



Schlussbericht vom 15.03.2022

Schwemmholzrechen auf Hochwasserentlastungsanlagen



Verklauster aufgelöster Rechen unter extremem Schwemmholzanfall im Modell während der Kraftmessung.



Haute école d'ingénierie et d'architecture Fribourg
Hochschule für Technik und Architektur Freiburg

EPFL

Datum: 15. März 2022

Ort: Freiburg und Lausanne

Auftraggeberin:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Energieforschung
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch
energieforschung@bfe.admin.ch

Auftragnehmer/in:

HES-SO HEIA-FR ITEC
Bd de Pérolles 80
CH-1700 Fribourg
www.heia-fr.ch

EPFL ENAC IIC PL-LCH
Station 18
CH-1015 Lausanne
www.epfl.ch

Autor/in:

Michael Pfister, HEIA-FR, michael.pfister@hefr.ch
Giovanni De Cesare, EPFL, giovanni.decesare@epfl.ch

BFE-Bereichsleitung: Michael Moser, michael.moser@bfe.admin.ch
BFE-Programmleitung: Klaus Jorde, klaus.jorde@kjconsult.net
BFE-Vertragsnummer: SI/502057-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.



Zusammenfassung

Schwemmholz stellt eine potentielle Gefährdung von Hochwasserentlastungsanlagen dar, da es den abflussrelevanten Querschnitt verklausen kann. Schwemmholz sollte also vom abflussrelevanten Querschnitt ferngehalten werden, beispielsweise mittels Rechen.

Bisher angewandte Rechen sind so ausgelegt, damit sie möglichst das gesamte Schwemmholz zurückhalten. Dieses fehlt dann dem nachfolgenden Gewässer als lebensraumgestaltendes Element. Wir haben daher einen «aufgelösten» Rechen systematisch im Modell untersucht, der Einzelhölzer in der Regel ausrichtet und durchleitet. Bei Gruppen von Schwemmholz verklaust er, wie herkömmliche Rechen. Gleichzeitig stellt er eine viel grössere Abflusskapazität sicher, beinahe vergleichbar mit jener des vollständigen Rechens, selbst unter extremen Schwemmholzanfall.

Zusätzlich haben wir schwemmholzinduzierte Rechenkräfte für unterschiedliche Randbedingungen gemessen, sowie rein hydrodynamische Kräfte. Erstere betragen ein Vielfaches der letzteren. Die Versuche haben nahegelegt, dass im Prinzip der klassische Strömungswiderstand angesetzt werden darf. Dieser gibt den Einfluss der getesteten Parameter weitestgehend korrekt wieder, insbesondere die Strömungsgeschwindigkeit der Wasseroberfläche beim Rechenstab. Angepasst werden musste dagegen die Schattenfläche der Verklausung und der Strömungswiderstandskoeffizient. Bei beiden spielt der lichte Rechenstababstand eine zentrale Rolle, sowie die maximale Holzlänge. Es kann jedoch auch mit einem pragmatischen Ansatz eine Umhüllende angenommen werden, welche einen konstanten Strömungswiderstandskoeffizient beinhaltet, unabhängig der untersuchten Parameter.

Résumé

Les bois flottants constituent un danger potentiel pour les évacuateurs de crue, car ils peuvent obstruer la section de contrôle du déversoir. Par conséquent, les bois flottants doivent être éloignés de la section de contrôle du déversoir, par exemple au moyen d'un râtelier.

Les râteliers utilisés jusqu'à présent sont conçus pour retenir autant de bois flottants que possible. Ceux-ci manquent alors au cours d'eau aval comme élément créateur d'habitat. Nous avons donc systématiquement étudié sur modèle physique un râtelier "espacé", qui aligne et laisse passer généralement les troncs d'arbres individuels. Dans le cas d'amas de bois flottant, il les retient comme les râteliers classiques. En même temps, il assure une capacité d'écoulement bien plus importante, presque comparable à celle du râtelier complet, même en cas d'accumulation extrême de bois flottant.

En outre, nous avons mesuré les forces induites par les bois flottants sur une barre de râtelier pour différentes conditions de bord, ainsi que les forces purement hydrodynamiques. Les premiers représentent un multiple des seconds. Les tests ont suggéré qu'en principe la formulation classique de la force de traînée peut être appliquée. Celle-ci reflète l'influence des paramètres testés, notamment la vitesse d'écoulement de la surface de l'eau à la barre du râtelier. En revanche, la surface d'obstruction et le coefficient de traînée ont dû être ajustés. Pour les deux, l'espace transversal entre les barres du râtelier joue un rôle central, tout comme la longueur maximale du bois. Avec une approche pragmatique, une enveloppe résultant dans un coefficient de traînée constant peut également être supposée, quels que soient les paramètres examinés.



Summary

Driftwood represents a potential threat to flood releasing systems, as it can block the flow control cross-section. Driftwood should therefore be kept away from the critical cross-section, for example by means of a driftwood rack.

The racks used so far are designed to hold back all driftwood. The following water course, however, then lacks large deadwood elements as a habitat-shaping element. We have therefore systematically examined a "partial" rack in the physical model, which usually aligns and guides individual pieces of driftwood through the spillway inlet. For driftwood groups (congested arrival) however, the rack behaves similar to conventional racks. At the same time, it ensures a much larger discharge capacity, almost comparable to that of the full rack, even under extreme driftwood appearances.

In addition, we measured driftwood-induced rack forces for different boundary conditions, as well as purely hydrodynamic forces. The former are a multiple of the latter. The tests have suggested that in principle the common flow resistance equation can be applied. This equation reflects the influence of the tested parameters relatively well, in particular the water surface flow velocity at the considered rack bar. Nevertheless, the surface area of the obstruction and the drag coefficient had to be adjusted. For both, the open distance between the rack bars plays a central role, as does the maximum wood length. With a pragmatic approach, an envelope resulting in a constant drag coefficient can also be assumed, regardless of the parameters examined.



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
Résumé	3
Summary	4
Inhaltsverzeichnis	5
1 Einleitung	6
2 Schwemmholtzdurchgängigkeit	6
2.1 Motivation	6
2.2 Methode.....	7
2.3 Zentrale Beobachtungen	8
2.4 Schlussfolgerungen	12
3 Rechenkraft	14
3.1 Motivation	14
3.2 Methode.....	15
3.3 Zentrale Beobachtungen	17
3.4 Schlussfolgerungen	22
4 Referenzen	24



1 Einleitung

Im Sommer 2020 wurde der Vertrag zum besagten Projekt zwischen den involvierten Parteien unterzeichnet. Projektbeginn war in September 2020 und das Ende des Projekts fällt auf den März 2022.

Das BFE Projekt enthält zwei Forschungsschritte, namentlich erstens die Untersuchungen zur Schwemmholzdurchgängigkeit – unter Einhaltung der hydraulischen Leistungsfähigkeit – des aufgelösten Rechens vor einer Hochwasserentlastungsanlage, und zweitens die Rechenkraft als Folge der Verklausung. Der erste Forschungsschritt ist im Anhang 1 detailliert zusammengefasst (Bericht «Eco-Barrages», HES-SO). Die Versuche und Resultate zum zweiten Forschungsschritt sind im Anhang 2 detailliert aufgezeigt (Bericht «Force appliquée sur un ratelier», HES-SO//Master)

Dieser BFE-Schlussbericht beinhaltet eine Zusammenfassung der wichtigsten Resultate, sowie die zwei ausführlichen Berichte zu den zwei Forschungsschritten als Anhänge.

2 Schwemmholzdurchgängigkeit

Die Resultate zur Schwemmholzdurchgängigkeit sind im Anhang 1 detailliert aufgezeigt. Hier ist eine Übersicht gegeben. Eine wissenschaftliche Publikation dazu ist als [Bénet et al. \(2022\)](#) eingereicht und aktuell provisorisch akzeptiert.

2.1 Motivation

Vorgängige, ebenfalls vom BFE finanziell unterstützte Modellversuche haben gezeigt, dass Hochwasserentlastungsanlagen (HWE) ohne Massnahmen unter extremem Schwemmholzanfall verklauen. Ihre hydraulische Leistungsfähigkeit wird dadurch deutlich reduziert ([Bénet et al. 2021a, b](#)). Vorgelagerte und vollständige Rechen – sowie andere Massnahmen – halten Schwemmholz vor dem Einlauf zur HWE zuverlässig zurück und erhalten daher deren Leistungsfähigkeit. Dem Aspekt der Talsperren-Sicherheit wurde damit Rechnung getragen.

Nicht berücksichtigt wurde beim vorgängigen Ansatz der ökologische Wert von grossem Totholz in Gewässern. Das vollständige Rückhalten von Schwemmholz erfordert nämlich dessen Entnahme nach dem Hochwasser, wodurch es als lebensraumgestaltendes Element des Fliessgewässers nicht mehr zur Verfügung steht. Der erste Forschungsschritt *Durchleitfähigkeit von aufgelösten Rechen* hatte daher zu Ziel, einen Schwemmholzrechen zu testen, der die Talsperren-Sicherheit gewährleistet und gleichzeitig – zumindest teilweise – durchgängig ist bzw. einen möglichst grossen Anteil des Schwemmholzes im Gewässer belässt.

Der eben erwähnte aufgelöste Rechen verfügt bloss vor jedem zweiten Pfeiler über einen Rechenstab, der vollständige Rechen hat vor jedem Pfeiler einen Rechenstab. Die Abbildung 1 zeigt einen aufgelösten Rechen im Modell während eines Versuchs, die Abbildung 2 zeigt die hiernach verwendeten Parameter.

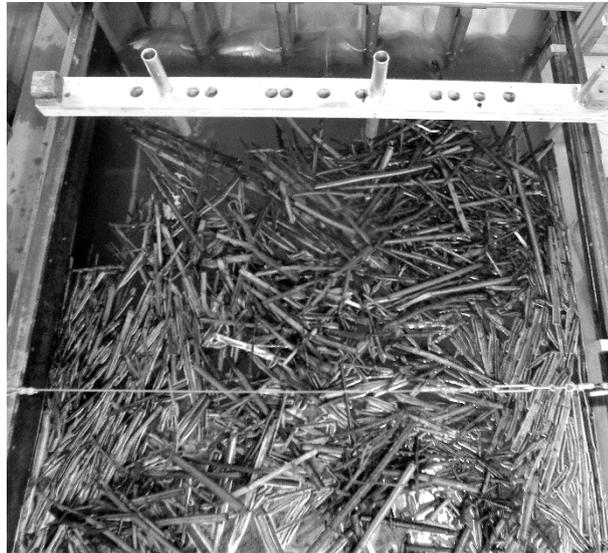


Abbildung 1. Modellversuch mit einem aufgelösten Rechen und einem extremen Schwemmholzanfall.

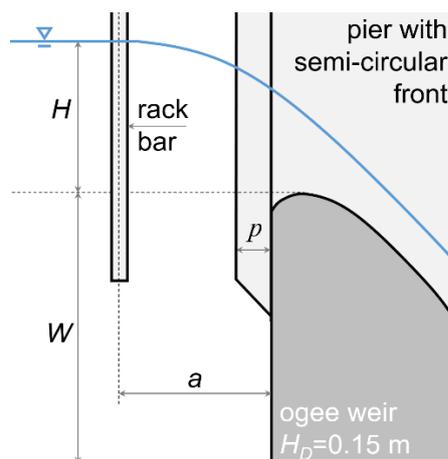


Abbildung 2. Parameterdefinition.

2.2 Methode

Am PL-LCH der EPFL wurden physikalische Modellversuche mit vollständigen und aufgelösten Rechen vor Einläufen zu HWen durchgeführt, die der Einwirkung von Schwemmholz ausgesetzt sind. Die Experimente umfassten das extreme Schwemmholzzenario sowie ergänzend verschiedene Formen von Einzelholzanfall, unterschiedliche Abflüsse, Wehrbreiten b und Rechenpositionen a . Der untersuchten Parameterbereich ist in der Tabelle 1 gezeigt. Darin sind χ_R der normierte Abfluss (mit $\chi_R=1$ als dem Bemessungsabfluss), b/L_M die relative Wehrfeldbreite, und a die Rechenvorlagerung mit vier Positionen (Detail sind im Anhang 1 gegeben, L_M entspricht der maximalen Stammlänge):

1. Der Rechen ist «*entfernt*» vom Einlauf eingebaut (a gross, Abb. 2),
2. der Rechen ist auf einer «*mittleren*» Position eingebaut (a mittel),
3. der Rechen befindet sich «*nahe*» beim Einlauf (a klein), und
4. «*ohne*» Rechen als Referenzkonfiguration.



Insgesamt wurden 573 Versuche durchgeführt, alle mit einem Zufluss des Typs «Reservoir» vor dem Rechen (d.h. mit Zufluss-Froude-Zahlen unter ca. 0.1).

Um die Effizienz des aufgelösten Rechens zu untersuchen, wurde dieser an drei Rechenvorlagerungen a installiert und für drei relative Wehrfeldbreiten b/L_M getestet. Die Verklausungswahrscheinlichkeit P und die hydraulische Leistungsfähigkeit η wurden bewertet, und mit den Werten des vollständigen Rechens sowie mit jenen der Situation ohne Rechen verglichen. Diese sind definiert als:

- Verklausungswahrscheinlichkeit P als Quotient der Anzahl der verklausten Hölzer und der insgesamt zugegebenen Hölzer. Der Wert P beträgt demnach zwischen null (sämtliches Holz passiert den Rechen und das Wehr) und eins (sämtliches Holz verklaust). Die Interpretation von P und der Vergleich von unterschiedlichen Konfigurationen ist grundsätzlich anspruchsvoll, und die am Ende dieses Forschungsschritts gegebene Tabelle 3 mag aussagekräftiger sein als die Abbildungen 3 bis 6.
- Hydraulische Leistungsfähigkeit η als Quotient des Überfallbeiwerts des Profils mit Holz und des Beiwerts ohne Holz. Der Wert η liegt somit zwischen null (die hydraulische Kapazität ist nicht mehr gegeben) und eins (die volle Leistungsfähigkeit tritt auf, ohne Reduktion).

Tabelle 1. Untersuchte Parameterbereiche in Abhängigkeit des Schwemmholzanfalls («hyper-congested» als extremer Anfall, «congested» als mittlere Gruppe, «sporadic» als Einzelholz, und (*) als Wert von [Bénet et al. 2022](#)).

Holzanfall		χ_R	b/L_M	a
		[-]	[-]	[m]
Einzelholz	Min.	0.34	0.40	0.00
	Max.	1.01	0.77	0.40
Gruppe	Min.	0.33	0.40	0.00
	Max.	1.01	0.77	0.40
Extrem	Min.	0.17 (*)	0.40	0.00
	Max.	1.01	0.77	0.40

2.3 Zentrale Beobachtungen

2.3.1 Aufgelöster Rechen

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Verklausungswahrscheinlichkeit P und die hydraulische Leistungsfähigkeit η des aufgelösten Rechens in Funktion der relativen Rechenvorlagerung a/H_R , mit H_R als der jeweiligen Referenz-Energiehöhe des Abflusses ohne Schwemmholz. Diese Normalisierung erwies sich in den vorherigen Untersuchungen zum vollständigen Rechen und vorgelagerten Pfeilerköpfen als massgebend ([Bénet et al. 2021a, b](#)).

Für den *Einzelholzanfall* (Abb. 3) konnten sich die Schwemmhölzer relativ frei bewegen und entsprechend vom aufgelösten Rechen oft in Strömungsrichtung gedreht werden. Insbesondere die Rechenposition 1 mit «grossen» a/H_R und daher «entfernt» von Einlauf bot genügend Raum zur Drehung und die Verklausungswahrscheinlichkeiten nahmen ab, insbesondere im Vergleich zur Situation ohne Rechen (Position 4). Die hydraulische Leistungsfähigkeit war mit dem aufgelösten Rechen und Einzelholzanfall deutlich grösser als jene ohne Rechen (typischerweise bei über 80%).

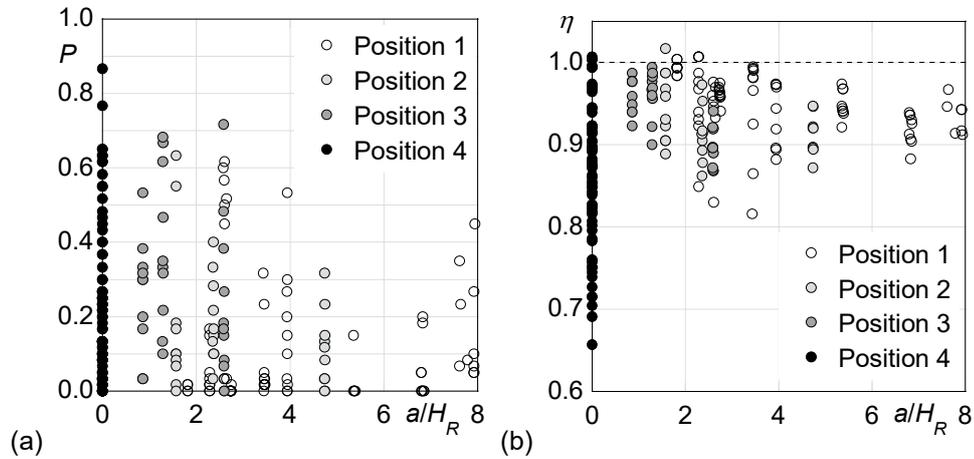


Abbildung 3. Für den aufgelösten Rechen und «Einzelholzanfall»: (a) Verkläusungswahrscheinlichkeit und (b) hydraulische Leistungsfähigkeit. Positionen gemäss Kap. 2.2 (Bénet et al. 2022).

Für den *Schwemmholzanfall als Gruppe* (Abb. 4) zeigt sich kaum ein Unterschied bezüglich der Verkläusungswahrscheinlichkeit mit und ohne des aufgelösten Rechens. Die hydraulische Leistungsfähigkeit dagegen ist deutlich grösser mit dem aufgelösten Rechen, und liegt meist bei über 80%.

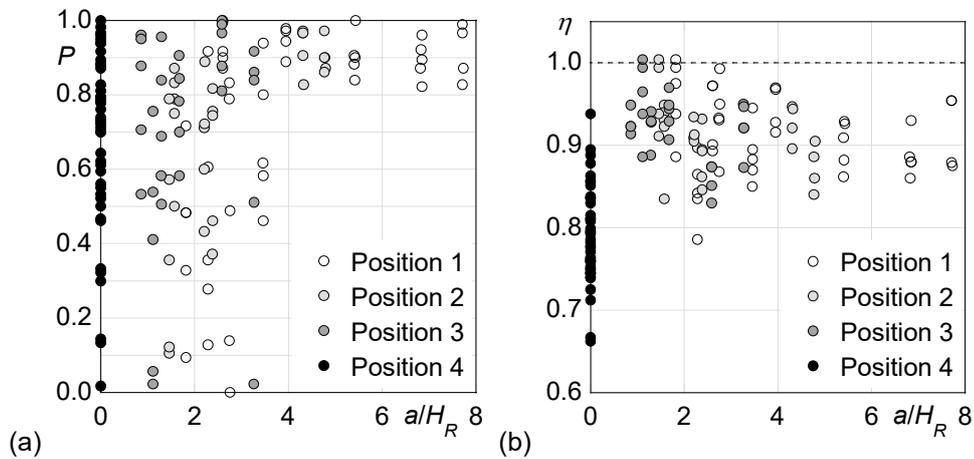


Abbildung 4. Für den aufgelösten Rechen und einen Schwemmholzanfall als «Gruppe»: (a) Verkläusungswahrscheinlichkeit und (b) hydraulische Leistungsfähigkeit. Positionen gemäss Kap. 2.2 (Bénet et al. 2022).

Unter einem *extremen* Schwemmholzanfall blockiert das gesamte Holzvolumen am aufgelösten Rechen und Einlauf, womit $P=1$ ist. Dies gilt auch für die Situation ohne Rechen. Die Anwesenheit des aufgelösten Rechens erhöht jedoch die Leistungsfähigkeit deutlich, typischerweise auf über 90% (Abb. 5).

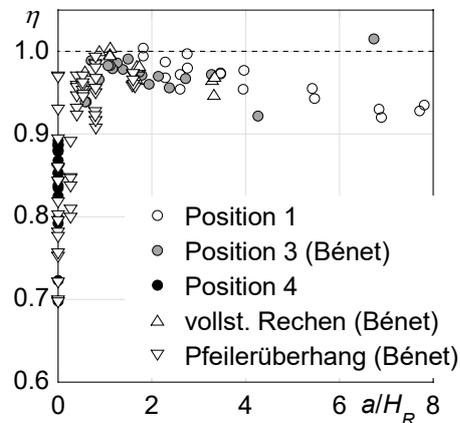


Abbildung 5. Hydraulische Leistungsfähigkeit des aufgelösten Rechen und einem extremen Schwemmholzanfall. Positionen gemäss Kap. 2.2 (Bénet et al. 2022).

Der aufgelöste Rechen lässt folglich deutlich mehr Einzelholz passieren als die Konfiguration ohne Rechen (Tabelle 3). Für einen Holzanfall als Gruppe oder ein extremes Aufkommen besteht kein signifikanter Unterschied. Die Durchlässigkeit ist somit erhöht für den häufigsten «Lastfall», verglichen mit der Situation ohne Rechen oder mit einem vollständigen Rechen. Dieses Ziel wurde daher relativ gut erreicht und es verbleibt mehr grosses Totholz im Gewässer. Für den Schwemmholzanfall in grossen Gruppen und die Extremsituation wird ungefähr gleich viel Holz am aufgelösten Rechen zurückgehalten. Hier zeigt er keinen Vorteil. Dies ist vielleicht sogar positiv, da das Schwemmholz nach der HWE an Engstellen im Gewässer verklausen würde, und die Gefährdung damit einzig verschoben würde.

Die hydraulische Leistungsfähigkeit wird durch den aufgelösten Rechen zwar deutlich gesteigert ($\eta > 0.80$), verglichen mit der Situation ohne Rechen. Eine beinahe unbeeinträchtigte Leistung ($\eta \approx 0.95$), wie sie beispielsweise für die Situation mit einem vollständigen Rechen auftritt, ist jedoch nicht gegeben. Folglich würde der aufgelöste Rechen mit überhängenden Pfeilern kombiniert (Bénet 2021a, b). Damit soll seine Durchleitfähigkeit erhalten bleiben, kombiniert mit einer gesteigerten hydraulischen Effizienz.

2.3.2 Aufgelöster Rechen mit Pfeilerüberhang

Der maximale Pfeilerüberhang von $p=0.08$ m (Abb. 2, Bénet et al. 2021a, b) wurde im Modell eingebaut, zusätzlich zum aufgelösten Rechen (Abb. 6). Wie die Abbildung 7a zeigt, blieb die Durchgängigkeit für Einzelholz erhöht, und jene für die anderen Holz-Anfälle quasi unverändert. Markant ist der Unterschied jedoch bei der hydraulischen Leistungsfähigkeit. Diese beträgt nun immer über ca. $\eta \approx 0.95$ so lange $0.35 < p/H_R < 4$ (Abb. 7b).



Abbildung 6. Kombination von aufgelöstem Rechen und Pfeilerüberhang (Bénet et al. 2022).

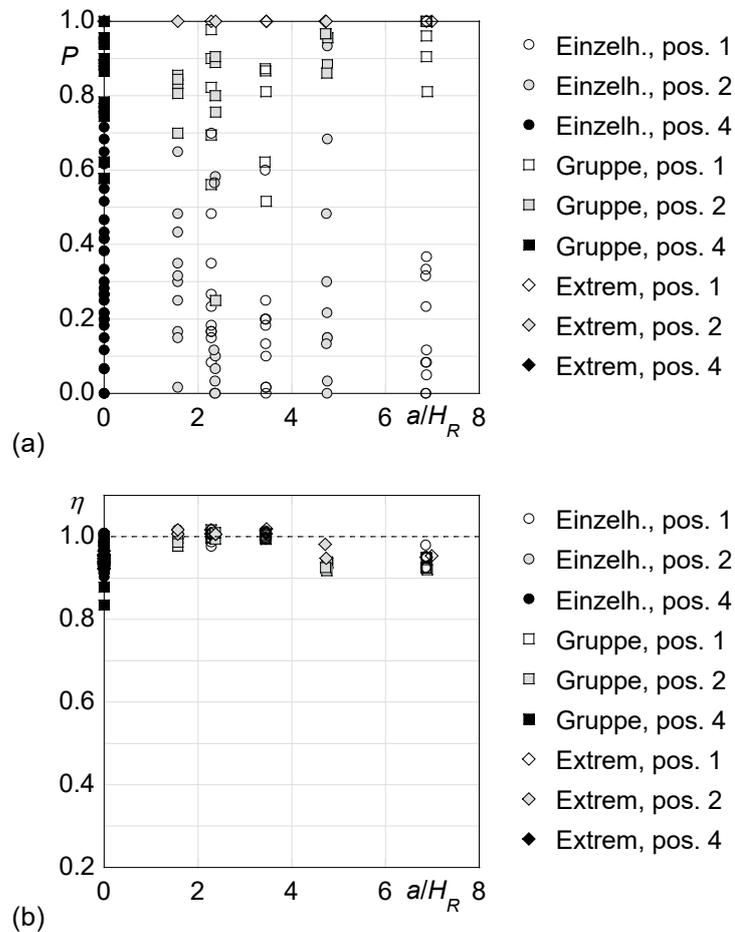


Abbildung 7. Für den aufgelösten Rechen mit einem Pfeilerüberhang und unterschiedlichen Schwemmholzanfall: (a) Verklausungswahrscheinlichkeit und (b) hydraulische Leistungsfähigkeit (Bénet et al. 2022).



2.4 Schlussfolgerungen

Wie im Anhang 1 detailliert erläutert, können aufgrund der durchgeführten Versuche die folgenden Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Breite Wehfelder ($b/L_M > 0.80$) sind am effizientesten, um Schwemmholz durchzuleiten und gleichzeitig die Abflusskapazität aufrecht zu erhalten. Solche wurden zwar hier nicht getestet, aber unsere Daten deuten dies klar an.
- Bei engeren Wehfelder ($b/L_M \leq 0.80$) und einem kritischen Schwemmholzaufkommen kann wie folgt differenziert werden:
 1. Ist die hydraulische Kapazität zentral (z.B. $\eta \geq 0.95$) und Schwemmholz soll, so weit als möglich, durchgeleitet werden, dann empfiehlt sich die Installation eines aufgelösten Rechens ($a/H_R < 4$) kombiniert mit einem Pfeilerüberhang ($p/H_R > 0.35$). Es wird dann ca. 20% mehr Einzelholz durchgeleitet.
 2. Ist das Durchleiten wichtiger als die hydraulische Kapazität, dann kann ein aufgelöster Rechen (an der Position $1 \leq a/H_R < 4$, ohne Pfeilerüberhang) vorgesehen werden. Die Kapazität beträgt dann $\eta > 0.80$ für jeden getesteten Schwemmholzanfall und es passiert bis zu 30% mehr Schwemmholz (Einzelholzanfall), verglichen mit der Konfiguration ohne Rechen.

Die Tabellen 2 und 3 geben die gemittelte Kapazität und Verklausungswahrscheinlichkeit pro Konfiguration.

Tabelle 2. Verbleibende hydraulische Kapazität η (Mittelwert aller getesteten Abflüsse, [Bénet et al. 2022](#)).

Rechen- Position	Holzanfall	Ohne Pfeilerüberhang				Mit Pfeilerüberhang
		b/L_M [-]			Mittelwert	b/L_M [-]
		0.40	0.60	0.77		0.60
1	Einzelholz	0.94	0.94	0.97	0.95	0.99
2		-	0.92	-	0.92	0.98
3		-	0.94	-	0.94	-
4		0.80	0.88	0.95	0.88	0.97
1	Gruppe	0.94	0.87	0.93	0.91	0.98
2		-	0.89	-	0.89	0.98
3		-	0.90	-	0.90	-
4		0.79	0.77	0.83	0.79	0.95
1	Extrem	0.95	0.96	0.98	0.96	0.99
2		-	-	-	-	0.99
3		0.97	-	0.97	0.97	-
4		0.86	0.85	0.81	0.84	0.97



Tabelle 3. Verklausungswahrscheinlichkeit P (Mittelwert aller getesteten Abflüsse, [Bénet et al. 2022](#)).

Rechen- position	Holzanfall	Ohne Pfeilerüberhang			Mittelwert	Mit Pfeilerüberhang
		b/L_M [-]				b/L_M [-]
		0.40	0.60	0.77		0.60
1	Einzelholz	0.22	0.06	0.01	0.10	0.20
2		-	0.16	-	0.16	0.26
3		-	0.30	-	0.30	-
4		0.41	0.18	0.05	0.21	0.32
1	Gruppe	0.94	0.68	0.59	0.74	0.82
2		-	0.76	-	0.76	0.82
3		-	0.82	-	0.82	-
4		0.80	0.72	0.52	0.68	0.81
1	Extrem	≈ 1	≈ 1	≈ 1	≈ 1	≈ 1
2		-	-	-	-	≈ 1
3		≈ 1	-	≈ 1	≈ 1	-
4		≈ 1	≈ 1	≈ 1	≈ 1	≈ 1



3 Rechenkraft

Der Schlussbericht zur Kraft von verlegten Schwemmholzrechen liegt als Anhang 2 bei. Hier ist eine Übersicht gegeben. Eine wissenschaftliche Publikation dazu wird gegenwärtig verfasst und im Frühling 2022 eingereicht.

3.1 Motivation

Verklaute Rechenstäbe erfahren grosse Kräfte, insbesondere unter einer vollen Verlegung und bei hohen Fliessgeschwindigkeiten. Bei der Abschätzung der Kräfte als Folge eines vorgelagerten und angepressten Schwemmholzteppichs können zwar strömungsmechanische Ansätze formuliert werden, bisher jedoch mit (zu) vielen Unbekannten, wie beispielsweise dem Widerstandskoeffizienten c_w , der Schattenfläche A sowie einer Minderung aufgrund der Durchlässigkeit der Verklauung.

Die aktuelle Literatur ist noch lückenhaft und zur praktischen Auslegung von Rechen ungeeignet. Sie enthält die nachfolgend erwähnten Ansätze zur Bestimmung der Rechenkräfte:

- [Gippel et al. \(1996\)](#) beziehen sich auf den Widerstandskoeffizienten $c_w=R/(0.5\rho U^2LD)$ zur Berechnung der stationären hydrodynamischen Rechenkraft R mit Verlegung. Dabei ist LD die Verlegungsfläche des Holzes (Produkt aus Stammlänge L und -durchmesser D), ein Wert der für den planenden Ingenieur unbekannt ist. Es wurden prismatische Stangen sowie andere Elemente getestet und dafür verschiebende c_w bestimmt. Je nach Typ und Belegung folgen Werte zwischen $c_w=0.4$ und 1.2 für langsame Strömungen, was aufgrund der eher geringen Verlegung (bis 30% des hydraulischen Querschnitts) als belanglos erscheint. Der Widerstandskoeffizient mit Verklauung kann mittels einer empirischen Formel als Funktion des «unbeeinflussten» c_w und des Verlegungsgrades bestimmt werden. Eine spezielle Testreihe hat zudem gezeigt, dass c_w auch von der Froude-Zahl und der Abflusstiefe abhängt, und für extreme Kombination bis zu knapp $c_w=5$ betragen kann.
- [USCE \(1997\)](#) gibt einen Ansatz zur Berechnung der Aufprallkräfte einzelner Holzelemente bei Laufkraftwerken. Im Wesentlichen werden diese mit dem Eigengewicht des Elements gleichgesetzt.
- [NCHRP \(2000\)](#) geben eine Übersicht zu Kräften auf Brückenpfeiler und -kasten unter dem Einfluss von Schwemmholz und weisen auf die Heterogenität der Aussagen hin. Sie zeigen den Einfluss des Verlegungsgrades, welcher jedoch nur im Modell bestimmbar ist.
- Der maximale dynamische Aufprall (Umhüllende der im Modell gemessenen Kräfte) wurde von [Haehnel und Daly \(2004\)](#) mit $F_M=1550Um^{0.5}$ angegeben, mit U als der Geschwindigkeit und m als der Masse des Holzes. Der Aufbau der empirischen Formel ist dem Impulssatz entlehnt und vereinfacht. Es zeigt sich erneut der dominante Einfluss der Zuflussgeschwindigkeit, welche bei Flusswehren höher als bei Reservoir-Strömungen ist.
- Die [FHWA \(2005\)](#) zitiert die Untersuchungen von [NCHRP \(2000\)](#), bezieht sich auf die stationäre hydrodynamische Rechenkraft und gibt Werte für c_w um 1.8 an, bzw. als eine Funktion der Zufluss-Froude-Zahl und der Rechenverlegung.
- [Kälin et al. \(2005\)](#) entwerfen einen «Normbaumstamm» und lassen diesen senkrecht auf ein Blechfeld als Vereinfachung einer Stahlwasserbaute aufprallen. Im Fokus steht die Bemessung der Einbauten, und nicht die Verlegung der Einbauten oder die Kraft eines Schwemmholzteppichs.



- Konkrete Untersuchungen zum Aufprall und zum (zusätzlichen) Strömungswiderstand als Folge von Schwemmholaufkommen und Zivilisationsmüll werden aktuell in der Literatur hauptsächlich bei Gebäuden diskutiert (beispielsweise [Nistor et al. 2017](#) und [Wüthrich et al. 2020](#)). Die zugrundeliegenden Daten wurden mittels physikalischer Modellversuche erhoben. Diese Studien belegen, dass die Kenntnis von Verklausungs-«Dichten» erforderlich ist, um Strömungskräfte auf Gebäude zu beschreiben. Zudem wird ersichtlich, dass nicht der Aufprall von Schwemmholt («forest debris») am Gebäude der massgebende Lastfall darstellt, sondern die zusätzliche Strömungskraft aufgrund der Reduktion der Durchlässigkeit infolge der Verlegung des Strömungsquerschnitts. Die Autoren nennen, für Schwemmholt ohne containerförmige Elemente (grosse Zivilisationselemente), einen Faktor von 2 in Bezug auf die Belastung des Gebäudes, verglichen mit der Situation ohne Holz (Reinwasser).
- [Spreizer et al. \(2019\)](#) haben Holzelemente mit Beschleunigungssensoren ausgerüstet und im physikalischen Modell mit Hindernissen kollidieren lassen. Beim Auftreffen der Elemente auf einen Brückenpfeiler haben sie während des beschriebenen Versuchs Beschleunigungen von bis zu ca. knapp 2g gemessen, bei der Interaktion mit der Kanalwand von knapp 4g.
- [Majtan et al. \(2021\)](#) untersuchen mittels SPH Simulationen die von Schwemmholt auf einfeldrige Steinwerk-Bogenbrücken ausgeübten Kräfte. Schwemmholt erhöht diese, und kann insbesondere auch einzelne Steine durch Anprall aus dem Verbund lösen.

3.2 Methode

Der Versuchskanal der PL-EPFL wurde für die aktuelle Fragestellung angepasst. Es wurde eine Kraftmesseinrichtung ergänzt. Konkret wurde der Rechen drehbar gelagert und über einen Hebelarm mit einer Kraftmessdose versehen (rechts in Abb. 8). Die Kraftmessdose wurde mittels präzisen Referenz-Gewichten kalibriert. Die rein hydrodynamische Rechenkraft (nur Wasser, ohne Holz) wurde danach ebenfalls systematisch gemessen und mit Werten aus der Literatur validiert.



Abbildung 8. Drehbare Halterung des Rechens mit dem Hebelarm und der Kraftmessdose rechts im Bild.

Die Versuchssystematik ergibt sich aus den Regeln der Kunst, der Fragestellung und der Erfahrung. Es wurden insgesamt 112 Versuche durchgeführt, bestehend aus 54 Konfigurationen die mindestens jeweils doppelt getestet wurden. Zudem wurde unter jeder Testnummer jeweils die Situation mit und ohne Holz gemessen, damit der Strömungswiderstandskoeffizient direkt aus dem Datensatz ausgelesen werden kann.



Die Versuche umfassten die systematische Variation der Abflüsse (ausgedrückt mit der relativen Überfallhöhe χ), der Wehrfeldbreite b , der Rechenvorlagerung a (Abb. 2), des Rechentyps (vollständig oder aufgelöst, der lichte Stababstand wird als b_r bezeichnet und beträgt $b_r=b$ für den vollständigen und $b_r=2b$ für den aufgelösten Rechen) und des Holzanfalls (ohne Holz, sowie unter dem extremen Holzanfall mit 2'840 Elementen). Die Pegel-Abfluss-Beziehung wurde erneut mit Werten aus der Literatur validiert und als zuverlässig befunden.

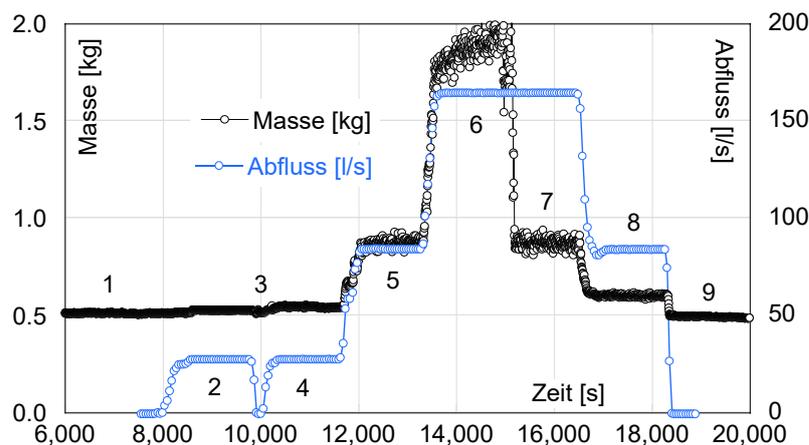


Abbildung 9. Typische Messwerte von Abfluss und Schwemmholzkraft (hier als Masse ausgedrückt), wie sie während eines Versuchs erfasst wurden (Tests 1, 3 und 5).

Die Abbildung 9 zeigt beispielhaft die erfassten Roh-Messdaten, hier Abfluss [l/s] und Rechenkraft (von der Kraftmessdose als Masse ausgegeben). Folgende Vorgehensweise wurde angewandt:

1. Das Messsystem wird gestartet und eine Stunde betrieben, um die Drift der Dose ausklingen zu lassen. Am Ende der Dauer wird die «Nullkraft» gemessen, d.h. die Kraft der Rechenkonstruktion ohne weitere äussere Einwirkungen. Diese ist jeweils allen anderen Kräften in Abzug zu bringen.
2. Der geringste Abfluss ($\chi=0.33$) wird eingestellt 20 min beibehalten. Es wird die hydrodynamische Kraftkomponente (nur Wasser) gemessen.
3. Das Schwemmholz wird zugegeben und gleichmässig im Kanal verteilt.
4. Der geringste Abfluss ($\chi=0.33$) wird erneut eingestellt und weitere 20 min beibehalten. Es wird die Kraftkomponente von Holz und Wasser gemessen. Für die spätere Auswertung wird dieser die Komponente des Wassers (aus Schritt 2) subtrahiert.
5. Der Abfluss wird auf $\chi=0.67$ eingestellt und 20 min beibehalten. Es wird die Kraftkomponente von Holz und Wasser gemessen.
6. Der Abfluss wird auf $\chi=1$ eingestellt und 40 min beibehalten, damit sich das Messsignal stabilisiert bzw. die Verklausung kompaktieren kann. Es wird die Kraftkomponente von Holz und Wasser gemessen. Am Ende der Periode wird das Holz entnommen.
7. Der Abfluss wird weitere 20 min auf $\chi=1$ gehalten. Es wird die Kraftkomponente des Wassers allein gemessen (als Vergleichswert zum Schritt 6).
8. Der Abfluss wird auf $\chi=0.67$ abgesenkt und 20 min beibehalten. Es wird die Kraftkomponente des Wassers gemessen (als Vergleichswert zum Schritt 5).



9. Der Abfluss wird abgestellt und erneut die «Nullkraft» gemessen (wie im Schritt 1). Sollte diese ungleich jener vor den Versuchen sein, so wird der Fehler linear über die Zeit verteilt.

3.3 Zentrale Beobachtungen

3.3.1 Hydrodynamische Kraft

Die hydrodynamische Kraft auf ein Objekt (bzw. dessen Strömungswiderstand) besteht aus dem Druck- und den Schubspannungswiderstand. Ersterer resultiert aus dem Druckunterschied vor und nach dem Körper, letzterer aus der Reibung im Fluid und an der Körperoberfläche. Da Rechenstäbe nur eine geringe Oberfläche aufweisen, ist hier der Druckwiderstand massgebend.

Die Strömungswiderstandskraft F_W (Index W für Wasser) eines Körpers ist abhängig von der Anströmgeschwindigkeit U , der Fluidichte ρ und der Schattenfläche A des Körpers zu:

$$F_W = \frac{1}{2} c_W \rho A U^2 \quad (1)$$

Darin ist c_W der Strömungswiderstandskoeffizient. Für zylindrische Stäbe in variablen Geschwindigkeitsprofilen gibt [Cheng \(2013\)](#) den Strömungswiderstandskoeffizienten diskretisiert pro Teillänge Δz und der dazu gehörenden lokalen Geschwindigkeit U an, welche mittels der ortsabhängigen Reynolds-Zahl R ausgedrückt werden, als:

$$c_W = 11R^{-0.75} + 0.9 \left[1 - e^{-\left(\frac{1000}{R}\right)} \right] + 1.2 \left[1 - e^{-\left(\frac{R}{4500}\right)^{0.7}} \right] \quad (2)$$

Die Strömungswiderstandskraft pro konstanter Teillänge Δz wird segmentweise aufsummiert zur totalen Strömungswiderstandskraft als:

$$F_W = \frac{1}{2} \rho D \Delta z \sum (c_W U^2) \quad (3)$$

Darin wurde die Schattenfläche A ersetzt mit dem Produkt von D (Durchmesser des Rechenstabs) und Δz . Im Modell müssen somit die Strömungswiderstandskraft, das vertikale Geschwindigkeitsfeld und die Wasserspiegellagen bekannt sein, damit diese in die entsprechenden c_W Werte umgerechnet (Gl. 3) werden können, und dann mit den Werten aus der Literatur verglichen werden können.

In einem ersten Schritt wurden die im Model gemessenen Momente M_R , resultierend aus den Strömungswiderstandskräften, mit den gerechneten Werten M_C gemäss dem eben vorgestellten Ansatz (Gl. 3) verglichen (Abb. 10). Es zeigt sich, dass die gemessenen Momente in der Regel um ca. 30% über den gerechneten liegen. Generell ist die Korrelation mit $R^2=0.91$ jedoch hoch. Es wird vermutet, dass dies mit dem ausgeprägt dreidimensionalen Strömungsfeld vor dem Wehr zusammenhängt. Der direkte Vergleich der Strömungswiderstandskoeffizienten c_W gemäss [Cheng \(2013\)](#) ist weniger aussagekräftig, da die Werte weniger korrelieren. Und dies ist nicht nur mit unseren eignen Daten der Fall, sondern auch mit jenen aus der Literatur, z.B. mit [NCHRP \(2000\)](#).

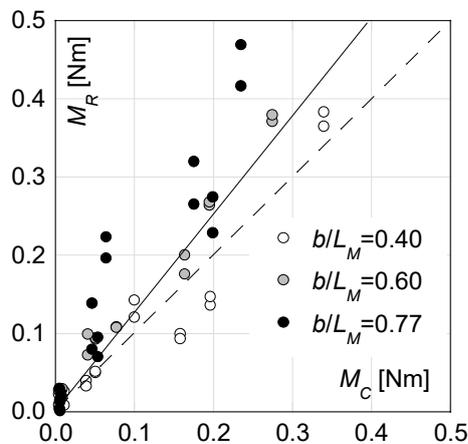


Abbildung 10. Gemessene und gerechnete (mit Hilfe der Gl. 3 und den entsprechenden Hebelarmen) Momente auf die Rechen, hier ausschliesslich für Wasser.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Kräfte (Momente) aus der rein hydrodynamischen Belastung gemäss [Chen \(2013\)](#) relativ gut vorausgesagt werden können, sofern dessen Kräfte mit einer Konstanten von 1.30 multipliziert werden. Dies ist notwendig, um die Randbedingungen an unsere Rechensituation anzupassen. Allerdings ist das bloss ein peripheres Resultat der vorliegenden Arbeit, da die rein hydrodynamischen Kräfte typischerweise um den Faktor 2 bis 6 unter den holzinduzierten Kräften liegen, und daher für den Bemessungsfall nicht massgebend sind.

3.3.2 Holzinduzierte Kraft

Die holzinduzierte Kraft wird im Modell als jene Kraft gemessen, welche das Holz (unter Abzug der hydrodynamischen Kraft) auf Höhe des Wasserspiegels auf die getesteten Rechen ausübt. Dabei spielt der eingebaute Rechentyp eine zentrale Rolle. Der vollständige Rechen weist im Modell eine relative Stabweite von $b_r/L_M < 0.80$ auf, mit b_r als lichten Abstand zwischen zwei benachbarten Rechenstäben und L_M als der maximalen Länge eines Schwemmholzstammes.

Der «enge» vollständige Rechen lässt Schwemmholz am Rechen selber verklauen, denn er erfüllt das aus der Literatur bekannte Kriterium von [Godtland und Tesaker \(1994, \$b_r/L_M < 0.80\$ \)](#). Dieses besagt, ab welcher Stabweite ein Rechen das Holz eher durchleitet bzw. zurückhält. Am «engen» Rechen bleibt praktisch das gesamte Schwemmholzvolumen hängen, und drückt entsprechend gegen ihn. Anders ist die Situation beim aufgelösten Rechen, der grössere lichte Stababstände als nach [Godtland und Tesaker \(1994\)](#) aufweist. Hier stemmt sich nur ein Teil des Schwemmholzes gegen den Rechen. Einzelne Stämme können sich auch gegen die dahinter liegenden Wehrpfeiler abstützen. Der Rechen erfährt somit nur einen Teil der Schwemmholzkraft.

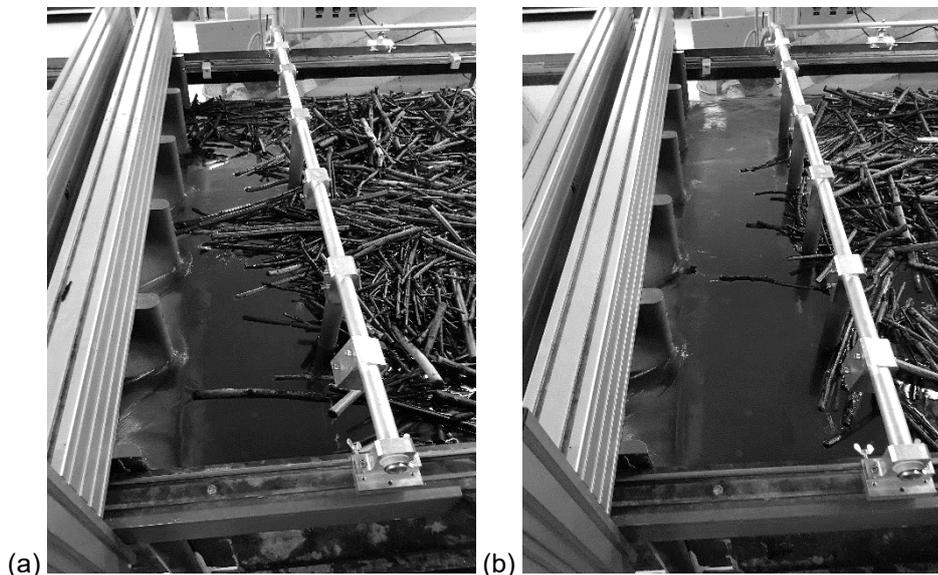


Abbildung 11. Beispielhafte Verklausung des (a) aufgelösten und (b) vollständigen Rechens im Modell. Beim aufgelösten Rechen stützen sich einzelne Stämme auch gegen die Wehrpfeiler.

Um dem eben beschriebenen Phänomen Rechnung zu tragen, wird im Weiteren die Stabkraft f_H (total gemessene holzinduzierte Kraft F_H durch die Anzahl der Rechenstäbe dividiert) als massgeblich verwendet. Der holzinduzierte Strömungswiderstandskoeffizient c_H wird aufgrund der Messdaten wie folgt bestimmt, in Anlehnung an Gleichung 1:

$$c_H = \frac{2f_H}{\rho A_H U^2} \quad (4)$$

Gleichung 4 stellt einen physikalisch sinnvollen Ansatz dar, muss für die praktische Anwendung jedoch mit Annahmen untermauert werden. Erstens stellt U in unserem Fall die horizontale Komponente der Strömungsgeschwindigkeit an der Wasseroberfläche beim Rechenstab dar. Diese Annahme ist sinnvoll, da die Verklausungen beim Rechen im Modell meist nur ein- und selten mehrlagig waren, und das betrachtete Holz grundsätzlich geschwommen ist. Die Strömungsgeschwindigkeit im Reservoir war äusserst gering und drückte das Holz ihrerseits kaum an dem Rechen. Zweitens muss eine Schattenfläche A_H definiert werden. Eigentlich entspricht diese der vom Schwemmholz verlegten Fläche. Eine solche ist dem planenden Ingenieur allerdings unbekannt, und im Modell auch nur sehr schwer bestimmbar. Wir haben daher, nach reiflicher Analyse der Daten, entschieden, dass

- $A_H = D_M \cdot b_r$ ist für «geringe» lichte Rechenabstände von $b_r \leq L_M$, und
- $A_H = D_M \cdot L_M$ ist für «grosse» lichte Rechenabstände von $b_r > L_M$.

Damit wird eine einlagige Verklausung angenommen, mit dem maximalen Stammdurchmesser D_M als Dicke. Die Breite der Verklausung entspricht den geringeren Wert von maximaler Stammlänge L_M oder des lichten Stababstandes b_r .

Vollständiger Rechen

Der vollständige Rechen erfährt die gesamte schwemmholzinduzierte Kraft und ist daher als erster zu untersuchen. Die systematischen Versuche haben es erlaubt, den Einfluss des Abflusses, der Wehrfeldbreite, der Rechenvorlagerung, und der Zufluss-Froude-Zahl (im Reservoir) auf die holzinduzierte Stabkraft einzeln zu analysieren. Es hat sich gezeigt, dass alle Variablen in Gleichung 4



de facto recht gut abgebildet werden, ausser des relativen lichten Stababstandes b_r/L_M . Hier nimmt die Stabkraft mit b_r/L_M zu, was zu erwarten war: (i) Bei «grossen» lichten Stababständen drückt ein «breites» Schwemmholzpaket gegen einen bestimmten Stab, und (ii) verteilt sich die Kraft auf mehrere Stäbe bei langen Stämmen. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 12 gut erkennbar. Die Korrelation mit einem globalen linearen Trend ist mit $R^2=0.87$ recht hoch für Schwemmholzversuche.

Im Bild sind Tests mit Zufluss-Froude-Zahlen unter 0.02 mit einem grauen Kreis hinterlegt. Diese liefern insgesamt eher wenig zuverlässige Kräfte, da die Magnituden sehr gering bzw. im Bereich der Messgenauigkeit liegen. In die weitere Auswertung wurden diese Versuche nicht mehr eingeschlossen.

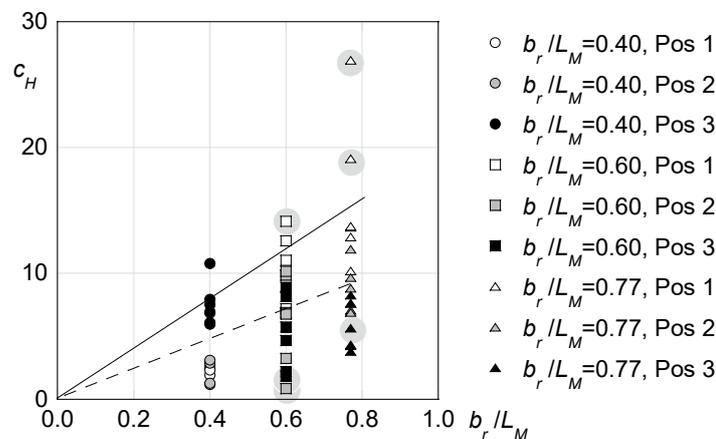


Abbildung 12. Holzinduzierte Strömungswiderstandskoeffizienten c_H des vollständigen Rechens in Funktion des relativen lichten Rechenstababstandes, mit einem linearen Trend.

Der lineare Trend folgt eigentlich der Gleichung $c_H=12.33(b_r/L_M)$, welche im Bild als gestrichelte Linie gezeigt ist. Mit Blick auf die Tatsache, dass hier ein Schwemmholzphänomen untersucht wird, empfehlen wir eher die Betrachtung mittels einer Umhüllenden. Diese ist in der Abbildung als ausgezogene Linie gezeigt und folgt der Funktion:

$$c_H = 20 \frac{b_r}{L_M} \quad (5)$$

Die Gleichung 5 gilt ausschliesslich für «geringe» lichte Rechenabstände mit $b_r/L_M < 0.80$. Nur dann lehnt sich *alles* Schwemmholz gegen den Rechen. Wie sich die Stabkraft bei grösseren lichten Stababständen verhält, muss mittels des aufgelösten Rechens untersucht werden.

Aufgelöster Rechen

Der aufgelöste Rechen verfügt bloss über einen Rechenstab vor jedem zweiten Pfeiler. Das Schwemmholz stützt sich beim aufgelösten Rechen somit gegen den Rechenstab *und* den benachbarten Pfeiler. Der relative lichte Stababstand variiert nun im Bereich von $0.80 \leq b_r/L_M \leq 1.54$, was über dem Kriterium von [Godtland und Tesaker \(1994\)](#) liegt. Es war daher zu erwarten, dass der aufgelöste Rechen teilweise «durchgängig» wird.

Die Auswertung und Darstellung der Messergebnisse erfolgten analog wie beim vollständigen Rechen. Die Abbildung 13 zeigt die Strömungswiderstandskoeffizienten c_H von Holz in Funktion des relativen lichten Stababstands b_r/L_M , welcher im Vergleich zum vollständigen Rechen nun doppelt so gross ist. Grundsätzlich sind die Koeffizienten in etwa gleich gross wie beim vollständigen Rechen,



und folgen demselben Trend, bloss mit grösseren b_r/L_M . Eine lineare Regression ergibt den Zusammenhang $c_H=6.15(b_r/L_M)$ mit $R^2=0.80$, was im Kontext von Schwemmholz immer noch gut ist. Interessanterweise beträgt die Steigung von 6.15 in der Gleichung des aufgelösten Rechens genau die Hälfte der Steigung vom vollständigen Rechen (von 12.33).

Wird in die Daten der Abbildung 13 erneut eine Umhüllende eingepasst, so folgt:

$$c_H = 10 \frac{b_r}{L_M} \quad (6)$$

Die Steigung der Geraden aus Gleichung 6 beträgt die Hälfte der Steigung aus Gleichung 5. Der aufgelöste Rechen erfährt somit höchstens die halbe Kraft des vollständigen Rechens. Erneut sind im Bild die Versuche mit Zufluss-Froude-Zahlen unter 0.02 in grau dargestellt und für die Datenauswertung nicht berücksichtigt.

Auf unseren Fall anwendbare Daten liefern [NCHRP \(2000\)](#). Sie spezifizieren schwemmholzinduzierte Kräfte detailliert für den Fall des Brückenpfeilers. Wir interpretieren dies in unserem Kontext als aufgelöster Rechen mit sehr grossem lichten Stababstand. Konkret folgt ungefähr $3 < b_r/L_M < 6$ für ihre Experimente. Basierend auf ihren Kraftmessungen, Schwemmholzdimensionen, Fließgeschwindigkeiten und der Kanalgeometrie wurden Werte von c_H mit unserem Ansatz berechnet. Unterschiede gibt es in der Form des Kopfes: wir arbeiten mit (i) runden Rechenstäben, während [NCHRP \(2000\)](#) im Grundriss rechteckige Brückenpfeiler untersuchte, (ii) einem Reservoir vor dem Wehr, während [NCHRP \(2000\)](#) ein Fließgewässer voraussetzte, und (iii) einem «extremem» Schwemmholzvolumen, während [NCHRP \(2000\)](#) ein geringeres betrachtete.

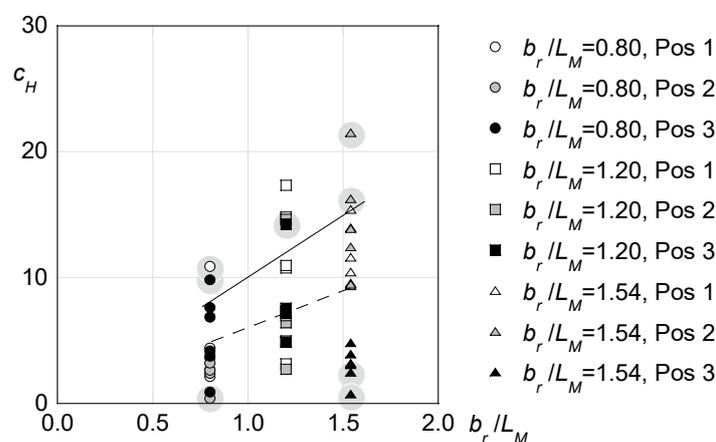


Abbildung 13. Holzinduzierte Strömungswiderstandskoeffizienten c_H des aufgelösten Rechens in Funktion des relativen lichten Rechenstababstandes, mit einem linearen Trend.

Die Abbildung 14 ergänzt unseren Daten (nur mit Zufluss-Froude-Zahlen über 0.02) jene von [NCHRP \(2000\)](#). Diese liegen weiter rechts bei grossen b_r/L_M und reichen bis zu ungefähr $c_H < 17$. Dieser Wert entspricht auch dem von uns beobachteten Maximum. Die Werte steigen somit nicht mehr an für zunehmend lichte Rechenweiten, sondern erreicht ab ungefähr $b_r/L_M > 1.54$ den erwähnten Höchstwert. Dies ist einleuchtend, da sich kein «sehr» breiter Schwemmholzteppich vor einem einzelnen Stab ausbilden kann, nur weil der lichte Stababstand «sehr» gross wird. Die Breite der Verklauung, und damit auch der c_H Wert, entkoppelt sich von b_r/L_M für sehr weite Stababstände. Wir haben dieses Phänomen bereits bei der Formulierung der Schattenfläche A_H der Verklauung eingebaut, wie vorgängig erwähnt. Die massgebende Breite der Verklauung zu deren Bestimmung beträgt den



geringeren Wert von maximaler Stammlänge oder lichtem Stababstand. Die Daten von [NCHRP \(2000\)](#) helfen entsprechend, diesen Übergang festzulegen.

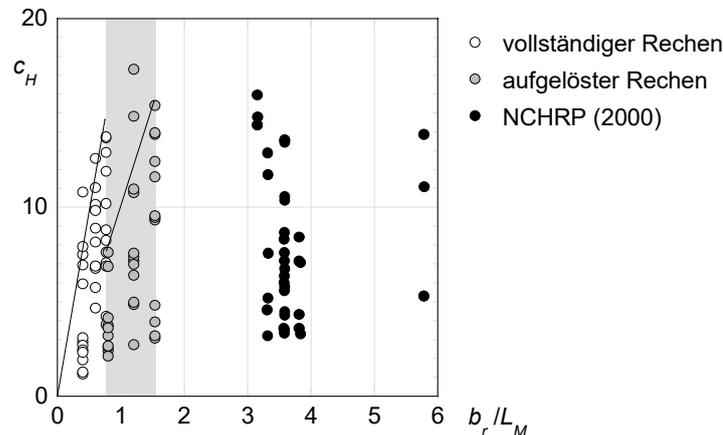


Abbildung 14. Holzinduzierte Strömungswiderstandskoeffizienten c_H abgeschätzt mit den Daten von [NCHRP \(2000\)](#) und unserer Vorgehensweise.

3.4 Schlussfolgerungen

Schwemmholz-Kräfte (ohne die hydrodynamische Komponente) auf verlegte Rechen lassen sich zuverlässig mit dem gängigen Ansatz der Strömungswiderstandskraft formulieren, bezogen auf einen einzelnen Rechenstab. Die systematischen Modellversuche haben es erlaubt, diese Gleichung zu validieren und kalibrieren. Für den «extremen» Schwemmholzanfall wirkt die folgende, maximale (hergeleitet aus einer Umhüllenden) Kraft auf einen Rechenstab ein:

$$f_H = \left(20r \frac{b_r}{L_M}\right) \rho A_H \frac{U^2}{2} \quad (7)$$

In der Gleichung entspricht der Klammerterm dem Strömungswiderstandskoeffizient c_H für Holz. Diese Gleichung beinhaltet den Effekt der Anströmung (d.h. der Vorlagerung des Rechens und des Abflusses), der lichten Weite der Rechenstäbe, der maximalen Holzlänge, und der Schattenfläche der Verklausung. Letztere wurde als geringere Wert von $D_M \cdot L_M$ (grosse lichte Stababstände) oder $D_M \cdot b_r$ (geringe lichte Stababstände) oder angenommen.

Der Faktor r gibt den Rechentyp an, und ist $r=1$ für den vollständigen Rechen ($0.40 < b_r/L_M < 0.80$) sowie $r=0.5$ für den aufgelösten Rechen ($0.80 \leq b_r/L_M \leq 1.54$). Die Gleichung 7 gilt folglich einzig im Bereich von $0.40 < b_r/L_M < 1.54$. Für grössere lichte Stabweiten ($b_r/L_M > 1.54$) folgt ein konstanter Klammerterm (d.h. $c_H=17$) in Gleichung 7.

Die obigen Ausführungen können auch pragmatischer interpretiert werden. Der Klammerterm in Gleichung 7 gibt bekanntlich den Strömungswiderstandskoeffizient c_H für Holz, kann jedoch vereinfacht auch mit $c_H=17$ ersetzt werden. Es sind dann praktisch alle unsere Punkte und jene von NCHRP (2000) abgedeckt, mit zwei Ausnahmen. Die Gleichung 7 zur holzinduzierten Rechenkraft pro Stab wird dann:

$$f_H \leq 17 \rho A_H \frac{U^2}{2} \quad (8)$$



Die hier erwähnten Beobachtungen und Schlussfolgerungen gelten im Rahmen der untersuchten Parameter und deren Variationsbereich.

Abschliessend sei noch darauf hingewiesen, dass wir auch zwei geringere Schwemmholumina getestet haben, verglichen mit dem bisher beschriebenen «extremen» Volumen. «Klein» bedeutet konkret, dass sie unter dem von [Schlako et al. \(2019\)](#) abgeschätzten «bestimmenden» Volumen lagen. Die gemessenen Rechenkräfte waren leicht geringer als jene der «extremen» Verkläusung. Letztere stellt daher offensichtlich den massgebenden Fall dar.



4 Referenzen

- Bénet, L., De Cesare, G., Pfister, M. (2021a). Reservoir Level rise under extreme driftwood blockage at ogee crest. *Journal of Hydraulic Engineering* 147(1), 04020086.
- Bénet, L., De Cesare, G., Pfister, M. (2021b). Closure to Reservoir level rise under extreme driftwood blockage at ogee crest. *Journal of Hydraulic Engineering* 147(12), 07021013.
- Bénet, L., De Cesare, G., Pfister, M. (2022). Partial driftwood rack at gated ogee crest: Blocking probability and reservoir level rise. *Journal of Hydraulic Engineering* [under review].
- Cheng N.-S. (2013). Calculation of Drag Coefficient for Arrays of Emergent Circular Cylinders with Pseudofluid Model. *Journal of Hydraulic Engineering* 139(6), 602-611.
- FHWA (2005). Debris Control Structures Evaluation and Countermeasures. *Hydraulic Engineering Circular No. 9*, Salem, OG.
- Gippel, C.J., O'Neill, I., Finlayson, B.L., Schnatz, I. (1996). Hydraulic guideline for the re-introduction and management of large woody debris in lowland rivers. *Regulated rivers: Research & management* 12(2-3), 223-236.
- Haehnel, R.B., Daly, F. (2004). Maximum Impact Force of Woody Debris on Floodplain Structures. *Journal of Hydraulic Engineering* 130(2), 112-120.
- Kälin, R., Ballini, D., Meier, J. (2005). Abspülen von Geschwemmselteppichen: Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit von Stahlwasserbauten. *Wasser Energie Luft* 97(1/2), 11-13.
- Majtan, E., Cunningham, L.S., Rogers, B. (2021). Flood-Induced Hydrodynamic and Debris Impact Forces on Single-Span Masonry Arch Bridge. *Journal of Hydraulic Engineering* 147(11), 04021043.
- NCHRP (2000). Debris forces on highway bridges. National Cooperative Highway Research Program, *Report* 445, National Academic Press, Washington DC.
- Nistor, I., Goseberg, N., Stolle, J. (2017). Tsunami-driven debris motion and loads: A critical review. *Front. Built Environ.* 3(2), 1-11.
- Schalko, I., Schmocker, L., Weitbrecht, V., Boes, R. (2019). Gefahrenbeurteilung von Schwemmholzverklausungen in Flüssen: Teil 2 – Aufstau. *Wasser Energie Luft* 111(2), 71-77.
- Spreitzer, G., Tunncliffe, J., Friedrich, H. (2019). Using smart sensors for measuring impact forces of large wood. E-proceedings 38th IAHR *World Congress*, September 1-6, Panama City, Panama.
- USCE (1997). Debris Control at Hydraulic Structures in Selected Areas of the United States and Europe. *Contract Report* CHL-97-4, US Army Corps of Engineers, UK, London.
- Wüthrich, D., Ylla Arbòs, C., Pfister, M., Schleiss, A.J. (2020). Effect of debris damming on wave-induced hydrodynamic loads against free-standing buildings with openings. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering* 146(1), 04019036.