

Technische Mitteilung

TM-211-RN13091

Titel : Verklausungswahrscheinlichkeit für die
Oberwasserkanalbrücke und Zunahme des
Wasserpegels bei Vollverklausung

Block : 1+2
Anzahl Seiten : 27

Sachgebiet: Externes Hochwasser

Verfasser : [REDACTED]

Erst. Datum : 11.12.2013

Verteiler : [REDACTED] [REDACTED]
[REDACTED] ENSI [REDACTED]

nicht öffentlich

	Name	Unterschrift	Datum
Erstellt	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]
Geprüft	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]
Genehmigt	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]

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
11.12.2013	0	Erstausgabe	alle	

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1 Einleitung	4
2 Begriffe	4
3 Konstruktive Regeln für die Vermeidung von Verklausungen an Brücken	6
4 Oberwasserkanalbrücke	7
5 Verklausung der Brücke	11
6 Zusammenfassung	21
7 Referenzen	24

1 Einleitung

Im Schreiben vom 26. März 2013 [1] fordert das ENSI das KKB auf, eine vollständige Verklausung der Brücke über den Oberwasserkanal in den Überflutungsberechnungen des Kraftwerkes zu berücksichtigen. Im Rahmen dieser Technischen Mitteilung (TM) wird die Wahrscheinlichkeit eines solchen Ereignisses bewertet und die infolge der Verklausung der Brücke entstehende Wasserhöhe auf dem Gelände des Werkes bestimmt. Es erfolgt keine vollständig neue Überflutungsberechnung basierend auf dem spezifischen Geländemodell. Vielmehr wird der behinderte Abfluss auf die Wasserhöhe aufaddiert. Dieses Vorgehen erscheint sinnvoll, da die Annahme einer vollständigen Verklausung des Wehres Beznau bzw. der Oberwasserkanalbrücke eine Vielzahl weiterer Annahmen beinhaltet, die die Genauigkeit einer Berechnung mittels spezifischen Geländemodells und zweidimensionaler Abflussbedingungen erheblich einschränken.

Die TM ist wie folgt aufgebaut. Zunächst wird der Begriff Verklausung erläutert. Anschliessend werden konstruktive Regeln zur Vermeidung von Verklausungen an Brücken vorgestellt. Im nächsten Abschnitt werden der Aufbau und die Lage der Oberwasserkanalbrücke beschrieben. Desweiteren wird die Fliessbehinderung der Brücke ohne Berücksichtigung einer Verklausung ermittelt, während im anschliessenden Abschnitt sowohl die Verklausungswahrscheinlichkeit als auch die Wasserstandhöhe auf dem Werksgelände bei Verklausung bestimmt wird. In diesem Abschnitt werden auch die Möglichkeiten von Verklausungen an der REFUNA-Brücke und am Werkszaun diskutiert. Den Abschluss der TM bildet eine Zusammenfassung.

2 Begriffe

Unter Verklausung wird im Allgemeinen der teilweise oder vollständige Verschluss eines Fliessgewässerquerschnittes infolge angeschwemmten Treibgutes verstanden [2]. Weitere Definitionen finden sich in zahlreichen Veröffentlichungen, siehe z.B. [3], [4], [5], [6].

Verklausungserscheinungen werden seit mindestens 150 Jahren dokumentiert, wobei nicht alle natürlich-induzierten Verklausungen in Zusammenhang mit Schwemmgut, sondern auch mit Steinschlägen, Muren oder Lawinen stehen [7]. Bei grossen Wasserflächen kann Totholz auch durch Windwurf eingetragen werden [4]. Teilweise wurden Verklausungen durch das Flössen von Holz künstlich verursacht [54].

Bild 1 zeigt zwei Beispiele für Verklausungen an Wehren. Die Möglichkeit der Verklausung des Wehres Beznau wurde bereits in der TM-211-RN11027 [8] diskutiert. Die Wahrscheinlichkeit für eine solche Verklausung des Wehres wurde in TM-211-RN13020 [9] quantifiziert. Insgesamt ist die Wahrscheinlichkeit für eine Vollverklausung des Wehres sehr gering.

Neben den gezeigten Verklausungen von Wehren ist häufig auch die Verklausung von Brücken Diskussionsgegenstand. Verklausungen können erhebliche Schäden an Brücken verursachen (Bild 2), wobei Horizontalkräfte auf Brücken auch für andere Naturgefahren berücksichtigt werden müssen [12].



Verklauung an der 72 m Bogen-Gewichtsstaumauer Palagnedra, 7. August 1978, 25 000 m³ Schwemmholz (Einzugsgebiet 138 km²), Verstopfung Hochwasserentlastung, Erosion der Widerlager [10]

Verklauung am Wehr des Kraftwerkes Perlen/Buchrain, LU im August 2005 [11]

Bild 1: Beispiele von Wehrverklauungen



Verklauung an der Staatsstrasse in Hintereggerbach, Österreich [13]

Brücke im Mündungsbereich des Schächen, Schweiz, beim Hochwasserereignis im Jahr 1977 [43]

Bild 2: Beispiele von Verklauungen an Brücken

Insbesondere im Rahmen der Verklauungsereignisse beim Hochwasser 2005 wurden ab 2008 verschiedene Forschungsprojekte in der Schweiz zum besseren Verständnis der Verklauungsmechanismen und -wahrscheinlichkeiten gestartet. Ein Überblick dazu findet sich bei Strasser [14]. Massgeblich für die Studie zur Abschätzung der Verklauungswahrscheinlichkeit des Wehres Beznau waren die Arbeiten von Hartlieb [15]. Daneben werden in dieser TM auch Ergebnisse der Versuche zur Verklauung von Brücken von Schmocker & Hager [35] verwendet.

Der Nachweis der Verklauungssicherheit kann über die direkte Ermittlung der Verklauungswahrscheinlichkeit eines Flussbauwerkes oder pauschal über die Einhaltung konstruktiver Regeln erfolgen. Diese Regeln werden im folgenden Abschnitt behandelt.

3 Konstruktive Regeln für die Vermeidung von Verklausungen an Brücken

Konstruktive Regeln zur Verklausungsvermeidung finden sich für Wehre mit Schützen beim BFE [16] und bei Rickenmann [17] mit 10 bis 15 m erforderlicher Mindestbreite der Wehre (weitere Regeln siehe [10]).

Brücken werden als verklausungsgefährdet angenommen, wenn das Freibordmass der Brücken (Abstand zwischen Wasserspiegel und mittlerer Höhe der Brückenunterkante, siehe Bild 3) weniger als 0.5 m beträgt [18], [19]. In [21] wird ein Mindestfreibord von einem Meter vorgeschlagen. Das BFE [16] empfiehlt eine lichte Durchflusshöhe bezogen auf den Wasserspiegel des Bemessungshochwassers von 1.5 m bis 2 m. In [20] werden folgende konstruktive Empfehlungen gegeben:

- günstig sind gewölbte Unterkonstruktionen mit höherem Brückenfreibord in der Flussmitte,
- möglichst keine Pfeiler im Abflussquerschnitt,
- ein Freibord von einem Meter,
- die Widerlager dürfen die Abflussbreite maximal um 20% einengen,
- Die Überflutungsbreite bei Hochwasser des Gerinnes sollte etwa der zweifachen zu erwartenden Stammlänge entsprechen,
- Die lichte Höhe einer Brücke sollte zumindest das 1.7-fache der massgebenden Abmessungen der zu erwartenden Wurzelstöcke betragen.

In [22] wird ebenfalls die Ausbildung gewölbter Unterkonstruktionen mit höherem Brückenfreibord in Flussmitte empfohlen. In [23] werden u.a. folgende Empfehlungen gegeben: "Die Sohlbreite des Gerinnes sollte etwa der zweifachen zu erwartenden Stammlänge entsprechen. Die lichte Höhe einer Brücke sollte mindestens das 1.7fache der massgebenden Abmessung der zu erwartenden Wurzelstöcke betragen."

Nach [24] kann der erforderliche Freibord berechnet werden:

$$F_{\min} \leq F_e = \sqrt{F_w^2 + F_v^2 + F_t^2} \leq F_{\max} \quad \text{mit}$$

F_e = erforderliches Freibord

F_{\min} = minimales Freibord = 0.5 m

F_{\max} = maximales Freibord = 1.5 m

F_w = erforderliches Freibord aufgrund von Unschärfen bei der Bestimmung der Wasserspiegellage

F_v = erforderliches Freibord aufgrund von Wellenbildung und Rückstau an Hindernissen

F_t = erforderliches Freibord aufgrund von zusätzlich benötigtem Abflussquerschnitt für Treibgut unter Brücken

Letztendlich werden auch hier ein minimaler Freibord von ca. 0.5 m und ein maximaler Freibord von 1.5 m vorgeschlagen. Im folgenden Abschnitt wird die Brückenkonstruktion vorgestellt und geprüft, inwieweit diese die konstruktiven Anforderungen erfüllt.

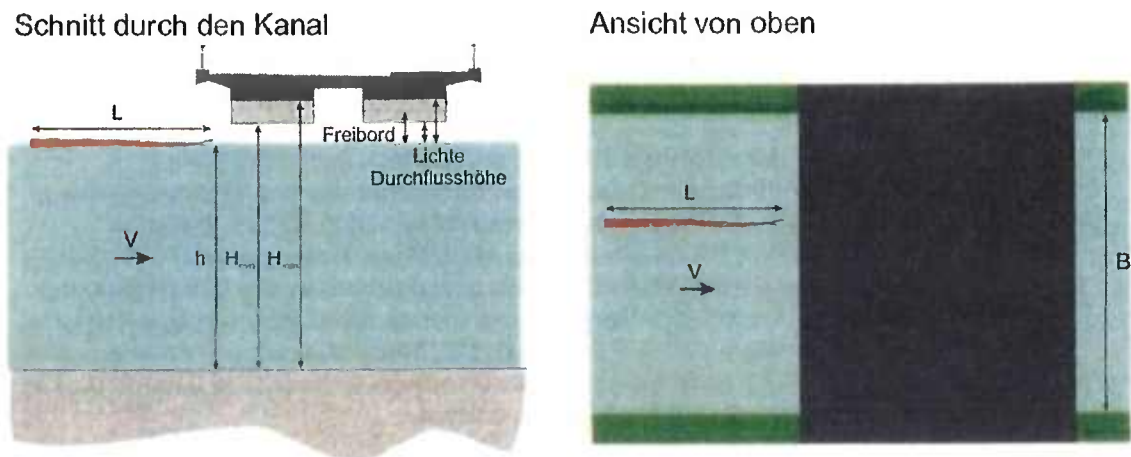


Bild 3: Bezeichnungen; Die Brücke besitzt einen Überbau mit über die Längsachse veränderlicher Höhe (Voutung), daher sind Teile des Überbaus im Schnitt dunkel- und hellgrau dargestellt. Der dunkelgraue Querschnitt befindet sich in Feldmitte, der hellgraue über den Pfeiler (Stützquerschnitt).

4 Oberwasserkanalbrücke

4.1 Konstruktion

Die neue Oberwasserkanalbrücke, für die eine Verkläuserung untersucht werden soll, wurde 1991 neu geplant. Sie befindet sich im Oberwasserkanal in Richtung Hydraulisches Kraftwerk Beznau (Bild 4). Bei der neuen Oberwasserkanalbrücke handelt es sich um eine dreifeldrige gevoutete Spannbetonbrücke [25]. Die Brücke quert den Oberwasserkanal in einem schiefen Winkel. Die lichte Spannweite der Brücke beträgt im Mittelfeld 44.90 m und an den Randfeldern 31.75 m [26] (Bild 5). Die Brücke wurde als zweistegiger Plattenbalken errichtet [27] (Bild 6). Die Brücke wurde gegen Erdbebeneinwirkungen Zone I, Bauwerksklasse 2 nachgewiesen [28]. Damit ist die Brücke auch gegen Horizontalkräfte ausgelegt. Ausserdem ist die Brücke für hohe Vertikallasten (Sondertransporte) ausgelegt [28].

Die Kanalsohle des Oberwasserkanals liegt bei 318.85 m ü. M. [26], wobei das Kanalprofil zu den Widerlagern hin ansteigt (Trapezförmig). Die planmässige Wasserspiegelhöhe im Oberwasserkanal liegt bei ca. 325.25 m ü. M. (6.4 m), die niedrigste Unterkante der Brücke bei 326.25 m ü. M. (7.4 m), die höchste Unterkante der Brücke bei 327.15 m ü. M. (8.3 m) und die Oberkante Fahrbahn bei 328.16 m ü. M. (9.3 m) in Feldmitte [27]. Die Brücke hat damit an den Pfeilern eine lichte Durchflusshöhe von 1 m und in Feldmitte eine lichte Durchflusshöhe von ca. 2 m. Der Freibord beträgt ca. 1.45 m. Die Brücke besitzt an der Oberseite ein Längsgefälle von ca. 1.5%. [26]. Damit liegt die Mitte der Brücke ca. 1.3 m über Oberkante Gelände, welches in diesem Bereich zwischen 326.6 und 327 m ü. M. liegt [29].

Mit dem genannten Freibord erfüllt die Brücke die im Abschnitt 3 genannten Forderungen zur Verkläuserungsfreiheit: die maximale lichte Durchflusshöhe liegt bei ca. 2.0 m, der mittlere Freibord bei 1.45 m, es gibt eine höhere lichte Durchflusshöhe in Flussmitte als am Rand, die Spannweite entspricht mehr als dem zweifachen der zu erwartenden Stammlänge von ca. 10 m und die Widerlager verringern die Breite des Abflussquerschnitts um nicht mehr als 20%. Die Annahme einer Stammlänge von 10 m basiert auf einer Studie zum Hochwasser 1987 [16]. Damals wurde beobachtet, dass Baumstämme in alpinen und voralpinen Gewässern durch den Transport relativ schnell auf 10 m Länge gekürzt werden. Die 10 m entsprechen nicht einem maximal möglichen Stamm.

Dadurch, dass der Wasserstand im Oberwasserkanal auch bei Hochwasser durch das Hydrokraftwerk kontrolliert wird, bleiben der Wasserstand und damit der Freibord auch bei Hochwassern bis zu einem gewissen Grade erhalten.

Auf der anderen Seite liegt der niedrigste Punkt des Überbaus der Brücke bei 326.25 m ü. M., also ca. einem Meter über der planmässigen Kote des Oberwasserkanals, aber unterhalb der Geländekote des Kraftwerkes von 327 m ü. M. Die Kote 326.25 m ü. M. wird entweder bei einem mehrtausendjährigen Hochwasser mit mindestens 3400 m³/s erreicht, wenn alle Wehrfelder offen sind oder bei einem 500 jährlichen Hochwasser mit 3000 m³/s, wenn ein Wehrfeld geschlossen bleibt [33]. Danach führt die Brücke als Abflussbehinderung zu einer Erhöhung des Wasserstandes auf der Insel. Bei 327.15 m ü. M. wird die Brücke über die gesamte Kanalbreite den Abfluss behindern. Diese Fließbehinderung wird im nächsten Absatz berechnet.

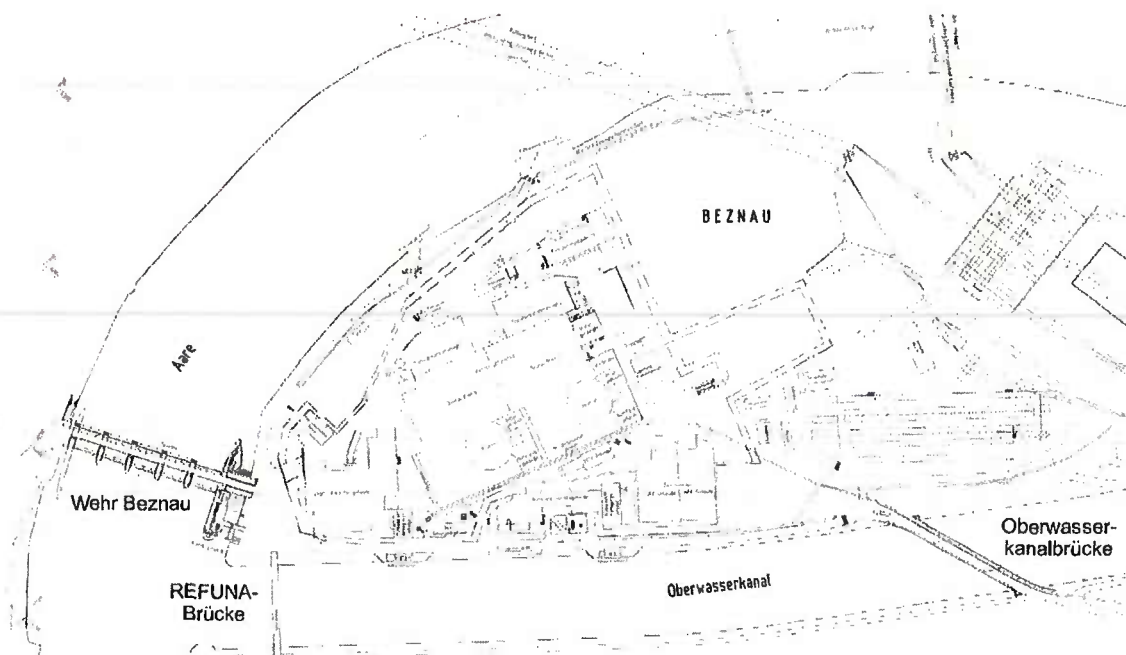


Bild 4: Lage der Oberwasserkanalbrücke (KKB230/0079)



Bild 5: Ansicht Oberwasserkanalbrücke (Blick von Oberstrom)

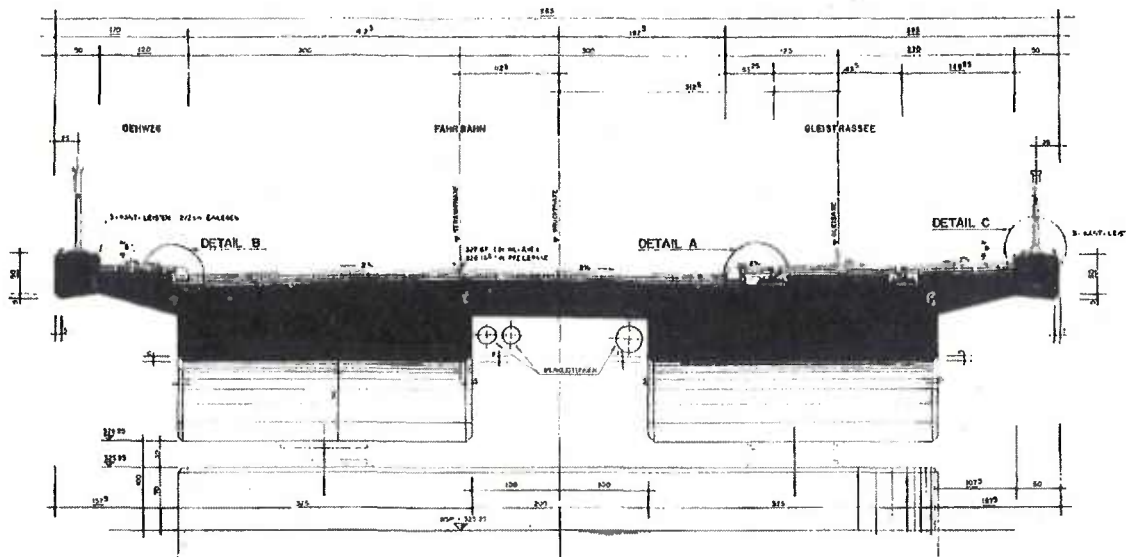


Bild 6: Querschnitt der Oberwasserkanalbrücke [27]

4.2 Mögliche Fließbehinderung durch die Brücke

Gemäss Bild 7 liegt die maximale mittlere Fließgeschwindigkeit im Oberwasserkanal beim 10 000 jährlichen Hochwasser ohne Geschiebe und Verkläuerung bei 0.50 m/s (Beilage 29 [30]). Es wird vereinfachend angenommen, dass diese Fließgeschwindigkeit auch für Hochwasser mit einer geringeren Wiederkehrperiode gültig ist. Die maximale Fließgeschwindigkeit bezieht sich auf den zeitlichen Ablauf des Hochwassers. Sie ist über die Höhe gemittelt und entspricht etwa der Fließgeschwindigkeit bei 2/3 Wassertiefe. Grundsätzlich wird eine laminare Gerinneströmung mit parabolischer Geschwindigkeitsverteilung über die Höhe angenommen.

$Q=4200 \text{ m}^3/\text{s}$, 1 Wehröffnung geschlossen

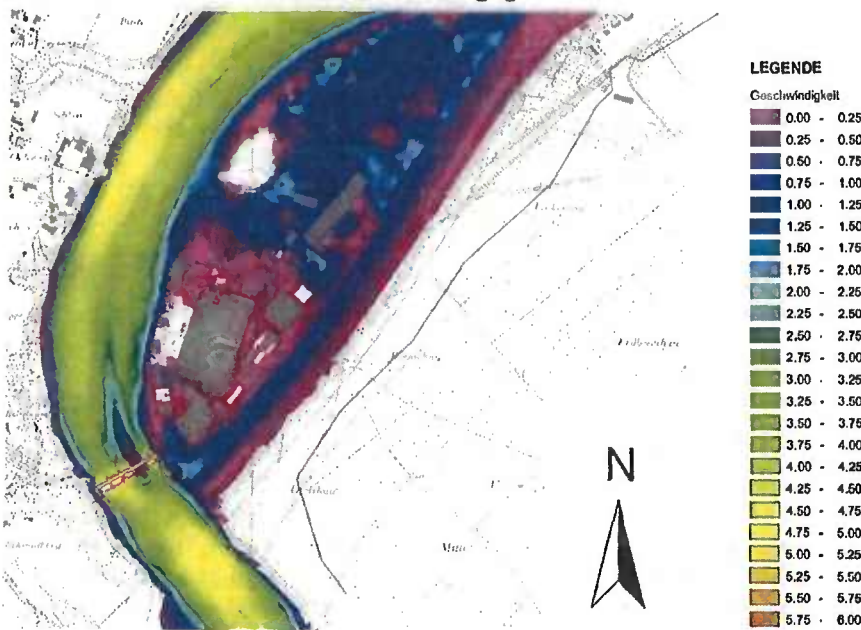


Bild 7: Fließgeschwindigkeit im Oberwasserkanal beim 10 000 jährlichen Hochwasser ohne Verkläuerung und Geschiebe [30]

Der Abflussquerschnitt ergibt sich gemäss Zeichnung KKB225/0003 [44] und KKB225/0004 [26]. Die lichte Kanalbreite beträgt ca. 66 m. Allerdings ist der Kanal trapezförmig, so dass die Sohle links und rechts ca. 12 m eingerückt ist.

Wird ein 1 000-jährliches Hochwasser mit 3 200 m³/s angesetzt (1 Wehr geschlossen), so ergibt sich eine Abflusstiefe im Oberwasserkanal von 326.60 m ü. M. [33] - 318.85 m ü. M. [26] = 7.75 m. Bei einer Kanaltiefe von 7.75 m ergibt sich ein Abflussquerschnitt von $7.75 \times (66 + 66 - 2 \times 12)/2 = 418.5 \text{ m}^2$. Mit einer Fliessgeschwindigkeit von 0.5 m/s [30] entspricht dieser Querschnitt einem Durchfluss von $418.5 \text{ m}^2 \times 0.5 \text{ m/s} = 209.25 \text{ m}^3/\text{s}$. Bei 7.75 m Höhe Wasserstand (326.60 m ü. M.) gibt es überschlägig einen Einschnitt in den Abflussquerschnitt durch die Brücke von $50 \text{ m} \times 0.35 = 17.5 \text{ m}^2$ (siehe [44] und [26]). $17.5 \text{ m}^2 \times 0.5 \text{ m/s}$ entsprechen 8.75 m³/s. Das Wasser fliesst mit einer Breite von ca. 165 m mit ca. 0.5 m/s über das Werksgelände. Damit ergibt sich: $8.75 \text{ m}^3/\text{s}/165 \text{ m}/0.5 \text{ m/s} = 0.11 \text{ m}$. Das entspricht einer Wassererhöhung von 0.11 m auf dem Gelände des KKB.

Bei ca. 8.5 m Kanaltiefe ergibt sich ein Abflussquerschnitt von ca. $8.5 \times (66 + 66 - 2 \times 12)/2 = 459 \text{ m}^2$. 8.5 m Kanaltiefe entsprechen etwa einer Kote von 327.35 m ü. M. (10 000 jährliches Hochwasser [55]). Mit einer Fliessgeschwindigkeit von 0.5 m/s entspricht dieser Querschnitt einem Durchfluss von $459 \text{ m}^2 \times 0.5 \text{ m/s} = 229.5 \text{ m}^3/\text{s}$. Bei 8.5 m Höhe Wasserstand gibt es einen Einschnitt in den Abflussquerschnitt durch die Brücke von ca. 60 m^2 (siehe [44] und [26]). Damit ergibt sich ein verringerter Abfluss von $0.5 \text{ m/s} \times 60 \text{ m}^2 = 30 \text{ m}^3/\text{s}$. Das Wasser fliesst wiederum mit einer Breite von ca. 165 m über das Werksgelände. Über diese Breite wird eine zusätzliche mittlere Wasserhöhe von $30 \text{ m}^3/\text{s}/165 \text{ m}/0.5 \text{ m/s} = 0.36 \text{ m}$ abgeschätzt (siehe Trösch Consult, Bericht TKC1618, Bericht Beilage 5 [55]).

Bei einem 10 000 jährlichen Hochwasser mit 4 200 m³/s ohne Geschiebe und Verkläuerung und ohne Berücksichtigung des Abflusswiderstandes der Oberwasserkanalbrücke wird auf dem Werksgelände eine Wasserhöhe von ca. 0.30 m erreicht. Diese Höhe muss aber noch um ca. 0.36 m auf ca. 0.66 m erhöht werden, da ab 327.15 m ü. M. die Oberwasserkanalbrücke über die gesamte Länge Wasser zurückstaut.

Tabelle 1: Rückstau durch die Oberwasserkanalbrücke (Wiederkehrperiode unter der Annahme, dass ein Wehrfeld geschlossen bleibt)

Wiederkehrperiode	Abfluss m ³ /s	Wasserhöhe ohne Rückstau in m ü. M.	Bemerkung	Rückstau Brücke in m	Hochwasser KKB Gelände in m	Gesamt in m
20 Jahre	bis 2200	325.2		0.00	0.00	
500 Jahre	3000	326.2	UK Brücke	0.00	0.00	
		326.6		0.11	0.00	0.00
10 000 Jahre	3800	327.0		0.25	0.00	0.25
10 000 Jahre		327.1	Stau gesamte Länge	0.28	0.13	0.40
10 000 Jahre	4200	327.3	Zaun	0.36	0.30	0.66
		328.2	UK REFUNA-Brücke	0.66	1.20	1.86
10 000 Jahre & Verkläuerung (< 1.5 ⁸ /Jahr)	4200	328.7		0.66	1.65	2.21

Auf der anderen Seite wurde das 10 000 jährliche Hochwasser ursprünglich mit 3800 m³/s ermittelt [51]. Bei diesem Abfluss wird die Überflutung allein durch den Rückstau der Brücke verursacht, wobei durch den 0.40 m hohen Zaunsockel grosse Bereiche des Werksgeländes trocken bleiben, da der Rückstau nur 0.25 m beträgt [50]. Diese 0.40 m werden etwa ab einer reinen Überflutungshöhe von 327.1 m ü. M. erreicht, was in etwa 3900 m³/s entspricht. Bei einem 10 000 jährlichen Hochwasser mit 4200 m³/s wird der Zaunsockel überspült. Diese Werte sind in Tabelle 1 und in Bild 8 zusammengefasst.

Die Berücksichtigung des Zaunsockels bleibt für den Fall des Wehrbruchs Wettingen von Interesse, da hier auf dem KKW Gelände nur Überflutungshöhen von ca. 0.10 m erreicht werden.

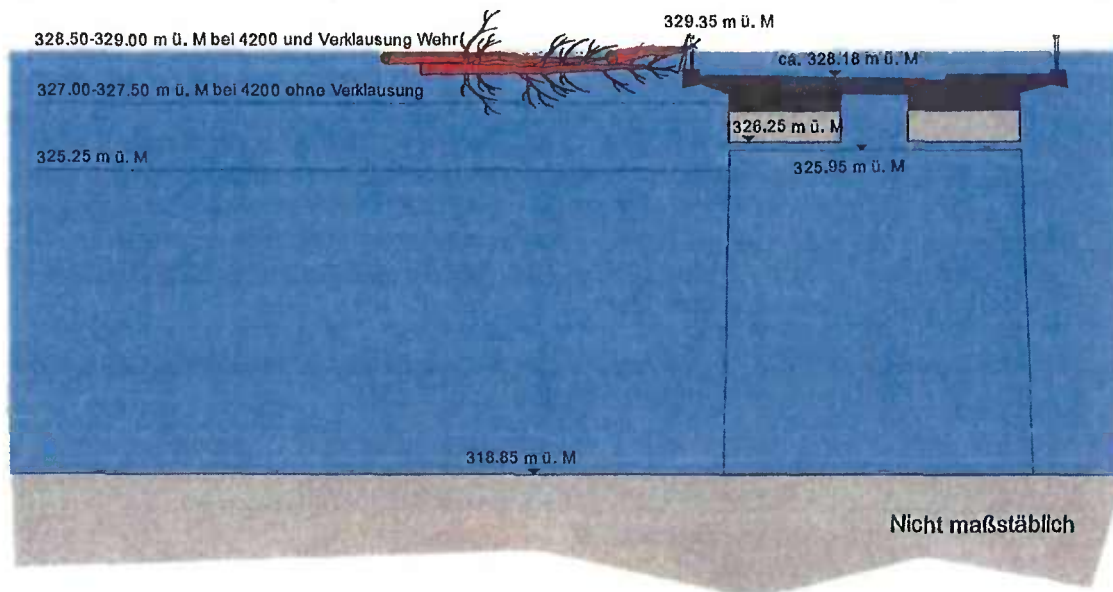


Bild 8: Abfluss- und Brückenknoten

Zusammenfassend kann man feststellen, dass die Brücke die konstruktiven Regeln zur Vermeidung von Verkläusung erfüllt, dass die Brücke aber auch etwa ab einem 1000 jährlichen Hochwasser einen Rückstau verursacht. Dieser ist zwar bis zum 10 000 jährlichen Hochwasser mit $3\,800\text{ m}^3/\text{s}$ relativ gering, steigt aber mit zunehmendem Abfluss. Da für die Rückstauberechnungen eine konstante Fließgeschwindigkeit angenommen wurde, sind die Rechnungen konservativ – in der Realität würde sich an der Einschnürung eine Geschwindigkeitserhöhung ergeben.

Etwa bei $3\,900\text{ m}^3/\text{s}$ wird das Gelände des Kraftwerkes im Bereich der Notstandsbunker überflutet. Eine Verkläusung der Oberwasserkanalbrücke würde diesen Rückstau noch deutlich verstärken. Dieser Rückstau wird im nächsten Abschnitt quantifiziert.

5 Verkläusung der Brücke

5.1 Wasserstand bei alleiniger Verkläusung Brücke

Zunächst wird die Wasserhöhe auf dem Werksgelände abgeschätzt, wenn ausschliesslich eine Verkläusung der Brücke, also keine Verkläusung des Wehres, stattfindet. Dazu werden zunächst der Abflussquerschnitt und der Abfluss des Oberwasserkanals bei einem 10 000 jährlichen Hochwasser bestimmt:

Bei einer Wasserhöhe von 8.5 m ergibt sich wie im Abschnitt 4.2 gezeigt ein Abfluss im Oberwasserkanal von $229.5\text{ m}^3/\text{s}$. Das Wasser fließt wiederum mit einer Breite von ca. 165 m über das Werksgelände und noch einmal 100 m über das Wehr. Die Fließgeschwindigkeit am Wehr beträgt ca. 5 m/s, während die Fließgeschwindigkeit auf dem KKB-Gelände ca. 0.5 m/s beträgt. Das ergibt über diese Breite eine zusätzliche mittlere Wasserhöhe von $229.5\text{ m}^3/\text{s} / (100\text{ m} \times 5\text{ m/s} + 165\text{ m} \times 0.5\text{ m/s}) = 0.40\text{ m}$.

Zum Vergleich: eine vollständige Wehrverkläusung führt zu einem zusätzlichen Wasserstand von 0.80 m auf der Ostseite der Notstandsbunkergebäude auf dem Werksgelände.

5.2 Wasserstand bei Verklausung Wehr und Brücke

Bei einem 10 000 jährlichen Hochwasser mit vollständiger Verklausung des Wehres Bezau und Geschiebe wird im Oberwasserkanal eine Wasserhöhe von 328.50 bis 329.00 m ü. M. erreicht (Bild 9). Auf dem Gelände des KKW wird die Auslegungswasserhöhe von 1.65 m erreicht.

Da die Unterkante der Brücke bei 327.23 m ü. M. und die Oberkante Gehwegkappe bei 328.33 m ü. M. in Feldmitte liegen, wird die Brücke mit ca. 0.75 m überströmt. Der Mittelträger hat eine Höhe von 1.80 m über den Pfeilern und 0.90 m in Feldmitte. Die Kappendicke beträgt ca. 0.50 m. Insgesamt ergibt sich eine minimale Brückenüberbauhöhe ohne Geländer von ca. 1.40 m und eine maximale Brückenüberbauhöhe von 2.20 m. Das Geländer hat eine Höhe von ca. einem Meter.

Es wird eine durchschnittliche Fließgeschwindigkeit von 3 m/s pro Sekunde gewählt (Beilage, per Email vom 26.4.2013, Trösch Consult, Bild 10, [32]).

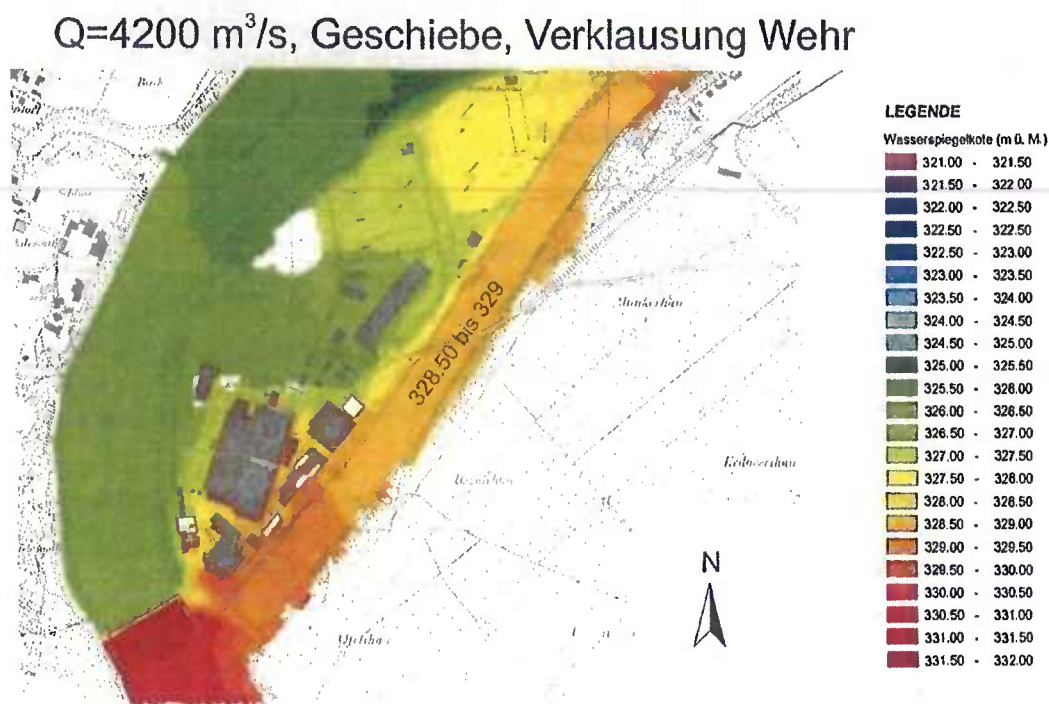


Bild 9: Wasserkote beim 10 000 jährlichen Hochwasser mit Verklausung und Geschiebe

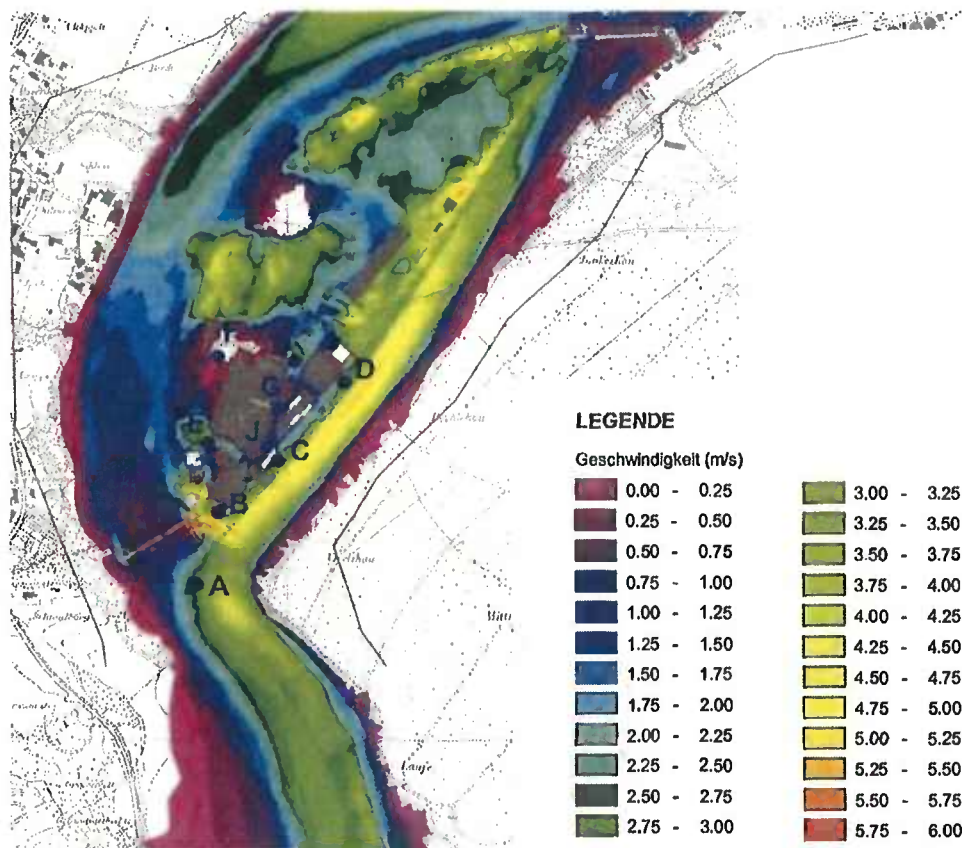


Bild 10: Fließgeschwindigkeit im Oberwasserkanal beim 10 000 jährlichen Hochwasser mit Verklauung und Geschiebe [56]

Wenn Wehr und Brücke vollständig verschlossen sind, muss der gesamte Abfluss über Oberkante Gelände bei 327.0 m ü. M. fließen. Das würde eine Höhe von $4200 \text{ m}^3 / (165 \text{ m} + 100 \text{ m} + 66 \text{ m}) / 3 \text{ m/s} = 4.2 \text{ m} = 331.2 \text{ m ü. M.}$ ergeben. Es handelt sich hierbei um ein Extremszenario. Im folgenden Abschnitt wird deshalb die Wahrscheinlichkeit eines solchen Ereignisses quantitativ bewertet.

5.3 Verklauungswahrscheinlichkeit

Die Abschätzung von Verklauungswahrscheinlichkeiten wird seit einigen Jahren diskutiert [43]. Die Verklauungswahrscheinlichkeit für ein Bauwerk wird gemäss [9] in den folgenden Schritten berechnet.

- Ermittlung der Schwemmholzmenge,
- Wahrscheinlichkeitsverteilung der Baumängen,
- Rückhaltewahrscheinlichkeiten an baulichen Anlagen Oberstrom,
- Verklauungswahrscheinlichkeit Einzelstamm,
- Wahrscheinlichkeit Vollverklauung.

Die Berechnung des Schwemmholzpotentials kann entweder über vereinfachte empirische Verfahren (siehe z.B. Rickenmann [17]) oder mittels diskreter Modellierung des Oberlaufs mit spezifischer Berücksichtigung der Wasser-, Geschiebe- und Schwemmholzverteilung [37] (siehe Bild 11) erfolgen. Allerdings werden solche detaillierten Modelle in der Regel in alpinen Bereichen mit grossen Schwemmholz- und Geschiebeaufkommen und kleinen Einzugsflächen verwendet. Im Unterlauf der Flüsse mit einem deutlich geringeren Gefälle sind Schwemmholz- und Geschiebeaufkommen deutlich kleiner, aber das Einzugsgebiet ist erheblich grösser, weshalb dort in der Regel die vereinfachten empirischen Verfahren verwendet werden.

Im nächsten Schritt wird eine Wahrscheinlichkeitsfunktion für die Verteilung der Baumlänge gewählt (Bild 12). Da hierbei der Fokus auf grossen Stammlängen liegt, kann man eine gestutzte Verteilung verwenden, indem die unteren Baumängen von der Verteilung abgeschnitten werden. Im vorliegenden Fall wird für die grossen Baumängen eine Exponentialverteilung verwendet.

Anschliessend müssen die Rückhaltefaktoren für den Oberlauf des Flusses mit seinen wasserbaulichen Einrichtungen abgeschätzt werden. Hier kann man auf empirische Werte von früheren Flutereignissen ausgehen (siehe Bild 13) [39], [40]. Für diese Rechnung wurden die Formeln gemäss [9] verwendet.

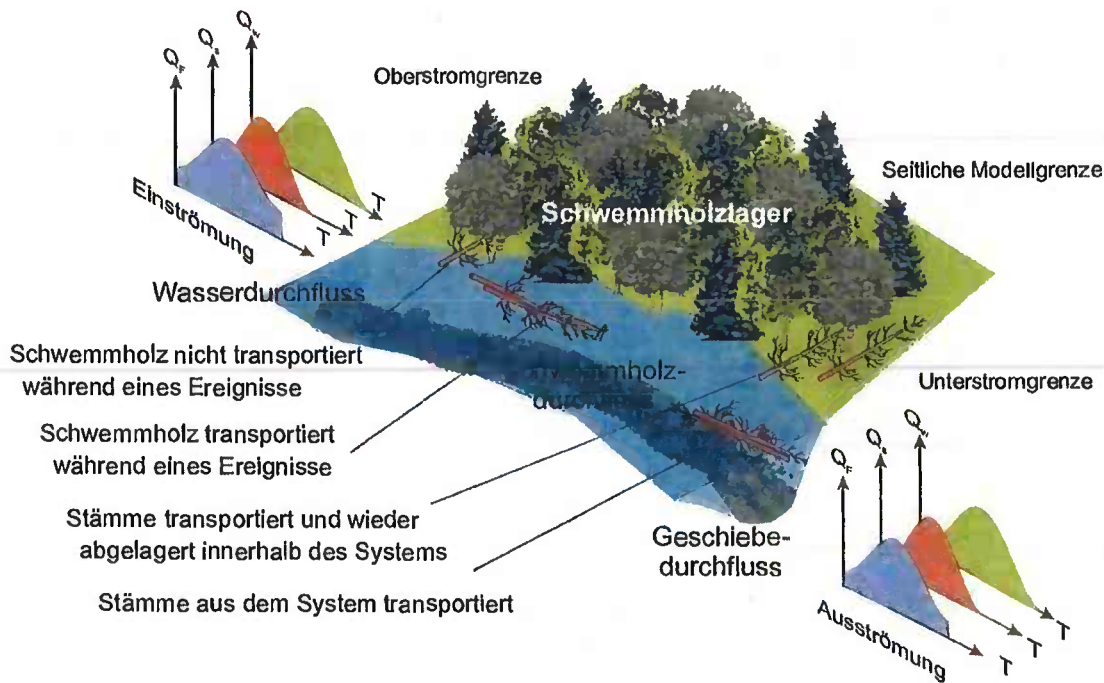


Bild 11: Theoretisch-kombiniertes Wasser-, Geschiebe- und Verkläusungsmodell [27]

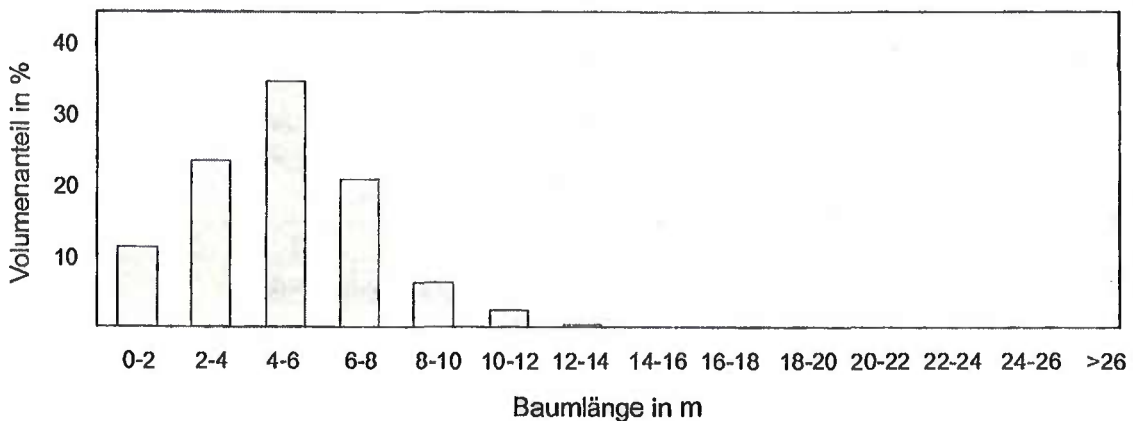


Bild 12: Empirische Verteilung der Stammlänge gemäss [38]

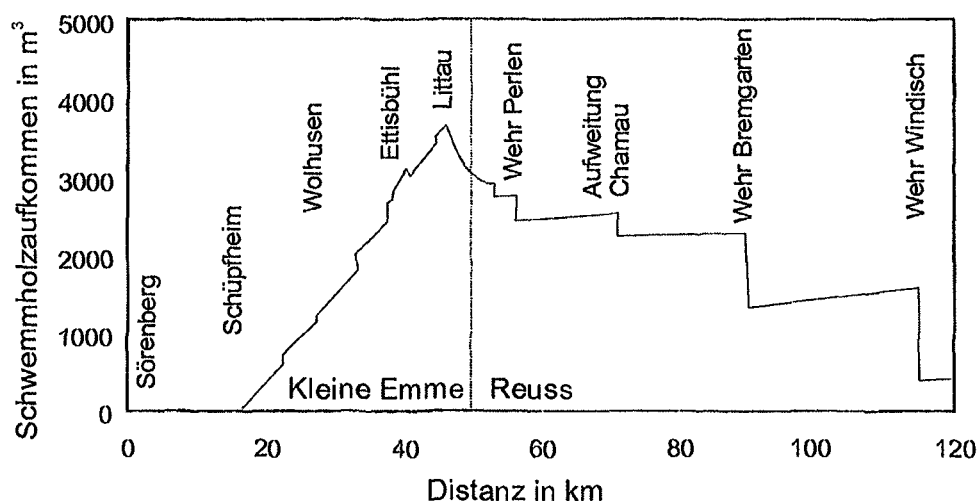


Bild 13: Schwemmholzvolumen während der Flut der Reuss 2005 gemäss [39]

Damit ist jetzt bekannt, wie viel Schwemmholz am Bauwerk ankommt (18 000 m³ Festholz). Das Wehr Beznau beeinflusst massgeblich das Schwemmholzaufkommen an der Oberwasserkanalbrücke. Vereinfacht könnte man diesen Einfluss als Rückhaltefaktor ausdrücken. Dieser wäre sehr gross, da beim offenen Wehr beim 10 000 jährlichen Hochwasser dort grosse Fliessgeschwindigkeiten und ein deutlich grösser Wasserdurchfluss vorhanden ist als im Oberwasserkanal. Dies führt auch zu einem grösseren Schwemmholzabtransport als im Oberwasserkanal.

Es wird deshalb angenommen, dass nur 1/10 der Bäume in den Oberwasserkanal fliesst, wobei hier die Strömungsverhältnisse wie vor der Verklauung angenommen werden (also 9/10 des Wasservolumens fließen über das Wehr und 1/10 fließt über den Oberwasserkanal).

Schmocker & Hager [35] haben in den letzten Jahren in der Schweiz Versuche durchgeführt und daraus Wahrscheinlichkeiten für Verklauungserscheinungen von Brücken bestimmt (Bild 14). Diese Wahrscheinlichkeiten beziehen sich darauf, dass ein Stamm oder eine Baumwurzel an einer Brücke hängen bleibt. Die Arbeiten von Schmocker & Hager berücksichtigen verschiedene relative Wasserstände. Generell steigt bei der Überströmung einer Brücke mit Geländer die Rückhaltewahrscheinlichkeit sehr schnell an. Diese Einzelwahrscheinlichkeit bezieht sich allerdings nicht auf eine vollständige Verklauung der Brücke. Während in der TM-211-RN13020 [9] für das Wehr eine Wahrscheinlichkeit der Totalverklauung eines Feldes bei Verklauung eines Holzstammes bzw. einer Wurzel mit 10% angenommen wurde, kann dies für eine Brücke mit einer maximalen Spannweite von knapp 45 m nicht gelten. Vielmehr wird für die Brücke eine Wahrscheinlichkeit der Vollverklauung von einem Prozent der Einzelverklauungswahrscheinlichkeit angenommen.

Gemäss Bild 14 liegt die Wahrscheinlichkeit für eine Verklauung bei einer relativen Wasserstandhöhe gleich oder kleiner 1 bei 0. Erst bei einer Überströmung und einem Verhältnis Baumlänge L zu Spannweite B = 1 ergibt sich eine Wahrscheinlichkeit von 0.25. Bei Baumängen kleiner als 1/3 der Spannweite ist die Verklauungswahrscheinlichkeit immer noch Null. Das entspricht bei einer Spannweite von 44.90 m etwa 15 m Baumlänge. Die Wahrscheinlichkeit eines Baumes mit einer Länge von 15 m oder mehr liegt bei ca. 0.0754 pro Ereignis. Damit ergibt sich vereinfacht eine Wahrscheinlichkeit von $0.0754 \times 0.25 / 2 = 0.0094$ für das mittlere Feld.

Mittels der in der TM-211-RN13020 [9] vorgestellten Verfahren und den Annahmen von Schmocker & Hager ergibt sich die Wahrscheinlichkeit für eine vollständige Verklausung des mittleren Brückenfeldes von 2.7×10^{-4} pro 10 000 jährlichem Hochwasser. Die Wahrscheinlichkeit für eine vollständige Verklausung der gesamten Brücke ergibt sich zu 2.03×10^{-8} pro 10 000 jährlichem Hochwasser. Es ergibt sich eine totale Wahrscheinlichkeit 2.7×10^{-8} pro Jahr für die vollständige Verklausung des grossen Brückenfeldes und von 2.03×10^{-12} pro Jahr für die vollständige Verklausung der Brücke.

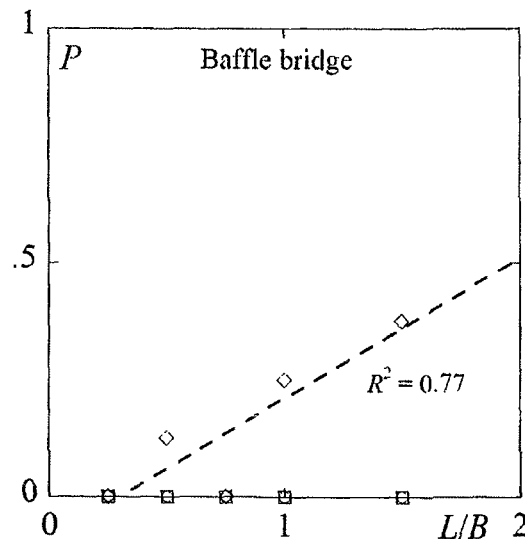


Bild 14: Verklausungswahrscheinlichkeit P für die Froude-Zahl 0.8, Höhe Wasserstand zu Höhe Brücke $h/H = 0.90$ (\circ , - - -), 1.00 (\square , —), and 1.07 (\diamond , - - -), Bezeichnungen siehe Bild 3

5.4 Plausibilitätskontrolle

Eine Plausibilitätsprüfung erfolgt hier über drei Wege: zum einen wird die Holzmenge abgeschätzt, die für eine Vollverklausung sowohl für die Brücke als auch für das Wehr notwendig ist, im zweiten Schritt wird die Tragfähigkeit der Verklausungsschicht gegen Wasserdruck bewertet und im letzten Schritt werden maximal weltweit beobachtete Verklausungshöhen zum Vergleich herangezogen. Ziel der Plausibilitätsprüfung ist eine Aussage, ob das angenommene Szenario überhaupt möglich ist.

Um eine vollständige Verklausung der Brücke zu erreichen, muss eine beträchtliche Menge Schwemmholz aktiviert werden. Für die Berechnung dieses Volumens wird ein charakteristischer Verklausungskörper festgelegt (siehe Bild 15). Dieser hat ein Lockervolumen von $8.0 \text{ m} \times 460 \text{ m}^2$ (volle Tiefe, siehe Abschnitt 4.2) = $3\,680 \text{ m}^3$. Das Volumen Festmeter Holz errechnet sich zu: $3\,680 \text{ m}^3 \times 0.3$ [9] = $1\,104 \text{ m}^3$ Vollholz. Bei einem Holzvolumen von 1.2 m^3 pro Baum ergeben sich $1\,104 \text{ m}^3 / 1.2 = 920$ Bäume mit einer Länge grösser 8 m. Wenn an der Brücke nur $1/10$ der gesamten Holzfracht hängen bleibt, ergibt sich: $920 \times 10 = 9\,200$ Bäume grösser 8 m bzw. $3\,680 \text{ m}^3 \times 10 = 36\,800 \text{ m}^3$ Lockervolumen. Werden diese Werte bei einem Hochwasser nicht erreicht, so kann eine Vollverklausung ausgeschlossen werden.

Einer Verklausung der Oberwasserkanalbrücke dürfte eine Verklausung des Wehres Beznau vorangehen, da die Abflussmenge dort deutlich grösser als im Oberwasserkanal ist. Für die Verklausung des Wehres Beznau mit 5 Feldern ergibt sich das Verklausungslockervolumen zu $5 \text{ Felder} \times 20 \text{ m Breite} \times 12 \text{ m Tiefe} \times 10 \text{ m Breite} = 6\,000 \text{ m}^3$. Das entspricht wiederum $6\,000 \text{ m}^3 \times 0.3 = 1\,800 \text{ m}^3$ Volumen Festmeter Holz und ca. $1\,800 \text{ m}^3 / 1.2 \text{ m}^3/\text{Baum} = 1\,500$ Bäumen (grösser 8 m).

Damit ergibt sich insgesamt für Wehr und Brücke ein Baumbedarf von $1\,500 + 920 = 2\,500$ Bäumen grösser 8 m ohne Berücksichtigung der Bäume kleiner 8 m und ohne Berücksichtigung der effektiven Rückhaltefaktoren. Da aber tatsächlich ca. 90% der Bäume kleiner als 8 m ist (siehe [16], Bild 12), werden wahrscheinlich mehr als $2\,500 \times 10 = 25\,000$ Bäume aller Länge notwendig sein, um eine Vollverkläusung für Wehr und Brücke zu erreichen. Berücksichtigt man noch einmal den Rückhaltefaktor von 90 % für die Flussaufwärts gelegenen Bauwerke, so werden insgesamt $25\,000 \times 10 = 250\,000$ Bäume Totholz und $9\,680 \text{ m}^3 \times 10 = 96\,800 \text{ m}^3$ Lockervolumen für eine Vollverkläusung von Wehr Beznau und der Oberwasserkanalbrücke notwendig.

Zum Vergleich: Beim Hochwasser 2005 wurden an der Aare in Bern $2\,300 \text{ m}^3$ Lockervolumen und in Klingnau $4\,661 \text{ m}^3$ Lockervolumen entnommen [38]. Das gesamte Lockervolumen Totholz erreichte beim Hochwasser 2005 etwa $230\,000 \text{ m}^3$. Bei diesem Ereignis wurden keine Verkläusungserscheinungen am Wehr Beznau oder an der Brücke Beznau beobachtet. Fazit: das Totholzvolumen, welches für eine Vollverkläusung notwendig ist, kann auftreten, jedoch werden hierbei sehr konservative Annahmen getroffen, denn bei einem Hochwasser mit dem erforderlichen Totholzvolumen für eine Vollverkläusung wurden praktisch keine Verkläusungserscheinungen an den beiden Bauwerken beobachtet.

Die Rechenergebnisse werden in Tabelle 2 zusammengefasst, wobei ein prinzipieller Vergleich auch in [38], Abb. 53, erfolgt. Zu beachten ist allerdings, dass das reine Eintragsvolumen nicht für genaue Rechnungen verwendet werden kann, da sich über die Abflusslänge Eintrags- und Ablagerungsgebiete abwechseln.

Tabelle 2: Abschätzung für die Verkläusung zur Verfügung stehenden Holz mengen

Szenario	Einzugsgebiet in km ²	Lockervolumen in m ³	Lockervolumen in m ³ mit Rück- haltefaktor	Festholz in m ³	Anzahl Bäume > 8 m	Anzahl Bäume gesamt	Mit Rückhalte- faktor
Verkläusung Brücke	17 620	3 680	36 800	1 104	920	9 200	92 000
Verkläusung Wehr und Brücke	17 620	6 000	60 000	1 800	1 500	15 000	150 000
Gesamt	17 620	9 680	96 800	3 904	2 420	24 200	242 000
Palagnedra, 1978,	138	25 000	25 000	25 000			
Hochwasser 2005, Gesamtes Einzugsgebiet		230 000	230 000	69 000			57 500

Unter Umständen könnte bei Teilverkläusungen, wie sie z.B. bei Hochwasserplanungen berücksichtigt werden [47], die Anzahl der Bäume bzw. das Holzvolumen prozentual zu verringern.

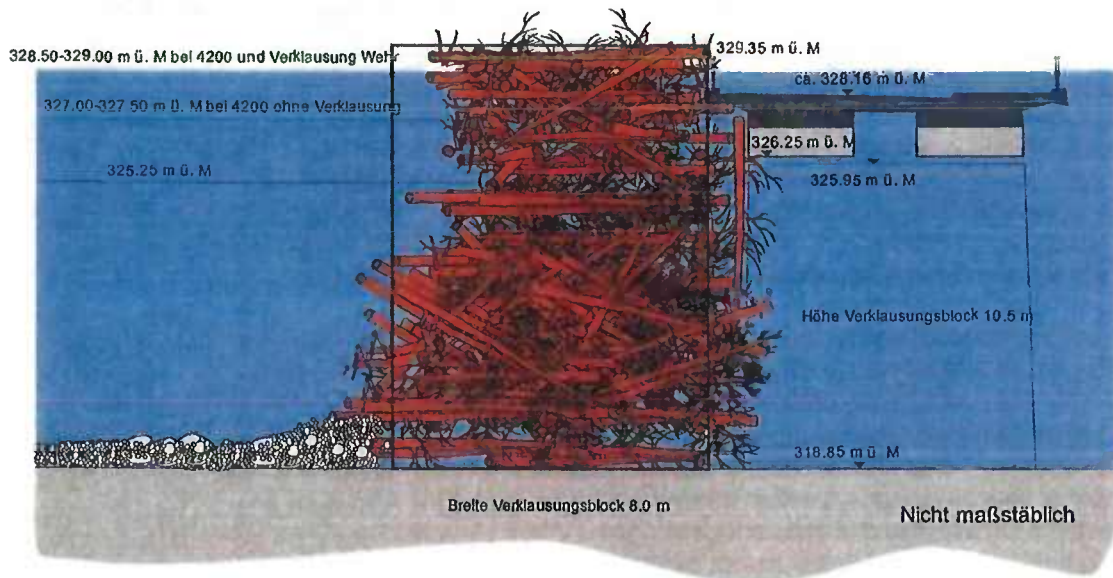


Bild 15: Charakteristischer Verkläusungskörper

Neben der Abschätzung der Baumannzahl kann man auch die statische Tragfähigkeit des Verkläusungsvolumens prüfen. Die Brücke mit Verkläusung kann als Dreifeldträger unter horizontaler Last (Wasserdruck) angesehen werden. Wahrscheinlich würde sich die Last nicht gleichverteilen, sondern in den spitzen Winkel mehr Holz ansammeln (Bild 16). Über die Höhe bildet sich ein Keil, der den hydrostatischen Wasserdruck symbolisiert (Bild 17).

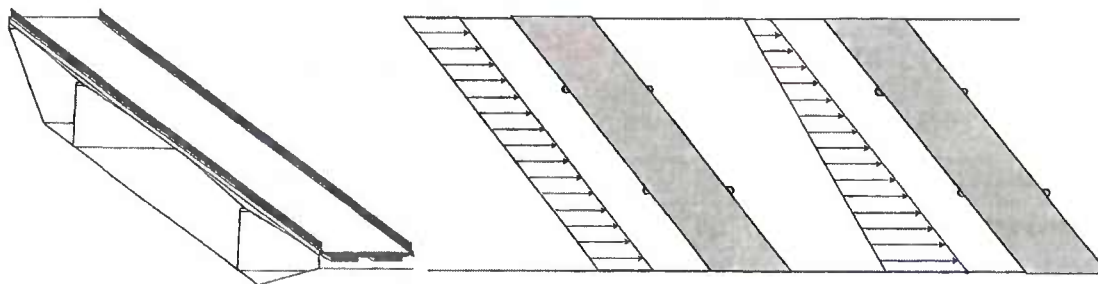


Bild 16: Brücke und statisches Ersatzsystem

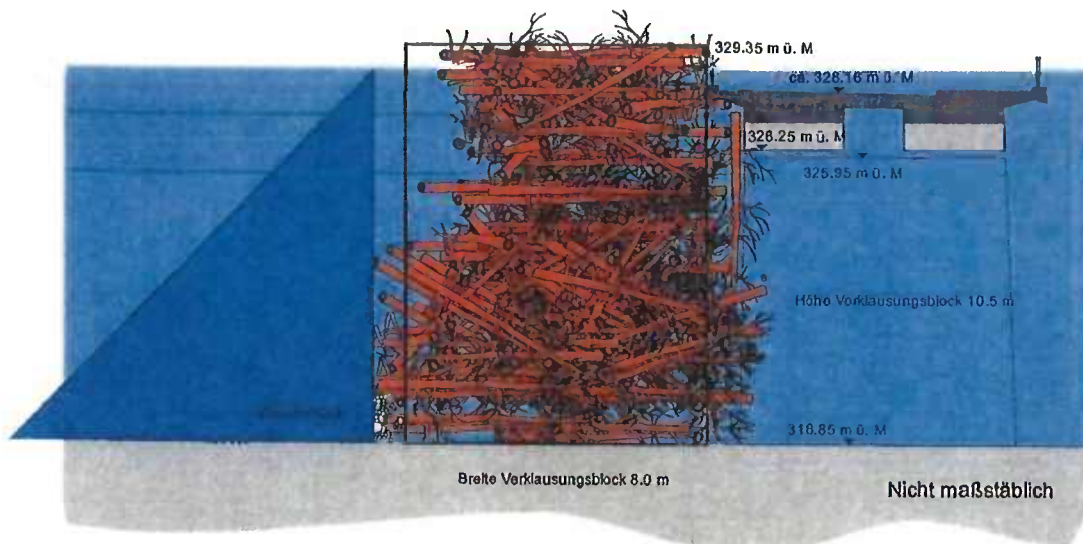


Bild 17: Statischer Wasserdruck

Der Keil wirkt im Sohlbereich bei 10 m Wasserhöhe mit 10 Tonnen Wasserdruck pro Quadratmeter horizontal auf den Verkläungsbereich. Über die Höhe von 10 m ergeben sich

$$p_s = \rho \times h \times g = 1000 \text{ kg/m}^3 \times 10 \text{ m} \times 9.81 \text{ m/s}^2 = 98100 \text{ N/m}^2 = 98.1 \text{ kN/m}^2$$

Der dynamische Wasserdruck ergibt sich zu

$$p_d = \rho \times v^2 / 2$$

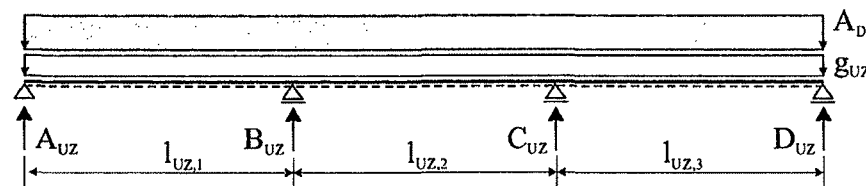
$$p_d = 1000 \text{ kg/m}^3 \times (5 \text{ m/s})^2 / 2 = 12500 \text{ kg/m}^3 \times \text{m}^2/\text{s}^2 = 12.5 \text{ kN/m}^2$$

Nimmt man einen gleichfeldrigen Durchlaufträger an, so erhält man als maximales Feldmoment [48] gemäss Bild 18:

$$M_B = -0.1 \cdot 0.1 \text{ MN/m}^2 \cdot (45 \text{ m})^2 = 20.25 \text{ MNm}$$

$$W = \frac{b \cdot h^2}{6} = \frac{10 \text{ m} \cdot (8 \text{ m})^2}{6} = 106.6 \text{ m}^3$$

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{20.25}{106.6} = 0.18 \frac{\text{MN}}{\text{m}^2}$$



Lastfall	Kraftgrössen	Belastung 1
	M_1	0,080
	M_2	0,025
	M_b	- 0,100
	A	0,400
	B	1,100
	V_{bl}	- 0,600
	V_{br}	0,500

Bild 18: Statisches Ersatzsystem mit Schnittgrössentabelle [48]

Die erforderliche Zugkraft von 0.18 MN/m² ist sehr gering und kann wahrscheinlich durch das Holz abgetragen werden. In den Rechenannahmen wurde ein vollständiger Wasserabschluss durch den Verkläungскеil angenommen. Dieser vollständige Wasserabschluss ist sicherlich unrealistisch, so dass die Spannungen im Verkläungскеil noch geringer sein werden als die o.g. Zugspannung. Auf der anderen Seite sollte berücksichtigt werden, dass das Sohlenmaterial im Oberwasserkanal sehr fest ausgebildet ist. Die Entnahme von Steinmaterial am 29. Juni 2009 durch Taucher gelang nur mit Hammer und Meissel [36]. Damit können sich die Bäume nicht in der Kanalsohle verankern, sondern müssen den Wasserdruck allein durch Biegung oder Reibung abtragen.

Abschliessend soll die Verkläungshöhe mit weltweit maximal beobachteten Verkläungen verglichen werden. Bild 19 zeigt zwei solcher Beispiele. Im rechten Bild zeigt die Ellipse zwei Menschen, die auf den Baumstämmen stehen.



2010 bildete sich auf dem Fluss Rajang in Malaysia ein 50 km langer Holzteppich [52]



Verklaesung am Croix River in Wisconsin 1869 [53]

Bild 19: Beispiele von weltweiten maximalen Verklaesungen und Schwemholzansammlungen

In der Geschichte haben sich insbesondere in den Regionen mit hohem Holzeinschlag immer wieder grosse Verklaesungen gebildet. In Wisconsin, USA ereigneten sich am St. Croix River mehrere grosse Verklaesungen, z.B. 1869 in der Nähe der Taylors Wasserfälle und 1886 in der Nähe des Angle Rock. Bei der Verklaesung am Angle Rock benötigten über 200 Mann und 100 Pferde mehrere Wochen, um die Verklaesung aufzulösen. Die Verklaesung erreichte eine Höhe von 15 m [53]. Die wahrscheinlich grösste Verklaesung weltweit ereignete sich 1894 am Mississippi in der Nähe von Little Falls, MN. Die Verklaesung war 20 m hoch, ca. 700 m breit und nahezu 10 km lang. Aber auch in den letzten Jahren wurden weltweit grosse Verklaesungen bzw. Holzteppiche beobachtet. So wurde der Fluss Rajang in Malaysia 2010 von einem 50 km langen Holzteppich bedeckt [52].

Allerdings können diese Verhältnisse nicht einfach auf das Wehr Beznau bzw. die Brücke angewendet werden. Ende des 19. Jahrhunderts war es üblich, Baumstämme zu flössen. Die grössten Flösse erreichten Ausmasse von mehreren Kilometern Länge [54]. Die Baumstämme wurden oft in der Nähe der Flüsse gelagert, um sie einfacher und schneller in den Fluss zu bringen. Dadurch war eine viel grössere Totholzreserve vorhanden. Die Flüsse in der Schweiz sind nahezu durchgehend bewirtschaftet und verbaut, hier liegen solche grossen Totholz mengen nicht vor.

Zusätzlich zu den grossen Verklaesungsvolumen ist zu beachten, dass bei den hohen Wasserständen bereits andere Konstruktionen Holzstämme abfangen können. Eine dieser Konstruktionen ist die REFUNA-Brücke am Eingang des Oberwasserkanals.

5.5 Verklaesung der REFUNA-Brücke

Im südlichen Bereich des Oberwasserkanals befindet sich eine Fussgänger- und Rohrleitungsbrücke, die hier im Folgenden als REFUNA-Brücke bezeichnet wird. Diese Brücke besteht aus einem Einfeldträger als Stahlfachwerkkonstruktion. Die Unterkante des Fachwerkes liegt bei 328.10 m ü. M., also damit 2.85 m über dem Wasserspiegel im Oberwasserkanal von 325.25 m ü. M. [45], [46]

Während die Unterseite der Oberwasserkanalbrücke bereits bei 327.15 m ü. M. vollständig im Wasser liegt, hat die REFUNA-Brücke einen Meter mehr, bis sie zu einer Fließbehinderung im Oberwasserkanal wird. Allerdings dürfte auf Grund des Stauanstieges durch die Oberwasserkanalbrücke auch die REFUNA-Brücke dann relativ schnell das Wasser erreichen, da die Fahrhahnoberkante der Oberwasserkanalbrücke bei 328.16 m ü. M. liegt.

Die REFUNA-Brücke taucht wahrscheinlich bei einem ungestörten Abflussmodell von 327.70 m ü. M. ins Wasser, da sich zu diesem Zeitpunkt bereits der Rückstau durch die Oberwasserkanalbrücke bemerkbar macht und zu ca. 50 cm Rückstau führt. Bei einer vollständigen Verklauung des Wehres Beznau und der Brücke dürfte auch die REFUNA-Brücke verklauen. Das würde wiederum zu einer Entlastung des Werkes führen, da die Brücke vor dem Werk liegt. Somit würde verhindert, dass der gesamte Abfluss erst an der verklauten Oberwasserkanalbrücke zur Insel bzw. dem Werksgelände umgeleitet wird.

5.6 Verklauung des Zauns

Das Kraftwerksgelände ist von einem Doppelzaun umgeben, der bis zu 2 m hoch ist [50]. Der Zaun hat einen ca. 0.4 m hohen Sockel. Beides, Zaun und Sockel, führen zu einer Abströmungsbehinderung und können Verklauungen verursachen, da der Zaun als Rechen funktioniert und Feststoffe im Gewässer mit einem grösseren Durchmesser als der Maschenbreite zurückhält.

Sollte sich eine Verklauung am Zaun zwischen zwei Gebäuden einstellen, so besteht dort die Gefahr von Schwallwellen bei einem Versagen des Zauns und damit einer plötzlichen Öffnung der Verklauung. Nimmt man an, dass zu diesem Zeitpunkt noch die Brücke vollständig unverklaut und offen ist, so ist der Anteil des Wassers, der über das Werksgelände fliesst, immer noch deutlich geringer als der Abfluss im Oberwasserkanal. Insofern ist zu erwarten, dass auch die Schwallwelle nur zu einer geringeren Erhöhung auf dem Werksgelände führt. Hier wird eine Höhe von 0.30 m angenommen.

Weiterhin sind die Kühlwassereinlässe im Strassenbereich abgezäumt, so dass auch dort Schwemmholz anlanden kann. Diese Verklauung kann unter Umständen dazu führen, dass der Einlass verstopft oder beschädigt wird.

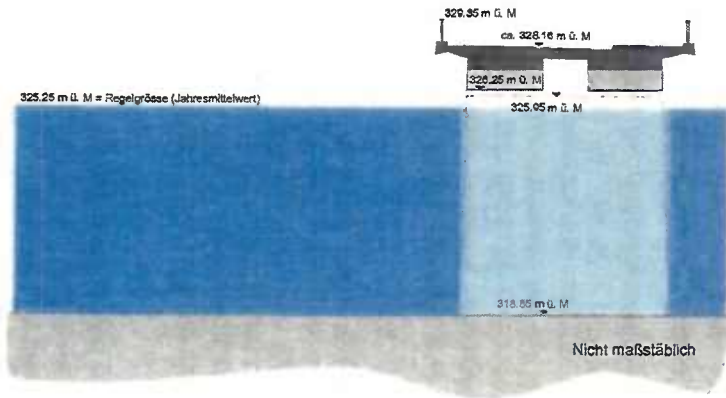
6 Zusammenfassung

In der vorliegenden Technischen Mitteilung wird die Auswirkung einer vollständigen Verklauung der Oberwasserkanalbrücke bewertet. Dazu wird die Wahrscheinlichkeit einer solchen Verklauung ebenso berechnet wie die Auswirkungen auf den Wasserstand.

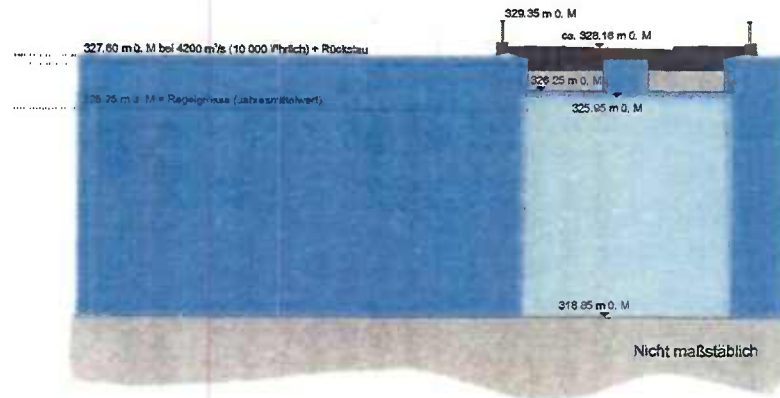
Die Wahrscheinlichkeit einer vollständigen Verklauung der Oberwasserkanalbrücke wird mit 2.7×10^{-8} pro Flutereignis für die Verklauung des Mittelfeldes und 2.0×10^{-12} für die vollständige Verklauung der Brücke ermittelt. Der Wasserstand auf dem Werksgelände würde sich bei der Vollverklauung um maximal 0.40 m erhöhen. Da der bisherige Wasserstand beim 10 000 jährlichen Hochwasser ohne Geschiebe bei ca. 0.30 m lag und sich noch einmal ca. 0.1 m durch den Rückstau der Oberwasserkanalbrücke ergeben, bleibt die Auslegungshöhe von 1.65 m mit einer Wasserhöhe von 0.8 m eingehalten. Dies gilt auch für den Fall mit Geschiebe.

Unterstellt man das extrem unwahrscheinliche Ereignis einer vollständigen Verklauung des Wehres Beznau und einer vollständigen Verklauung der Oberwasserkanalbrücke, so müsste die gesamte 10 000-jährliche Abflussmenge von $4200 \text{ m}^3/\text{s}$ über das Werksgelände abfliessen. Die Abschätzung der Wasserhöhe hängt dann von den Annahmen über die Höhe der Vollverklauung am Wehr und der Brücke ab. Prinzipiell können dann aber Wasserstände auf dem Gelände oberhalb der Auslegungshöhe erreicht werden. Bild 20 fasst die Szenarien für den Oberwasserkanal zusammen.

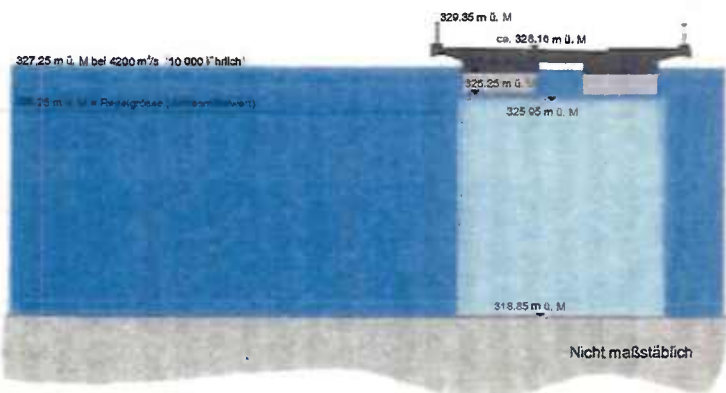
Gemäss TM-211-RN13019 [49] gelten die Abfahrstränge 3 und 4 bis zu einer Überflutungshöhe von 6 m auf dem Gelände als sicher. Man kann also feststellen, dass selbst bei einem extrem unwahrscheinlichen Ereignis einer gemeinsamen vollständigen Verklauung des Wehres Beznau und der Oberwasserkanalbrücke die Anlage einzelfehlensicher abgefahren und gekühlt werden kann.



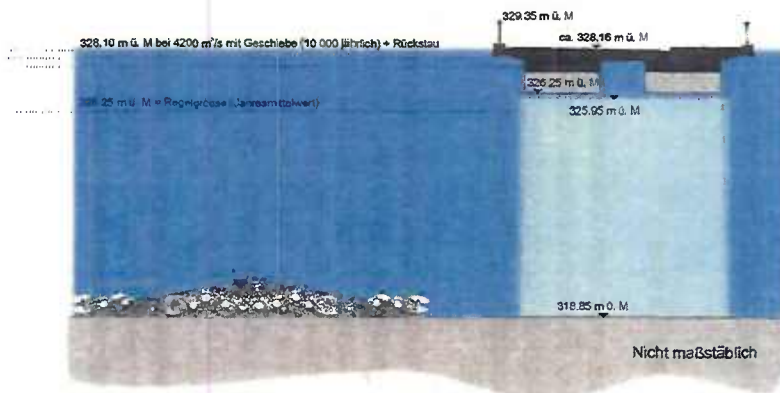
a)



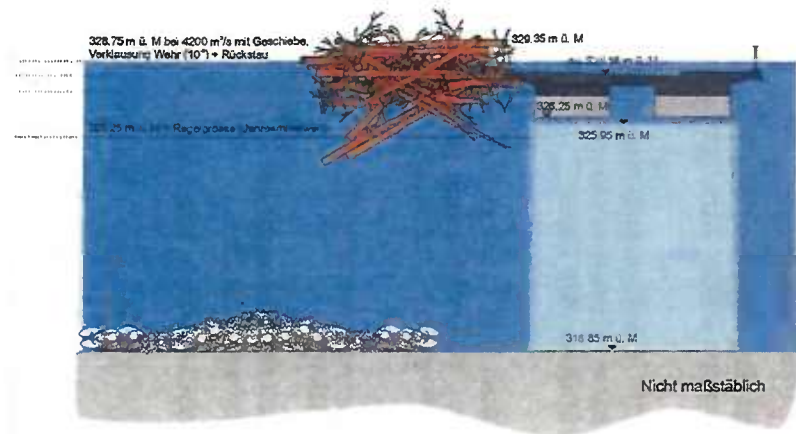
c)



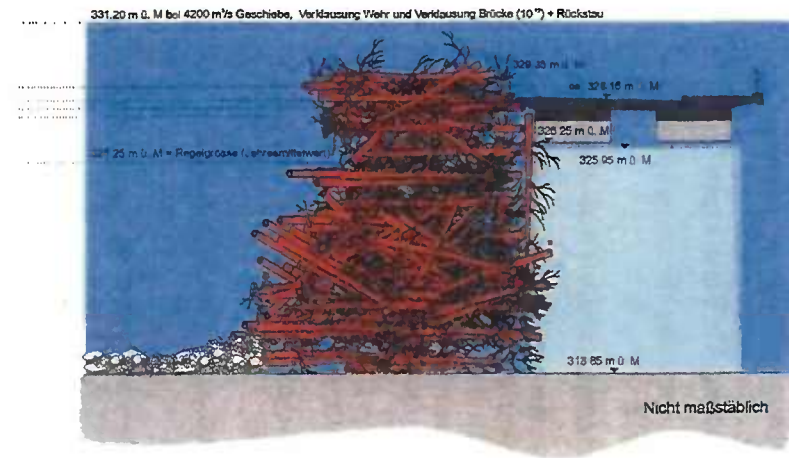
b)



d)



e)



f)

Bild 20: Zusammenfassung der Wasserstände (Rückstau entspricht dem Rückstau durch die Brücke)

7 Referenzen

- [1] ENSI, Konkretisierung der Anforderungen an eine Berücksichtigung von Geschiebe- und Schwebstofftransport bei Überflutungsberechnungen, 26. März 2013, Ihr Zeichen: [REDACTED] – 10KEX.APFUKU2, 14/13/018
- [2] Lindner, J.: Beseitigung von Verklausungen“ Erfahrungen – Hochwassereinsatz 2002, Bezirks-Feuerwehrkommando PERG, http://bfw.ac.at/ort1/Vortraege_als_pdf/verklausung/Lindner_Verklausung.pdf
- [3] Amt der Tiroler Landesregierung, Landesbaudirektion, Abteilung Wasserwirtschaft: Fließgewässeratlas Tirol – Handbuch, Innsbruck, 2002
- [4] Rissler, P. Talsperrenpraxis, München – Wien – Oldenbourg, ISBN 3-486-26428-1
- [5] Gems, B.: Entwicklung eines integrativen Konzeptes zur Modellierung hochwasserrelevanter Prozesse und Bewertung der Mitwirkung von Hochwasserschutzmaßnahmen in alpinen Talschaften – Modellanwendungen auf Basis einer regionalen Betrachtungsebene am Beispiel des Ötztales in den Tiroler Alpen. Forum Umwelttechnik und Wasserbau, Band 13, innsbruck university press, 2012
- [6] BUWAL/Eidg. Forstdirektion: Begriffsdefinitionen zu den Themen: Geomorphologie, Naturgefahren, Forstwesen, Sicherheit, Risiko, Arbeitspapier, September 1998
- [7] Hübl, J.; Bunza, G.; Hafner, K., Klaus, W.: ETAlp – Erosion, Transport in den Alpen Systemen: Stummer Zeugen Katalog, 15.12.2003
- [8] TM-211-RN11027: Bewertung einer externen Überflutung des Kernkraftwerkes Beznau, KKB, 17.12.2011
- [9] TM-211-RN13020: Verklausungswahrscheinlichkeit am Stauwehr Beznau bei einem Aareabfluss von 4200 m³/s (HQ=10'000), KKB, 08.04.2013
- [10] Boes, R.: Hochwasserentlastung (HWE), 17. Vorlesung WASSERBAU II, ETH Zürich, 22.11.2012
- [11] Rickli, Chr. & Bucher H.: Einfluss ufernaher Bestockungen auf das Schwemmholzvorkommen in Wildbächen, WSL-Projektbericht vom 22.12.06 zuhanden des Bundesamtes für Umwelt BAFU, Sektion Schutzwald und Naturgefahren
- [12] Proske, D.: Brücken unter Alpinen Stoßeinwirkungen. Tagungsband des 19. Dresdner Brückenbausymposiums, TU Dresden, Dresden, 2009, ISBN 978-3-86780-093-8, Seite 243-257
- [13] Hübl J., Eisl J., Hohl D., Kogelnig B., Mühlböck F. (2011): Ereignisdokumentation und Ereignisanalyse Wölzerbach; IAN Report 143, Band 1: Ereignisdokumentation, Institut für Alpine Naturgefahren, Universität für Bodenkultur - Wien (unveröffentlicht)
- [14] Strasser, K.-H.: Schwemmholzmanagement – Probleme und Lösungsansätze, in Minor, H.-E.: Neue Anforderungen an den Wasserbau, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, Mitteilungen 207, Zürich, 2008
- [15] Hartlieb, A.: Modellversuche zur Verklausung von Hochwasserentlastungsanlagen mit Schwemmholz, Wasserwirtschaft, 6/2012, Seite 15-19
- [16] Bundesamt für Energie, Sektion Talsperren: Sicherheit der Stauanlagen – Basisdokument zum Nachweis der Hochwassersicherheit. Juni 2008
- [17] Rickenmann D. (1997). Schwemmholz und Hochwasser. Wasser, Energie, Luft, Jg. 89, Nr. 5/6, 115-119

- [18] Landestalsperrenverwaltung des Freistaates, Talsperrenmeisterei Zwickauer Mulde/Weiße Elster: SachsenGefahrenkarten - Gefahr durch Überschwemmung im Bereich der Gemeinde: Schlema mit den Ortslagen Wildbach, Niederschlema; erstellt durch: Ingenieurgemeinschaft H.P.Gauff Ingenieure GmbH & Co. KG
- [19] Sereinig, N.; Schober, S.: Gefahrenzonenausweisung Szenarien, Bundeswasserbauverwaltung vertreten durch das Amt der Kärntner Landesregierung, Abteilung 18 - Schutzwasserwirtschaft, Klagenfurt, Februar 2012
- [20] INTERPRAEVENT: Wildholz – Praxisleitfaden, Schriftenreihe 1, Handbuch 2, Klagenfurt 2011
- [21] Hunzinger, L.; Zarn, B.; Bezzola, G. R.: Beurteilung der Wirkung von Schutzmassnahmen gegen Naturgefahren als Grundlage für ihre Berücksichtigung in der Raumplanung, TEIL F: FLÜSSE, Nationale Plattform Naturgefahren PLANAT, 2008
- [22] DVWK – Merkblatt „Flussdeiche“ (Heft 210/1986)/Lebensministerium.at: Freibord - Überströmstrecken. Leitfaden zur Festlegung des erforderlichen Freibordes anhand projektspezifischer Rahmenbedingungen einschließlich der Kriterien für die Anordnung von Überströmstrecken, FASSUNG 2006
- [23] Lange, D.; Bezzola, G. R. Schwemmholz - Probleme und Lösungsansätze, Versuchsanstalt für Wasserbau Hydrologie und Glaziologie der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, Mitteilungen 188, Zürich, 2006
- [24] Kommission für Hochwasserschutz KOHS des Schweizerischen Wasserwirtschaftsverbandes (2012). Positionspapier Freibord. – Konzept, Version 2.2 vom 30.04.2012, Arbeitsgruppe Freibord, siehe auch Empfehlungen der Kommission Hochwasserschutz (KOHS): Freibord bei Hochwasserschutzprojekten und Gefahrenbeurteilungen, In: «Wasser Energie Luft» – 105. Jahrgang, 2013, Heft 1, CH-5401 Baden
- [25] KKB 225D0001: Neue Brücke Oberwasserkanal: Technischer Bericht, Beilage zum Baugesuch vom 31. Januar 1991, NOK
- [26] KKB 225/0004: Längsschnitt: Neue Brücke Oberwasserkanal, 17.1.1991
- [27] KKB 225/0005: Querschnitt: Neue Brücke Oberwasserkanal, 17.1.1991
- [28] KKB 225D0002: Brücke über den Oberwasserkanal, Projektbeschreibung, NOK, 15. Januar 1991
- [29] J:\Daten\CPlan_Daten\Beznau\Fixp\koord1.asc, Erstellt am Wednesday, May 20, 2009, 07:21:11 und Zeichnung Jsit1000 Model.pdf
- [30] Email von [REDACTED]@tkconsult.ch] am 16.6.2011, 13:49 Uhr Geschwindigkeiten
- [31] TM-211-RN13084: Überflutung des Betriebsgeländes des KKB im Falle eines Versagens des Wehres Wettingen, 29.05.2013
- [32] Email von [REDACTED]@tkconsult.ch] am 26.4.2013, 16:19 Uhr: Re: Fliessgeschwindigkeiten
- [33] KKB 261D0009 Rev. 2: Externe Überflutung infolge Hochwasser Kernkraftwerk Beznau 1 und 2, Ganze Kraftwerkanlage auf der Insel Beznau, 28.9.2010
- [34] Overney, O.; Bezzola, R. G. Schwemmholz: Strategien und Perspektiven. in Minor, H.-E.: Neue Anforderungen an den Wasserbau, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, Mitteilungen 207, Zürich, 2008
- [35] Schmocker, L. & Hager, W.H.: Drift accumulation at river bridges, River Flow 2010 - Dittrich, Koll, Aberle & Geisenhainer (eds) - © 2010 Bundesanstalt für Wasserbau ISBN 978-3-939230-00-7

- [36] NEBE – Neues hydraulisches Kraftwerk, H 13745, NOK, Beznau
- [37] Mazzorana, B. (2009): Woody Debris Recruitment Prediction Methods and Transport Analysis. PhD Thesis, Institute of Mountain Risk Engineering, University of Natural Resources and Applied Life Sciences, Vienna
- [38] Waldner, P.; Köchli, D.; Usbeck, T.; Schmocker, L.; Sutter, F.; Rickli, C.; Rickenmann, D.; Lange, D.; Hilker, N.; Wirsch, A.; Siegrist, R.; Hug, C.; Kaennel, M. (2005) Schwemmholz des Hochwassers 2005, Schlussbericht des WSL-Teilprojekts Schwemmholz der Ereignisanalyse BAFU/WSL des Hochwassers 2005, WSL, Birmensdorf
- [39] Zumsteg, M., Hochwassermanagement im Reusstal, Departement Bau, Verkehr und Umwelt des Kantons Aargau. (2007), http://www.ag.ch/alg/shared/dokumente/pdf/bremgarten_19.09.2007_zumsteg.pdf
- [40] Moulin, B.; Schenk, E.R.; Hupp, C.R. (2011): Distribution and characterization of in channel large wood in relation to geomorphic patterns on a low gradient river. Earth Surf. Process. Landforms 36, pp. 1137-1151
- [41] Gantenbein, S. (2001) Verklausungsprozesse - Experimentelle Untersuchungen. Diplomarbeit, VAW - ETH Zürich
- [42] Gems, B.: (2012): Entwicklung eines integrativen Konzeptes zur Modellierung hochwasserrelevanter Prozesse und Bewertung der Wirkung von Hochwasserschutzmassnahmen in alpinen Talschaften. Forum Umwelttechnik und Wasserbau, Band 13, innsbruck university press
- [43] Lange, D.; Bezzola, G. R. (2006): Schwemmholz - Probleme und Lösungsansätze Mitteilungen 188, VAW Mitteilungen 188, Hrsg. Prof. Dr.-Ing. H.-E. Minor, Zürich
- [44] KKB225/0003: Situation Neue Brücke, 17.1.1991
- [45] NOK128003: Rohrbrücke: Übersichts- und Aussparungsplan, NOK AG Baden 1983
- [46] NOK105702: Rohrbrücke: NOK AG Baden
- [47] Einwohnergemeinde Biberist, Einwohnergemeinde Gerlafingen, Kanton Solothurn, Hochwasserschutz- und Revitalisierungsprojekt Biberist – Gerlafingen, Raumplanungsbericht, Projekt Nr. A-435, 8. Januar 2010, rev. 20. Mai 2010, erstellt durch Hunziker, Zarn & Partner, Ingenieurbüro für Fluss- und Wasserbau
- [48] Scheerer, S.; Proske, D.: Stahlbeton for Beginners, Springer Berlin, 2008
- [49] TM-211-RN13019: Sicherheitsmargen bei auslegungsüberschreitender Überflutung, Beznau, 25.3.2013, Rev. 1
- [50] TM-211-RN13084: Überflutung des Betriebsgeländes des KKB im Falle eines Versagens des Wehres Wettingen, 29.05.2013
- [51] Scherrer AG, Hydrologie und Hochwasserschutz: Hydrologische Untersuchungen an der Aare für die Kraftwerke in Beznau – Analyse und Prognose zu Hoch- und Niederwasser, Wassertemperaturen und Eisbildung, Reinach: 2009, KKB 211D0051
- [52] http://news.mongabay.com/2010/1009-logjam_sarawak.html
- [53] Rosholt, M. The Wisconsin Logging Book 1839-1939, Rosholt House, 1980
- [54] White, S.E.: The Great Log Jam – The Story of one of the most terrific battles in History of American Industry. Frank Leslies Popular Monthly: Vol. LII, JULY, 1901, No. 3, FRANK LESLIE PUBLISHING HOUSE
- [55] KKB 211D0053 TK Consult: Überflutung Beznau – Szenarien zur Untersuchung der Überflutung der Beznau-Insel. Bericht TKC1618, Zürich: März 2011

- [56] KKB 211D0058: Überflutung Beznau – Ermittlung der maximalen Überflutungshöhe der Beznau-Insel unter Berücksichtigung von Geschiebetransport, Numerisches Abflussmodell KKB, Bericht TKC1712, TK CONSULT AG, Zürich 2012