwasser, in: Wasser, Energie, Luft, 89. Jahrgang, Heft 5/6, Baden, Seiten 115–119

[12] Hartlieb, A., Modellversuche zur Verklausung von Hochwasserentlastungsanlagen mit Schwemmholz, Wasserwirtschaft 6/2012, Seiten 15-19

[13] Hydrologische Daten des BAFU, Stationsinfo Klingnau

[14] Zumsteg, M., Hochwassermanagement im Reusstal, Departement Bau, Verkehr und Umwelt des Kantons Aargau. (2007)

[15] Hübl, J. et al., Präventive Strategien für das Wildholzrisiko in Wildbächen, Departement für Bautechnik und Naturgefahren Universität Wien.

[16] Neuhaus, H. (2009), Ingenieurholzbau. Vieweg+Teuber in Wiesbaden ISBN 978-3-519-12248-4

[17] Uchioga et al. (1996), Design methods for wood-debris entrapment. Intern. Symp. Interpraevent, Garmisch-Partenkirchen, Tagungspublikation Band 5, S. 279–288

[18] ENSI Schreiben vom 20. Februar 2013. Probabilistische Hochwassergefährdung durch Versagen von wasserbaulichen Einrichtungen

[19] Boes, R. (2011) Wasserbau, Übung Konstruktionsbeispiele Wehr und Tosbecken, ETHZ Zürich.

[20] KKB 511D0127, "Full Power Probabilistic Risk Assessment (BERA)", October 2009

[21] Noel van Erp, Pieter van Gelder: How to Interpret the Beta Distribution in Case of a Breakdown. Graubner, Schmidt & Proske: Proceedings of the 6th International Probabilistic Workshop, Darmstadt 2008, Page 341–348