

Schwemmholz in Fließgewässern

Gefahren und Lösungsmöglichkeiten

von

Arnd Hartlieb

PD Dr.-Ing. habil. Arnd Hartlieb, Lehrstuhl und Versuchsanstalt für Wasserbau
und Wasserwirtschaft der Technischen Universität München



Technische Universität München

Lehrstuhl für Wasserbau und Wasserwirtschaft

80333 München, Arcisstraße 21
Germany

Tel.: 089 / 289 23161
Fax: 089 / 289 23172
E-Mail: wabau@bgu.tum.de

Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft (Oskar von Miller - Institut)

82432 Oberrach, Walchensee
Germany

Tel.: 08858 / 9203 0
Fax: 08858 / 9203 33

ISSN 1437-3513

ISBN 978-3-943683-09-7

Berichte des Lehrstuhls und der Versuchsanstalt für
Wasserbau und Wasserwirtschaft

Herausgegeben von Prof. Peter Rutschmann
Ordinarius für Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU München

Druck und Einband: meissnerdruck, Oberaudorf

Kurzfassung

Seit etwa 25 Jahren werden am Lehrstuhl und der Versuchsanstalt Forschungsarbeiten und Modellversuche zur Schwemmholzproblematik in Fließgewässern durchgeführt.

In der vorliegenden Arbeit werden zum einen die Ergebnisse der Untersuchungen zum Schwemmholzurückhalt mit Rechen und Netzen zusammengefasst und in den Kontext vergleichbarer wissenschaftlicher Untersuchungen gestellt. Diese Erkenntnisse fließen in ein generelles Vorgehen für die Konzeptplanung von Schutzmaßnahmen vor Schwemmholzgefahren im Sinne einer Gesamtbetrachtung im Einzugsgebiet ein.

Den zweiten Schwerpunkt der Arbeit bilden systematische Grundlagenuntersuchungen zur Verklauung wasserbaulicher Anlagen (Wehr- und Hochwasserentlastungsanlagen) sowie entsprechende Modellversuche für konkrete Bauwerke. Im Vordergrund stehen dabei die Verklauungswahrscheinlichkeit, die dabei ablaufenden Prozesse und die Verklauungsfolgen (höherer Aufstau bzw. Verlust an Abflusskapazität). Auf Basis der Ergebnisse wird ein Kriterienkatalog erarbeitet, mit dem einzelne bestehende oder geplante wasserbauliche Anlagen hinsichtlich des Verklauungsrisikos beurteilt bzw. optimiert werden können.

Abstract

In the past 25 years research and hydraulic model tests concerning the problem of wooden debris in flowing waters have been performed at the Institute of Hydraulic and Water Resources Engineering of TU München.

The present paper firstly summarises the results of the studies on the retention of wooden debris by racks and nets and compares them with other relevant research. These results are used for a general procedure for the concept design of protective measures against debris dangers in terms of an overall view in a drainage area.

The second part of the paper is dealing with systematic basic investigations in debris jams at hydraulic structures (weirs and spillways) as well as appropriate hydraulic model tests for specific structures. The focus lies on the probability of a debris jam formation, the running processes and the debris jam effects (backwater resp. reduction of discharge capacity). Based on these results a list of criteria regarding the risk of debris jams is developed for the assessment resp. optimisation of individual existing or projected hydraulic structures.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit ist im Rahmen meines Habilitationsverfahrens entstanden. Mein Dank gilt den offiziellen Fachmentoren, den Professoren Peter Rutschmann, Robert Boes und Albert Göttle, die zusätzlich zu ihren zahlreichen anderen Aufgaben auch noch diese Funktion übernommen und mir wertvolle inhaltliche Anregungen gegeben haben. Den Professoren Theodor Strobl und Jost Knauss, meinen „inoffiziellen“ Mentoren, habe ich viel zu verdanken. Sie haben mich nach dem Studium in den Wissenschaftsbetrieb eingeführt und mich stets gefördert. Meine Aufgabe als Betriebsleiter der Versuchsanstalt Obernach liegt mir sehr am Herzen. Dazu trägt insbesondere die freundschaftliche Zusammenarbeit mit Dr. Richard Huber, Alfred Sperer und allen anderen Kollegen bei.

Obernach, im Mai 2015

Arnd Hartlieb

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Allgemeines	1
1.2	Schwemmholzmenge	3
2	Schwemmholzrückhalt	5
2.1	Rechen senkrecht zur Fließrichtung	5
2.2	V-Rechen	7
2.3	Lastannahmen für Schwemmholzrechen	11
2.4	Verklaunungsversuche mit unterschiedlicher Rechenanordnung	13
2.4.1	Verklaunungsversuche von KNAUSS	14
2.4.2	Verklaunungsversuche von ASENKERSCHBAUMER	20
2.4.3	Zusammenfassung der Verklaunungsversuche mit unterschiedlicher Rechenanordnung	32
2.4.4	Vergleich mit anderen Verklaunungsversuchen bei unterschiedlicher Rechenanordnung	33
2.5	Schwemmholzrückhalt mit Netzen	37
3	Grundlagenversuche zur Verklaunung von wasserbaulichen Anlagen	40
3.1	Modelle und Versuchsdurchführung	40
3.2	Versuchsparameter	43
3.2.1	Dimensionsanalyse Verklaunungswahrscheinlichkeit	44
3.2.2	Dimensionsanalyse Verklaunungsprozess, -körper und -folgen	45
3.3	Versuche zur Verklaunungswahrscheinlichkeit	46
3.3.1	Standardversuche	46
3.3.2	Zusätzliche Schwemmholzeigenschaften	51
3.3.3	Teilöffnung der Drucksegmente	53
3.3.4	Position einer vorgelagerten Brücke	54
3.3.5	Wehrsteuerung	56
3.3.6	Vergleich mit anderen Versuchen zur Verklaunungswahrscheinlichkeit	58
3.4	Versuche zum Verklaunungsprozess und zur Form des Verklaunungskörpers	63
3.4.1	Geschwindigkeit und Froude-Zahl der Anströmung	64
3.4.2	Holzrohddichte	66

3.5	Versuche zu den Verklauungsfolgen	70
3.5.1	Einfeldmodell mit Naturholz	71
3.5.2	Dreifeldmodell mit Naturholz	73
3.5.3	Dreifeldmodell mit Kunstholz	77
3.5.4	Bewertung der Versuchsergebnisse zu den Folgen von Wehrverklauungen	79
3.5.5	Flach geneigter Rechen vor Dreifeldmodell	80
3.5.6	Zusätzliche Kräfteinwirkung durch Verklauungen	88
3.6	Maßstabs- und Modelleffekte	89
3.7	Zusammenfassung der Grundlagenversuche zur Verklauung von wasserbaulichen Anlagen	92
4	Schwemmholzproblematik in Modellversuchen für konkrete Bauwerke	94
4.1	Hochwasserentlastungsanlage Grüntensee	94
4.2	Hochwasserentlastungsanlagen Sylvensteinspeicher	102
4.2.1	Alte Hochwasserentlastungsanlage Sylvensteinspeicher	104
4.2.2	Neue Hochwasserentlastungsanlage Sylvensteinspeicher	107
4.3	Wehranlage Baierbrunn	110
4.3.1	Theoretische Überlegungen	112
4.3.2	Überprüfung im Modellversuch	116
4.4	Neues Hydraulisches Kraftwerk Beznau	121
4.5	Wehranlage Winznau	124
5	Numerische Simulation von Schwemmholzverklauungen	129
6	Schlussfolgerungen und Empfehlungen	132
6.1	Vorgehen bei der Konzeptplanung von Schutzmaßnahmen für Siedlungsräume vor Schwemmholzgefahren (Gesamtbetrachtung im Einzugsgebiet)	132
6.2	Kriterien für die Beurteilung und Optimierung von wasserbaulichen Anlagen hinsichtlich des Verklauungsrisikos (lokale Betrachtung)	137
	Abbildungsverzeichnis	142
	Tabellenverzeichnis	148
	Literaturverzeichnis	150
	Verwendete Symbole und Formelzeichen	155

1 Einführung

1.1 Allgemeines

Schwemmh Holztransport in Fließgewässern wird im Hochwasserfall durch die Mobilisierung von bereits im Gewässerbett liegendem Totholz und von ufernah gelagertem Nutzholz, durch die Erosion bewachsener Ufer sowie durch Hangrutschungen verursacht. Zum Problem wird das Schwemmh Holz dann, wenn es sich an natürlichen oder künstlichen Engstellen wie Brücken und Durchlässen querlegt, d.h. diese Engstellen „verklaut“. Dies hat häufig eine gravierende Verschärfung der Hochwassersituation zur Folge, wenn der Abfluss einschließlich der transportierten Feststoffe aus dem vorgegebenen Gerinne ausbricht. Aber auch Wehr- und Hochwasserentlastungsanlagen können von Schwemmh Holz blockiert werden. Im Extremfall kann es dann zum Bruch von Wehranlagen oder zur Überströmung von Talsperren kommen.

Verschärft wird die Problematik einerseits durch alle Faktoren, die den Zustand der Wälder negativ beeinflussen (Luftschadstoffe, Wildverbiss, Waldschädlinge ...) und den Schwemmh Holzeintrag in die Gewässer erhöhen. Die für die hier betrachteten alpinen und voralpinen Regionen prognostizierte Klimaänderung fällt dabei doppelt negativ ins Gewicht: zum einen schwächen die häufigeren Trockenperioden die Wälder und zum anderen führen die zunehmenden Starkniederschläge zu größeren Hochwasserabflüssen. Ein weiterer wesentlicher Faktor ist die sich in vollem Gang befindliche Renaturierung der Fließgewässer mit dem Rückbau von Uferbefestigungen und verstärkter Ufererosion. Damit geht ein erhöhter Schwemmh Holzeintrag in die Fließgewässer einher. Auch das aus ökologischen Gründen künstlich eingebrachte Totholz wird im Hochwasserfall mobilisiert und erhöht das Schwemmh Holzaufkommen.

Grundsätzlich können drei Lösungswege für die Schwemmh Holzproblematik aufgezeigt werden: die Reduzierung des Schwemmh Holzaufkommens durch Maßnahmen im Einzugsgebiet, der Schwemmh Holzrückhalt durch bauliche Einrichtungen in Bächen und Flüssen oberhalb der gefährdeten Bereiche sowie die Verbesserung der Durchgängigkeit an den verklauungsgefährdeten Problemstellen. Das Schwemmh Holzaufkommen im Hochwasserfall könnte durch flächendeckende Bewirtschaftungsmaßnahmen im bewaldeten Einzugsgebiet und insbesondere an den Gewässeruferrn deutlich reduziert werden. Diese regelmäßig erforderlichen Maßnahmen sind allerdings sehr aufwändig, bedeuten einen großen Eingriff in den Naturraum und kommen deshalb häufig nicht in Frage. Beim Schwemmh Holzrückhalt durch bauliche Einrichtungen unterscheiden LANGE/BEZZOLA 2006 einerseits zwischen vollstän-

digem und selektivem Rückhalt nur einer bestimmten Holzklasse bzw. nur eines Teils des gesamten Holzes. Andererseits differenzieren sie zwischen dem Schwemmholzurückhalt im Gerinne, bei dem häufig ein möglichst geringer, gleichzeitiger Geschieberückhalt angestrebt wird, und dem kombinierten Schwemmholz- und Geschieberückhalt in einem dafür vorgesehenen Rückhalteraum (Geschiebesammler, Ablagerungsplatz). Die Durchgängigkeit an verklausungsgefährdeten Engstellen kann entweder durch eine bauliche Optimierung der Engstellen selbst (Erweiterung der Engstellen in Breite und Höhe, Entschärfung von verklausungsgefährdeten Konstruktionsdetails), eine verbesserte Längsausrichtung des Schwemmholzes an den Problemstellen und durch planmäßigen Maschineneinsatz im Hochwasserfall verbessert werden.

Die bisherigen Kenntnisse im Themenfeld Schwemmholz sind teilweise unzureichend, lückenhaft und basieren weltweit nur auf Ereignisdokumentationen, projektbezogenen Einzelfallstudien und wenigen grundlegenden Forschungsprojekten. RUNDQVIST 2005 weist auf den Gegensatz zu „Reinwasser“-Hydrologie und -Hydraulik als etablierten Wissenschaften mit einem Kenntnisstand auf einem grundsätzlich höheren Niveau hin.

Ziel der vorliegenden Schrift ist es, den Kenntnisstand in Teilbereichen des Themenfelds Schwemmholz zu verbessern. Dazu werden die an der Versuchsanstalt für Wasserbau in Oberrach in den vergangenen 25 Jahren durchgeführten Untersuchungen zur Schwemmholzproblematik zusammengefasst und in den Kontext von vergleichbaren Untersuchungen gestellt. Der Schwerpunkt liegt dabei einerseits auf dem Schwemmholzurückhalt mit geeigneten Rechen- und Netzkonstruktionen und andererseits auf der Wahrscheinlichkeit, dem Prozess und den Folgen der Verklausung von wasserbaulichen Anlagen, unter denen hier Wehr- und Hochwasserentlastungsanlagen verstanden werden. Aus den gewonnenen Erkenntnissen wird das grundsätzliche Vorgehen bei der Konzeptplanung von Schutzmaßnahmen für Siedlungsräume vor Schwemmholzgefahren in einer auf das Einzugsgebiet bezogenen Gesamtbetrachtung abgeleitet. Außerdem wird ein Kriterienkatalog erstellt, mit dem in einer lokalen Betrachtung einzelne bestehende bzw. geplante wasserbauliche Anlagen hinsichtlich des Verklausungsrisikos beurteilt bzw. optimiert werden können. Die vorliegende Schrift erhebt nicht den Anspruch, alle Aspekte der Schwemmholzproblematik erschöpfend darzustellen.

1.2 Schwemmholzmenge

Eine zentrale Frage zu Beginn aller Überlegungen im Zusammenhang mit Schwemmholz in Fließgewässern ist diejenige nach der zu erwartenden Schwemmholzmenge. Für eine fundierte Antwort wären aussagekräftige Daten über Schwemmholzmengen bei vergangenen Ereignissen am betrachteten Gewässer von großem Vorteil. Häufig liegen aber solche Daten überhaupt nicht oder nur in unzureichendem Maße vor. Dann können empirische Schätzformeln zur Anwendung kommen, die durch die Auswertung von zahlreichen Hochwasserereignissen an verschiedenen Gewässern ermittelt wurden. Dabei unterscheiden LANGE/BEZZOLA und verschiedene Autoren zwischen der effektiven Schwemmholzmenge, die tatsächlich bei einem bestimmten Ereignis auftritt, und dem Schwemmholzpotential als dem Holzvorrat in der direkten Umgebung des Gewässers, der bei Hochwasser mobilisiert werden kann.

Für die effektive Schwemmholzmenge V [m^3], die als Lockervolumen des lose angehäuften Holzes zu verstehen ist, gibt RICKENMANN 1997 zwei Formeln an. Bei der einen wird V in Abhängigkeit von der Fläche des Einzugsgebiets EG [km^2] bestimmt:

$$V = 45 \cdot EG^{2/3} \quad (\text{Gl. 1.1})$$

In der zweiten Formel wird V in Abhängigkeit von der Wasserfracht V_W [m^3] des Hochwasserereignisses ermittelt:

$$V = 4 \cdot V_W^{2/5} \quad (\text{Gl. 1.2})$$

Dagegen berechnen UCHIOGI ET AL 1996 die effektive Schwemmholzmenge V in Abhängigkeit von der Feststofffracht V_F [m^3], die beim Hochwasserereignis transportiert wird:

$$V = 0,2 \cdot V_F \quad (\text{Gl. 1.3})$$

Das Schwemmholzpotential V_{Pot} [m^3] wird von UCHIOGI ET AL in Abhängigkeit von der Fläche des Einzugsgebiets EG [km^2] und dem im Einzugsgebiet dominierenden Waldtyp angegeben:

$$V_{\text{Pot}} = C \cdot EG \quad (\text{Gl. 1.4})$$

mit	C = 1000:	Maximalwert für Nadelwälder
	C = 100:	Maximalwert für Laubwälder
	C = 10:	Minimalwert für Nadel- und Laubwälder

Ausgehend von der Überlegung, dass nicht die Fläche des gesamten Einzugsgebiets für das Schwemmh Holzpotential relevant ist, sondern die Fläche des bewaldeten Einzugsgebiets EG_W [km²], gelangt RICKENMANN zu einer anderen Beziehung für das Schwemmh Holzpotential V_{Pot} :

$$V_{\text{Pot}} = 90 \cdot EG_W \quad (\text{Gl. 1.5})$$

Für kleine Einzugsgebiete gibt RICKENMANN das Schwemmh Holzpotential V_{Pot} in Abhängigkeit von der bewaldeten Gerinnelänge L_W [m] an:

$$V_{\text{Pot}} = 40 \cdot L_W^2 \quad (\text{Gl. 1.6})$$

Die vorgestellten Formeln können nur einer ersten, sehr groben Abschätzung dienen. DUSS 1999 hat für ein Wildbacheinzugsgebiet in der Schweiz exemplarisch die Ergebnisse der verschiedenen Schätzformeln einander gegenübergestellt und dabei eine große Streuung der Werte ermittelt. Der Ansicht von LANGE/BEZZOLA, dass „eine Abschätzung des Schwemmh Holzpotentials anhand der bewaldeten Gerinnelänge auf jeden Fall sinnvoller erscheint, als nur anhand der Größe des Einzugsgebiets“, wird in vollem Umfang zugestimmt.

Für eine genauere Abschätzung der Schwemmh Holzmenge ist in jedem Fall eine eingehende Untersuchung des Einzugsgebiets anzuraten. Nach LANGE/BEZZOLA sind dabei zahlreiche Einflussfaktoren wie Bewaldung, Waldzustand, Hangneigung, Geologie, Gewässergefälle, Abflussprozesse usw. zu erheben. Durch neue Methoden, wie das von RIMBÖCK 2001 beschriebene, luftbildbasierte LASP-Verfahren („Luftbildbasierte Abschätzung des Schwemmh Holzpotentials“) oder das GIS-basierte Verfahren, das gegenwärtig am Bayerischen Landesamt für Umwelt entwickelt wird, reduziert sich der Aufwand für diese Untersuchungen.

An diese Stelle sei die Frage aufgeworfen, ob im Hinblick auf Schwemmh Holzverkläuerungen und deren Folgen die maximale Schwemmh Holzmenge oder das Schwemmh Holzpotential überhaupt relevant sind. Die Erfahrung spricht eher dafür, dass von Fall zu Fall schon bei der Mobilisierung und Verkläuerung geringerer kritischer Schwemmh Holz mengen Folgen auftreten, die sich auch bei höherem Schwemmh Holz aufkommen bis hin zum Schwemmh Holzpotential nur noch unwesentlich verschärfen.

2 Schwemmholzurückhalt

Eine effektive Methode zur Vermeidung von Hochwasserschäden durch Schwemmholzverklauungen ist der Rückhalt des Schwemmholzes in unsensiblen Bereichen durch bauliche Einrichtungen wie Rechen und Netze. Die vorliegende Schrift beschränkt sich dabei auf Bauwerke für einen weitgehenden Schwemmholzurückhalt bei gleichzeitig möglichst ungestörtem Geschiebetransport.

Schwemmholzrechen stellen starre Konstruktionen dar, die aus parallel angeordneten Rechenstäben bzw. -säulen bestehen. Es ist zwar auch denkbar, dass ein annähernd horizontaler Rechen unmittelbar unterhalb eines Absturzbauwerks angeordnet wird, auf den das Schwemmholz aufgleiten kann. Aber in den meisten Fällen sind die Rechenstäbe bzw. -säulen vertikal angeordnet. Dabei ist es in Abhängigkeit vom Säulenabstand durchaus möglich, dass einzelnen Schwemmholzelemente durch ihre ungünstige Ausrichtung in Bezug auf die Rechensäulen durch den Rechen schwimmen. Dies stellt oft noch keine Gefahr für die unterhalb liegenden, zu schützenden Bereiche dar, weil die dortigen Engstellen von Einzelementen ebenfalls passiert werden können. Sobald sich aber ein Baumstamm im Rechen verfängt, wird eine große Rückhaltewirkung für das nachkommende Schwemmholz aktiviert. Unterschiedliche Schwemmholzrechen lassen sich anhand der Anordnung der Rechensäulen im Grundriss in Bezug zur Fließrichtung klassifizieren.

2.1 Rechen senkrecht zur Fließrichtung

Schwemmholzrechen mit einer Säulenordnung senkrecht zur Fließrichtung (siehe Beispiel in Abb. 2.1) haben zwar grundsätzlich die schon angesprochene große Rückhaltewirkung. ISHIKAWA 1989 hat in Modellversuchen ohne Geschiebe eine Rückhaltewirkung von 99 % bezogen auf die Anzahl der zugegebenen Schwemmholzstämmen ermittelt (Modellmaßstab 1:50; Gewässerbreite: 10 m; Sohlgefälle: 10 %; runde Rechensäulen mit einer Höhe von 1,65 m und einer lichten Weite von 2,0 m; 1000 als Zylinder idealisierte, einheitliche Schwemmholzstämmen mit einer Länge von 5,0 m und einem Durchmesser von 0,75 m).



Abb. 2.1: Beispiel für Schwemmholzrechen mit einer Anordnung senkrecht zur Fließrichtung (Galsauerbach, Südtirol, Foto Asenkerschbaumer)

Allerdings weist KNAUSS 1995 auf der Grundlage von Modellversuchen für zwei konkrete Anwendungsfälle auf gravierende Nachteile dieser Anordnung hin, die in Abb. 2.2 (schematischer Grundriss) und Abb. 2.3 (schematischer Längsschnitt) verdeutlicht werden:

- Das zurückgehaltene Schwemmholz türmt sich zu einem hohen, kompakten und bis zur Gewässersohle reichenden Verklauungskörper auf. Der dadurch hervor gerufene Aufstau führt einerseits zu einer Ablagerung eines großen Teils des Geschiebes, das sich auch noch mit dem Schwemmholz vermischt. Andererseits überströmt der Abfluss den vergleichsweise kompakten Verklauungskörper und stürzt mit einer großen Fallhöhe auf die Sohle unterhalb des Bauwerks. Dort könnten Auskolkungen zum Einsturz und zum Totalversagen des Bauwerks führen.
- In den Modellversuchen hatte der Bruch einer einzelnen Rechensäule einen schlagartigen Ausbruch des gesamten zurückgehaltenen Schwemmholzes zur Folge.



Abb. 2.2: Schematischer Grundriss eines verklauten Schwemmholzrechens senkrecht zur Fließrichtung

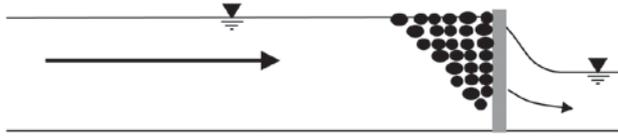


Abb. 2.3: Schematischer Längsschnitt eines verkleauten Schwemmholtzrechens senkrecht zur Fließrichtung

2.2 V-Rechen

Der Schwemmholtzrechen mit einer im Grundriss V-förmigen Säulenanzordnung, die mit der Spitze in Fließrichtung zeigt, wurde von KNAUSS an der Versuchsanstalt Oberrach im Rahmen von Modellversuchen für den Lainbach in Oberbayern entwickelt. Abb. 2.4 zeigt den inzwischen realisierten Rechen:



Abb. 2.4: Beispiel eines doppelreihigen V-förmigen Schwemmholtzrechens (Lainbach, Oberbayern, Foto Asenkerschbaumer)

Die V-förmige Anordnung hat gegenüber der Anordnung senkrecht zur Fließrichtung folgende Vorteile, die in Abb. 2.5 (schematischer Grundriss) und Abb. 2.6 (schematischer Längsschnitt) verdeutlicht werden:

- Es bildet sich ein großflächigerer, weniger kompakter und flacherer Verkläusungskörper, der einem Schwemmholtzteppich nahe kommt.
- Die höhere Durchlässigkeit des Verkläusungskörpers, die längere Wasseraustrittsline sowie die stärkere Unterströmung verringern den Aufstau oberhalb des Rechens und las-

sen zumindest einen gewissen Geschiebetransport unter dem Verklausungskörper hindurch in das Unterwasser zu.

- Bei einer Verklausung wird die Last stärker über innere Brückenbildungen in der Holzansammlung abgetragen und gleichmäßiger auf die Rechensäulen verteilt. Dadurch erhöht sich die Versagenssicherheit des Rechens.

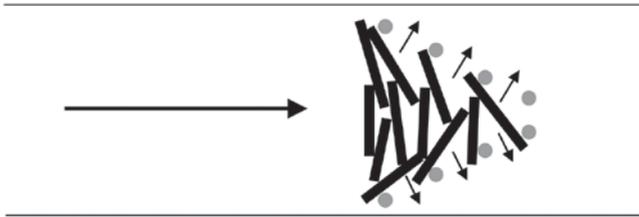


Abb. 2.5: Schematischer Grundriss eines verklausten V-förmigen Schwemmholzrechens

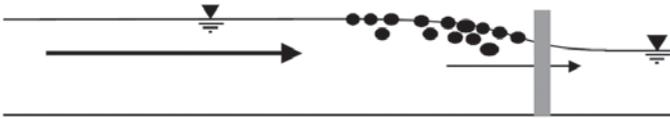


Abb. 2.6: Schematischer Längsschnitt eines verklausten V-förmigen Schwemmholzrechens

Die Höhe der Säulen richtet sich nach der Wasserspiegellage beim höchsten Aufstau im Bemessungshochwasserfall. Durch die längere Wasseraustrittslinie ergibt sich für den Wasserspiegelverlauf eine Senkungslinie von den oberen zu den unteren Säulen, so dass die oberen Säulen höher sein müssen als die unteren. Für den Säulenabstand sind zwei gegenläufige Aspekte maßgebend: zum einen soll eine möglichst große Rückhaltewirkung erzielt werden und dazu sollte der Abstand möglichst klein sein. Zum anderen ist die Räumbarkeit des Rechens mit schwerem Gerät erforderlich und dazu sollte ein Mindestabstand der Säulen von 3 m eingehalten werden.

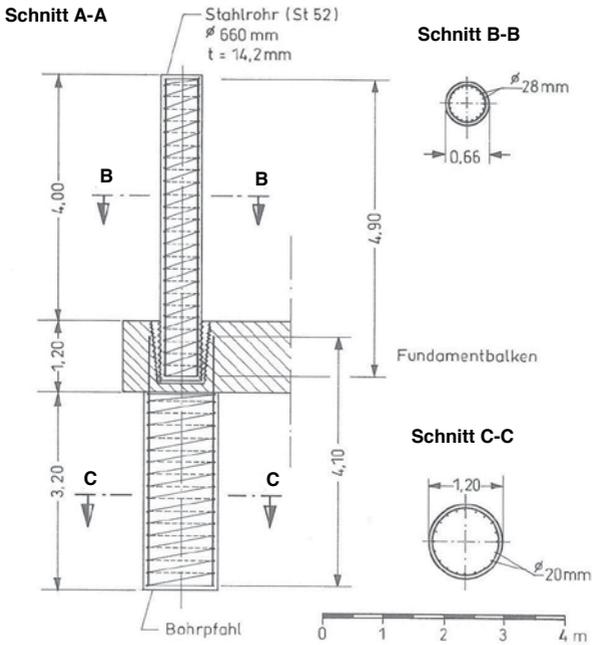
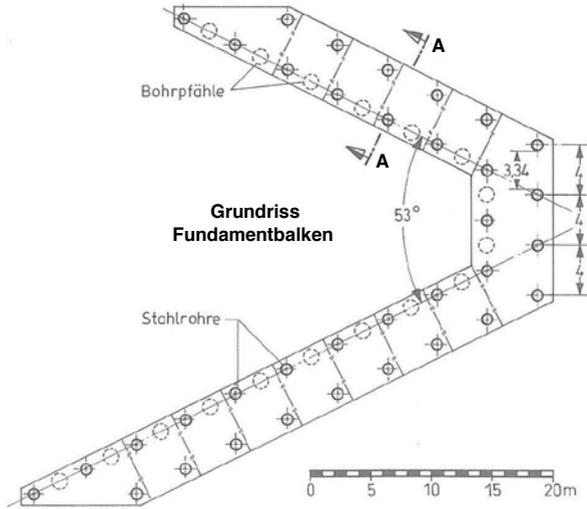


Abb. 2.8: Einbindung der Säulen des V-förmigen Schwemmholzrechs am Lainbach im Untergrund (aus KNAUSS)

2.3 Lastannahmen für Schwemmholzrechen

LANGE/BEZZOLA unterscheiden bei den Lastannahmen für Schwemmholzrechen zwischen dem Fall einer klaren Trennung von Holz und Geschiebe, bei dem die Geschiebefront den Rechen nicht erreicht, und dem Fall, dass eine Trennung von Holz und Geschiebe nicht gewährleistet ist und ein Gemisch aus Holz und Geschiebe vor dem Rechen abgelagert wird.

Wenn die Geschiebefront den Rechen nicht erreicht, wirken auf die Rechenstäbe oberwasserseitig die Wasserlast W_O und die Holzlast H_O , die durch die Strömungskräfte auf den mit Holz verlegten Rechen verursacht wird. Außerdem wirken auf den Rechen noch das Eigengewicht G , die Auftriebskraft A auf das Rechenfundament und die Wasserlast W_U infolge des Unterwasserstands. In Abb. 2.9 sind die auf den Rechen einwirkenden Lasten bei klarer Trennung von Holz und Geschiebe dargestellt:

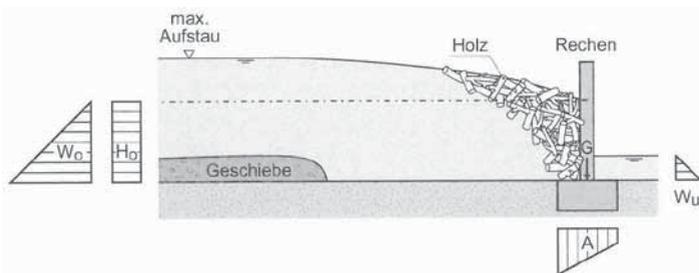


Abb. 2.9: Schematische Darstellung der auf einen Schwemmholzrechen wirkenden Lasten bei klarer Trennung von Holz und Geschiebe (aus LANGE/BEZZOLA)

LANGE/BEZZOLA schlagen zur Bemessung vor, für die Wasserlast W_O und die Holzlast H_O eine kombinierte Last $W_O + H_O$ mit einer mittleren Dichte von 1500 kg/m^3 bis zum maximalen Aufstau anzusetzen. Sie empfehlen außerdem, für eine konservative Bemessung auf das Ansetzen der Wasserlast W_U im Unterwasser zu verzichten. Abb. 2.10 zeigt die entsprechend vereinfachte Lastannahme:

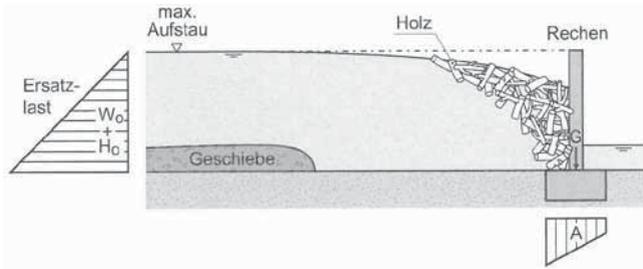


Abb. 2.10: Vereinfachte Lastannahme für einen Schwemmholzrechen bei klarer Trennung von Holz und Geschiebe (aus LANGE/BEZZOLA)

Falls ein Gemisch aus Holz und Geschiebe am Rechen abgelagert wird, muss zusätzlich zur oberwasserseitigen Wasserlast W_0 und Holzlast H_0 der aktive Erddruck E_a unter Auftrieb angesetzt werden. Dann ergeben sich die in Abb. 2.11 schematisch dargestellten Lasteinwirkungen auf den Schwemmholzrechen:

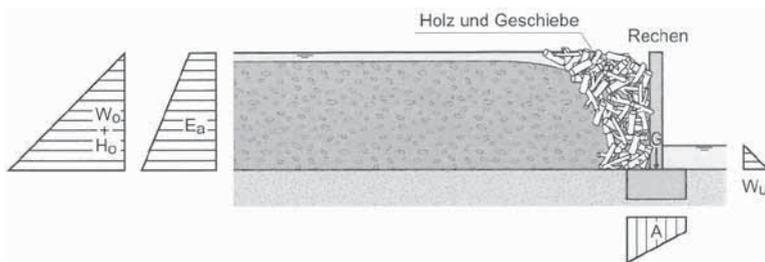


Abb. 2.11: Schematische Darstellung der auf einen Schwemmholzrechen wirkenden Lasten bei einer gemeinsamen Ablagerung von Holz und Geschiebe (aus LANGE/BEZZOLA)

Bei der Bemessung eines Schwemmholzrechens muss zusätzlich überprüft werden, ob der Anprall eines Baumstamms maßgebend ist. LANGE/BEZZOLA beschreiben zwei Szenarien:

- den Anprall am unverlegten Rechen, also am Beginn des Rückhalteereignisses, bei dem die ersten Stämme mit hohen Geschwindigkeiten im Bereich von 2 bis 3 m/s in geringer Höhe auf die Rechenstäbe treffen und
- den Anprall am bereits verlegten Rechen. Die Stämme treffen dann infolge des Aufstaus mit geringeren Geschwindigkeiten unter 1 m/s auf die Rechenstäbe, allerdings in größerer Höhe.

2.4 Verklauungsversuche mit unterschiedlicher Rechenanordnung

KNAUSS sowie ASENKERSCHBAUMER 2009 haben grundlegende Verklauungsversuche mit verschiedenen Anordnungen der Rechensäulen insbesondere im Hinblick auf den durch die Rechenverklauungen verursachten Aufstau durchgeführt: Die Versuche wurden jeweils in einer Versuchsrinne mit Rechteckquerschnitt und Rechensäulen mit kreisförmigem Querschnitt durchgeführt und mit dem Modellgesetz von Froude betrieben. In allen Versuchen wurde die Höhe der Säulen so gewählt, dass ein Transport einzelner Stämme über den Rechen hinweg ausgeschlossen war. Die wesentlichen Randbedingungen der Versuche sind in Tab. 2.2 vergleichend zusammengestellt (in Prototypmaßen):

		KNAUSS	ASENKERSCHBAUMER
Modell	Modellmaßstab	1:30	1:60
	Breite Versuchsrinne [m]	0,66	0,52
Gewässer	Gewässerbreite [m]	19,8	31,2
	Sohlgefälle [%]	3,0	0,0
Rechen	Säulendurchmesser [m]	0,60	0,60
	Lichte Säulenweite [m]	0,9 / 2,4	3,4
	Verbauungsgrad in Fließrichtung [%]	39,4 / 21,2	15,4 / 21,2 / 42,3
Holz	Beschreibung	wenig gekrümmt, sehr geringe Verzweigung	
	Stammvolumen [m ³]	max. 1000	max. 1000
	Länge [m]	?	3,0 - 12,0
	Durchmesser [m]	?	0,12 - 0,70

Tab. 2.2: Wesentliche Randbedingungen der Versuche von KNAUSS sowie ASENKERSCHBAUMER (Prototypmaße)

Sowohl KNAUSS als auch ASENKERSCHBAUMER haben zu Beginn der Versuche stationär-gleichförmige Verhältnisse in der jeweiligen Versuchsrinne mit den hydraulischen Parametern des spezifischen Abflusses q und der Fließtiefe h eingestellt. Für die einheitliche Auswertung der beiden Versuchsreihen in der vorliegenden Schrift wird daraus als maßgebender hydraulischer Eingangsparameter die Froude-Zahl der Anströmung $Fr = q/(g^{0.5} \cdot h^{1.5})$ ermittelt. Die Dimensionsanalyse für die hinsichtlich des Prozesses direkt vergleichbare Verklauung von wasserbaulichen Anlagen, die in Kap. 3.2.2 vorgenommen wird, bestätigt diesen Ansatz. Nach der Schwemmholzzugabe im Versuch und dem Auftreten der Verklauung am Rechen wurde nach Erreichen eines stationären Zustands der Anstieg der Fließtiefe Δh oberhalb der Verklauung gemessen (siehe Abb. 2.12). In der vorliegenden Schrift wird der Anstieg der Fließtiefe Δh auf die Ausgangsfließtiefe h bezogen und damit $\Delta h/h$ als maßgebende dimensionslose Größe für den durch die Verklauung erzeugten Aufstau ermittelt. Der relative Aufstau $\Delta h/h$ hat sich in der Auswertung als aussagekräftiger erwiesen als der von KNAUSS definierte Aufstaufaktor A_k , bei dem Δh auf die Geschwindigkeitshöhe der Anströmung $v^2/2g$ bezogen wird.

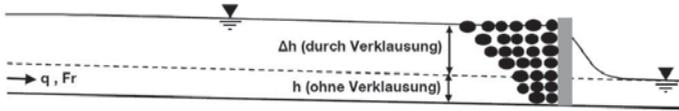


Abb. 2.12: Hydraulische Versuchsparameter der Verkläungsversuche im schematischen Längsschnitt

Im Folgenden werden die Versuchsergebnisse von KNAUSS und ASENKERSCHBAUMER entsprechend ausgewertet und dargestellt.

2.4.1 Verkläungsversuche von KNAUSS

KNAUSS hat in seinen Versuchen neben der Anordnung der Rechensäulen senkrecht zur Fließrichtung auch einen schrägen Rechen mit einer Neigung von 30° gegenüber der Fließrichtung sowie symmetrische V-Formen (Öffnungswinkel 60°) in und entgegen der Fließrichtung untersucht. Senkrecht zur Fließrichtung wurden zwei Anordnungen mit unterschiedlichen Säulenabständen getestet. Beim größeren Säulenabstand war die lichte Säulenweite mit $W_s = 2,4$ m genauso groß wie bei der schrägen oder V-Anordnung, der Verbauungsgrad in Fließrichtung mit $B = 21,2$ % dagegen kleiner. Beim kleineren Säulenabstand war der Verbauungsgrad mit $B = 39,4$ % genauso groß wie bei der schrägen oder V-Anordnung, aber dafür die lichte Säulenweite mit $W_s = 0,9$ m kleiner. Abb. 2.13 zeigt die von KNAUSS untersuchten Anordnungen im Grundriss. Weitere Versuchsparameter bei KNAUSS waren der spezifische Abfluss sowie die Beschaffenheit und Zugabezeit des Schwemmh Holzmaterials.

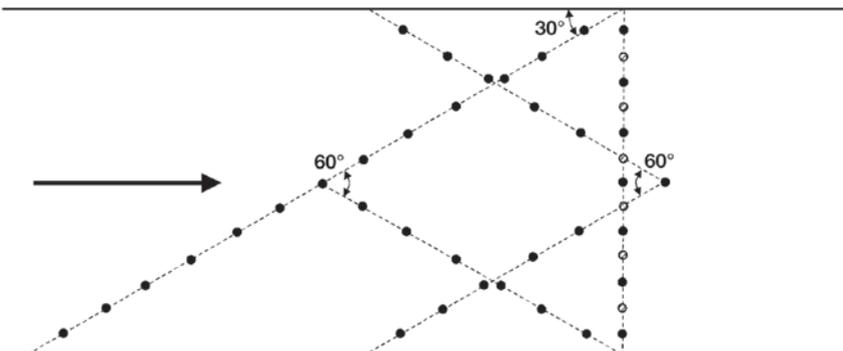


Abb. 2.13: Von KNAUSS untersuchte Anordnungen der Rechensäulen im Grundriss

In Tab. 2.3 sind die Ergebnisse der Grundlagenversuche von KNAUSS nach den Versuchsparametern geordnet, wobei die einzelnen Versuche in den verschiedenen Variationskate-

goren auftauchen. In allen Versuchen mit Ausnahme der Variationskategorie "Material" wurde die identische Schwemmholzmischung mit einer bestimmten, nicht mehr nachvollziehbaren Längenverteilung verwendet.

Variation	Rechen	W _s [m]	B [%]	q [m ³ /(s·m)]	h [m]	v [m/s]	Fr	Material / Zugabezeit [min]	Δh [m]	Δh/h
Anordnung	→ 2,4	2,4	21,2	7,5	1,16	6,44	1,91	grob / 2,5	2,81	2,42
	→ 0,9	0,9	39,4	7,5	1,16	6,44	1,91	grob / 2,5	2,84	2,45
	→ >	2,4	39,4	7,5	1,16	6,44	1,91	grob / 2,5	2,95	2,54
	→ <	2,4	39,4	7,5	1,16	6,44	1,91	grob / 2,5	3,21	2,77
	→ /	2,4	39,4	7,5	1,16	6,44	1,91	grob / 2,5	3,19	2,75
Abfluss	→ 2,4	2,4	21,2	7,5	1,16	6,44	1,91	grob / 2,5	2,81	2,42
	→ 2,4	2,4	21,2	10,0	1,50	6,67	1,74	grob / 2,5	3,51	2,34
	→ 0,9	0,9	39,4	7,5	1,16	6,44	1,91	grob / 2,5	2,84	2,45
	→ 0,9	0,9	39,4	10,0	1,50	6,67	1,74	grob / 2,5	3,66	2,44
	→ >	2,4	39,4	2,5	0,47	5,27	2,45	grob / 2,5	2,02	4,30
	→ >	2,4	39,4	5,0	0,83	6,02	2,11	grob / 2,5	2,53	3,05
	→ >	2,4	39,4	7,5	1,16	6,44	1,91	grob / 2,5	2,95	2,54
	→ >	2,4	39,4	10,0	1,50	6,67	1,74	grob / 2,5	3,75	2,50
	→ >	2,4	39,4	12,5	1,83	6,83	1,61	grob / 2,5	4,09	2,23
Material	→ 2,4	2,4	21,2	7,5	1,16	6,44	1,91	grob / 2,5	2,81	2,42
	→ 2,4	2,4	21,2	7,5	1,16	6,44	1,91	fein / 2,5	3,40	2,93
	→ 2,4	2,4	21,2	7,5	1,16	6,44	1,91	sehr fein / 2,5	4,73	4,08
	→ >	2,4	39,4	7,5	1,16	6,44	1,91	grob / 2,5	2,95	2,54
	→ >	2,4	39,4	7,5	1,16	6,44	1,91	fein / 2,5	3,45	2,97
	→ >	2,4	39,4	7,5	1,16	6,44	1,91	sehr fein / 2,5	4,54	3,91
Zugabezeit	→ 2,4	2,4	21,2	7,5	1,16	6,44	1,91	grob / 2,5	2,81	2,42
	→ 2,4	2,4	21,2	7,5	1,16	6,44	1,91	grob / 1,0	4,41	3,80
	→ >	2,4	39,4	7,5	1,16	6,44	1,91	grob / 2,5	2,95	2,54
	→ >	2,4	39,4	7,5	1,16	6,44	1,91	grob / 1,0	3,17	2,73

Tab. 2.3: Ergebnisse der grundlegenden Verklauseungsversuche von KNAUSS

Im Folgenden wird der Einfluss der verschiedenen Versuchsparameter auf den Aufstau $\Delta h/h$ zusammengefasst:

- Anordnung (siehe Abb. 2.14):

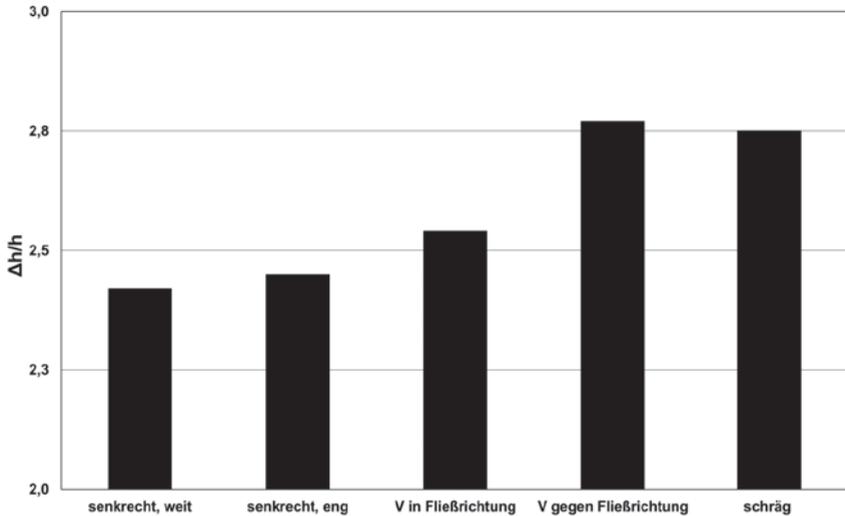


Abb. 2.14: Aufstau $\Delta h/h$ in Abhängigkeit von der Rechenanordnung (Versuche von KNAUSS)

Die unterschiedliche lichte Säulenweite bei den untersuchten Anordnungen senkrecht zur Fließrichtung hatte so gut wie keinen Einfluss auf den Aufstau $\Delta h/h$, da auch beim größeren Säulenabstand der Schwemmholzdurchgang durch den Rechen zu vernachlässigen war.

Im Gegensatz zu den Beobachtungen in den Modellversuchen für konkrete Anwendungsfälle und den daraus abgeleiteten generellen Schlussfolgerungen (siehe Kap. 2.2) ist bei beiden V-förmigen Anordnungen und dem schrägen Rechen der Aufstau $\Delta h/h$ nicht kleiner, sondern sogar größer als bei den Anordnungen senkrecht zur Fließrichtung. Der Grund für dieses überraschende Ergebnis dürfte in der schießenden Anströmung mit der hohen Froude-Zahl $Fr = 1,91$ liegen. Dabei kommen die Vorteile der V-förmigen und schrägen Anordnung nicht zum Tragen und es bilden sich bei allen Rechenanordnungen kompakte Verklausungskörper mit großem Aufstau $\Delta h/h > 2,4$. Es ist vermutlich dem Zufallsaspekt beim Verklausungsprozess geschuldet, dass sich gerade bei den V-förmigen Anordnungen und dem schrägen Rechen die höchsten Werte für $\Delta h/h$ ergeben. Dagegen erfolgt im ersten Anwendungsfall für einen V-förmigen Schwemmholzrechen am Lainbach die Anströmung im Bemessungsfall im Strömen ($Fr = 0,9$) und ein weniger kompakter Verklausungskörper mit geringerem Aufstau als bei senkrechter Anordnung kann entstehen.

- Froude-Zahl der Anströmung Fr (siehe Abb. 2.15):

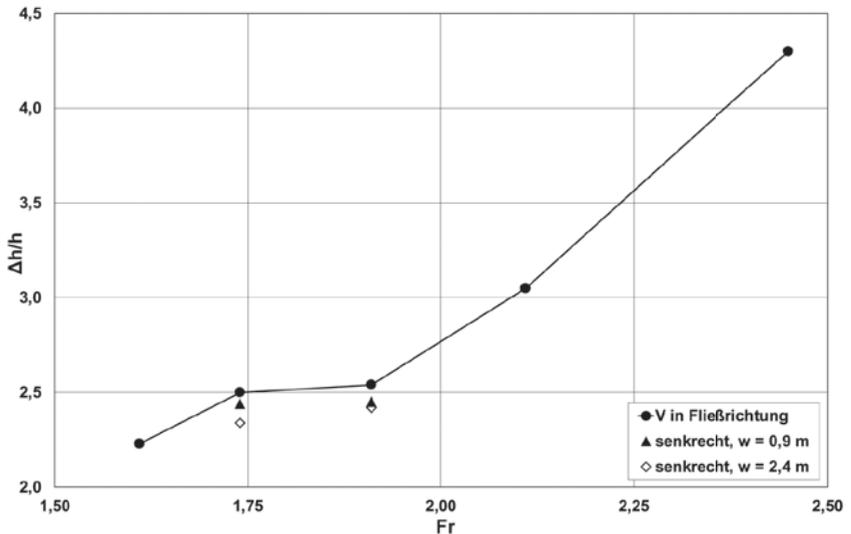


Abb. 2.15: Aufstau $\Delta h/h$ in Abhängigkeit von der Froude-Zahl Fr (Versuche von KNAUSS)

Es ist eine wesentliche Erkenntnis der Versuche zur Rechenverkläuerung, dass der Aufstau $\Delta h/h$ bei den untersuchten Rechenanordnungen mit steigender Froude-Zahl Fr zunimmt. Mit steigender Froude-Zahl Fr entwickeln sich kompaktere Verkläuerungskörper, die einen größeren Teil des Abflussquerschnitts verlegen und undurchlässiger ausfallen. Vermutlich bedingt durch die in allen Fällen schießende Anströmung mit Froude-Zahlen $Fr > 1,6$ ist die Abhängigkeit des Aufstaus $\Delta h/h$ von der Froude-Zahl Fr allerdings nicht stark ausgeprägt.

- Beschaffenheit und Zugabezeit t_z des Schwemmholzmaterials (siehe Abb. 2.17 und Abb. 2.18):

Abb. 2.16 zeigt die drei verschiedenen in den Versuchen verwendeten Schwemmholzmaterialien „grob“, „fein“ und „sehr fein“:



Abb. 2.16: Verwendete Schwemmholzmaterialien

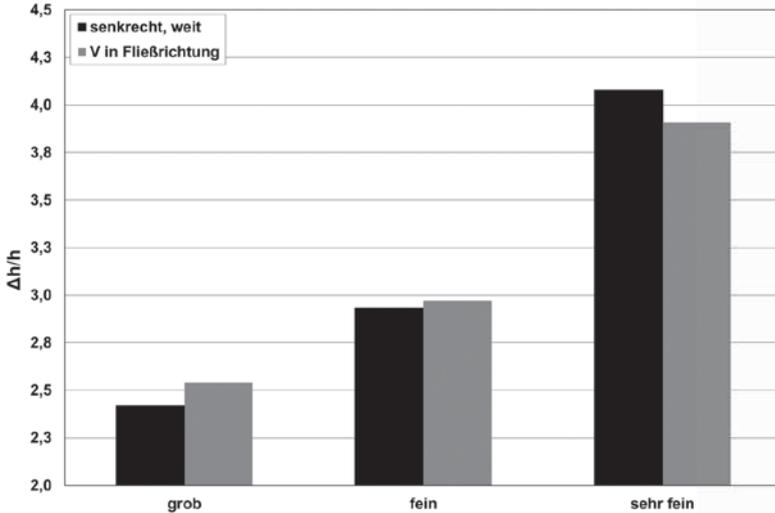


Abb. 2.17: Aufstau $\Delta h/h$ in Abhängigkeit von der Materialbeschaffenheit (Zugabezeit $t = 2,5$ min)

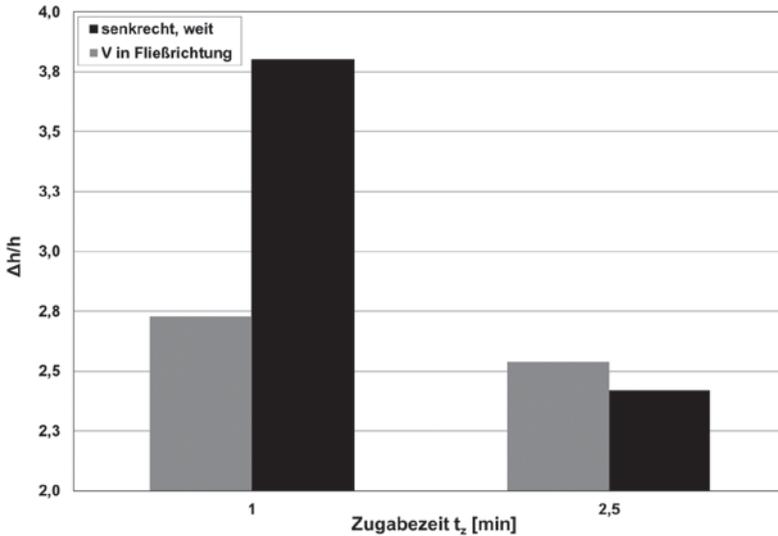


Abb. 2.18: Aufstau $\Delta h/h$ in Abhängigkeit von der Zugabezeit t_z (Schwemmholzmaterial „grob“)

Den größten Einfluss der untersuchten Parameter auf den Aufstau $\Delta h/h$ haben Beschaffenheit und Zugabezeit des Schwemmholzmaterials. Je feiner das Material, desto undurchlässiger der Verkläusungskörper und desto höher $\Delta h/h$. Bei den beiden untersuchten Re-

chenanordnungen erhöht sich der Aufstau um deutlich mehr als 50 %, wenn man bei gleicher Zugabezeit $t_z = 2,5$ min die Werte für das grobe Standardmaterial mit dem sehr feinen Material vergleicht. Bezüglich der Zugabezeit ergeben sich für das gleiche Material („grob“) die größeren Aufstauwerte $\Delta h/h$ bei der kürzeren Zugabezeit von 1 min, da hier weniger Einzelhölzer und mehr Holzgruppen zum Rechen gelangen als bei der längeren Zugabezeit $t_z = 2,5$ min. Wenn eine Holzgruppe statt eines Einzelholzes auf den Rechen bzw. eine schon vorhandene Holzansammlung trifft, treten durch die größeren Kräfte schlagartig größere Umlagerungen im Verkläusungskörper auf, die zu einer stärkeren Verdichtung führen. Auch wenn es sich um eine sehr geringe Anzahl an Versuchen handelt, fällt dennoch auf, dass der Aufstau $\Delta h/h$ durch die kürzere Zugabezeit bei der V-förmigen Anordnung wesentlich weniger ansteigt als bei der senkrechten Anordnung. Diese Beobachtung deckt sich sehr gut mit den Modellversuchen für konkrete Anwendungsfälle und den daraus abgeleiteten generellen Schlussfolgerungen (siehe Kap. 2.2): bei der V-förmigen Anordnung werden die Kräfte durch innere Brückenbildungen in der Holzansammlung gleichmäßiger abgetragen als bei der senkrechten Anordnung. Deshalb führt der Einstoß von zusätzlichem Holz zu einer geringeren Verdichtung des Verkläusungskörpers.

In zusätzlichen Versuchen mit Rechensäulen, die bündig an der Sohle mit Sollbruchstellen ausgestattet waren, und mit Schwallwellen, die auf bereits verkläuste Rechen trafen (siehe Abb. 2.19), konnte KNAUSS die höhere Versagenssicherheit der V-förmigen Anordnung gegenüber der senkrechten Anordnung klar bestätigen: bei der senkrechten Anordnung führt der Bruch einer einzelnen Rechensäule in einer Kettenreaktion zum Bruch der gesamten Rechen. Das zurückgehaltene Holz bricht schlagartig aus. Dagegen bleiben beim V-förmigen Rechen nach dem Bruch einer einzelnen Rechensäule die anderen Säulen durch die bessere Lastverteilung stehen. Wenn überhaupt, wird nur ein kleiner Teil des zurückgehaltenen Holzes in das Unterwasser transportiert.

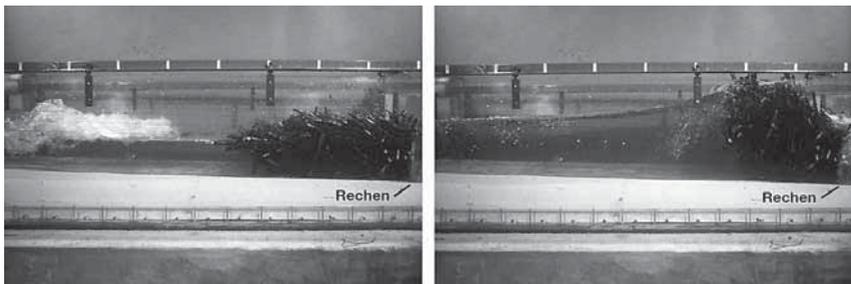


Abb. 2.19: Verkläusungskörper an einem Rechen mit Anordnung senkrecht zur Fließrichtung vor (links) und beim Eintreffen (rechts) einer Schwallwelle

2.4.2 Verklausungsversuche von ASENKERSCHBAUMER

Der Schwerpunkt bei den Versuchen von ASENKERSCHBAUMER lag einerseits wie bei KNAUSS auf dem Aufstau, der durch Verklausungen bei den verschiedenen Rechenanordnungen verursacht wird. Von großem Interesse war aber andererseits auch, ob durch eine schräge Rechenanordnung und gegebenenfalls zusätzliche Einbauten ein einseitiger, möglichst konzentrierter Verklausungskörper herbeigeführt werden kann. Dieser ist im Hinblick auf die Räumung eines Rechens im Prototyp, die möglicherweise nur von einem Ufer aus erfolgen kann, positiv zu beurteilen. Zusätzlich wurden noch Überlastversuche für die verschiedenen Rechenanordnungen durchgeführt.

Untersucht wurden Anordnungen senkrecht zur Fließrichtung sowie schräge Rechen mit Neigungen von 45° und 20° gegenüber der Fließrichtung (siehe Abb. 2.20). Dabei war die lichte Säulenweite mit $W_s = 3,4$ m konstant. Der Verbauungsgrad B in Fließrichtung nahm folglich von 15,4 % bei der Anordnung senkrecht zur Fließrichtung über 21,2 % bei der Neigung 45° bis 42,3 % bei der Neigung 20° zu. Die Versuche wurden für zwei spezifische Abflüsse ($q = 6,15$ m³/(s·m) und 16,25 m³/(s·m)) bei allerdings ähnlichen Froude-Zahlen ($Fr = 0,67$ und $Fr = 0,71$) durchgeführt.

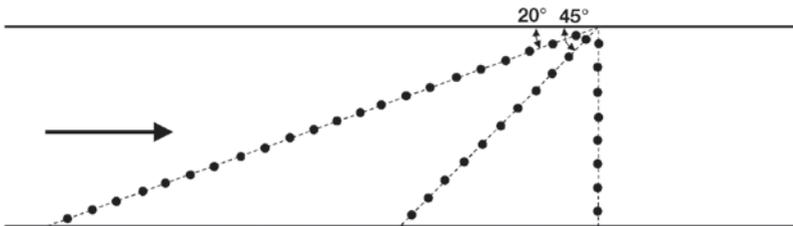


Abb. 2.20: Von ASENKERSCHBAUMER untersuchte Anordnungen der Rechensäulen im Grundriss

Die prinzipielle Versuchsdurchführung erfolgte wie bei KNAUSS, so dass auch aus den Ergebnissen von ASENKERSCHBAUMER der relative Aufstau $\Delta h/h$ ermittelt werden konnte. Allerdings wurden für die Versuche andere hydraulische Verhältnisse mit anderen Abflüssen und Froude-Zahlen sowie ein anderes Schwemmh Holzmaterial als von KNAUSS gewählt. Grundsätzlich wurde in den Versuchen jeweils die identische Schwemmh Holz Mischung mit einer heterogenen Längenverteilung verwendet. Als Kriterium für die einseitige Ablagerung des Schwemmh Holzes wurde von ASENKERSCHBAUMER registriert, welcher Anteil M des zurückgehaltenen Schwemmh Holzes sich innerhalb des in Fließrichtung linken Drittels der Versuchsrinne vor dem jeweiligen Rechen abgelagert hat (siehe Abb. 2.21). Außerdem wurde in jedem Versuch der Schwemmh Holz durchgang N bezogen auf die zugegebene Schwemmh Holzmenge erfasst, der nicht am Rechen zurückgehalten wurde.

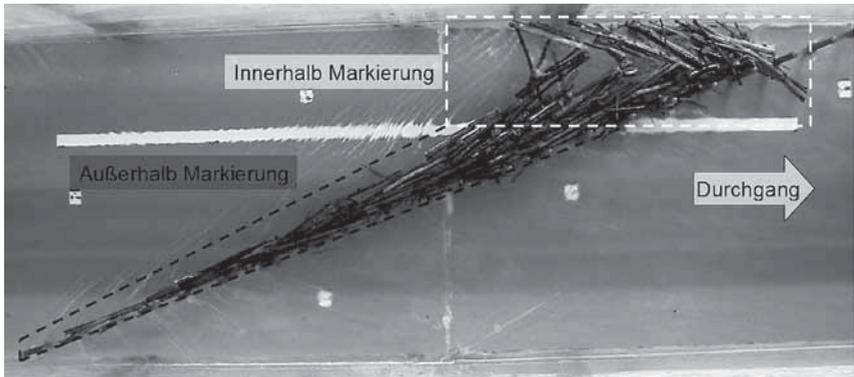


Abb. 2.21: Verkläuskörper in einem Versuch mit einer schrägen Rechenanordnung von 20° mit der Definition der Ablagerungsorte

In Tab. 2.4 sind die Ergebnisse der ersten Versuchsreihe von ASENKERSCHBAUMER zusammengestellt. Jeder Versuch wurde zweimal wiederholt. Die Abweichung der Messwerte war gering und damit die Reproduzierbarkeit der Versuche gegeben. Deshalb werden in der Tabelle nur die Mittelwerte der Ergebnisse angegeben.

Rechen	B [%]	q [$\text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$]	h [m]	v [m/s]	Fr	Δh [m]	$\Delta h/h$	M [%]	N [%]
→ 90°	15,4	6,15	2,05	3,0	0,67	2,51	1,22	27,7	5,6
→ / 45°	21,2	6,15	2,05	3,0	0,67	1,88	0,92	33,1	5,8
→ / 20°	42,3	6,15	2,05	3,0	0,67	1,28	0,62	47,4	5,4
→ 90°	15,4	16,25	3,78	4,3	0,71	3,58	0,95	27,7	14,7
→ / 45°	21,2	16,25	3,78	4,3	0,71	2,85	0,75	31,6	9,9
→ / 20°	42,3	16,25	3,78	4,3	0,71	1,92	0,51	56,2	5,8

Tab. 2.4: Ergebnisse der ersten Versuchsreihe von ASENKERSCHBAUMER für grundsätzlich verschiedene Rechenanordnungen

Im Gegensatz zu den Grundlagenversuchen von KNAUSS ergab sich in den Versuchen von ASENKERSCHBAUMER mit strömendem Abfluss und deutlich niedrigeren Froude-Zahlen um $Fr = 0,7$ die erwartete Abhängigkeit von der Rechenanordnung (siehe Abb. 2.22):

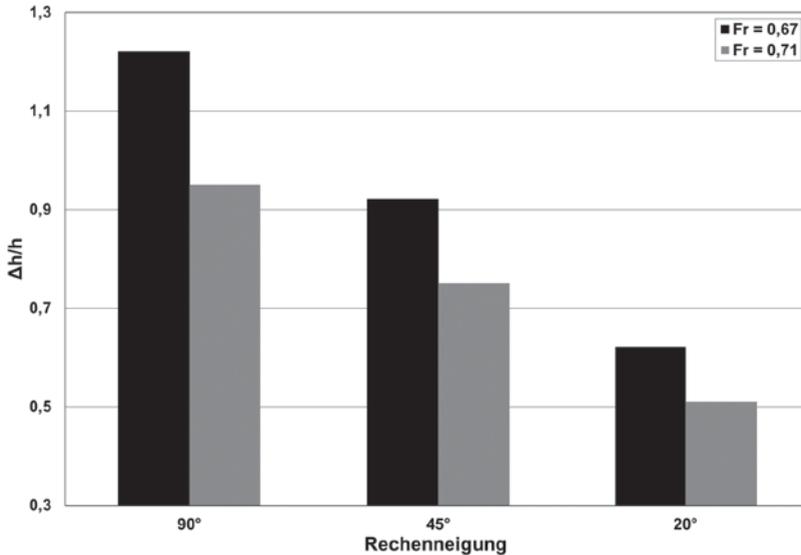


Abb. 2.22: Aufstau $\Delta h/h$ in Abhängigkeit von Rechenneigung und Froude-Zahl (Versuche von ASENKERSCHBAUMER)

Bei der Rechenanordnung senkrecht zur Fließrichtung (90°) bildeten sich für die beiden untersuchten Abflusszustände die kompaktesten Verkläusungskörper. Für den 45°-Rechen waren die Verkläusungen schon weniger dicht und für die mit 20° schrägste Anordnung deutlich am lockersten. Dementsprechend ist der Aufstau $\Delta h/h$ für den 90°-Rechen infolge des kompakten Verkläusungskörpers am größten und für den 20°-Rechen am kleinsten. Die Werte für den 45°-Rechen liegen etwa in der Mitte. Die $\Delta h/h$ -Werte liegen insgesamt deutlich unter denjenigen der Grundlagenversuche von KNAUSS, die bei schießendem Abfluss durchgeführt wurden. Überraschenderweise sind sie für die etwas höhere Froude-Zahl $Fr = 0,71$ kleiner. Dafür dürften wiederum zufällige Einflüsse bei der Bildung der Verkläusungskörper verantwortlich sein.

ASENKERSCHBAUMER konnte auch nachweisen, dass sich durch eine schräge Anordnung die Ablagerung des Schwemmhohles in Ufernähe verstärken lässt (siehe Abb. 2.23). Bei dem mit 20° zur Fließrichtung geneigten Rechen werden bei beiden Abflusszuständen immerhin etwa 50 % des gesamten zurückgehaltenen Holzes im linken Drittel der Versuchsrinne vor dem Rechen abgelagert, während es bei dem senkrecht angeordneten Rechen zwischen 25 und 30 % sind.

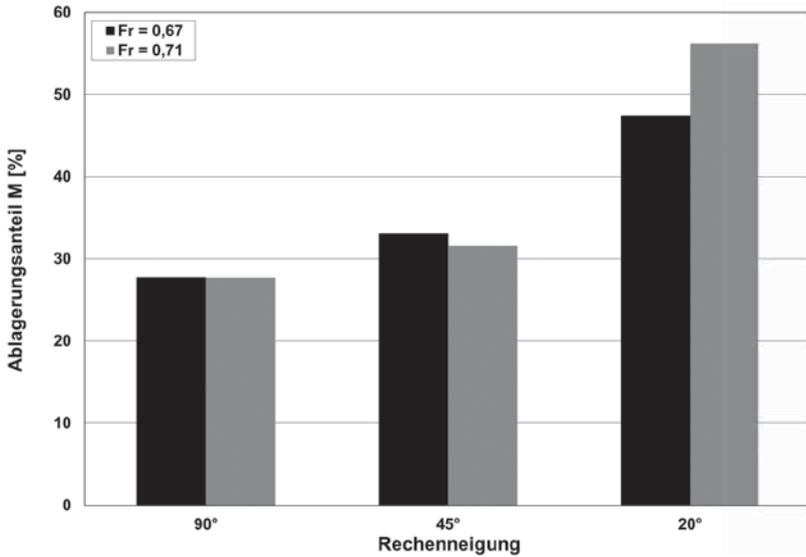


Abb. 2.23: Ablagerungsanteil M im linken Drittel der Versuchsrinne in Abhängigkeit von Rechenanordnung und Froude-Zahl

Beim Schwemmholzdurchgang N durch den Rechen ergaben sich für die etwas kleinere Froude-Zahl $Fr = 0,67$ keine signifikanten Unterschiede zwischen den Rechenanordnungen. Für $Fr = 0,71$ dagegen sinkt der Schwemmholzdurchgang N mit zunehmender Schrägstellung deutlich (siehe Abb. 2.24).

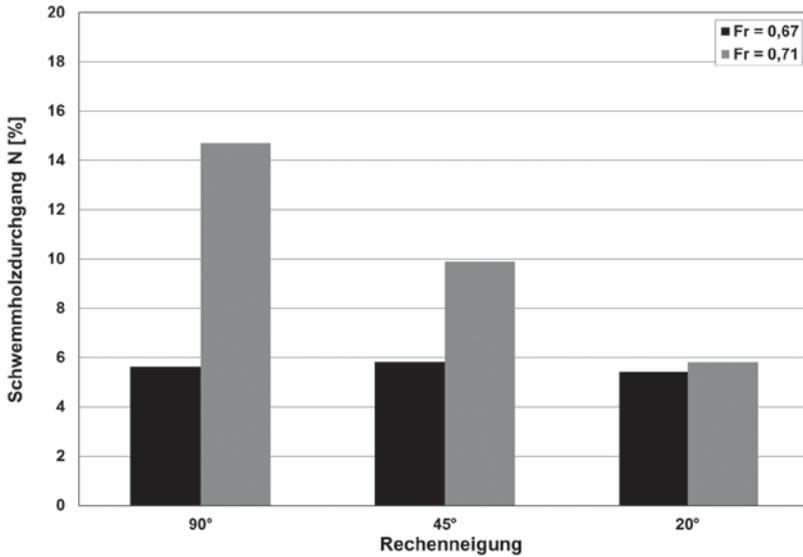
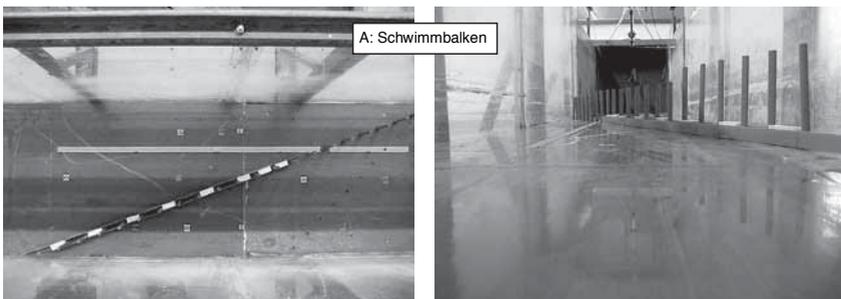


Abb. 2.24: Schwemmholzdurchgang N in Abhängigkeit von Rechenneigung und Froude-Zahl

Generell liegen die Versuchsergebnisse des 45°-Rechens (Aufstau, Ablagerungsort und Schwemmholzdurchgang) näher beim 90°-Rechen als beim 20°-Rechen, der sich deutlich positiv abhebt. Dadurch wird die Bedeutung einer möglichst starken Schrägstellung unterstrichen.

In seiner zweiten Versuchsreihe hat ASENKERSCHBAUMER getestet, ob durch zusätzliche Einbauten am 20°-Rechen die einseitige Ablagerung verstärkt werden kann. Abb. 2.25 zeigt die fünf untersuchten Varianten im Grundriss und in der Ansicht in Fließrichtung:



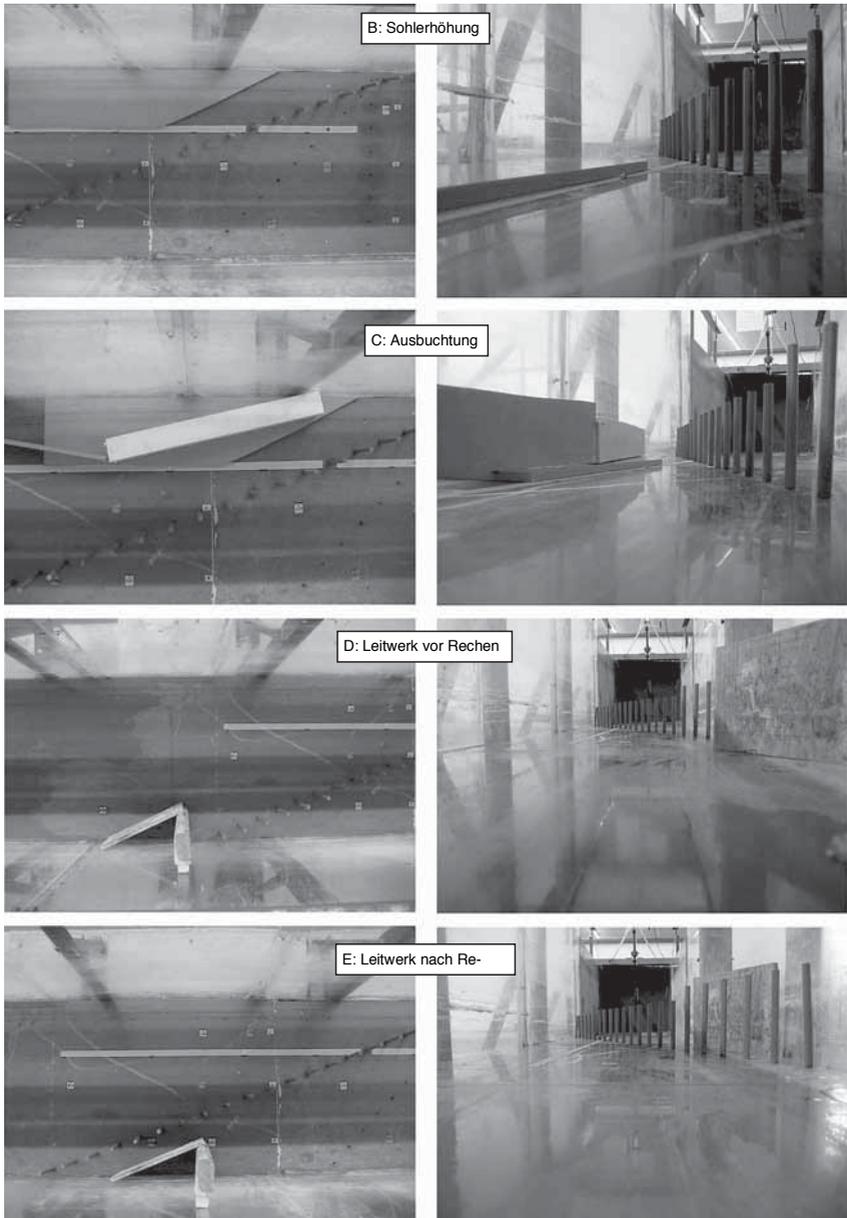


Abb. 2.25: Untersuchte Varianten des 20°-Rechen mit zusätzlichen Einbauten

Tab. 2.5 fasst die in den Versuchen für $q = 6,15 \text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$ und $Fr = 0,67$ ermittelten Werte des Ablagerungsanteils M im linken Drittel der Versuchsrinne und den Schwemmholzdurchgang N für die verschiedenen untersuchten Varianten des 20° -Rechens zusammen. Abb. 2.26 zeigt die Ergebnisse im Diagramm. Dabei ist zu beachten, dass die Schwemmholzmenge im Vergleich zur ersten Versuchsreihe von ASENKERSCHBAUMER reduziert war und eine deutlich homogenere Längenverteilung mit Stamm­längen zwischen 7 m und 9,5 m gewählt wurde. Deshalb weichen die Werte M und N für die Ausgangsvariante ohne zusätzliche Einbauten von den Werten des vergleichbaren Versuchs aus der ersten Versuchsreihe ab (sie sind bei der zweiten Versuchsreihe etwas höher, vgl. Tab. 2.4).

Rechen	q [m ³ /(s·m)]	Fr	M [%]	N [%]
20° (ohne Einbauten)	6,15	0,67	51,3	11,3
A: Schwimmbalken	6,15	0,67	59,3	6,0
B: Sohl­erhöhung	6,15	0,67	62,0	4,0
C: Ausbuchtung	6,15	0,67	56,7	9,3
D: Leitwerk vor Rechen	6,15	0,67	46,7	27,3
E: Leitwerk nach Rechen	6,15	0,67	53,3	10,0

Tab. 2.5: Ergebnisse der zweiten Versuchsreihe von ASENKERSCHBAUMER für Varianten des 20° -Rechens

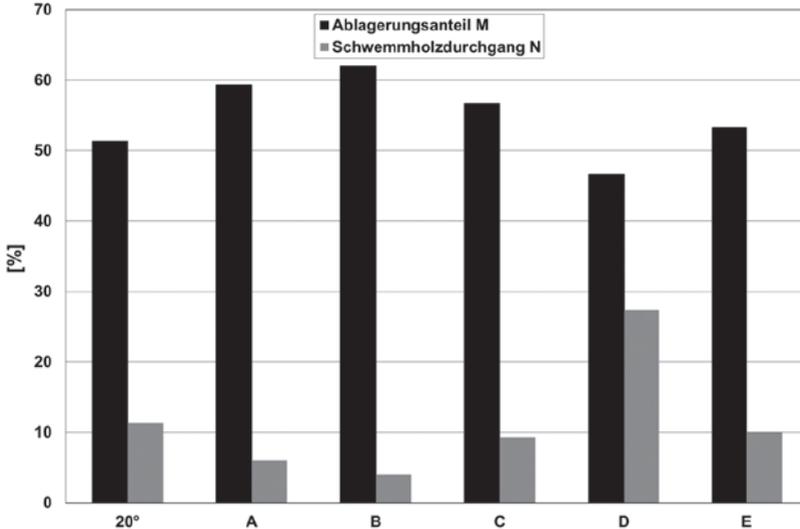


Abb. 2.26: Ablagerungsanteil M im linken Drittel der Versuchsrinne und Schwemmholzdurchgang N bei den Varianten des 20° -Rechens mit zusätzlichen Einbauten (siehe Abb. 2.25)

Die besten Ergebnisse werden mit Variante B erreicht, bei der die Sohle auf einer Länge von 40 m linksseitig um 60 cm erhöht ist. Die Sohlerrhöhung ist gegen die Fließrichtung vom Rechen abgerückt, damit auch bei kleinen Abflüssen das linke Drittel des Rechens beaufschlagt wird. Gegenüber der Ausgangsvariante des 20°-Rechens ohne Einbauten wird der Ablagerungsanteil M im linken Drittel von 51,3 % auf 62,0 % gesteigert und der Schwemmholzdurchgang N von 11,3 % auf 4,0 % deutlich reduziert. Der Absatz am linken Rand ruft dort höhere Fließgeschwindigkeiten hervor. Dadurch werden die Stämme zum einen schon vor dem Eintreffen am Rechen etwas nach links geleitet. Zum anderen bewirkt die Sohlerrhöhung eine leichte Querströmung, die einen Teil der rechts oder mittig angelagerten Stämme nachträglich noch in den markierten Bereich bewegt. Als positiver Nebeneffekt werden die Stämme vorwiegend parallel zum Rechen ausgerichtet, wodurch sich die niedrige Durchgangsquote ergibt.

Der Schwimmbalken (Variante A) zeigt die nächstbesseren Ergebnisse, wobei die dauerhafte Beweglichkeit und damit Funktionsfähigkeit des auf- und abschwimmenden Balkens gerade im Hochwasserfall mit Schwemmholz sicherlich einen kritischen Punkt darstellt. Alle anderen Varianten ergeben keine signifikant besseren oder im Falle der Variante D (Leitwerk vor Rechen) sogar deutlich schlechtere Ergebnisse als die Ausgangsvariante.

In der dritten Versuchsreihe zum Überlastfall unterschied ASENKERSCHBAUMER zwischen Versuchen, bei denen ein Verkläusungskörper durch Schwallwellen „nur“ zusammengestaucht und nach oben gedrückt wird („Stauchungsversuche“), und Versuchen mit noch höherer Belastung, bei denen es teilweise zum Ausbruch der Verkläusung über den Rechen hinweg ins Unterwasser kam („Ausbruchsversuche“).

Bei den Stauchungsversuchen wurde zunächst beim spezifischen Abfluss $q = 16,25 \text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$ und der Froude-Zahl $Fr = 0,71$ durch Holzzugabe ein „Referenzverkläusung“ am jeweiligen Rechen verursacht (Versuchsphase 0). Dann wurden die Verkläusungskörper insgesamt drei größer werdenden, reproduzierbaren Schwallwellen ausgesetzt (Versuchsphasen 1-3), die durch einen definierten Aufstau im Oberwasser der Versuchsrinne erzeugt wurden. Die jeweils nächste Schwallwelle wurde erst erzeugt, nachdem sich in der Versuchsrinne wieder stationäre Verhältnisse eingestellt hatten und die Längsstauung sowie die Höhenausdehnung des Verkläusungskörpers vermessen worden war. Abb. 2.27 zeigt von oben nach unten die drei untersuchten Rechenneigungen 90°, 45° und 20° in der Draufsicht mit der Referenzverkläusung (Versuchsphase 0) und dem gestauchten Verkläusungskörper nach der dritten Schwallwelle (Versuchsphase 3).

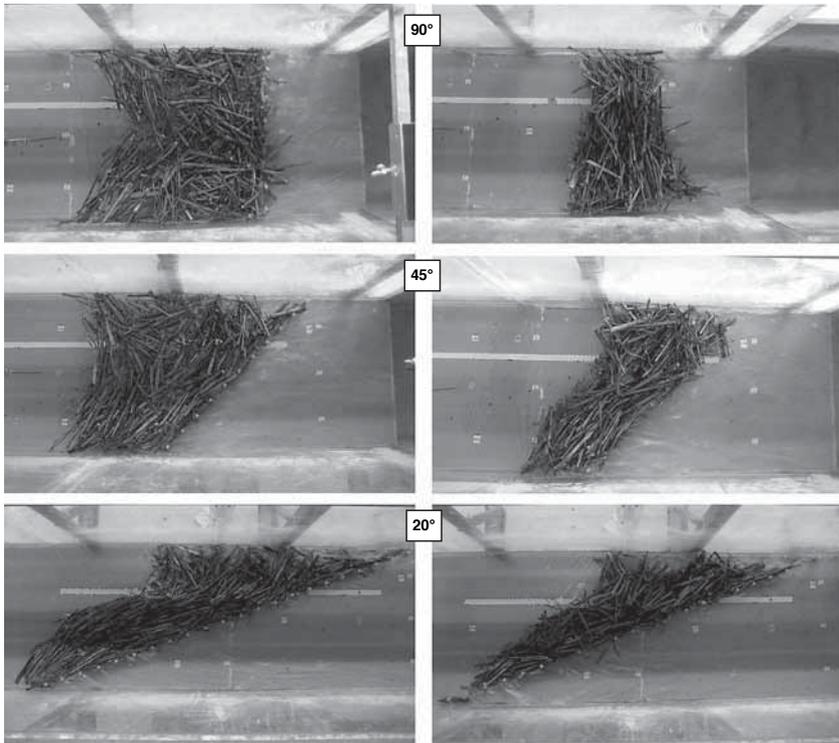


Abb. 2.27: Untersuchte Rechenanordnungen mit der jeweiligen Referenzverkläusung (links) und dem gestauchten Verkläusungskörper nach der dritten Schwallwelle (rechts)

Aus den Aufnahmen ist ersichtlich, dass bei der 90°-Anordnung die Längsstauchung der Referenzverkläusung durch die Schwallwellen deutlich größer ausfällt als bei der 20°-Anordnung. Die 45°-Anordnung liegt dazwischen. Diese Aussage kann durch die vorgenommenen Vermessungen genauer quantifiziert werden (siehe Abb. 2.28):

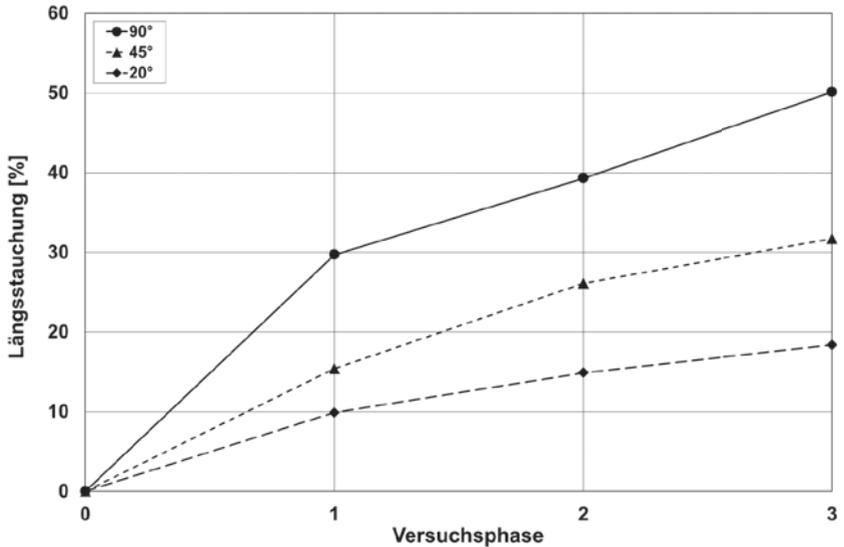


Abb. 2.28: Längsstauchung der Referenzverklauung für die untersuchten Rechenneigungen in den verschiedenen Versuchsphasen

Die Längsstauchung oder Verkürzung des Verklauungskörpers nach der dritten Schwallwelle (Versuchsphase 3) beträgt bei der 90°-Anordnung 50,1 %, bei der 45°-Anordnung 31,7 % und bei der 20°-Anordnung 18,4 % bezogen auf die Länge der Referenzverklauung in Fließrichtung. Die Vermessungen zeigen aber auch schon für die vorausgehenden schwächeren Schwallwellen in den Versuchsphasen 1 und 2 bei allen Rechenanordnungen eine zusätzliche Längsstauchung. Die Längsstauchung spiegelt sich in der Ausdehnung des Verklauungskörpers nach oben wieder. Die Höhenausdehnung ist die Höhenzunahme des Verklauungskörpers bezogen auf die Höhe der Referenzverklauung. Sie beträgt nach der dritten Schwallwelle bei der 90°-Anordnung 61,8 %, bei der 45°-Anordnung 32,4 % und bei der 20°-Anordnung 12,3 % (siehe Abb. 2.29):

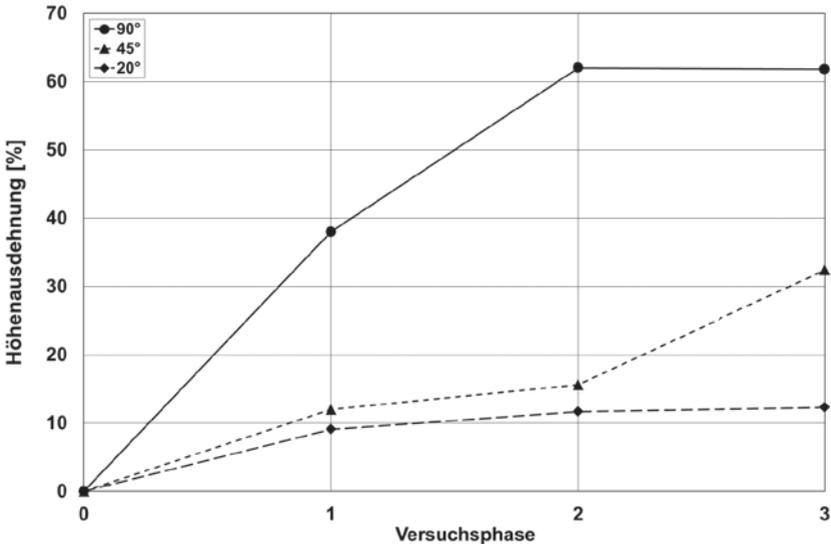


Abb. 2.29: Höhengausdehnung der Referenzverkläusung für die untersuchten Rechenneigungen in den verschiedenen Versuchsphasen

In den Ausbruchversuchen für die drei Rechenanordnungen wurde bei gleich bleibender Froude-Zahl $Fr = 0,71$ der spezifische Abfluss auf $q = 18,73 \text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$ erhöht. Wieder wurde jeweils eine Referenzverkläusung verursacht. Anschließend wurde der jeweilige Verkläusungskörper einer einzigen, reproduzierbaren Schwallwelle ausgesetzt, die deutlich größer war als in den Stauchungsversuchen. Dabei wurden für jede Rechenanordnung insgesamt fünf Versuche mit identischem Ablauf durchgeführt. Als maßgebender Parameter für die quantitative Beurteilung des jeweiligen Überlastungsverhaltens wurde dabei der Schwemmhohldurchgang N bezogen auf die zugegebene Schwemmhohlmenge herangezogen. Abb. 2.30 zeigt für einen Versuch mit dem 90°-Rechen die Referenzverkläusung und die „kümmerliche“ Restverkläusung nach Durchgang der großen Schwallwelle in der Draufsicht:

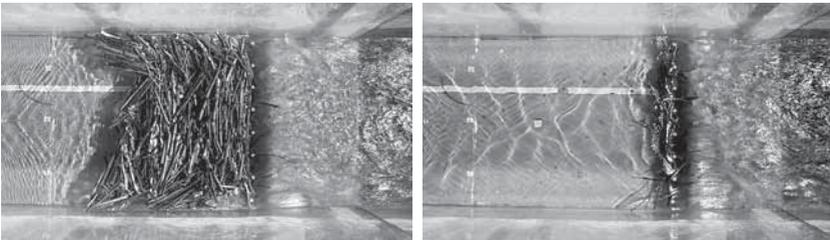


Abb. 2.30: 90°-Rechen mit der Referenzverkläusung (links) und der Restverkläusung nach der großen Schwallwelle (rechts)

Abb. 2.31 zeigt den Schwemmholzdurchgang N für alle 15 Ausbruchsversuche geordnet nach der Rechenanordnung und der Größe:

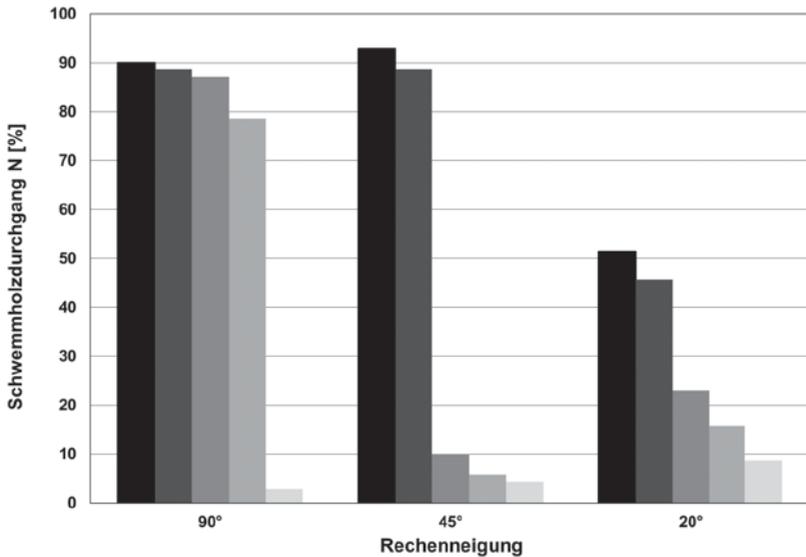


Abb. 2.31: Schwemmholzdurchgang bei den Ausbruchsversuchen in Abhängigkeit von der Recheneigung

Auffallend bei den 90°- und 45°-Rechen ist, dass es bei einer völlig identischen Versuchsdurchführung zu fast vollständigen Ausbrüchen des Schwemmholzes (> 80 % Durchgang) durch die Schwallwelle oder einem fast vollständigen Rückhalt (< 10 % Durchgang) trotz der Schwallwelle kommt. Beim 90°-Rechen kommt es in vier von fünf Versuchen zu einem fast vollständigen Ausbruch. Beim 45°-Rechen ist das in zwei von fünf Versuchen der Fall. Der 20°-Rechen zeigt ein anderes, berechenbareres Verhalten: in keinem der fünf Versuche kommt es zum fast vollständigen Schwemmholzausbruch, im schlechtesten Fall brechen etwas mehr als 50 % aus. Allerdings brechen in jedem Versuch mehr als 8,6 % aus. Scheinbar ist der innere Zusammenhalt der Verkläusungskörper bei den 90°- und 45°-Rechen größer als die Kraftübertragungen zum Rechen, so dass der Ausbruch nach dem Motto „alle oder keiner“ erfolgt. Beim 20°-Rechen sind die Wechselwirkungen zwischen dem Verkläusungskörper und dem Rechen deutlich größer, so dass es bei Überlastung zu einer ausgeprägteren Separierung und zu Teilausbrüchen des Verkläusungskörpers kommt. Die Mittelwerte für den Schwemmholzdurchgang N über die jeweils fünf Versuche betragen 69,4 % für den 90°-Rechen, 40,3 % für den 45°-Rechen und 28,9 % für den 20°-Rechen. Insgesamt zeigt der 20°-Rechen das deutlich beste Verhalten bei Überlastung.

2.4.3 Zusammenfassung der Verklausungsversuche mit unterschiedlicher Rechenanordnung

In den systematischen Verklausungsversuchen von KNAUSS sowie ASENKERSCHBAUMER konnten deutliche Vorteile einer V-förmigen oder einer schrägen Rechenanordnung gegenüber der Anordnung senkrecht zur Fließrichtung nachgewiesen werden. In den Versuchen von KNAUSS konnte die Abhängigkeit des von einer Erstverklausung verursachten Aufstaus von der Rechenanordnung infolge der schießenden Anströmung mit Froude-Zahlen $> 1,6$ zwar nicht nachgewiesen werden. Bei der weiteren Holzzugabe zeigte sich aber für die V-förmige und schräge Anordnung doch ein deutlich geringerer zusätzlicher Aufstau als für die senkrechte Anordnung. Die Versuche von KNAUSS erbrachten auch die wesentliche Erkenntnis, dass der durch eine Verklausung verursachte Aufstau mit steigender Froude-Zahl der Anströmung zunimmt. Bei ASENKERSCHBAUER ergab sich aufgrund des strömenden Abflusses mit Froude-Zahlen um 0,7 auch schon bei der Erstverklausung ein geringerer Aufstau für schräge Rechenanordnungen, wobei der Aufstau beim 20°-Rechen noch einmal deutlich geringer war als beim 45°-Rechen. Durch innere Brückenbildung und bessere Lastabtragung ergeben sich bei der V-Form und der schrägen Anordnung weniger kompakte, großflächigere Verklausungskörper als bei der senkrechten Anordnung. Der Vorteil der schrägen Anordnung gegenüber der V-Form liegt darin, dass das zurückgehaltene Schwemmholz eventuell verstärkt durch zusätzliche Einbauten in der Nähe eines Ufers konzentriert und dadurch besser entnommen werden kann. Gerade bei größeren Flüssen mit permanenter Wasserführung kommt dieser Vorteil zur Geltung.

KNAUSS sowie ASENKERSCHBAUMER haben in zusätzlichen Versuchen das für eine moderne Sicherheitsbetrachtung wichtige Verhalten der verschiedenen Rechenanordnungen im Überlastfall untersucht. Der Schwerpunkt bei KNAUSS lag dabei auf dem Versagen von einzelnen Rechensäulen: bei der senkrechten Rechenanordnung führt der Bruch einer einzelnen Rechensäule in einer Kettenreaktion zum Bruch der gesamten Rechen. Das zurückgehaltene Holz bricht schlagartig aus. Dagegen bleiben beim V-förmigen Rechen nach dem Bruch einer einzelnen Rechensäule durch die bessere Lastverteilung die anderen Säulen stehen. Wenn überhaupt, wird nur ein kleiner Teil des zurückgehaltenen Holzes in das Unterwasser transportiert. ASENKERSCHBAUMER konnte nachweisen, dass die Verklausungskörper an schräg angeordneten Rechen durch Schwallwellen deutlich weniger gestaucht und nach oben aufgeworfen werden als an senkrecht angeordneten Rechen. Deshalb führt eine weitere noch größere Schwallwelle, die auf den Verklausungskörper trifft, beim 90°-Rechen häufig zu einem fast vollständigen Ausbruch des zurückgehaltenen Schwemmholzes, während beim 20°-Rechen nur ein kleinerer Schwemmholzanteil über den Rechen transportiert wird.

2.4.4 Vergleich mit anderen Verklausungsversuchen bei unterschiedlicher Rechenanordnung

Zahlreiche Untersuchungen an der Versuchsanstalt für Wasserbau (VAW) der ETH Zürich in den vergangenen Jahren stehen in guter Übereinstimmung mit der zentralen Erkenntnis aus den Modellversuchen von KNAUSS und ASENKERSCHBAUMER, dass bei einer möglichst schrägen, d.h. spitzwinkligen Rechenanordnung in Bezug auf die Anströmungsrichtung der am wenigsten kompakte Verklausungskörper mit dem geringsten Aufstau entsteht. Schwerpunkt dieser Untersuchungen an der VAW war die Wirkung von parallel zur Strömung angeordneten Schwemmholzrechen, sozusagen der Extremform des schräg angeströmten Rechens. Ausgangspunkt war dabei ein in MÖLLER ET AL 2009 beschriebener Modellversuch für ein parallel angeströmtes, sehr langes Wehr, die so genannte Matteschwelle an der Aare in Bern (Schweiz). Durch den großen Schwemmholzurückhalt an den Wehrpfeilern und -verschlüssen auf großer Länge und den vergleichsweise moderaten Aufstau infolge der Verklausung entstand die Idee, bei anderen Projekten lange, parallel zur Strömung angeordnete Schwemmholzrechen zu untersuchen.

Für einen Anwendungsfall an der Kleinen Emme (Schweiz) haben TAMAGNI ET AL 2010 bzw. TAMAGNI/WEITBRECHT 2010 einen gegen die Fließrichtung orientierten V-Rechen mit sehr großem Öffnungswinkel, der fast schon einem im Grundriss geraden Rechen senkrecht zur Fließrichtung entsprach, mit einem langen Parallelrechen verglichen. Für den V-Rechen ergab sich ein hoher, sehr kompakter Verklausungskörper und ein großer Aufstau, während sich für den Parallelrechen, der in diesem Fall aufgrund der Anordnung in einer Flussaufweitung möglich war, ein lockerer, einlagiger Schwemmholzteppich mit geringerem Aufstau entwickelte. Ebenso ins Bild passen die Versuchsergebnisse von PFISTER 2010, der in Modellversuchen für eine Hochwasserentlastung am Lyssbach (Schweiz) einen parallel zur Hauptströmungsrichtung angeordneten Schwemmholzrechen vor einem Streichwehr untersucht hat. Selbst bei der größten im Modell zugegebenen Schwemmholzmenge blieb der Rechen auf einem Abschnitt am oberen Ende unverlegt und der durch die Verklausung des Rechens verursachte Aufstau gering. Eine wesentliche Erkenntnis der beiden Untersuchungen für die Kleine Emme und den Lyssbach war, dass bei einer parallelen Rechenanordnung ein größerer Schwemmholzanteil am gesamten Rechen vorbei transportiert wird, ohne daran hängen zu bleiben oder durch den Rechen transportiert zu werden. Deshalb ist neben dem Rechen eine größere Rezirkulationszone als Holzurückhalteraum erforderlich. Dies wurde auch bei einem Modellversuch für den Schwemmholzurückhalt in der Sihl oberhalb von Zürich (Schweiz) berücksichtigt, der in SIMONETT ET AL 2012 beschrieben wird.

Auch hier ergab der Parallelrechen den gewünschten großen Schwemmholzrückhalt bei vergleichsweise geringem Aufstau.

In WEITBRECHT/SCHMOCKER 2012 wird von Grundlagenversuchen in einer Rechteckrinne zum Vergleich des 90°-Rechens mit dem Parallelrechen (0°-Rechen) berichtet. Der Parallelrechen wurde in einer Aussparung einer Seitenwand der Rinne angeordnet, durch die der Abfluss erfolgte. In Tab. 2.6 sind die wesentlichen Randbedingungen der Versuche von WEITBRECHT/SCHMOCKER und von ASENKERSCHBAUMER aufgeführt (vgl. Tab. 2.2):

		WEITBRECHT/SCHMOCKER		ASENKERSCHBAUMER		
Modell	Breite Versuchsrinne [m]	0,6		0,52		
Rechen	Anordnung	→ 90°	→ - 0°	→ 90°	→ / 45°	→ / 20°
	Säulendurchmesser [cm]	1,0		1,0		
	Lichte Säulenweite [cm]	5,0		5,7		
Holz	Beschreibung	keine Verzweigung		wenig gekrümmt, sehr geringe Verzweigung		
	Länge [cm]	0,5 - 20		5 - 20		
	Durchmesser [mm]	2 - 20		2 - 12		

Tab. 2.6: Wesentliche Randbedingungen der Versuche von WEITBRECHT/SCHMOCKER und ASENKERSCHBAUMER in Modellmaßen

Die Breite der verwendeten Versuchsrinnen wie die Rechenabmessungen waren in beiden Versuchsreihen sehr ähnlich. Bei den Rechenanordnungen wurde in beiden Versuchsreihen ein 90°-Rechen untersucht. Der 0°-Rechen von WEITBRECHT/SCHMOCKER kann mit Einschränkungen mit dem 20°-Rechen von ASENKERSCHBAUMER verglichen werden. Beim verwendeten Modellschwemmholz war in der Mischung von WEITBRECHT/SCHMOCKER sowohl kürzeres als auch dickeres Material als bei ASENKERSCHBAUMER enthalten. Das bei den Versuchen eingebrachte Schwemmholzvolumen wird von WEITBRECHT/SCHMOCKER mit 50 dm³ Schüttvolumen und von ASENKERSCHBAUMER mit 4,6 m³ reinem Holzvolumen angegeben, so dass sich dieses zwar in einer vergleichbaren Größenordnung bewegt haben dürfte, aber bei WEITBRECHT/SCHMOCKER vermutlich größer war.

Auch was den maßgebenden hydraulischen Eingangsparameter, die Froude-Zahl der Anströmung des Rechens vor der Verklausung angeht, stimmen die Bedingungen in beiden Versuchsreihen gut überein. Die Versuche von WEITBRECHT/SCHMOCKER wurden bei strömendem Abfluss und Froude-Zahlen der Anströmung zwischen 0,5 und 0,8 durchgeführt, somit bei ähnlichen Verhältnissen wie die Versuche von ASENKERSCHBAUMER (Froude-Zahlen um 0,7).

In Tab. 2.7 sind die Froude-Zahl Fr der Anströmung des Rechens vor der Verkläuerung und als wesentliches Versuchsergebnis der durch die Rechenverkläuerung verursachte relative Aufstau $\Delta h/h$ der vergleichbaren Versuche von WEITBRECHT/SCHMOCKER und von ASENKERSCHBAUMER einander gegenübergestellt. Die $\Delta h/h$ -Werte bei den Versuchen von WEITBRECHT/SCHMOCKER wurden aus den publizierten Versuchsergebnissen abgeleitet.

Versuchsreihe	Rechenanordnung	Fr	$\Delta h/h$
WEITBRECHT/SCHMOCKER	→ 90°	0,50	1,50
	→ 90°	0,80	1,98
ASENKERSCHBAUMER	→ 90°	0,67	1,22
	→ 90°	0,71	0,95
WEITBRECHT/SCHMOCKER	→ - 0°	0,50	0,88
	→ - 0°	0,50	0,85
ASENKERSCHBAUMER	→ / 20°	0,67	0,62
	→ / 20°	0,71	0,51

Tab. 2.7: Vergleich der Froude-Zahl Fr der Anströmung und des relativen Aufstaus $\Delta h/h$ für die Versuche von WEITBRECHT/SCHMOCKER und von ASENKERSCHBAUMER

Bei WEITBRECHT/SCHMOCKER sind die Aufstauwerte für den 90°-Rechen wie bei ASENKERSCHBAUMER durch die kompakteren Verkläuerungskörper signifikant höher als beim 0°- bzw. 20°-Rechen. Vermutlich aufgrund des größeren Schwemmholumens und des Feinanteils in der Mischung mit Holzlängen ab 0,5 cm sind die $\Delta h/h$ -Werte bei WEITBRECHT/SCHMOCKER durchgehend etwas größer. Selbst die Aufstauwerte beim 0°-Rechen von WEITBRECHT/SCHMOCKER sind höher als die beim ungünstiger angeordneten 20°-Rechen von ASENKERSCHBAUMER. Die Ergebnisse der beiden Versuche von WEITBRECHT/SCHMOCKER für den 90°-Rechen mit $\Delta h/h = 1,50$ für $Fr = 0,5$ und $\Delta h/h = 1,98$ für $Fr = 0,8$ bestätigen die Erkenntnis aus den Ergebnissen von KNAUSS, dass der durch eine Verkläuerung hervorgerufene Aufstau bei einer größeren Froude-Zahl der Anströmung höher ausfällt.

In SCHMOCKER/HAGER 2013 sind weitere Versuche zur Verkläuerung von 90°-Rechen beschrieben, wobei einige Randbedingungen denjenigen der Versuche von WEITBRECHT/SCHMOCKER 2012 entsprechen. Als ein wesentlicher Parameter wurde die Froude-Zahl der Rechenanströmung von $Fr = 0,5$ über $Fr = 0,8$ bis $Fr = 1,5$ variiert. Aus den Versuchsergebnissen haben SCHMOCKER/HAGER lineare Zusammenhänge abgeleitet, mit denen die Zunahme sowohl der Kompaktheit des Verkläuerungskörpers am Rechen als auch des dadurch hervorgerufenen Aufstaus in Abhängigkeit von der steigenden Froude-Zahl der Anströmung quantifiziert werden. Verwendet man die Parameter der vorliegenden Schrift, lau-

tet die Gleichung von SCHMOCKER/HAGER für die Abhängigkeit des relativen Aufstaus $\Delta h/h$ von der Froude-Zahl Fr der Anströmung für den Geltungsbereich $0,5 < Fr < 1,5$:

$$(\Delta h+h)/h = 1,4 + 1,9 \cdot Fr \quad \text{bzw.} \quad \Delta h/h = 0,4 + 1,9 \cdot Fr \quad (\text{Gl. 2.1})$$

In Abb. 2.32 sind die Versuchsergebnisse von WEITBRECHT/SCHMOCKER und der Graph der Gl. 2.1 von SCHMOCKER/HAGER für die Verkläuerung von 90°-Rechen den Werten aus den Versuchen von KNAUSS für die V-förmige Rechenanordnung (siehe auch Abb. 2.15) gegenübergestellt. Soweit nachvollziehbar, wurden in den verschiedenen Versuchsreihen vergleichbare Schwemmholzmischungen verwendet.

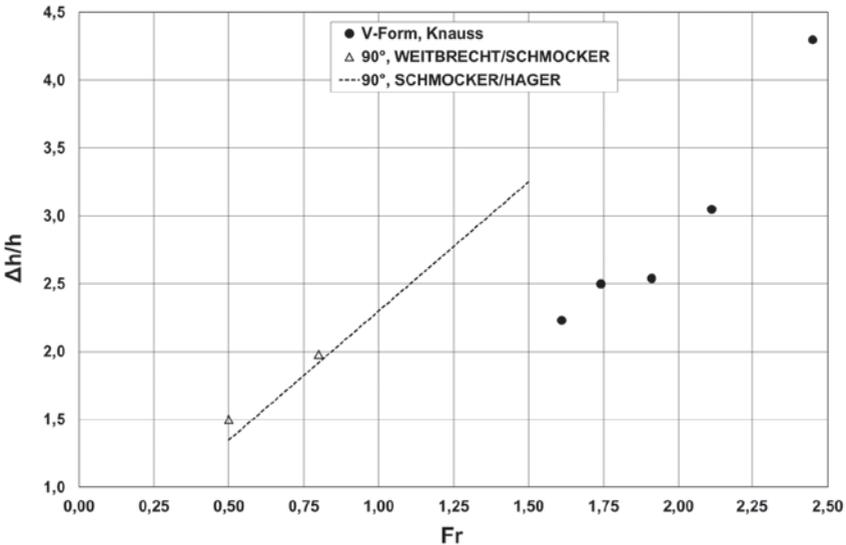


Abb. 2.32: Aufstau $\Delta h/h$ in Abhängigkeit von der Froude-Zahl Fr der Anströmung in den verschiedenen Versuchsreihen

Die Quantität des Anstiegs des relativen Aufstaus $\Delta h/h$ mit wachsender Froude-Zahl Fr der Anströmung liegt bei allen drei Versuchsreihen in einer vergleichbaren Größenordnung. Bemerkenswert ist auch, dass bei einer Extrapolation des linearen Zusammenhangs von SCHMOCKER/HAGER auf größere Froude-Zahlen der Anströmung die relativen Aufstauwerte deutlich höher liegen würden als bei den Versuchen von KNAUSS. Dies deckt sich mit der grundlegenden Erkenntnis von KNAUSS, dass Verkläuerungen von V-förmigen Rechen grundsätzlich zu einem geringeren Aufstau führen als Verkläuerungen von 90°-Rechen.

2.5 Schwemmholzurückhalt mit Netzen

Netzkonstruktionen zum Schwemmholzurückhalt bestehen aus senkrecht zum Gewässer gespannten Tragseilen, die direkt in den Uferflanken verankert oder an abgespannten vertikalen Trägern befestigt werden. Bei den so genannten Seilnetzsperrern wird das zusätzliche Netz an den Tragseilen aufgehängt. Bei den Seilsperrern bilden die Tragseile zusammen mit vertikalen Druckstreben selbst das Netz. Häufig wird eine Netzkonstruktion im Überfallquerschnitt einer Geschiebesperre installiert. Abb. 2.33 zeigt eine entsprechende Seilnetzsperrung mit abgespannten vertikalen Trägern:



Abb. 2.33: Seilnetzsperrung über Geschiebesperre (Kranzbach, Oberbayern, Foto: Asenkerschbaumer)

RIMBÖCK 2003 hat den Schwemmholzurückhalt mit Seilnetzsperrern unter Berücksichtigung aller Prozesse vom Schwemmholzeintrag in das Gewässer bis zum Rückhalt im Netz auf der Basis von Modell- und Naturversuchen umfassend untersucht. Abb. 2.34 zeigt die Verklausung eines Netzes im Modellversuch:



Abb. 2.34: Verklausung eines Schwemmholznetzes im Modellversuch (Foto: Rimböck)

Das wesentliche Ergebnis der Untersuchungen von RIMBÖCK stellt ein Bemessungskonzept für Seilnetzsperrern dar. Am Beginn stehen die Auswahl der Sperrenstelle und die Ermittlung der Eingangsdaten für die Bemessung, die zunächst im Hinblick auf die Anwendungsgrenzen von Seilnetzsperrern (siehe Tab. 2.8) überprüft werden müssen.

Sohlbreite b_s	Kurvenradius r	Abfluss q	Sohlgefälle J	Holzmenge V_s	Geschiebemenge G_s
$\leq 15 \text{ m}$	$\geq 10 b$	$\leq 5 \text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$	$\leq 5 \%$	$\leq 20 \text{ m}^3/\text{m}$	$\leq 100 \text{ m}^3/\text{m}$

Tab. 2.8: Anwendungsgrenzen von Seilnetzsperrern nach RIMBÖCK

Im zweiten Schritt wird aus den Eingangsdaten als maßgebende Sperrenabmessung die erforderliche Höhe des Netzes bestimmt, die sich unmittelbar aus der Aufstauhöhe im Falle der „Bemessungsverklaugung“ ergibt. Von RIMBÖCK werden dabei in den Bemessungsdiagrammen und Korrekturfaktoren, die er auf Basis der Modellversuche ermittelt hat, folgende Parameter berücksichtigt:

- Spezifische Schwemmh Holzmenge V_s im Bemessungsfall: sie hat den quantitativ größten Einfluss auf den Aufstau.
- Holzzusammensetzung: feineres Holz verursacht einen höheren Aufstau.
- Spezifischer Abfluss q : ein größerer spezifischer Abfluss führt zu einem höheren Aufstau.
- Sohlgefälle J : ein größeres Sohlgefälle führt zu einem höheren Aufstau.
- Sohl- und Uferrauheit: bei einer größeren Rauheit werden vermehrt Lasten in Ufer und Sohle abgetragen. Dadurch verringern sich die Kompaktheit des Verklauungskörpers und der Aufstau.
- Uferneigung: eine flachere Uferneigung reduziert den Aufstau.
- Spezifische Geschiebemenge G_s : die Verklauung des Netzes und der sich daraus ergebende Aufstau rufen auch den Rückhalt von Geschiebe hervor. Unter einer kritischen Menge G_1 hat das Geschiebe noch keine Auswirkung auf die Verklauung und den Aufstau. Für $G_s > G_1$ kommt es zu einer Interaktion zwischen Holz und Geschiebe, der Verklauungskörper wird undurchlässiger und der Aufstau höher. Ab einer noch größeren Geschiebemenge G_2 dominiert das Geschiebe die Verklauung und somit die Netzbelastung. Das Holz spielt keine Rolle mehr.

Die Netzbelastung für $G_s < G_2$ wird aus der Netzhöhe unter Ansatz des hydrostatischen Wasserdrucks errechnet. Wenn die Fließtiefe im Unterwasser des Netzes ermittelt werden kann, darf die Belastung nach dem Stützkraftansatz reduziert werden. Für $G_s > G_2$ ist der aktive Erddruck unter Annahme der Feuchtwichte des Materials anzusetzen.

Als weitere wichtige Bemessungsgröße ist der Abstand der Unterkante des Netzes von der Gewässersohle festzulegen, der bei allen Netzsperrern zur ungestörten Abfuhr von kleinen und mittleren Abflüssen ohne Schwemmholtfracht vorzusehen ist. RIMBÖCK gibt als Anhaltswert die Fließtiefe bei einem Abfluss im Bereich des HQ_{10} bis HQ_{20} an, ab dem in der Regel ein ausgeprägter Schwemmholttransport auftritt.

Im letzten Schritt des Bemessungskonzepts von RIMBÖCK werden für die konstruktive Durchbildung in einem iterativen Prozess Anzahl, Abstand und Durchmesser der Seile sowie die Seil- und Ankerkräfte ermittelt.

Üblicherweise werden Ringnetze (siehe auch Abb. 2.33) verwendet, die durch gute Lastverteilung und -abtragung sowie große Verformbarkeit gekennzeichnet sind. Die Maschenweite liegt entsprechend der geforderten Rückhaltewirkung im Bereich von 30 bis 50 cm. Die Gewässersohle im Bereich des Netzes und auch unterhalb davon muss befestigt werden, um der großen hydraulischen Belastung im Bemessungsfall Stand zu halten.

Um eine Größenordnung der auf Seilnetzsperrern wirkenden Kräfte anzugeben, werden Messergebnisse von Prototypversuchen von RIMBÖCK angeführt. Die betreffende Seilnetzsperrung bestand aus drei horizontalen Tragseilen (Durchmesser: 28 mm), in die ein Ringnetz mit 30 cm Ringdurchmesser eingehängt war. Der Sohlabstand des untersten Tragseils betrug 0,5 m und der Abstand der Tragseile untereinander 1,5 m. Bei einem Rückhalt von 15 m^3 Schwemmholt und einem Abfluss von $30 \text{ m}^3/\text{s}$ wurden eine horizontale Gesamtbelastung des Netzes von etwa 245 kN, die unter den theoretischen Ansätzen des hydrostatischen Wasserdrucks und des Stützkraftansatzes lag, und Seillängskräfte von etwa 255 kN für das untere und mittlere Tragseil sowie von etwa 125 kN für das obere Tragseil gemessen.

Ein Nachteil von Netzkonstruktionen zum Schwemmholtzrückhalt ist ihr Verhalten im Überlastfall. Falls ein Tragseil durch eine Belastung über dem Bemessungsfall reißt, versagt die gesamte Rückhaltekonstruktion und es kommt zum schlagartigen und vollständigen Ausbruch des Verklausungskörpers. Die Auswirkungen auf die Unterlieger und die zu erwartenden Schäden werden dann wesentlich gravierender sein als ohne Schutzkonstruktion.

3 Grundlagenversuche zur Verklausung von wasserbaulichen Anlagen

Die bisherigen Kapitel haben sich vor allem mit dem Rückhalt von Schwemmholz befasst, der in Fließgewässern mit vergleichsweise kleinen Einzugsgebieten einen effektiven Schutz vor Verklausungen an Engstellen darstellt. An Fließgewässern mit großen Einzugsgebieten und vielen Seitengewässern ist ein flächendeckender Schwemmholzurückhalt nicht realisierbar. Hier muss man sich an den vorhandenen oder geplanten wasserbaulichen Anlagen - insbesondere Wehr- und Hochwasserentlastungsanlagen - der Verklausungsproblematik stellen. Dabei ist zu unterscheiden zwischen der Wahrscheinlichkeit, mit der eine Verklausung überhaupt auftritt, dem eigentlichen Verklausungsprozess und der Form des Verklausungskörpers sowie den Folgen einer Verklausung, die immer einer Reduzierung der Abflussleistung bzw. einen Anstieg des Oberwasserstands bedeutet. In Extremfällen kann das sogar zum Bruch eines Wehrs oder zur Überströmung einer Talsperre führen.

3.1 Modelle und Versuchsdurchführung

In den Jahren 2006 bis 2008 wurden in einem Betonkanal im Freigelände der Versuchsanstalt Oberrach zu diesen Themen systematische Modellversuche nach dem Modellgesetz von Froude im Maßstab 1:20 durchgeführt (vgl. HARTLIEB/RUTSCHMANN 2007, HARTLIEB/RUTSCHMANN 2008, HARTLIEB 2012a sowie HARTLIEB 2012b). Der Kanal ist 220 m lang und weist einen Rechteckquerschnitt mit einer Breite von 2,5 m und einer Tiefe von 2 m auf. Der Zufluss ist über ein Schütz mit aufgesetzter Klappe regulierbar und erfolgt über kalibrierte Messrinnen. Am unteren Ende des Kanals befindet sich ein regulierbarer Verschluss zur Einstellung der Fließtiefe im Kanal. Etwa in der Mitte des Kanals wurde für die Versuche im Jahr 2006 eine einfeldrige und für die Versuche in den Jahren 2007 und 2008 eine dreifeldrige Wehranlage mit einem WES-Profil als fester Wehrschwelle und mit aufgesetzten Drucksegmenten als beweglichen Verschlüssen installiert. Dem Wehrkörper vorgelegt war ein 5 m langer, höhenverstellbarer Vorboden, der an insgesamt sechs Gewindestangen nahe an den Kanalwänden aufgehängt war. Der Übergang zwischen Kanal- und Vorboden wurde mit einer mehr oder weniger geneigten Rampe hergestellt. Der Wehrkörper bestand aus Beton, die Seitenwände bzw. Pfeiler des Wehrs und der Vorboden einschließlich der Rampe aus laminiertem Holz sowie die Drucksegmente aus PVC.

Abb. 3.1 und Abb. 3.2 zeigen im Überblick und in einer Nahaufnahme das einfeldrige Wehrmodell und Abb. 3.3 das Dreifeld-Modell. In Abb. 3.4, Abb. 3.5 und Abb. 3.6 sind beide Wehrmodelle in schematischen und unmaßstäblichen Lageplänen und in einem Schnitt dargestellt.



Abb. 3.1: Einfeldmodell im Überblick

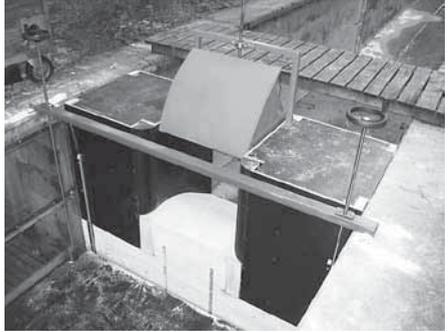


Abb. 3.2: Einfeldmodell in der Nahaufnahme

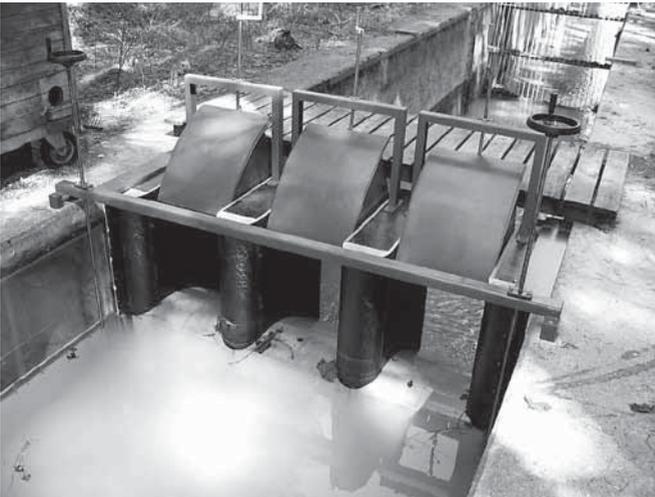


Abb. 3.3: Dreifeldmodell

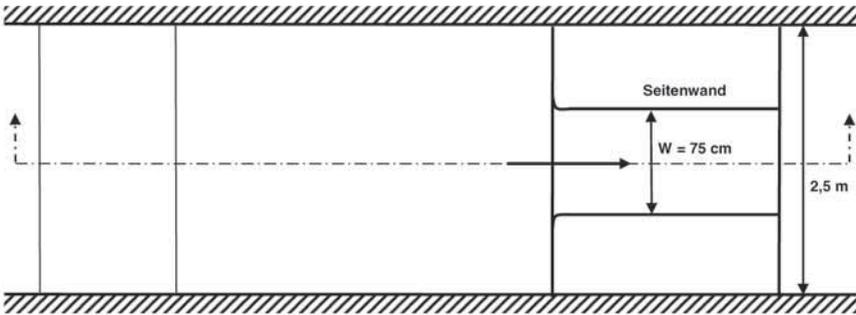


Abb. 3.4: Schematischer, unmaßstäblicher Lageplan des Einfeldmodells

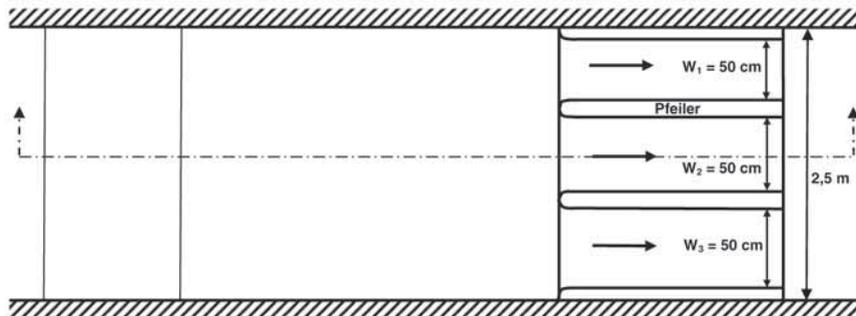


Abb. 3.5: Schematischer, unmaßstäblicher Lageplan des Dreifeldmodells

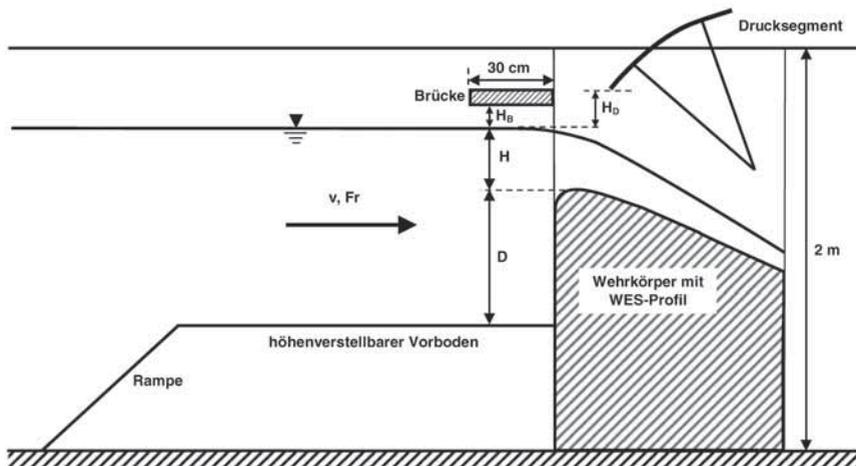


Abb. 3.6: Schematischer, unmaßstäblicher Schnitt in Kanalmitte (für beide Modelle identisch)

Für die Versuchsdurchführung wurde zunächst ein stationärer Abflusszustand mit einem definierten Abfluss über die kalibrierten Messrinnen im Zulauf und einer definierten Fließtiefe im Kanal oberhalb der Senkungslinie des Wehrmodells eingestellt. Die Wasserstände in den Messrinnen und die Fließtiefe im Kanal wurden mit Stechpegeln gemessen. Wegen des stationären Abflusszustands sowie der geringen Wellenbildung an den Messstellen konnte dadurch eine hohe Genauigkeit erzielt und auf elektronische Ultraschallpegel mit einer höheren Fehleranfälligkeit im Freigelände verzichtet werden. Der Unterwasserstand wurde bei allen Versuchen so stark abgesenkt, dass kein Rückstau einfluss beim Abfluss über die Wehrfelder gegeben war. Für den eigentlichen Verklausungsversuch wurde das Modellschwemmholz von einer Brücke, die den Kanal etwa 30 m oberhalb des Wehrmodells überspannte, zufällig hinsichtlich der Position im Kanal und der Ausrichtung zugegeben. Die Hölzer, die das Wehrmodell ohne Verklausung passierten, wurden an einem Rechen 10 m unterhalb des Wehrmodells zurückgehalten und aus dem Kanal entnommen.

3.2 Versuchparameter

Die in den Versuchen variierten Parameter lassen sich in drei Gruppen einteilen. Zum einen in die Parameter, die die Anströmung beeinflussen (siehe auch Abb. 3.4, Abb. 3.5 und Abb. 3.6):

- Überströmungshöhe H in Relation zur Wehrfeldbreite W ($H/W = 0,35; 0,5; 0,7; 0,9$)
- Höhendifferenz D zwischen Wehrschwelle und Vorboden in Relation zu H ($D/H = 0,1; 1; 2$)
- Wehrsteuerung

Die zweite Parametergruppe betrifft die Schwemmholzeigenschaften:

- Holzlänge L in Relation zu W ($L/W = 1; 1,5; 2$),
- Einzelhölzer oder Gruppen aus fünf Hölzern,
- Elastizität,
- Verastung,
- Holzrohddichte

Bei der dritten Parametergruppe wird der hinsichtlich einer Verklausung kritische Querschnitt nicht nur seitlich, sondern auch nach oben begrenzt:

- Position der Drucksegmente
- Position einer vorgelagerten Brücke

Zunächst wird für die verschiedenen Untersuchungsschwerpunkte zur Eingrenzung der maßgebenden Parameter eine Dimensionsanalyse durchgeführt. Dabei kann aufgrund unterschiedlicher Einflussfaktoren zwischen der Verklausungswahrscheinlichkeit einerseits sowie dem Verklausungsprozess, dem -körper und den -folgen andererseits differenziert werden.

3.2.1 Dimensionsanalyse Verklausungswahrscheinlichkeit

Abb. 3.7 zeigt schematisch die Verklausung eines Wehrfelds der Breite W mit einem Holzstamm der Länge L bei einer Anströmungsgeschwindigkeit v . Es wird davon ausgegangen, dass der Abflussquerschnitt nach oben nicht begrenzt ist.

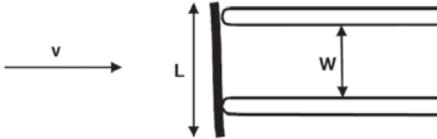


Abb. 3.7: Schematischer Grundriss eines mit einem Holzstamm verkleauten Wehrfelds

Es liegt auf der Hand, dass die Länge des Holzstamms L und die Wehrfeldbreite W maßgebenden Einfluss auf die Verklausungswahrscheinlichkeit haben. Vereinfachend wird für diese Betrachtung von unverzweigtem und vollständig steifem Holz ausgegangen. Möglicherweise spielt auch die Anströmungsgeschwindigkeit v eine Rolle bei der Verklausungswahrscheinlichkeit. Die Verklausungswahrscheinlichkeit P wird also als Funktion von L , W und v bzw. als Produkt einer Proportionalitätskonstante C_P und von L , W und v mit den unterschiedlichen Exponenten x , y und z betrachtet:

$$P = f(L, W, v) = C_P \cdot L^x \cdot W^y \cdot v^z \quad (\text{Gl. 3.1})$$

Damit nimmt die Dimensionsmatrix A_P im Masse-Länge-Zeit-System folgende Gestalt an:

$$A_P = \begin{bmatrix} & L & W & v \\ m & 0 & 0 & 0 \\ l & 1 & 1 & 1 \\ t & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (\text{Gl. 3.2})$$

Die Dimensionsgleichung der Masse entfällt und die Dimensionsgleichungen der Länge [l] und der Zeit [t] ergeben sich, weil die Verklausungswahrscheinlichkeit P dimensionsfrei ist, in der folgenden Weise:

$$[l]: \quad 0 = x + y + z \quad \Rightarrow \quad y = -x - z = -x$$

$$[t]: \quad 0 = -z \quad \Rightarrow \quad z = 0$$

$$\Rightarrow \quad P = C_P \cdot L^x \cdot W^{-x} \cdot v^0 = C_P \cdot (L/W)^x \quad (\text{Gl. 3.3})$$

Da also die Anströmungsgeschwindigkeit v keine Rolle spielt, verbleibt die Verklauungswahrscheinlichkeit P als Produkt der Proportionalitätskonstante C_P und des Verhältnisses von Holzlänge L zu Wehrfeldbreite W mit dem unbekanntem Exponenten x (siehe Gl. 3.3). Konkrete Werte für C_P und x werden in den Versuchen zur Verklauungswahrscheinlichkeit ermittelt (siehe Kap. 3.3.1).

3.2.2 Dimensionsanalyse Verklauungsprozess, -körper und -folgen

Die quantitativen Verklauungsfolgen wie die Reduzierung der Abflussleistung bzw. der Anstieg des Oberwasserstands ΔH sind unmittelbar und ohne Freiheitsgrade vom Verklauungsprozess und dem sich entwickelnden Verklauungskörper abhängig. Die Dimensionsanalyse für den Verklauungsprozess, den -körper und die -folgen kann also anhand einer einzigen charakteristischen Größe erfolgen. Hierfür wird das Verhältnis der Höhe T zur Länge L_K des Verklauungskörpers in Fließrichtung, die so genannte Kompaktheit des Verklauungskörpers, ausgewählt (siehe Abb. 3.8):

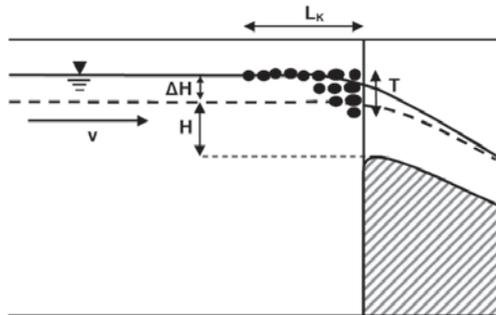


Abb. 3.8: Schematischer Langsschnitt eines verklauten Wehrfelds

Eine höhere Anströmungsgeschwindigkeit v führt vermutlich zu einer höheren Kompaktheit T/L_K . Verschiedene Überströmungshöhen H bei gleicher Anströmungsgeschwindigkeit v sollten auch zu verschiedenen Kompaktheiten T/L_K führen. Die Erdbeschleunigung g , die Rohdichte des Schwemmholzes ρ_H , und die Dichte des Wassers ρ_W haben einen Einfluss auf das mögliche Abtauchen einzelner Holzstämmen unter andere Stämme, die an der Oberfläche schwimmen. Die Kompaktheit T/L_K des Verklauungskörpers wird also als Funktion von v , g , H , ρ_H und ρ_W bzw. als Produkt einer Proportionalitätskonstante $C_{T/L}$ und von v , g , H , ρ_H und ρ_W mit den unterschiedlichen Exponenten a , b , c , d und e betrachtet:

$$T/L_K = f(v, g, H, \rho_H, \rho_W) = C_{T/L} \cdot v^a \cdot g^b \cdot H^c \cdot \rho_H^d \cdot \rho_W^e \quad (\text{Gl. 3.4})$$

Damit nimmt die Dimensionsmatrix $A_{T/L}$ im Masse-Länge-Zeit-System folgende Gestalt an:

$$A_{T/L} = \begin{bmatrix} & v & g & H & \rho_H & \rho_W \\ m & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ l & 1 & 1 & 1 & -3 & -3 \\ t & -1 & -2 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{Gl. 3.5})$$

Die Dimensionsgleichungen der Masse [m], Länge [l] und der Zeit [t] ergeben sich in der folgenden Weise, weil die Kompaktheit der Verklauung T/L_K dimensionsfrei ist:

$$\begin{aligned} [m]: \quad 0 &= d + e & \Rightarrow & e = -d \\ [l]: \quad 0 &= a + b + c - 3d - 3e & \Rightarrow & c = -a - b = -0,5a \\ [t]: \quad 0 &= -a - 2b & \Rightarrow & b = -0,5a \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow T/L_K &= C_{T/L} \cdot v^a \cdot g^b \cdot H^c \cdot \rho_H^d \cdot \rho_W^e = C_{T/L} \cdot v^a \cdot g^{-0,5a} \cdot H^{0,5a} \cdot \rho_H^d \cdot \rho_W^{-d} = \\ &= C_{T/L} \cdot [v/(g \cdot H)^{0,5}]^a \cdot (\rho_H/\rho_W)^d = C_{T/L} \cdot Fr^a \cdot (\rho_H/\rho_W)^d \quad (\text{Gl. 3.6}) \end{aligned}$$

Die Kompaktheit T/L_K des Verklauungskörpers ist also das Produkt der Proportionalitätskonstante $C_{T/L}$, der Froude-Zahl Fr mit dem unbekanntem Exponenten a und des Verhältnisses der Holzroh- zur Wasserdichte ρ_H/ρ_W mit dem unbekanntem Exponenten d (siehe Gl. 3.6). Die gleiche grundsätzliche Abhängigkeit ist wie oben erläutert für die dimensionslosen Kenngrößen der Verklauungsfolgen gegeben: bei dem durch die Verklauung verursachten relativen Anstieg des Oberwasserstands $\Delta H/H$ (siehe Abb. 3.8), der mit dem in Kap. 2.4 eingeführten relativen Aufstau $\Delta h/h$ bei der Verklauung von Rechenkonstruktionen zum Schwemmholrückhalt direkt vergleichbar ist, bzw. bei der durch die Verklauung verursachten relativen Abflussreduzierung $\Delta Q/Q$ (siehe Abb. 3.23). Die Versuche zu den Verklauungsfolgen werden in Kap. 3.5 beschrieben, wobei eine Quantifizierung der Proportionalitätskonstante und der Exponenten von Fr und ρ_H/ρ_W nicht möglich war.

3.3 Versuche zur Verklauungswahrscheinlichkeit

3.3.1 Standardversuche

Zur Bestimmung der Verklauungswahrscheinlichkeit bei einer bestimmten Parameterkombination wurden die Versuche im Regelfall jeweils 20-mal durchgeführt. Dies stellt einen Kompromiss zwischen statistischen Erfordernissen und dem Aufwand für die Versuche bei den vielen Parameterkombinationen dar. Für die insgesamt 1800 Standardversuche wurden

abgestorbene, steife und gerade Fichtenrundlinge (Durchmesser: $2 \div 4$ cm) mit wenig und kurzen Ästen verwendet, die durch Lagerung im Wasser vollständig wassergesättigt waren. Im Jahr 2006 wurden die Versuche mit dem vollständig geöffneten Wehrfeld ($W_1 = 75$ cm) im Einfeldmodell und im Jahr 2007 im mit den drei vollständig geöffneten Wehrfeldern ($W_1 = W_2 = W_3 = 50$ cm) im Dreifeldmodell durchgeführt. Die Drucksegmente waren während der Versuche so weit geöffnet, dass sie keinen Einfluss auf die Verklausung hatten. Tab. 3.1 zeigt die Parameterkombinationen H/W und D/H, für die die Standardversuche durchgeführt wurden, und die zugehörigen hydraulischen Kenngrößen der Anströmung im Bereich des Vorbodens:

- Mittlere Anströmungsgeschwindigkeit $v = Q / [(D + H) \cdot 2,5 \text{ m}]$
- Froude-Zahl $Fr = v / [g \cdot (D + H)]^{1/2}$ mit $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

H/W	D/H	Einfeldmodell		Dreifeldmodell	
		v [m/s]	Fr	v [m/s]	Fr
0,35	0,1	0,278	0,162	0,474	0,345
	1,0	0,155	0,068	0,260	0,141
	2,0	0,106	0,038	0,174	0,077
0,50	0,1	0,323	0,160	0,530	0,321
	1,0	0,178	0,066	0,293	0,132
	2,0	0,102	0,036	0,196	0,072
0,7	0,1	0,386	0,162	0,633	0,324
	1,0	0,212	0,066	0,349	0,133
	2,0	0,142	0,036	0,233	0,073
0,9	0,1	0,458	0,170	0,768	0,350
	1,0	0,252	0,069	0,421	0,142
	2,0	0,177	0,041	0,280	0,077

Tab. 3.1: Parameterkombinationen in den Standardversuchen und zugehörige hydraulische Kenngrößen der Anströmung

Im Dreifeldmodell sind die Anströmungsgeschwindigkeiten im Bereich des Vorbodens bei der gleichen Parameterkombination H/W und D/H um etwa das 1,7-fache größer als im Einfeldmodell und die Froude-Zahlen um etwa das 2-fache. Betrachtet man nur das Einfeld- oder Dreifeldmodell für sich, dann steigt zwar bei gleich bleibendem D/H mit steigendem H/W die Anströmungsgeschwindigkeit v an, die Froude-Zahl Fr bleibt aber in etwa konstant.

Tab. 3.2 fasst die Ergebnisse der Standardversuche für Einzelhölzer und Holzgruppen in Abhängigkeit von den Parametern H/W, D/H, und L/W zusammen. Das Ergebnis in einer Tabellenzelle sind die beiden Verklausungswahrscheinlichkeiten P_1 für das Einfeldmodell und P_3 für das Dreifeldmodell. Die in jeder Tabellenzelle erstgenannte Zahl P_1 ist definiert als der Anteil der in den meisten Fällen zwanzig Versuche in Prozent, bei denen ein Einzelholz bzw. mindestens ein Holz der Holzgruppe dauerhaft vor dem vollständig geöffneten Wehrfeld des Einfeldmodells hängen geblieben ist. Die zweitgenannte Zahl P_3 ist der Anteil der in den meisten Fällen zwanzig Versuche in Prozent, bei denen ein Einzelholz bzw. mindestens ein Holz der Holzgruppe dauerhaft vor mindestens einem der drei vollständig geöffneten Wehrfelder des Dreifeldmodells hängen geblieben ist.

Einzelhölzer

H/W = 0,35

	L/W	1	1,5	2
D/H				
0,1		0/-	0/0	0,05/0,05
1		0/-	0,05/0	0/0
2		0/0	0/0	0/0,10

H/W = 0,5

	L/W	1	1,5	2
D/H				
0,1		-/-	-/-	0/0,10
1		-/-	-/0	0,05/0,15
2		-/-	0/-	0,10/0,05

H/W = 0,7

	L/W	1	1,5	2
D/H				
0,1		-/-	-/0	0/0
1		-/-	-/0	0,05/0,05
2		-/-	-/-	0/0,05

H/W = 0,9

	L/W	1	1,5	2
D/H				
0,1		-/-	-/-	-/0,05
1		-/-	0/-	0/0
2		-/-	-/-	0/0

Holzgruppen

H/W = 0,35

	L/W	1	1,5	2
D/H				
0,1		0,10/-	0,45/0,65	0,95/0,80
1		0/-	0,55/0,55	0,85/0,70
2		0/0	0,50/0,70	0,60/0,70

H/W = 0,5

	L/W	1	1,5	2
D/H				
0,1		-/-	0,30/0,35	0,85/0,70
1		-/-	0,50/0,55	0,80/0,75
2		-/-	0,40/0,40	0,75/0,90

H/W = 0,7

	L/W	1	1,5	2
D/H				
0,1		-/-	0,35/0,20	0,80/0,65
1		-/-	0,55/0,25	0,90/0,65
2		-/-	0,55/0,35	0,85/0,75

H/W = 0,9

	L/W	1	1,5	2
D/H				
0,1		-/-	0,25/0,25	0,65/0,55
1		-/-	0,25/0,35	0,75/0,65
2		-/-	0,20/0,20	0,75/0,90

- : bei dieser Parameterkombination wurden keine Versuche durchgeführt

Tab. 3.2: Verklauungswahrscheinlichkeiten P_1 und P_3 in den Standardversuchen (Einfeldmodell/ Dreifeldmodell)

Im Folgenden werden die in Tab. 3.2 dargestellten Ergebnisse aus verschiedenen Blickwinkeln beleuchtet:

- Einfeld- oder Dreifeldmodell

Es traten keine signifikanten Unterschiede zwischen dem Einfeld- und dem Dreifeldmodell hinsichtlich der Verklauungswahrscheinlichkeiten auf.

- Überströmungshöhe H in Relation zur Wehrfeldbreite W ($H/W = 0,35; 0,5; 0,7; 0,9$)

Die Versuchsergebnisse zeigen keinen signifikanten Einfluss von H/W auf die Verklauungswahrscheinlichkeit.

- Höhendifferenz D zwischen Wehrschwelle und Vorboden in Relation zu H ($D/H = 0,1; 1; 2$)

Die Versuchsergebnisse zeigen keinen signifikanten Einfluss von D/H auf die Verklauungswahrscheinlichkeit.

- Mittlere Geschwindigkeit v und Froude-Zahl Fr der Anströmung im Bereich des Vorbodens

In direktem Zusammenhang mit den drei vorgenannten Parametern lassen die Ergebnisse der Verklauungswahrscheinlichkeit auch keine signifikanten Abhängigkeiten von der mittleren Geschwindigkeit v und von der Froude-Zahl Fr der Anströmung erkennen. Dies deckt sich mit den Erkenntnissen aus der Dimensionsanalyse in Kap. 3.2.1.

- Einzelhölzer oder Holzgruppen

Die Verklauungswahrscheinlichkeit von Einzelhölzern ist sehr gering. Das ist auch für die größten Holzlängen der Fall ($L/W = 2$). Fast alle Einzelhölzer werden spätestens durch die Abflussbeschleunigung zu den Wehrfeldern in Fließrichtung ausgerichtet und nur sehr wenige, die in Kanalmitte einschwimmen und bis zu den Wehrfeldern ihre Ausrichtung senkrecht zur Fließrichtung behalten, bleiben hängen. Deshalb wurde auf die meisten Versuche mit Einzelhölzern für $L/W = 1$ und auf viele für $L/W = 1,5$ verzichtet. Bei den Holzgruppen, deren Zusammensetzung aus fünf Einzelhölzern willkürlich festgelegt wurde und die immer übereinander liegend bzw. durch die Äste zusammenhängend zugegeben wurden, ergaben sich für die Verklauungswahrscheinlichkeit klare Abhängigkeiten von den anderen Parametern. Falls nicht ausdrücklich darauf hingewiesen wird, beziehen sich die folgenden Interpretationen immer auf die Ergebnisse der Holzgruppen.

- Holzlänge L in Relation zur Wehrfeldbreite W ($L/W = 1; 1,5; 2$)

Für $L/W = 1$ wurden die Versuche nur bei $H/W = 0,35$ durchgeführt. Dabei ergaben sich sehr geringe Verklauungswahrscheinlichkeiten, so dass auf entsprechende Versuche bei größeren Überströmungshöhen verzichtet wurde. Tab. 3.3 zeigt die mittleren Verklauungswahrscheinlichkeiten, die für die drei Holzlängen bzw. L/W -Werte aus den in Tab. 3.2 aufgeführten Werten berechnet wurden. Für $L/W = 1,5$ und $L/W = 2$ sind das die Mittelwerte aus jeweils 480 Einzelversuchen.

L/W	P
1	0,03*
1,5	0,40
2	0,76

* $H/W = 0,35$

Tab. 3.3: Mittlere Verklauungswahrscheinlichkeiten P (für Holzgruppen)

Wie schon die Dimensionsanalyse in Kap. 3.2.1 gezeigt hat, ist der Parameter L/W von herausragender Bedeutung für die Verklauungswahrscheinlichkeit: während für $L/W = 1$ die Verklauungswahrscheinlichkeit mit $P = 0,03$ auch für Holzgruppen vernachlässigt werden kann, steigt sie in nahezu linearer Abhängigkeit für $L/W = 1,5$ auf 0,40 und für

$L/W = 2$ auf 0,76 an. In Abb. 3.9 ist die Abhängigkeit der Verklausungswahrscheinlichkeit P von L/W für Holzgruppen in Diagrammform dargestellt. Dabei wurde der in den Versuchen abgedeckte Bereich $1 \leq L/W \leq 2$ mit den Bereichen $L/W < 1$ und $L/W > 2$ qualitativ ergänzt. Es wird davon ausgegangen, dass in beiden Fällen asymptotische Annäherungen an die jeweiligen Horizontalen $P = 0$ bzw. $P = 1$ vorhanden sind.

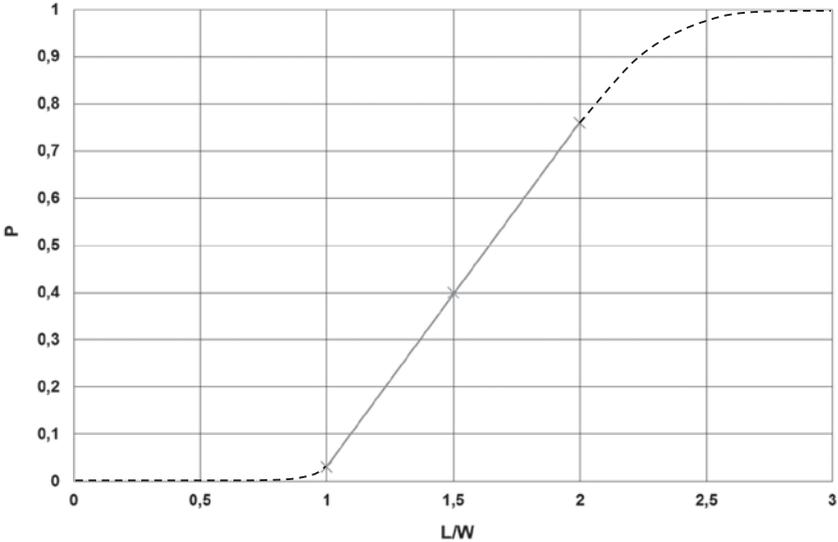


Abb. 3.9: Verklausungswahrscheinlichkeit P für Holzgruppen in Abhängigkeit vom Verhältnis der Holzlänge L zur Wehrfeldbreite W

Für den Bereich $1 \leq L/W \leq 2$ ergibt sich folgende Funktion:

$$P = (L/W - 0,96) \cdot 0,73 \quad (\text{Gl. 3.7})$$

In der Dimensionsanalyse (siehe Kap. 3.2.1) ergab sich folgende, mit Ausnahme der Linearverschiebung äquivalente Funktion (Gl. 3.3):

$$P = C_P \cdot (L/W)^x \quad (\text{Gl. 3.3})$$

In den Versuchen konnte also die Proportionalitätskonstante $C_P = 0,73$ und der Exponent $x = 1$ ermittelt werden.

3.3.2 Zusätzliche Schwemmholzeigenschaften

- Elastizität

Wie in Kap. 3.3.1 beschrieben, wurden die Standardversuche mit abgestorbenen Fichtenrundlingen mit wenigen und kurzen Ästen durchgeführt, die in Relation zu den in den Versuchen wirkenden Kräften eine sehr hohe Steifigkeit aufwiesen. Verformungen dieses Holzes traten in den Versuchen nicht auf. Für eine Parameterkombination (Einfeldmodell, Holzgruppen; $H/W = 0,35$; $D/H = 2$; $L/W = 1,5$) wurden Vergleichsversuche mit deutlich weniger steifen, elastischen grünen Fichten und zwar blattlosen, aber grünen Buchen- und Ahornzweigen durchgeführt. Abb. 3.10 zeigt die drei untersuchten Holzarten:

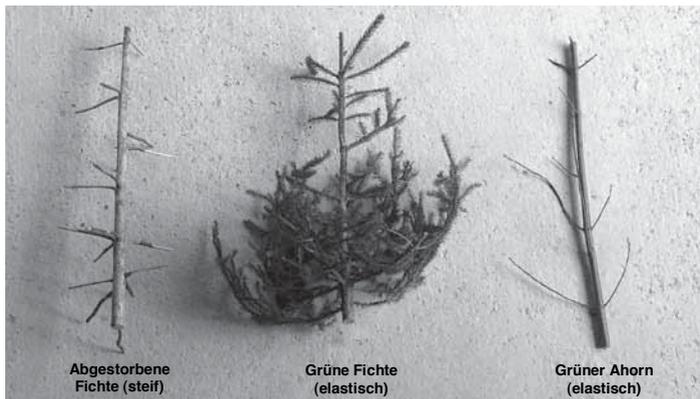


Abb. 3.10: Untersuchte Holzarten mit verschiedener Steifigkeit

Tab. 3.4 zeigt die Verklausungswahrscheinlichkeiten, die in den Versuchen (jeweils 20 pro Holzart) ermittelt wurden. Für die deutlich elastischeren Holzarten (grüne Fichten bzw. grüne Buchen und Ahorne) liegt die Verklausungswahrscheinlichkeit um 30 bzw. 40 % unter derjenigen der abgestorbenen und sehr steifen Fichten. Aufgrund der gleichen Längenabmessungen berührte das elastischere Holz die Pfeiler des vollständig geöffneten Wehrfelds genauso oft wie das steifere. Im Gegensatz zum steifen Holz kann sich das elastischere aber verformen und mit dem Abfluss leichter durch das Wehrfeld gezogen werden.

Holzart	P
Abgestorbene Fichte (steif)	0,50
Grüne Fichte (elastisch)	0,35
Grüne Buche und Ahorn (elastisch)	0,30

Tab. 3.4: Verklausungswahrscheinlichkeiten P für verschiedene Holzarten (Holzgruppen, $H/W = 0,35$; $D/H = 2$; $L/W = 1,5$)

Außerdem ist das in den Modellversuchen verwendete Schwemmholz in Relation zum Prototyp stabiler. Deshalb traten in den Versuchen keine Brüche einzelner Schwemmholzelemente im Falle einer Verklauung auf, die im Prototyp durchaus möglich sind und zu einer Auflösung von Verklauungen führen können, bevor gravierendere Schäden entstehen (vgl. Kap. 3.6 und SCHMOCKER/HAGER 2011).

- Anzahl und Länge der Äste

Um den Einfluss der Verastung des Schwemmholzes auf die Verklauungswahrscheinlichkeit zu quantifizieren, wurden vergleichende Versuche abgestorbenen Fichtenrundlingen ohne Äste, mit wenigen und kürzeren Ästen wie in den Standardversuchen und mit vielen und längeren Ästen durchgeführt (siehe Abb. 3.11):



Abb. 3.11: Schwemmholz ohne Äste, mit wenigen und kürzeren Ästen sowie mit vielen und längeren Ästen (von links)

Bei den Versuchen mit Holzgruppen war im Dreifeldmodell nur das mittlere Wehrfeld vollständig geöffnet. Die anderen Versuchsparameter waren $H/W = 0,7$; $L/W = 1,5$ und $D/H = 0,1$ bzw. 2. Tab. 3.5 zeigt die ermittelten Verklauungswahrscheinlichkeiten:

P	ohne Äste	wenige, kürzere Äste	viele, längere Äste
D/H = 0,1	0,15	0,20	0,45
D/H = 2	0,10	0,35	0,45

Tab. 3.5: Verklauungswahrscheinlichkeiten P für Holz mit unterschiedlicher Astanzahl und -länge (Holzgruppen, $H/W = 0,7$, $L/W = 1,5$)

Die Verastung hat den erwarteten großen Einfluss auf die Verklauungswahrscheinlichkeit. Je größer die Anzahl und Länge der Äste, desto größer ist die Verklauungswahrscheinlichkeit. Wenn man die Verklauungswahrscheinlichkeit von Schwemmholz mit vielen und längeren Ästen mit derjenigen von astlosem Schwemmholz vergleicht, ergaben sich in den Versuchen drei- bis viermal höhere Werte. Zusätzlich wurde bei den Versuchen beobachtet, dass bei astlosem Schwemmholz in den meisten Fällen nur ein Einzelholz am Wehrfeld hängen blieb, während es beim verasteten Schwemmholz in den meisten Fällen mehrere Hölzer waren.

- Holzrohddichte

Es wurden Versuche zur Verklauungswahrscheinlichkeit für drei verschiedenen Holzrohddichten durchgeführt: mit den abgestorbenen, aber durch Lagerung im Wasser vollständig wassergesättigten Fichtenrundlingen aus den Standardversuchen, mit abgestorbenen Fichtenrundlingen, die durch trockene Lagerung eine geringere Rohddichte aufwiesen, sowie mit Fichtenrundlingen, die für eine höhere Rohddichte gleichmäßig mit Stahldraht umwickelt wurden. Wie nach der Dimensionsanalyse in Kap. 3.2.1 zu erwarten war, ergaben sich keine signifikanten Unterschiede bei der Verklauungswahrscheinlichkeit. Der Einfluss der Holzrohddichte auf den Verklauungsprozess und die -folgen wird in Kap. 3.4 und Kap. 3.5 behandelt.

3.3.3 Teilöffnung der Drucksegmente

Verklauungsversuche mit unterschiedlichen Öffnungen der Drucksegmente wurden im Einfeld- sowie im Dreifeldmodell durchgeführt, wobei im Dreifeldmodell die drei Drucksegmente jeweils gleich weit geöffnet waren. Die gewählte Parameterkombination für die Versuche war $H/W = 0,35$; $D/H = 2$ und $L/W = 1$ sowohl mit Einzelhölzern als auch mit Holzgruppen. Abb. 3.12 zeigt eine Verklauung am teilgeöffneten Drucksegment des Einfeldmodells mit einer Holzgruppe. In Tab. 3.6 sind die ermittelten Verklauungswahrscheinlichkeiten für die verschiedenen Teilöffnungen der Drucksegmente zusammengestellt. Die Öffnung eines Drucksegments ist definiert über den Abstand H_D der Unterkante des Drucksegments vom Oberwasserstand (siehe Abb. 3.6), der von der Wasserspiegelabsenkung im Nahbereich der Wehrmodelle nicht beeinflusst ist. $H_D < 0$ bedeutet, dass die Unterkante des Drucksegments unterhalb des unbeeinflussten Oberwasserstands liegt.



Abb. 3.12: Verklauung des teilgeöffneten Drucksegments im Einfeldmodell mit einer Holzgruppe

Teilöffnung Drucksegment H_D [cm]	Einzelhölzer / Holzgruppen	P Einfeldmodell	P Dreifeldmodell
+2,50	Einzelhölzer	0,05	0
-2,50	Einzelhölzer	0,10	0
-5,34	Einzelhölzer	0,15	0,45
+2,50	Holzgruppen	0,20	0,20
-2,50	Holzgruppen	0,20	0,30
-5,34	Holzgruppen	0,50	0,95

Tab. 3.6: Verklausungswahrscheinlichkeiten P für verschiedene Teilöffnungen der Drucksegmente ($H/W = 0,35$; $D/H = 2$; $L/W = 1$)

Für $H_D = -5,34$ cm erreicht die Unterkante des Drucksegments gerade den durch die Abflussbeschleunigung stark abgesenkten oberen Rand des Abflussstrahls.

Wie erwartet nimmt die Verklausungswahrscheinlichkeit mit einer tieferen Lage der Unterkante bzw. mit einer kleineren Öffnung des Drucksegments zu, wobei die Werte für P selbst bei der kleinsten untersuchten Öffnung, bei der die Unterkante des Drucksegments den Abflussstrahl erreicht, überraschend niedrig sind. So bleiben für $H_D = -5,34$ cm im Einfeldmodell nur 15 % der einzeln einschwimmenden Schwemmh Holzstämme dauerhaft am Wehrfeld hängen, obwohl alle Einzelhölzer die Unterkante des Drucksegments berühren. Der Grund liegt in der hohen mittleren Fließgeschwindigkeit (ca. 0,9 m/s) bzw. der großen Froude-Zahl (ca. 0,6) des Abflussstrahls im kritischen Querschnitt des Drucksegments. Dadurch werden viele Stämme unter dem Drucksegment hindurchgezogen. Falls es aber zu einer Verklausung im Bereich des Drucksegments kommt, sind die Folgen hinsichtlich der Reduzierung der Abflussleistung und des Anstiegs des Oberwasserstands gravierend.

Auffallend ist die Tatsache, dass bei den größeren Öffnungen der Drucksegmente ($H_D = +2,50$ cm und $H_D = -2,50$ cm) die Verklausungswahrscheinlichkeiten P im Einfeld- und Dreifeldmodell ähnlich groß sind, während für die kleinste Öffnung $H_D = -5,34$ cm die Werte für P im Dreifeldmodell deutlich höher liegen als im Einfeldmodell. Mit quantitativen Unterschieden in den hydraulischen Parametern der Strömung direkt im Bereich der Drucksegmente können die unterschiedlichen Verklausungswahrscheinlichkeiten nicht erklärt werden: die mittleren Geschwindigkeiten bzw. Froude-Zahlen unterscheiden sich nur unwesentlich. Denkbar ist aber, dass die räumliche Anströmung im Einfeldmodell und die geradlinige Anströmung im Dreifeldmodell für den Unterschied verantwortlich sind.

3.3.4 Position einer vorgelagerten Brücke

In weiteren Versuchen im Einfeldmodell wurde der Einfluss einer den Pfeilern vorgelagerten Brücke auf die Verklausungswahrscheinlichkeit getestet. Die gewählte Parameterkombinati-

on für die Versuche war wieder $H/W = 0,35$; $D/H = 2$ und $L/W = 1$ mit Einzelhölzern und Holzgruppen. Als Brücke wurde ein Holzbrett mit entsprechendem Querschnitt verwendet, das in unterschiedlichen Höhen im Versuchsstand installiert wurde. Das Drucksegment war bei den Versuchen vollständig geöffnet. Die Position der Brücke ist definiert mit dem Abstand H_B der Unterkante der Brücke vom unbeeinflussten Oberwasserstand (siehe Abb. 3.6). Abb. 3.13 zeigt eine Verklausung an der vorgelagerten Brücke. In Tab. 3.7 sind die Verklausungswahrscheinlichkeiten für die beiden Brückenpositionen zusammengefasst.



Abb. 3.13: Verklausung der vorgelagerten Brücke mit einer Holzgruppe

Position Brücke H_B [cm]	Einzelhölzer / Holzgruppen	P
5,00	Einzelhölzer	0,20
2,50	Einzelhölzer	0,50
5,00	Holzgruppen	0,50

Tab. 3.7: Verklausungswahrscheinlichkeiten P für die vorgelagerte Brücke ($H/W = 0,35$; $D/H = 2$; $L/W = 1$, Einfeldmodell)

Bei der vergleichenden Betrachtung der in Tab. 3.6 und Tab. 3.7 für das Einfeldmodell aufgeführten Werte fällt auf, dass das Drucksegment sehr weit geschlossen werden muss, bis es ähnlich hohe Verklausungswahrscheinlichkeiten aufweist wie die vorgelagerte Brücke. Zwei Beispiele werden herausgegriffen: die Verklausungswahrscheinlichkeit für Einzelhölzer liegt beim Drucksegment nur bei 0,15, wenn dessen Unterkante den Abflussstrahl erreicht, während sie für die Brücke sogar bei 0,5 liegt, obwohl die Brückenunterkante 2,5 cm über dem unbeeinflussten Oberwasserstand liegt; für Holzgruppen ist die Verklausungswahrscheinlichkeit mit 0,5 gleich groß, ob das Drucksegment den Abflussstrahl erreicht oder die

Brücke 5 cm über dem Oberwasserstand liegt. Bei der vorgelagerten Brücke verhält es sich mit Verklausungen gegensätzlich zum Drucksegment. Unter der Vorderkante der Brücke hat die markante Abflussbeschleunigung zum Wehrüberfall noch nicht eingesetzt. Die mittlere Fließgeschwindigkeit (0,106 m/s, siehe Tab. 3.1) bzw. die Froude-Zahl (0,038) ist um ein Vielfaches kleiner als im kritischen Querschnitt des Drucksegments (0,9 m/s bzw. 0,6). Deshalb führt im Gegensatz zum Drucksegment ein Großteil der Kollisionen von Schwemmholz mit der Brücke zur Verklausung. Das Schwemmholz wird selten unter der Brücke hindurchgezogen. Die Verklausungswahrscheinlichkeit einer vorgelagerten Brücke ist also hoch. Andererseits sind die Folgen einer solchen Verklausung mit einer deutlich geringeren Reduzierung der Abflussleistung und einem deutlich geringeren Anstiegs des Oberwasserstand wesentlich weniger gravierend als bei einer Verklausung des Drucksegments.

3.3.5 Wehrsteuerung

Im Dreifeldmodell wurde untersucht, ob bei ansonsten identischen Versuchsparametern die Verklausungswahrscheinlichkeiten unterschiedlich sind, wenn zwei benachbarte Wehrfelder (links und Mitte bzw. rechts und Mitte) vollständig geöffnet sind oder die beiden äußeren Felder. In den Versuchen ergaben sich keine signifikanten Unterschiede. Abb. 3.14 zeigt eine Verklausung bei vollständiger Öffnung des mittleren und rechten Wehrfelds bzw. eine Verklausung bei vollständiger Öffnung der äußeren Felder. Die qualitativen Beobachtungen bei den Versuchen sprechen aber dafür, die Wehrfelder zumindest bei kleineren zu erwartenden Schwemmholzmengen alternierend, d.h. im Wechsel von offenen und geschlossenen Feldern zu öffnen - falls die bei Schwemmholztransport in der Regel auftretenden Hochwasserabflüsse verschlossene Wehrfelder hinsichtlich der Abflussleistung überhaupt zulassen. Dann werden einschwimmende Holzgruppen durch die unterschiedlichen Anströmungsrichtungen der verschiedenen Wehrfelder leichter in kleinere Gruppen bzw. Einzelhölzer getrennt. Dadurch würde sich die Durchgängigkeit des Schwemmholzes erhöhen und die Verklausungswahrscheinlichkeit sinken.



Abb. 3.14: Verklausung bei geöffnetem mittleren und linken Wehrfeld bzw. bei geöffneten äußeren Feldern

Eine weitere Testreihe befasste sich mit der Frage, ob hinsichtlich einer Verklausung die vollständige Öffnung eines Wehrfelds günstiger ist als die jeweils gleiche Teilöffnung von drei Feldern. Schon der erste Versuch für die Versuchsparameter $L/W = 1$; $H/W = 0,9$ und $D/H = 0,1$ mit Einzelhölzern ergab bei der Teilöffnung der drei Felder, die für den identischen Abfluss und Oberwasserstand wie für ein vollständig geöffnetes einzelnes Feld erforderlich ist, einen Rückhalt aller zugegebener Einzelhölzer oberhalb der in den Abflussstrahl eintauchenden Drucksegmente (siehe Abb. 3.15). Die Verklausungswahrscheinlichkeit im Versuch lag also sozusagen bei 100 %.



Abb. 3.15: Verklausung bei drei teilgeöffneten Wehrfeldern

Für ein vollständig geöffnetes Wehrfeld wurde bei ansonsten identischen Versuchsparametern schon in den Standardversuchen auf eine Versuchsdurchführung verzichtet, weil für $L/W = 1$ und Einzelhölzer eine vollständige Durchgängigkeit des Schwemmholzes, d.h. eine Verklausungswahrscheinlichkeit von 0 zu erwarten war. Andererseits ist eine Verklausung der drei teilgeöffneten Wehrfelder aufgrund der wesentlich geringeren Fließgeschwindigkeit und Froude-Zahl im Verklausungsbereich deutlich weniger gefährlich als eine, allerdings sehr unwahrscheinliche Verklausung des vollständig geöffneten Felds. Insgesamt ist zur Vermeidung von Verklausungen sicherlich die vollständige Öffnung von wenigen Wehrfeldern der Teilöffnung von vielen Feldern vorzuziehen. Zumal bei einer trotz geringer Wahrscheinlichkeit doch auftretenden Verklausung eines vollständig geöffneten Felds und einer daraus resultierenden Reduzierung der Abflussleistung noch weitere Felder freigegeben werden können.

3.3.6 Vergleich mit anderen Versuchen zur Verklausungswahrscheinlichkeit

JOHANSSON/CEDERSTRÖM 1995 haben systematische Modellversuche zur Verklausungswahrscheinlichkeit von Hochwasserentlastungsanlagen durchgeführt. Im Vollmodell einer schwedischen Talsperre mit zwei durch eine Insel getrennten, jeweils mehrfeldrigen Hochwasserentlastungsanlagen war auch der für die Anströmung maßgebende Ausschnitt des Stauraums enthalten. Im Gegensatz zu den vorliegenden neuen Untersuchungen konnte deshalb auch die räumliche Anströmungssituation für das Schwemmholz simuliert werden. Der Schnitt durch die baugleichen Wehrfelder der beiden Hochwasserentlastungsanlagen hatte in der prinzipiellen Anordnung mit einem Wehrkörper, einem aufgesetzten Drucksegment und einer vorgelagerten Brücke große Ähnlichkeit mit dem Modell für die vorliegenden neuen Untersuchungen (siehe Abb. 3.6). In den Versuchen wurde das Schwemmholz einzeln oder paarweise im Stauraum zugegeben und anschließend die Häufigkeit der Verklausung an den Hochwasserentlastungsanlagen erfasst. Die Versuchsergebnisse von JOHANSSON/CEDERSTRÖM sind in verschiedenen Teilaspekten mit den Ergebnissen der vorliegenden neuen Untersuchungen vergleichbar:

- Schwemmholzlänge L in Relation zur Wehrfeldbreite W
 Von JOHANSSON/CEDERSTRÖM wurde wie in den vorliegenden neuen Untersuchungen nachgewiesen, dass die Verklausungswahrscheinlichkeit mit zunehmendem Verhältnis L/W signifikant zunimmt.
- Überströmungshöhe H in Relation zur Wehrfeldbreite W
 Die von JOHANSSON/CEDERSTRÖM untersuchten H/W -Werte liegen mit 0,3; 0,4; 0,52 und 0,8 im gleichen Bereich wie in den vorliegenden neuen Untersuchungen ($H/W = 0,35; 0,5; 0,7$ und 0,9). In beiden Fällen war kein Einfluss von H/W auf die Verklausungswahrscheinlichkeit festzustellen. JOHANSSON/CEDERSTRÖM vermuten, dass für kleinere H/W -Werte unter einem Grenzwert durchaus eine Abhängigkeit der Verklausungswahrscheinlichkeit von H/W existiert, aber dieser Grenzwert in ihren Versuchen immer überschritten wurde.
- Einzelhölzer oder Holzpaare
 JOHANSSON/CEDERSTRÖM haben in den meisten Versuchen Einzelhölzer zugegeben. Bei den wenigen Versuchen mit Holzpaaren ergaben sich erhöhte Verklausungswahrscheinlichkeiten. JOHANSSON/CEDERSTRÖM erklären das damit, dass bei den Holzpaaren im Gegensatz zu den Einzelhölzern die Ausrichtung in Fließrichtung behindert wird und deshalb die Wahrscheinlichkeit größer ist, dass ein Schwemmholzelement quer zur Fließrichtung an den kritischen Abflussquerschnitt gelangt und diesen verklaust. In den vorliegenden neuen Untersuchungen war die Verklausungswahrscheinlichkeit der aus fünf Einzelhölzern bestehenden Holzgruppen gegenüber derjenigen der Einzelhölzer deutlicher erhöht.

- Abstand H_B der Unterkante der Brücke vom unbeeinflussten Oberwasserstand
Wie in den vorliegenden neuen Versuchen stieg auch bei JOHANSSON/CEDERSTRÖM die Verklauungswahrscheinlichkeit der Brücke mit abnehmendem Abstand H_B der Unterkante der Brücke vom unbeeinflussten Oberwasserstand in erwarteter Weise an. JOHANSSON/CEDERSTRÖM setzen den Abstand H_B in Relation zur Schwemmholzlänge L und ermitteln einen Wert für H_B/L im Bereich von 0,1 bis 0,15, bei dessen Überschreiten keine Brückenverklauung mehr auftreten würde. Dafür ist die Datenbasis allerdings vergleichsweise klein und die Abhängigkeit der Verklauungswahrscheinlichkeit der Brücke beispielsweise von der Astlänge wird vernachlässigt. Insgesamt sind die in den Versuchen von JOHANSSON/CEDERSTRÖM ermittelten Verklauungswahrscheinlichkeiten der Brücke wesentlich kleiner als diejenigen, die sich in den vorliegenden neuen Versuchen bei einer vergleichbaren Größenordnung für H_B/L ergaben. So beträgt bei JOHANSSON/CEDERSTRÖM für $H_B/L = 0,035$ und Einzelhölzer die Verklauungswahrscheinlichkeit der Brücke 6 %, während sie in den vorliegenden neuen Versuchen für $H_B/L = 2,5/75 = 0,033$ und Einzelhölzer bei 50 % liegt. Der Grund dürfte in der unterschiedlichen Brückenordnung liegen. Im Modell für die Versuche von JOHANSSON/CEDERSTRÖM verläuft die Brücke direkt über dem Wehrkörper und über den Pfeilern zwischen den Wehrfeldern. Die einzelnen Schwemmholzelemente gelangen schon deutlich beschleunigt an die Brücke und werden durch die hohe Fließgeschwindigkeit auch im Falle einer Kollision mit der Brücke zum großen Teil unter ihr hindurchgezogen. Dagegen ist die Brücke im Modell für die vorliegenden neuen Untersuchungen dem gesamten Wehrkörper und den Pfeilern vorgelagert und liegt damit noch außerhalb des Beschleunigungsbereichs zum Wehrüberfall. Deshalb führt ein Großteil der Kollisionen von Schwemmholz mit der Brücke zu einer Verklauung.
- Wehrsteuerung
Die Versuche von JOHANSSON/CEDERSTRÖM in dem Vollmodell mit einer großen Anzahl von Wehrfeldern bestätigen auch quantitativ die rein qualitativen Beobachtungen in den vorliegenden neuen Untersuchungen: die Verklauungswahrscheinlichkeit ist kleiner, wenn Wehrfelder alternierend geöffnet sind. Dann werden einschwimmende Holzgruppen durch die unterschiedlichen Anströmungsrichtungen der verschiedenen Wehrfelder leichter in kleinere Gruppen bzw. Einzelhölzer getrennt und durch die stärkere Abflussbeschleunigung besser in Fließrichtung ausgerichtet. Falls benachbarte Wehrfelder geöffnet sind, gelangen mehr und größere Holzgruppen zu den Wehrfeldern. Auch Einzelhölzer werden durch die geringere Abflussbeschleunigung schlechter in Fließrichtung ausgerichtet. Qualitative Beobachtungen von JOHANSSON/CEDERSTRÖM, die sie allerdings quantitativ nicht nachweisen konnten, sprechen dafür, dass bei räumlich angeströmten Wehrfeldern durch bessere Ausrichtung der Schwemmholzelemente in Fließrichtung die Verklauungswahrscheinlichkeit geringer ist als bei geradlinig angeströmten.

GANTENBEIN 2001 hat systematische Modellversuche für die Verklauung von Brücken über Wildbäche und kleinere voralpine Flüsse durchgeführt. In BEZZOLA ET AL 2002 sowie in LANGE/BEZZOLA sind die Ergebnisse dieser Untersuchungen zusammengefasst. Für die Versuche war in einem geraden Rechteck- oder Trapezgerinne eine Brücke angeordnet. Im Bereich der Brücke wurden unterschiedliche Strömungssituationen simuliert: strömender Abfluss mit einer minimalen Froude-Zahl von 0,3, schießender Abfluss mit einer maximalen Froude-Zahl von 1,1, Wechselsprung im Bereich der Brücke, Absturz im Oberwasser der Brücke. Als Schwemmholz wurden im Modell gerade, astlose Holzrundlinge und eigens hergestellte Nachbildungen von Wurzelstöcken verwendet. Das Modellschwemmholz wurde sowohl einzeln als auch als Holzgruppe oberhalb der Brücke in das Versuchsgerinne zugegeben und dann beobachtet, wie häufig eine Verklauung auftrat.

In SCHMOCKER/HAGER 2010 sowie SCHMOCKER/HAGER 2011 werden ähnliche Versuche in einem Rechteckgerinne beschrieben. Die Strömungssituation wurde hinsichtlich der Froude-Zahl (von 0,3 bis 1,2) und der Fließtiefe variiert, wobei nur Hochwasserfälle mit geringer lichter Höhe zwischen Wasserspiegel und Unterkante Brücke bzw. mit einem Einstau der Brücke untersucht wurden. Weitere Versuchsparameter waren die Brückenform und die Abmessungen des Schwemmholzes. Es wurden natürliche, astlose Holzelemente und Wurzelstöcke ausschließlich als Einzelhölzer verwendet. Das maßgebliche Versuchsergebnis war auch hier die Verklauungswahrscheinlichkeit.

Auch wenn in den Verklauungsversuchen von GANTENBEIN sowie von SCHMOCKER/HAGER 2010/11 die Ausgangssituation und die Untersuchungsschwerpunkte anders gelagert waren als in den vorliegenden neuen Versuchen, ist ein Vergleich der Untersuchungen in mehrfacher Hinsicht interessant:

- Ausgangssituation

Bei den Versuchen zur Brückenverklauung von GANTENBEIN sowie von SCHMOCKER/HAGER 2010/11 war der kritische Abflussquerschnitt in allen Fällen nach oben begrenzt und die Abflusssituation wurde variiert. Bei den vorliegenden neuen Versuchen zur Verklauung von Wehrfeldern war in einem Großteil der Versuche der kritische Abflussquerschnitt nicht nach oben begrenzt. In allen Fällen wurde die für vollständig geöffnete Wehrfelder charakteristische Abflusssituation mit strömendem Abfluss im Oberwasser und einer Abflussbeschleunigung zum Wehrfeld mit dem Übergang zum schießenden Abfluss im Wehrfeld simuliert.

- Schwemmhöhlzänge in Relation zur Gerinne- bzw. Wehrfeldbreite

In allen drei Versuchsreihen war die Verklauungswahrscheinlichkeit für Einzelhölzer bzw. für Holzgruppen (keine Wurzelstöcke) mit Schwemmhöhlzängen $L \leq$ Gerinne- bzw. Wehrfeldbreite W zu vernachlässigen. Für $L/W > 1$ konnte aus den Versuchen von GANTENBEIN sowie von SCHMOCKER/HAGER 2010/11 für Einzelhölzer eine in etwa lineare Zunahme der Verklauungswahrscheinlichkeit mit dem Verhältnis L/W abgeleitet werden. Ein ähnlicher Zusammenhang ist bei den vorliegenden neuen Versuchen gegeben (siehe Tab. 3.3 und Abb. 3.9): die Verklauungswahrscheinlichkeit P für Holzgruppen kann mit der linearen Gleichung $P = (L/W - 0,96) \cdot 0,73$ (Gl. 3.7) beschrieben werden. Die grundlegende Erkenntnis, dass die Verklauungswahrscheinlichkeit an natürlichen oder künstlichen Engstellen in Flüssen mit wachsender Schwemmhöhlzänge steigt, findet sich auch bei DIEHL 1997 und BOCCHIOLA ET AL 2006.

- Verastung des Schwemmhöhlzes

Bei den Versuchen von GANTENBEIN sowie von SCHMOCKER/HAGER 2010/11 wurden wegen der Ausrichtung auf Wildbäche und alpine Flüsse neben astlosen Rundlingen auch Wurzelstöcke als Schwemmhöhlz verwendet. Gerade wegen der Begrenzung des kritischen Abflussquerschnitts nach oben wurden ungleich höhere Verklauungswahrscheinlichkeiten für Wurzelstöcke im Vergleich zu den astlosen Rundlingen ermittelt. Die vorliegenden neuen Versuche für wasserbauliche Anlagen an Flüssen mit großen Einzugsgebieten konzentrierten sich auf mehr oder weniger verastete Rundlinge, wobei auch hier Schwemmhöhlz mit mehr und längeren Ästen wie erwartet höhere Verklauungswahrscheinlichkeiten ergab.

- Einzelhölzer und Holzgruppen

In den Untersuchungen von GANTENBEIN wie in den vorliegenden neuen Versuchen waren die für einzeln einschwimmendes Schwemmhöhlz ermittelten Verklauungswahrscheinlichkeiten wesentlich kleiner als für Holzgruppen. Falls aber ein Einzelholz am kritischen Querschnitt hängen bleibt, steigt die Wahrscheinlichkeit einer Verklauung mit zusätzlichen Schwemmhöhlzelementen rapide an.

- Lichte Höhe im kritischen Abflussquerschnitt

In den Versuchen von GANTENBEIN, von SCHMOCKER/HAGER 2010/11 sowie in den vorliegenden neuen Versuchen mit einer Begrenzung des kritischen Abflussquerschnitts nach oben durch teilgeöffnete Drucksegmente bzw. eine dem Wehrfeld vorgelagerte Brücke ergab sich eine deutliche Zunahme der Verklauungswahrscheinlichkeit mit abnehmender lichter Höhe zwischen Wasserspiegel und Unterkante Verschluss bzw. Brücke.

- Froude-Zahl Fr der Anströmung

In den Versuchen von GANTENBEIN wie auch in den vorliegenden neuen Versuchen ohne eine Begrenzung des kritischen Abflussquerschnitts nach oben war kein signifikanter Zusammenhang zwischen der Froude-Zahl Fr der Anströmung und der Verklausungswahrscheinlichkeit festzustellen. Bei den Versuchen von GANTENBEIN war möglicherweise deshalb kein entsprechender Zusammenhang nachzuweisen, weil ein Teil der Versuche mit so großer lichter Höhe zwischen Wasserspiegel und Unterkante Brücke durchgeführt wurde, dass auch hier keine wirksame obere Begrenzung des kritischen Abflussquerschnitts gegeben war. Im Gegensatz dazu ergab sich in den vorliegenden neuen Versuchen mit einer Begrenzung des kritischen Abflussquerschnitts nach oben durch teilgeöffnete Drucksegmente bzw. eine dem Wehrfeld vorgelagerte Brücke wie in den Versuchen von SCHMOCKER/HAGER 2010/11 eine klare Abhängigkeit: mit steigender Froude-Zahl Fr der Anströmung sinkt die Verklausungswahrscheinlichkeit. Für die vorgelagerte Brücke mit der sehr kleinen Froude-Zahl $Fr = 0,038$ der Anströmung war die Verklausungswahrscheinlichkeit wesentlich größer als für das teilgeöffnete Drucksegment mit der um ein Vielfaches größeren Froude-Zahl $Fr = 0,6$ der Strömung im kritischen Querschnitt. SCHMOCKER/HAGER 2010/11 erklären den Zusammenhang zwischen Froude-Zahl Fr der Anströmung und Verklausungswahrscheinlichkeit auch mit der Beobachtung, dass bei einer kleinen Geschwindigkeit bzw. Froude-Zahl der Anströmung fast jede Berührung eines Schwemmholzelements mit der Brücke zu einer Verklausung führt (wie in den vorliegenden neuen Versuchen an der vorgelagerten Brücke). Bei einer großen Geschwindigkeit bzw. Froude-Zahl der Anströmung würden dagegen viele Schwemmholzelemente, die die Brücke berühren, einfach darunter hindurchgezogen (wie in den vorliegenden neuen Versuchen am teilgeöffneten Drucksegment). Der beobachtete Zusammenhang zwischen der Froude-Zahl Fr der Anströmung und der Verklausungswahrscheinlichkeit wurde auch schon von HAGA ET AL 2002 und BOCCHIOLA ET AL 2008 festgestellt.

GODTLAND/TESAKER 1994 befassten sich in ihren Modellversuchen mit der Verklausungswahrscheinlichkeit von festen Überfällen als Hochwasserentlastungsanlagen von Talsperren. Sie haben dabei auch den Einfluss des vertikalen Abstands der Überfallkrone zur Sohle im Unterwasser untersucht. Aus den Versuchsergebnissen wurden folgende quantitative Kriterien zur weitgehenden Vermeidung von Verklausungen abgeleitet:

- Die Breite W der Hochwasserentlastungsanlage bzw. ihrer einzelnen Felder sollte mindestens 80 % der erwarteten Schwemmholzlänge L betragen. Dieser Wert liegt unter der Forderung einer Breite W von 100 % der Schwemmholzlänge L , die sich aus den vorlie-

genden neuen Versuchsergebnissen für eine zu vernachlässigende Verklauungswahrscheinlichkeit ableiten lässt (siehe Kap. 3.3.1).

- Für den Fall einer über der Überfallkrone angeordneten Brücke sollte der vertikale Abstand zwischen Überfallkrone und Brückenunterkante mindestens 15 % der erwarteten Schwemmholzlänge L betragen.
- Außerdem sollte für den Fall einer über der Überfallkrone angeordneten Brücke der vertikale Abstand zwischen der Krone und der Sohle im Unterwasser nicht ein Drittel der Schwemmholzlänge überschreiten. Ansonsten kann sich das Schwemmholz steil aufrichten, über die Brücke hinaus ragen und in dieser Position zu einer Verklauung führen. Ohne Brücke verhält es sich gegensätzlich: mit zunehmendem Abstand zwischen der Überfallkrone und der Sohle im Unterwasser sinkt die Verklauungswahrscheinlichkeit.

Als weiteres Versuchsergebnis ermittelten GODTLAND/TESAKER eine Überströmungshöhe H im Bereich von etwa einem Sechstel (ca. 16,7 %) der Schwemmholzlänge L , ab der die Verklauungswahrscheinlichkeit rapide abnimmt. Bei Bäumen, die mit ihrem Wurzelteller in Fließgewässern transportiert werden, entspricht ein Sechstel der Schwemmholzlänge L dem mittleren Durchmesser des Wurzeltellers. GODTLAND/TESAKER unterscheiden hier wieder zwischen dem Fall mit und ohne Brücke: ohne Brücke ist schon bei einer Überströmungshöhe H im Bereich von 10 bis 16 % der Schwemmholzlänge L die Wahrscheinlichkeit einer dauerhaften Verklauung sehr gering. Ist eine Brücke vorhanden, deren lichter Pfeilerabstand W mindestens 110 % der Schwemmholzlänge L beträgt, muss die Überströmungshöhe H mit 16 bis 20 % der Schwemmholzlänge L größer sein, damit die Verklauungswahrscheinlichkeit vernachlässigbar ist.

3.4 Versuche zum Verklauungsprozess und zur Form des Verklauungskörpers

Die Dimensionsanalyse in Kap. 3.2.2 ergab als wesentliche Einflussgrößen für den Verklauungsprozess nach einer Initialverklauung die mittlere Geschwindigkeit v bzw. als dimensionslose Größe die Froude-Zahl Fr der Anströmung oberhalb des Bauwerks sowie die Holzroh-dichte ρ_H bzw. als dimensionslose Größe das Verhältnis der Holzroh- zur Wasserdichte ρ_H/ρ_W . Für eine bessere Einschätzung bzw. Quantifizierung dieser Einflüsse wurden verschiedene Versuche durchgeführt.

3.4.1 Geschwindigkeit und Froude-Zahl der Anströmung

Bei unterschiedlichen Parameterkombinationen wurden nach einer Initialverklauung der Wehrfelder durch eine Holzgruppe nacheinander Einzelhölzer zugegeben, um die weitere Entwicklung des Verklauungskörpers zu beobachten. Im Einfeldmodell bildeten sich dabei in den meisten Fällen sehr lockere, einlagige Schwemmholzteppiche mit einer großen Längenausdehnung entgegen der Fließrichtung (siehe Abb. 3.16). Verstärkt wird dieser Effekt im Modell durch die seitlichen Begrenzungsmauern des Kanals und die große Länge des Schwemmholzes in Relation zur Kanalbreite. Ein Teil der Strömungskräfte auf das Schwemmholz wird in die seitlichen Mauern übertragen. Dadurch wird die Verdichtung des Verklauungskörpers reduziert.



Abb. 3.16: Lockerer, einlagiger Schwemmholzteppich im Einfeldmodell

Für $H/W = 0,9$ im Einfeldmodell war zu beobachten, dass durch die erhöhte Anströmungsgeschwindigkeit die Lücken im Schwemmholzteppich verschwanden und dadurch die Längenausdehnung der Schwemmholzansammlung abnahm. Im Dreifeldmodell mit vollständig geöffneten Wehrfeldern wurden mit zunehmender Geschwindigkeit und Froude-Zahl mehr und mehr Einzelhölzer unter die Wasseroberfläche gezogen, die sich dann unter der obersten Holzschicht anlagerten. Für die in den Versuchen maximale Anströmungsgeschwindigkeit $v = 0,768$ m/s (zugehörige Froude-Zahl $Fr = 0,35$) bei $H/W = 0,9$ und $D/H = 0,1$ wurden viele einschwimmende Hölzer unter die Wasseroberfläche gezogen und es entwickelte sich ein nach unten bis nahe an den Vorboden reichender mehrlagiger und sehr kompakter Verklauungskörper mit geringer Längenausdehnung entgegen der Fließrichtung (siehe Abb. 3.17). Bei dieser Verklauungsform ist der modellbedingte Einfluss der Begrenzungsmauern geringer.



Abb. 3.17: Kompakter, mehrlagiger Verklauskörper im Dreifeldmodell

Für eine Quantifizierung der kritischen Anströmungsgeschwindigkeit v_{krit} bzw. der kritischen Froude-Zahl Fr_{krit} der Anströmung, bei der das Abtauchen von Einzelhölzern unter einen an der Wasseroberfläche schwimmenden Schwemmholtzteppich beginnt, wurde folgender Versuchsablauf gewählt: zunächst wurde im vollständig geöffneten Dreifeldmodell für $H/W = 0,7$ sowie bei einer niedrigen Vorbodenhöhe ($D/H = 1,5$), einer mittleren Anströmungsgeschwindigkeit $v = 0,278$ m/s und einer Froude-Zahl $Fr = 0,095$ ein lockerer, einlagiger Schwemmholtzteppich generiert. Bei dem verwendeten Holz handelte es sich um astlose, abgestorbene und wassergesättigte Fichtenrundlinge wie in den Standardversuchen. Dann wurde, ohne etwas anderes zu verändern und ohne weiteres Schwemmholz zuzugeben, der verstellbare Vorboden in kleinen Schritten angehoben und damit auch die mittlere Anströmungsgeschwindigkeit v bzw. die Froude-Zahl Fr stufenweise gesteigert. Bei jedem Schritt wurde der Verklauskörper beobachtet und abgewartet, bis auftretende Umlagerungen abgeklungen waren und sich wieder ein stationärer Zustand eingestellt hatte. Für $D/H = 0,83$ mit der kritischen Anströmungsgeschwindigkeit $v_{\text{krit}} = 0,380$ m/s und der kritischen Froude-Zahl $Fr_{\text{krit}} = 0,151$ wurden die ersten Hölzer unter den Schwemmholtzteppich gezogen. In Tab. 3.8 sind die einzelnen Vorbodenstufen, die zugehörigen Geschwindigkeiten bzw. Froude-Zahlen der Anströmung und die Beobachtungen am Verklauskörper aufgeführt:

D/H	v [m/s]	Fr	Beobachtungen am Verklauskörper
1,50	0,278	0,095	einlagiger Holzteppich
1,37	0,294	0,102	keine Veränderung
1,26	0,308	0,110	keine Veränderung
1,11	0,330	0,122	keine Veränderung
1,00	0,349	0,133	keine Veränderung
0,83	0,380	0,151	erste Hölzer werden unter andere gezogen
0,69	0,412	0,170	kleinere Umlagerungen
0,54	0,452	0,196	kleinere Umlagerungen
0,40	0,497	0,226	kleinere Umlagerungen
0,26	0,552	0,264	deutliche Verdichtung: Holzteppich durchgehend zweilagig
0,10	0,633	0,324	Hölzer werden noch weiter nach unten gezogen: mehrlagig

Tab. 3.8: Beobachtung am Verklauskörper bei stufenweiser Anhebung des Vorbodens und entsprechender Steigerung der Geschwindigkeit bzw. Froude-Zahl der Anströmung

Vergleichende und stärker vereinfachte Versuche wurden an einem senkrecht zur Fließrichtung an der Wasseroberfläche schwimmenden einzelnen Rundholz (Durchmesser: 8 cm) durchgeführt, das als Barriere über die gesamte Kanalbreite gespannt war und durch die beiden Gewindestangen in der Mitte des Vorbodens am Abtrieb, aber nicht an einer Auf- und Abbewegung gehindert wurde (siehe Abb. 3.18).



Abb. 3.18: Rundholz senkrecht zur Fließrichtung, das an den Gewindestangen in der Mitte des Vorbodens zurückgehalten wird

In den Versuchen wurden Einzelhölzer sowohl einige Meter oberhalb des Rundholzes zugegeben als auch direkt und parallel vor das Rundholz eingesetzt. Die kritische Anströmungsgeschwindigkeit bzw. die kritische Froude-Zahl, bei denen die zugegebenen Einzelhölzer unter dem Rundholz hindurchgezogen wurden, lag wieder im Bereich von $v = 0,4$ m/s bzw. $Fr = 0,15$. Aufgrund der Trägheitskraft, die beim Auftreffen auf das Rundholz als zusätzlicher Impuls wirkt, waren beide Kenngrößen beim oberhalb zugegebenen Schwemholz etwas niedriger war als für das direkt am Rundholz eingesetzte.

SENDLHOFER/GEMS 2010 haben in ihren Verklausungsversuchen an einer Brücke ebenfalls festgestellt, dass die Anströmungsgeschwindigkeit von großer Bedeutung für die Verdichtung des Verklausungskörpers ist.

3.4.2 Holzrohichte

Mit dem gleichen Versuchsprinzip wurden unterschiedliche Rohdichten der weiter oberhalb zugegebenen bzw. direkt am Rundholz eingesetzten Einzelhölzer getestet. Die kritische Geschwindigkeit bzw. die kritische Froude-Zahl der Anströmung war für die trockenen Fichtenholzrundlinge größer als für die wassergesättigten. Die mit Stahldraht umwickelten Einzelhölzer schwebten unter der Wasseroberfläche und schwammen somit auch bei der kleinsten Anströmungsgeschwindigkeit ohne Berührung unter dem Rundholz durch.

Für die Verklausungsversuche 2008 wurden zahlreiche künstliche Schwemmholzstäbe mit deutlichen Abweichungen vom natürlichen Schwemmholz (ideale Zylinderform, sehr glatte Oberfläche) hergestellt, die man aber für eine sowohl definierte als auch über die Versuche konstante Rohdichte in Kauf nahm. Es handelte sich dabei um Plexiglasrohre mit 2,5 cm Durchmesser, in die PVC-Kerne mit gleicher Länge, aber unterschiedlichen Querschnitts-abmessungen für die unterschiedlichen Rohdichten eingesetzt wurden. Durch Deckel an den Rohrenden wurden die Stäbe wasserdicht abgeschlossen und die Kerne fixiert, so dass im Versuchsbetrieb keine Relativbewegungen von Rohr und Kern möglich waren. Es wurden Stäbe mit den vier Rohdichten $\rho_H = 800, 900, 950$ und 975 kg/m^3 angefertigt.

Auch mit den künstlichen Schwemmholzstäben wurden wieder die Versuche mit der Rundholzbarriere an den Gewindestangen in der Mitte des Vorbodens durchgeführt. Die Schwemmholzstäbe wurden ausschließlich direkt an der Rundholzbarriere eingesetzt. In Tab. 3.9 sind die ermittelten kritischen Geschwindigkeiten und Froude-Zahlen der Anströmung, bei denen einzelne Schwemmholzstäbe unter der Rundholzbarriere abtauchen, aufgeführt:

$\rho_H = [\text{kg/m}^3]$	ρ_H/ρ_W	$v_{\text{krit}} [\text{m/s}]$	F_{krit}
975	0,975	0,139	0,058
950	0,95	0,168	0,077
900	0,9	0,243	0,135
800	0,8	0,348	0,231

Tab. 3.9: Kritische Geschwindigkeiten v_{krit} und Froude-Zahlen F_{krit} der Anströmung in Abhängigkeit von der Holzrohddichte ρ_H bzw. vom Verhältnis der Holzroh- zur Wasserdichte ρ_H/ρ_W

Wie erwartet ist bei geringerer Holzrohddichte die kritische Geschwindigkeit bzw. die kritische Froude-Zahl der Anströmung deutlich größer. Um einen Vergleich mit dem natürlichen Schwemmholz aus den Standardversuchen zu ermöglichen, wurde die mittlere Rohddichte einer großen Stichprobe der abgestorbenen, aber wassergesättigten Fichtenrundlinge bestimmt. Mit 792 kg/m^3 ergab sich annähernd die gleiche Rohddichte wie für die leichtesten künstlichen Schwemmholzstangen mit 800 kg/m^3 . Somit ist eine vergleichsweise gute Übereinstimmung der kritischen Anströmungsgeschwindigkeit bzw. der kritischen Froude-Zahl für das natürliche und künstliche Schwemmholz gegeben.

Zur Beobachtung des Verklausungsprozesses und der Entwicklung des Verklausungskörpers, aber auch zur Quantifizierung der Verklausungsfolgen, auf die in Kap. 3.5 genauer eingegangen wird, wurden im Dreifeldmodell sechzehn standardisierte Verklausungsversuche mit den künstlichen Schwemmholzstangen für die vier Rohdichten und die vier in Tab. 3.9 aufgeführten kritischen Geschwindigkeiten bzw. Froude-Zahlen der Anströmung durchgeführt. Für jede der vier Rohdichten wurde ein Satz von 100 Stangen (siehe Abb. 3.19) mit der in Abb. 3.20 dargestellten Längenverteilung verwendet:

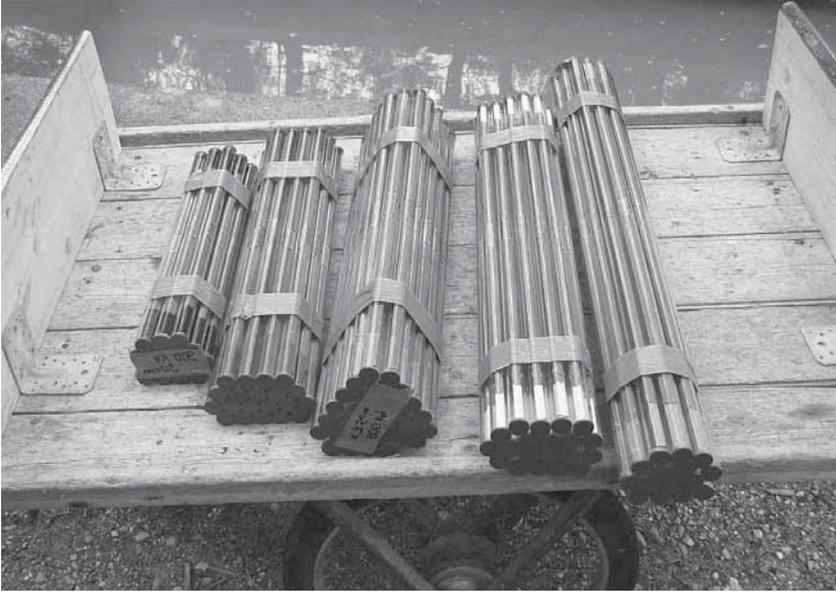


Abb. 3.19: 100-Stangen-Satz des Kunstholzes für $\rho_H = 900 \text{ kg/m}^3$

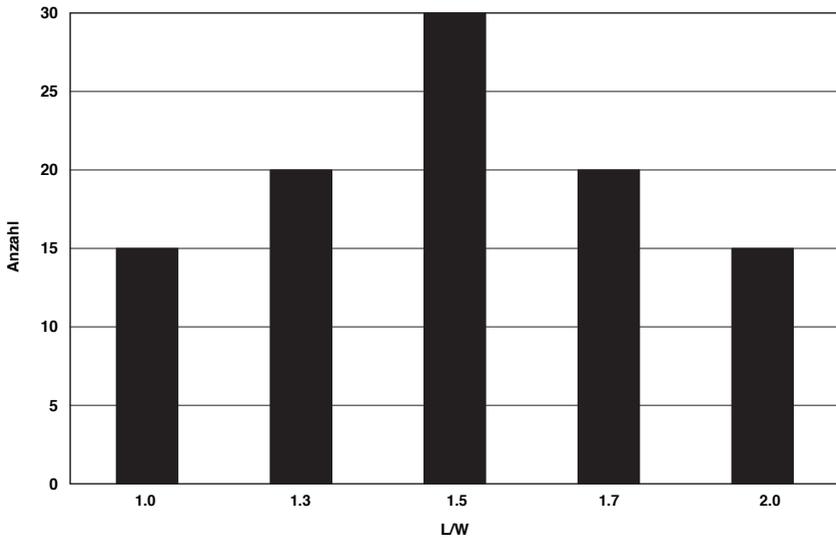


Abb. 3.20: Längenverteilung eines 100-Stangen-Satzes des Kunstholzes mit einer bestimmten Holzrohddichte

Mit dem künstlichen Schwemmholz konnten Verklausungen des vollständig geöffneten Dreifeldmodells nur durch einen unmittelbar auf die Pfeilerköpfe gelagerten Stahlrost verursacht werden (siehe Abb. 3.21 und Abb. 3.22). Ohne Stahlrost wurden die meisten Schwemmholzstangen aufgrund ihrer geringen Rauheit durch die Wehrfelder transportiert, selbst wenn Verklausungen künstlich eingebracht wurden. Für einen Versuch wurde eine der vier Fließgeschwindigkeiten eingestellt und anschließend ein 100 Stangen-Satz des Kunstholzes mit einer der vier Rohdichten nacheinander in den Oberwasserkanal zugegeben. Es ergaben sich also insgesamt 16 Versuche. In den Versuchen entwickelten sich bei einer bestimmten Geschwindigkeit bzw. Froude-Zahl der Anströmung für kleine Holzrohrdichten eher lockere, einlagige Schwemmholzteppiche und für große Holzrohrdichten eher kompakte, mehrlagige Verklausungskörper. Abb. 3.21 und Abb. 3.22 zeigen bei der gleichen Geschwindigkeit $v = 0,168 \text{ m/s}$ bzw. Froude-Zahl $Fr = 0,077$ der Anströmung die Verklausungen für die kleinste und größte Rohdichte:

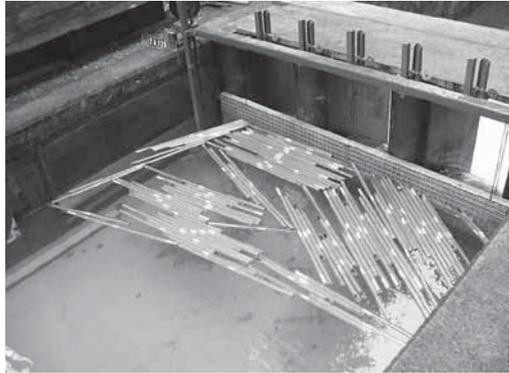


Abb. 3.21: Lockerer, einlagiger Schwemmholzteppich ($\rho_H = 800 \text{ kg/m}^3$, $v = 0,168 \text{ m/s}$, $Fr = 0,077$)

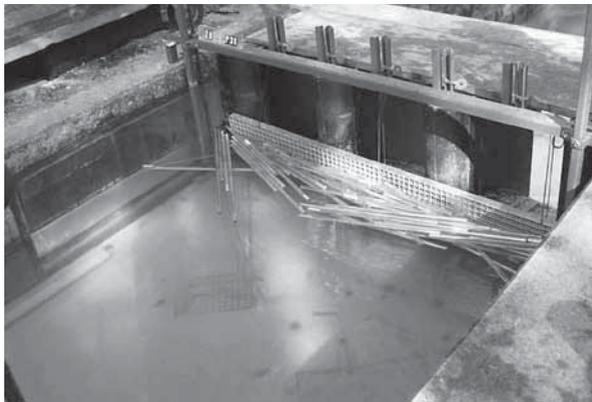


Abb. 3.22: Kompakter, mehrlagiger Verklausungskörper ($\rho_H = 975 \text{ kg/m}^3$, $v = 0,168 \text{ m/s}$, $Fr = 0,077$)

3.5 Versuche zu den Verklausungsfolgen

Sowohl im Ein- und Dreifeldmodell mit Naturholz als auch im Dreifeldmodell mit Kunstholz wurden Versuche zur Quantifizierung des Aufstaus bzw. der Reduzierung der Abflussleistung infolge einer Verklausung durchgeführt. Das methodische Vorgehen bei allen Versuchen war das gleiche: im ersten Schritt wurde nach der Generierung einer natürlichen oder künstlichen Verklausung und unter Beibehaltung des konstanten Abflusses solange gewartet, bis sich ein neuer stationärer Abflusszustand mit einem höheren Oberwasserstand eingestellt hatte. Im zweiten Schritt wurde der Abfluss in ein oder zwei Stufen so reduziert, dass der Oberwasserstand im sich dann wieder einstellenden stationären Zustand etwas kleiner oder gleich dem Ausgangsoberwasserstand vor der Zugabe des Schwemmholzes war. Zur dimensionsfreien Darstellung wird der durch die Verklausung verursachte Anstieg des Oberwasserstands ΔH auf die Überströmungshöhe H ohne Verklausung bezogen. $\Delta H/H$ ist mit dem in Kap. 2.4 eingeführten relativen Aufstau $\Delta h/h$ vergleichbar. Die durch die Verklausung verursachte Abflussreduzierung ΔQ wird auf den Abfluss Q bei der Überströmungshöhe H ohne Verklausung bezogen. In Abb. 3.23 werden und $\Delta Q/Q$ mit Hilfe schematischer H/Q -Beziehungen veranschaulicht:

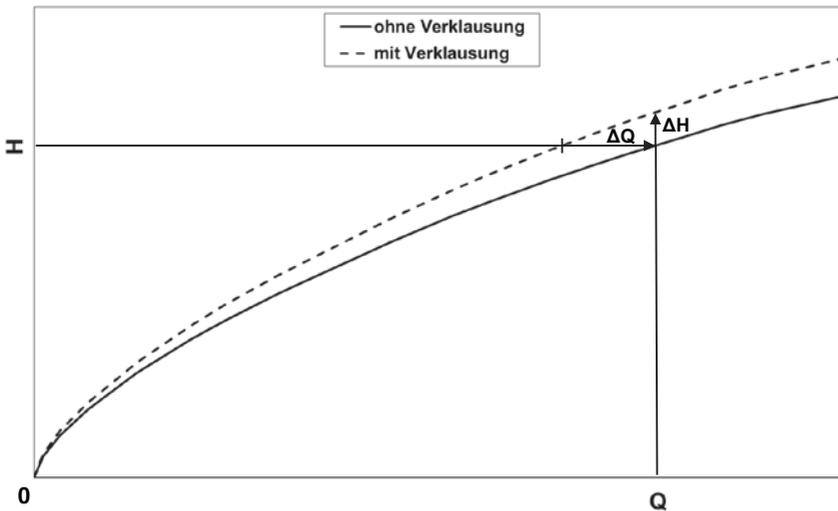


Abb. 3.23: Schematische Darstellung einer H/Q -Beziehung ohne und mit Verklausung zur Veranschaulichung der quantitativen Verklausungsfolgen $\Delta H/H$ und $\Delta Q/Q$

3.5.1 Einfeldmodell mit Naturholz

Hier wurde auf den zweiten Schritt des oben geschilderten Versuchsablaufs verzichtet. Gemessen wurde hier also nur der Anstieg des Oberwasserstands infolge verschiedener, jeweils neu generierter Verklausungen bei verschiedenen, teilweise aber auch identischen Abflüssen und Anströmungsgeschwindigkeiten. In Abb. 3.24 sind die Oberwasserstand-Abfluss-Beziehung für das unverklauste, vollständig geöffnete Wehrfeld des Einfeldmodells dargestellt und die gemessenen Wertepaare eingetragen, die sich infolge der verschiedenen Verklausungen ergaben. Tab. 3.10 führt die Überströmungshöhen in Relation zur Wehrfeldbreite H/W , die mittleren Geschwindigkeiten v und Froude-Zahlen Fr der Anströmung im Bereich des Vorbodens sowie die dabei durch verschiedene Verklausungen mit dem gleichen Satz Naturholz (abgestorbene, wassergesättigte Fichtenrohlinge) verursachten Anstiege des Oberwasserstands $\Delta H/H$ auf. Abb. 3.25 bzw. Abb. 3.26 zeigt in Diagrammform den Zusammenhang von v bzw. Fr einerseits und dem Anstieg des Oberwasserstands $\Delta H/H$ andererseits:

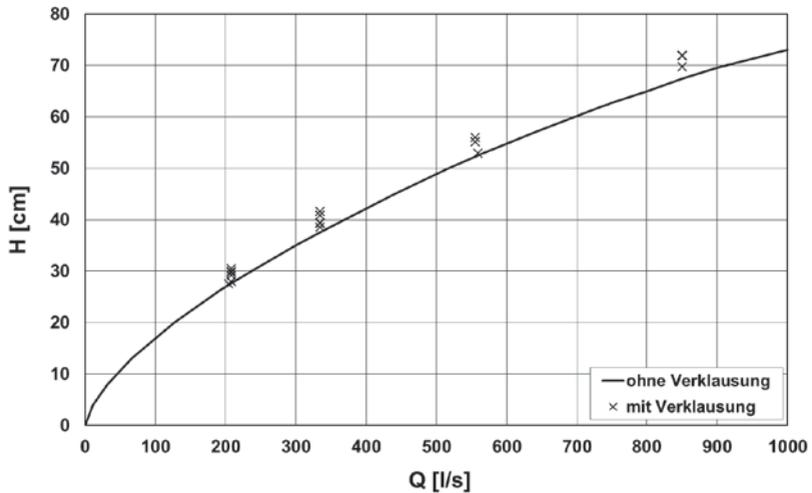


Abb. 3.24: Oberwasserstand-Abfluss-Beziehung für das Einfeldmodell ohne Verklausung sowie Wertepaare mit Verklausung

H/W	v [m/s]	Fr	$\Delta H/H$ [%]
0,36	0,103	0,037	0,55
0,37	0,103	0,037	8,35
0,37	0,155	0,068	0,87
0,37	0,155	0,068	5,68
0,37	0,278	0,162	7,63
0,37	0,278	0,162	10,02
0,50	0,119	0,036	2,37
0,50	0,119	0,036	4,63
0,50	0,178	0,066	4,55

H/W	v [m/s]	Fr	$\Delta H/H$ [%]
0,50	0,178	0,066	8,71
0,50	0,323	0,160	10,68
0,70	0,212	0,066	5,33
0,70	0,386	0,162	7,00
0,70	0,142	0,036	0,63
0,90	0,177	0,041	6,63
0,90	0,252	0,069	3,28

Tab. 3.10: Anstieg des Oberwasserstands $\Delta H/H$ durch Verklausungen im Einfeldmodell in Abhängigkeit von H/W sowie der mittleren Geschwindigkeit v und Froude-Zahl Fr der Anströmung

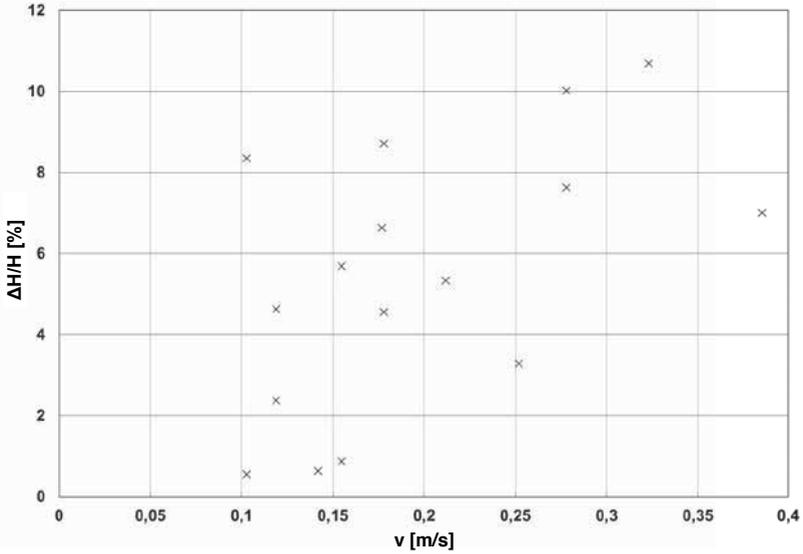


Abb. 3.25: Anstieg des Oberwasserstands $\Delta H/H$ durch Verklausung im Einfeldmodell in Abhängigkeit von der mittleren Anströmungsgeschwindigkeit v

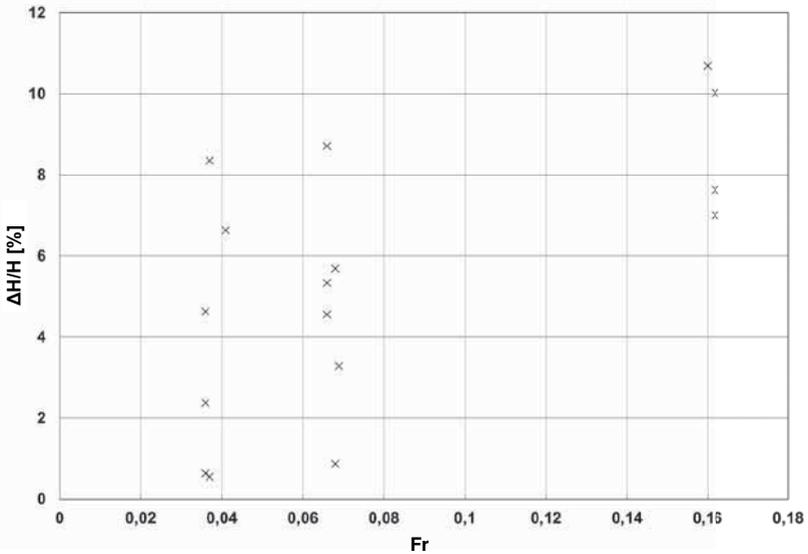


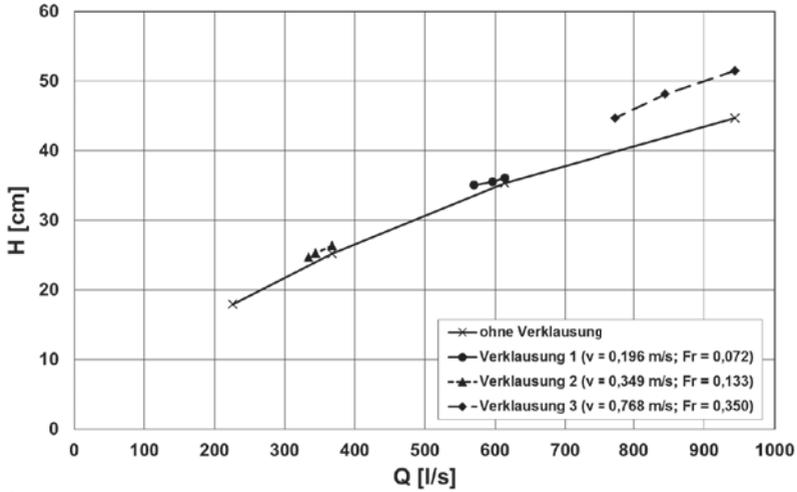
Abb. 3.26: Anstieg des Oberwasserstands $\Delta H/H$ durch Verklausung im Einfeldmodell in Abhängigkeit von der Froude-Zahl Fr der Anströmung

In Abb. 3.24 wird offensichtlich, dass bei gleichen oder ähnlichen Abflüssen verschiedene Verklausungen mit dem gleichen Material zu verschiedenen Anstiegen des Oberwasserstands führen. Nach der Dimensionsanalyse in Kap. 3.2.2 ist zu erwarten, dass dies auf die bei gleichen Abflüssen unterschiedlichen mittleren Geschwindigkeiten bzw. Froude-Zahlen der Anströmung zurückzuführen ist, die sich aus unterschiedlichen Vorbodenhöhen ergeben. Dies ist allerdings nur eingeschränkt möglich. In Abb. 3.25 bzw. Abb. 3.26 ist nur dann eine Tendenz zum größeren Anstieg des Oberwasserstands mit wachsender Geschwindigkeit bzw. Froude-Zahl der Anströmung zu erkennen, wenn man die Werte insgesamt betrachtet. Schwerer als die Geschwindigkeit bzw. die Froude-Zahl der Anströmung wiegt bei der Ausbildung der Verklausung und dem daraus resultierenden Aufstau der Zufallsaspekt. So verursachen beispielsweise zwei verschiedene Verklausungen mit dem identischen Material bei der gleichen Geschwindigkeit $v = 0,155 \text{ m/s}$ und Froude-Zahl $Fr = 0,068$ der Anströmung die sehr unterschiedlichen Anstiege des Oberwasserstands $\Delta H/H$ von 0,87 % und von 5,68 %. Immerhin wurde der maximale in allen Versuchen im Einfeldmodell erzielte Anstieg $\Delta H/H$ mit 10,68 % bei den vergleichsweise großen hydraulischen Parametern $v = 0,323 \text{ m/s}$ und $Fr = 0,16$ gemessen. Insgesamt liegen die Anstiege des Oberwasserstands durch Verklausungen im Einfeldmodell unter den Erwartungen. Als Grund ist anzuführen, dass im Einfeldmodell ausschließlich einlagige Schwemmholzteppiche entstanden sind. Die aufgetretenen Geschwindigkeiten und Froude-Zahlen der Anströmung lagen auch generell unter oder nur unwesentlich über den in Kap. 3.4.1 ermittelten kritischen Werten $v_{\text{krit}} = 0,38 \text{ m/s}$ und $Fr_{\text{krit}} = 0,151$ im Modell für das Abtauchen der abgestorbenen, wassergesättigten Fichtenrundlinge unter die Wasseroberfläche.

JOHANSSON/CEDERSTRÖM haben eine geringe Anzahl von vergleichbaren Versuchen in einem Einfeldmodell durchgeführt. Die ermittelten Anstiege des Oberwasserstands lagen für $H/W = 0,31$ bei $\Delta H/H = 10,5 \%$, für $H/W = 0,53$ bei $\Delta H/H = 4,8 \%$ und für $H/W = 0,71$ bei $\Delta H/H = 2,9 \%$. Die mittleren Geschwindigkeiten und Froude-Zahlen der Anströmung bei den Versuchen wurden von JOHANSSON/CEDERSTRÖM nicht angegeben. Die Ergebnisse für $\Delta H/H$ liegen in der gleichen Größenordnung wie in den vorliegenden neuen Versuchen für vergleichbare H/W -Werte.

3.5.2 Dreifeldmodell mit Naturholz

Insgesamt wurden im Dreifeldmodell mit den vollständig geöffneten Wehrfeldern drei Versuche mit Naturholz in den oben geschilderten zwei Schritten durchgeführt. Abb. 3.27 zeigt die qualitativen Oberwasserstand-Abfluss-Beziehungen für das Dreifeldmodell ohne Verklausung und für die drei Verklausungen, für die nach dem Anstieg des Oberwasserstands der jeweilige Abfluss in zwei Schritten reduziert wurde. Tab. 3.11 fasst die wesentlichen Zahlenwerte der Versuche zusammen.



0

Abb. 3.27: Oberwasserstand-Abfluss-Beziehung für das Dreifeldmodell ohne Verkläusung sowie für drei verschiedene Verkläusungen

v [m/s]	Fr	$\Delta H/H$ [%]	$\Delta Q/Q$ [%]
0,196	0,072	2,15	-4,81
0,349	0,133	4,35	-6,45
0,768	0,350	15,23	-18,08

Tab. 3.11: Mittlere Geschwindigkeit v und Froude-Zahl Fr der Anströmung ohne Verkläusung, Anstieg des Oberwasserstands $\Delta H/H$, Reduzierung der Abflussleistung $\Delta Q/Q$

Bei diesen Versuchen ist der nach der Dimensionsanalyse in Kap. 3.2.2 erwartete deutliche Zusammenhang zwischen den hydraulischen Parametern v und Fr einerseits sowie der Form des Verkläusungskörpers und den Verklausungsfolgen andererseits gegeben: die Verkläusungen 1 und 2, die sich bei niedrigeren Geschwindigkeiten $v < v_{krit}$ und kleineren Froude-Zahlen $Fr < Fr_{krit}$ der Anströmung gebildet haben, sind einlagige Schwemmholzteppiche, die nur kleinere Anstiege des Oberwasserstands $\Delta H/H < 5\%$ und kleinere Reduzierungen der Abflussleistung $\Delta Q/Q < -7\%$ verursachen. Bei diesen beiden Verkläusungen ist eine weitere Differenzierung möglich. Im Versuch mit den kleinsten hydraulischen Parametern $v = 0,196$ m/s und $Fr = 0,072$ (Verkläusung 1) ist der Schwemmholzteppich am lockersten ausgebildet und weist die größte Längenausdehnung auf. Folgerichtig ergibt sich der geringste Anstieg $\Delta H/H = 2,15\%$ und die geringste Reduzierung $\Delta Q/Q = -4,81\%$. Im Versuch mit $v = 0,349$ m/s und $Fr = 0,133$ (Verkläusung 2) ist der Schwemmholzteppich schon etwas kompakter und kürzer, aber immer noch einlagig. Die Verklausungsfolgen sind mit $\Delta H/H = 4,35\%$ und $\Delta Q/Q = -6,45\%$ entsprechend etwas gravierender. Die höchste Geschwindigkeit $v = 0,768$ m/s bzw. Froude-Zahl $Fr = 0,35$ der Anströmung hat einen nach unten bis nahe an den Vorboden reichenden mehrlagigen und sehr kompakten Verkläusungskörper zur Folge (siehe Kap. 3.4.1 und Abb. 3.17). Dementsprechend sind die Verklausungsfolgen mit $\Delta H/H = 15,23\%$ und $\Delta Q/Q = -18,08\%$ noch einmal wesentlich gravierender.

In einem weiteren Versuch mit $v = 0,768$ m/s und $Fr = 0,35$ wurde zusätzlich zum Satz des Naturholzes feines natürliches Material (kleine Zweige, Blätter, Fichtennadeln, Gras, Moos ...) in den Oberwasserkanal zugegeben. Abb. 3.28 zeigt den sich ausbildenden kompakten und mehrlagigen Verkläusungskörper, der mit dem Feinmaterial deutlich weniger durchlässig ist. Als Folge liegen der Anstieg des Oberwasserstands $\Delta H/H$ deutlich über 20 % und die Reduzierung der Abflussleistung $\Delta Q/Q$ deutlich unter -20 %.



Abb. 3.28: Kompakte, mehrlagige Verkläusung des Dreifeldmodells mit zusätzlichem Feinmaterial

Bei zusätzlichen Versuchen wurde wie im Einfeldmodell nur der Anstieg des Oberwasserstands infolge verschiedener Verkläusungen ermittelt. Tab. 3.12 führt die mittleren Geschwindigkeiten v und Froude-Zahlen Fr der Anströmung im Bereich des Vorbodens sowie die dabei durch verschiedene Verkläusungen mit Naturholz im Dreifeldmodell verursachten Anstiege des Oberwasserstands $\Delta H/H$ auf. Abb. 3.29 bzw. Abb. 3.30 zeigt in Diagrammform den Zusammenhang von v bzw. Fr einerseits und $\Delta H/H$ andererseits. Jeweils enthalten sind auch die Werte aus Tab. 3.11.

v [m/s]	Fr	$\Delta H/H$ [%]
0,174	0,077	0,59
0,196	0,072	2,15
0,233	0,073	5,43
0,233	0,073	4,73
0,260	0,141	4,52
0,260	0,141	5,00
0,293	0,132	5,38
0,349	0,133	4,35
0,530	0,321	12,98
0,633	0,324	12,76
0,748	0,350	15,23

Tab. 3.12: Mittlere Geschwindigkeiten v und Froude-Zahlen Fr der Anströmung sowie die Anstiege des Oberwasserstands $\Delta H/H$ durch Verkläusungen im Dreifeldmodell

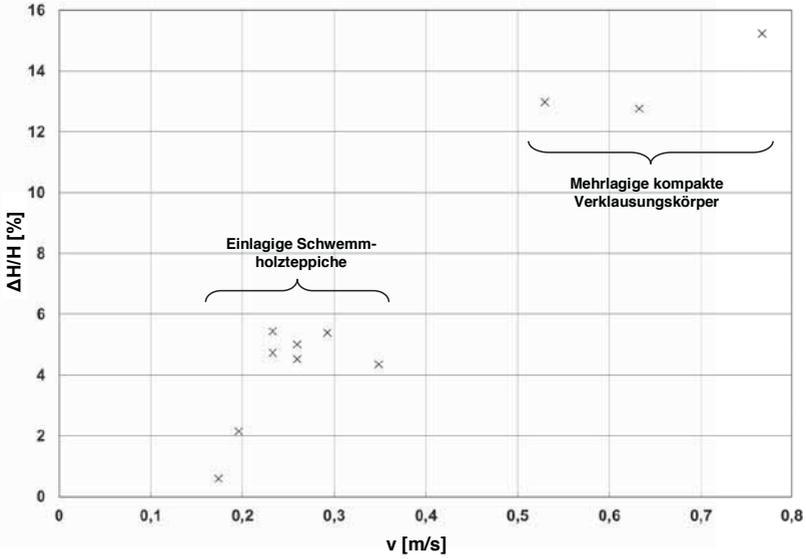


Abb. 3.29: Anstiege des Oberwasserstands $\Delta H/H$ durch Verkläungen im Dreifeldmodell in Abhängigkeit von der mittleren Anströmungsgeschwindigkeit v

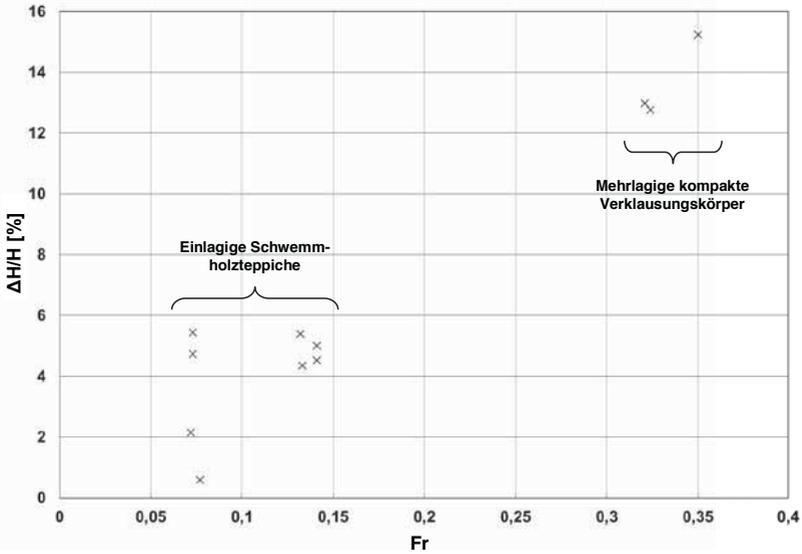


Abb. 3.30: Anstiege des Oberwasserstands $\Delta H/H$ durch Verkläungen im Dreifeldmodell in Abhängigkeit von der Froude-Zahl Fr der Anströmung

Die Gesamtbetrachtung der Werte in Tab. 3.12, Abb. 3.29 und Abb. 3.30 spricht dafür, dass der von einer Verklausung hervorgerufene Anstieg des Oberwasserstands $\Delta H/H$ mit steigender Geschwindigkeit v und Froude-Zahl Fr der Anströmung zunimmt. Die Werte ermöglichen eine klare Unterscheidung: auf der einen Seite entstehen bei niedriger Anströmungsgeschwindigkeit und Froude-Zahl ($v < v_{krit}$ und $Fr < Fr_{krit}$) ungefährliche einlagige Schwemmholzteppiche. Diese rufen nur kleine Anstiege $\Delta H/H$ unter 6 % hervor. Auf der anderen Seite entwickeln sich bei hoher Geschwindigkeit und Froude-Zahl der Anströmung ($v > v_{krit}$ und $Fr > Fr_{krit}$) gefährliche mehrlagige und kompakte Verklausungskörper, die zu großen Anstiegen $\Delta H/H$ über 12 % führen. Innerhalb der beiden Gruppen ist das Bild uneinheitlicher. Hier spielt der Zufallsaspekt bei der Ausbildung des Verklausungskörpers eine maßgebende Rolle.

3.5.3 Dreifeldmodell mit Kunstholz

Das zweistufige Vorgehen mit der Bestimmung des Anstiegs des Oberwasserstands und der Reduzierung der Abflussleistung infolge einer Verklausung wurde in den schon in Kap. 3.4.2 beschriebenen 16 Versuchen für die vier kritischen Anströmungsgeschwindigkeiten der vier verschiedenen Rohdichten des Kunstholzes praktiziert. Tab. 3.13, Abb. 3.31 und Abb. 3.32 zeigen die von den Verklausungen verursachten Anstiege des Oberwasserstands $\Delta H/H$ und Reduzierungen der Abflussleistung $\Delta Q/Q$ in Abhängigkeit von der Holzrohddichte ρ_H bzw. vom Verhältnis der Holzroh- zur Wasserdichte ρ_H/ρ_W sowie von der mittleren Geschwindigkeit v und Froude-Zahl Fr der Anströmung. Die Verklausungen wurden mit dem jeweiligen 100-Stangen-Satz zufällig am Stahlrost unmittelbar vor dem Dreifeldmodell generiert.

v [m/s]	Fr	ρ_H [kg/m ³]	ρ_H/ρ_W	$\Delta H/H$ [%]	$\Delta Q/Q$ [%]
0,139	0,058	800	0,8	8,24	-10,13
0,139	0,058	900	0,9	16,92	-20,19
0,139	0,058	950	0,95	28,09	-29,14
0,139	0,058	975	0,975	25,43	-28,56
0,168	0,077	800	0,8	5,87	-8,67
0,168	0,077	900	0,9	11,03	-14,71
0,168	0,077	950	0,95	30,17	-30,95
0,168	0,077	975	0,975	45,88	-42,69
0,243	0,135	800	0,8	15,68	-19,73
0,243	0,135	900	0,9	32,86	-31,35
0,243	0,135	950	0,95	39,49	-33,69
0,243	0,135	975	0,975	46,43	-40,56
0,348	0,231	800	0,8	21,87	-24,40
0,348	0,231	900	0,9	30,87	-32,00
0,348	0,231	950	0,95	27,43	-29,12
0,348	0,231	975	0,975	31,15	-36,08

Tab. 3.13: Mittlere Geschwindigkeit v und Froude-Zahl Fr der Anströmung, Holzrohddichte ρ_H , Verhältnis der Holzroh- zur Wasserdichte ρ_H/ρ_W , Anstieg des Oberwasserstands $\Delta H/H$ und Reduzierung der Abflussleistung $\Delta Q/Q$

Im Vergleich zu den Versuchen mit Naturholz sind die Werte für $\Delta H/H$ und $\Delta Q/Q$ für das künstliche Schwemmholz insgesamt deutlich größer und erreichen im Maximum $\Delta H/H = 46,43\%$ und $\Delta Q/Q = 42,69\%$. Bei den Ergebnissen tritt die nach der Dimensionsanalyse in Kap. 3.2.2 erwartete Abhängigkeit von der Holzrohddichte sehr deutlich zu Tage: fast durchgehend und sehr deutlich nehmen mit zunehmender Holzrohddichte ρ_H bzw. zunehmendem ρ_H/ρ_W der Anstieg des Oberwasserstands $\Delta H/H$ und die Reduzierung der Abflussleistung $\Delta Q/Q$ zu. Schwach ausgeprägt, aber in der Tendenz erkennbar ist die Zunahme von $\Delta H/H$ und $\Delta Q/Q$ mit steigender Geschwindigkeit v bzw. Froude-Zahl Fr der Anströmung. Beides lässt sich wiederum mit der Form des Verkläusungskörpers erklären: wie schon in der Dimensionsanalyse in Kap. 3.2.2 und in Kap. 3.4.2 beschrieben, führt eine größere Holzrohddichte und/oder eine höhere Geschwindigkeit bzw. Froude-Zahl der Anströmung zu einem kompakteren, mehrlagigen Verkläusungskörper und deshalb zu einem größeren Anstieg des Oberwasserstands $\Delta H/H$ bzw. zu einer deutlicheren Reduzierung der Abflussleistung $\Delta Q/Q$.

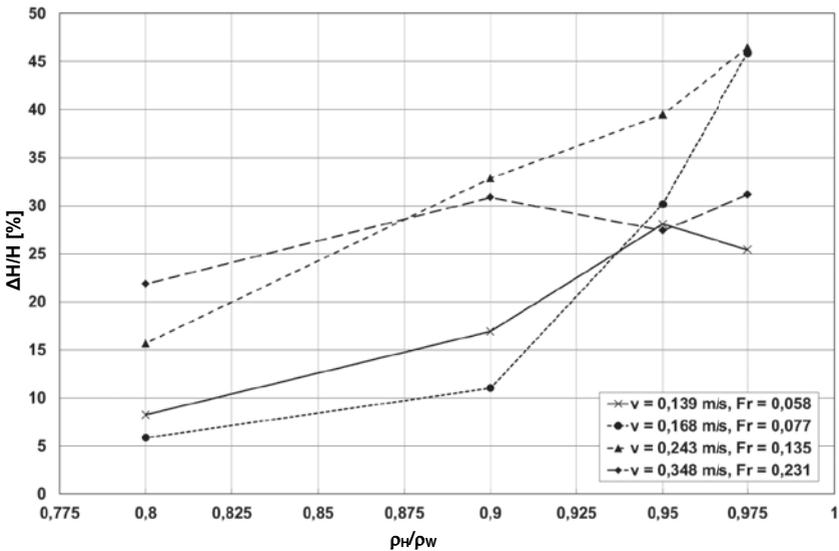


Abb. 3.31: Anstieg des Oberwasserstands $\Delta H/H$ durch Verkläusung im Dreifeldmodell mit Kunstholz in Abhängigkeit vom Verhältnis der Holzroh- zur Wasserdichte ρ_H/ρ_W und der mittleren Geschwindigkeit v bzw. Froude-Zahl Fr der Anströmung

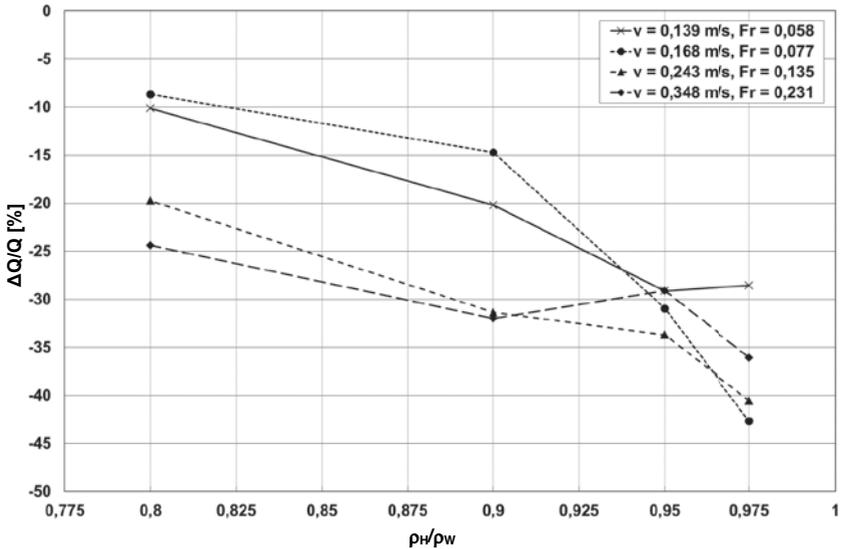


Abb. 3.32: Reduzierung der Abflussleistung $\Delta Q/Q$ durch Verklauung im Dreifeldmodell mit Kunstholz in Abhängigkeit vom Verhältnis der Holzroh- zur Wasserdichte ρ_H/ρ_W und der mittleren Geschwindigkeit v bzw. Froude-Zahl Fr der Anströmung

3.5.4 Bewertung der Versuchsergebnisse zu den Folgen von Wehrverklauungen

Grundsätzlich ergaben sich bei der Betrachtung der Ergebnisse in ihrer Gesamtheit zwar die nach der Dimensionsanalyse in Kap. 3.2.2 erwarteten Zusammenhänge, nämlich größere Verklauungsfolgen $\Delta H/H$ und $\Delta Q/Q$ bei größeren Froude-Zahlen Fr der Anströmung bzw. bei einem größeren Verhältnis ρ_H/ρ_W der Holzroh- zur Wasserdichte. Die Streuung der Werte für $\Delta H/H$ und $\Delta Q/Q$ ist aber so groß, dass eine Quantifizierung der unbekannt Parameter aus der Dimensionsanalyse anhand der vorliegenden neuen Versuchsergebnisse nicht möglich ist. Der in einer Dimensionsanalyse nicht zu erfassende Zufallsaspekt beim Verklauungsprozess und dem sich daraus entwickelnden Verklauungskörper besitzt einen so großen Einfluss, dass bei Verklauungen, die bei identischen Randbedingungen entstanden sind, die Verklauungsfolgen $\Delta H/H$ und $\Delta Q/Q$ teilweise um ein Vielfaches voneinander abweichen. Zur Eliminierung zumindest von Teilen dieses Zufallsaspekts könnte am Versuchsbeginn jeweils ein einheitliche „Startverklauung“ vorgegeben werden.

3.5.5 Flach geneigter Rechen vor Dreifeldmodell

Um zu überprüfen, ob durch eine spezielle Schutzeinrichtung eine Verklausung des Bauwerks zwar nicht verhindert, aber die Verklausungsfolgen weniger gravierend ausfallen könnten, wurden im Dreifeldmodell zusätzliche Versuche mit einem vorgelagerten Rechen durchgeführt. Die Besonderheit des Rechens liegt einerseits in der sehr flachen Neigung und andererseits im großen Stababstand in der Größenordnung einer halben Wehrfeldbreite. Abb. 3.33 gibt einen Überblick über das mit dem Rechen ergänzte Dreifeldmodell während eines Versuchs. In Abb. 3.34 bzw. Abb. 3.35 ist ein schematischer und unmaßstäblicher Lageplan bzw. ein Schnitt durch das Modell mit dem zusätzlichen Rechen dargestellt.

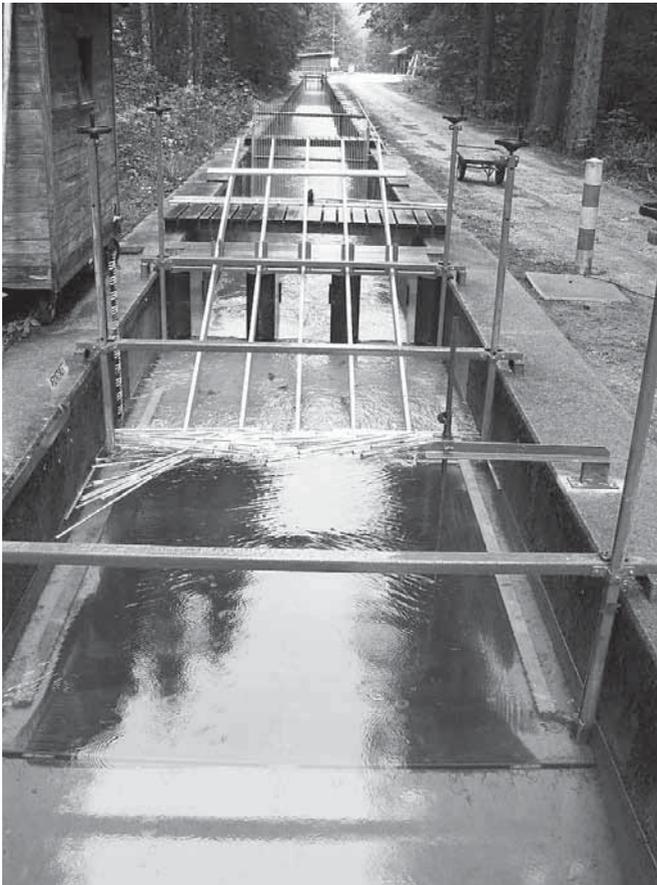


Abb. 3.33: Dreifeldmodell mit zusätzlichem, flach geneigtem Rechen



Abb. 3.36: Lockerer, einlagiger Schwemmholzteppich aus Kunstholz vor flach geneigtem Rechen ($v = 0,139$ m/s; $Fr = 0,058$; $\rho_H = 800$ kg/m³; $\alpha = 20^\circ$)



Abb. 3.37: Kompakter, mehrlagiger Verkläusungskörper aus Kunstholz vor flach geneigtem Rechen ($v = 0,348$ m/s; $Fr = 0,231$; $\rho_H = 975$ kg/m³; $\alpha = 20^\circ$)

In Tab. 3.14 sind die Versuchsergebnisse $\Delta H/H$ und $\Delta Q/Q$ infolge von Rechenverkläusungen für den Fall der größten Geschwindigkeit $v = 0,348$ m/s bzw. Froude-Zahl $Fr = 0,231$ der Anströmung zusammengestellt. Abb. 3.38 bzw. Abb. 3.39 zeigen den Anstieg des Oberwasserstands $\Delta H/H$ bzw. die Reduzierung der Abflussleistung $\Delta Q/Q$ durch Verkläusungen des flach geneigten Rechens im Vergleich zu direkten Verkläusungen des dreifeldrigen Wehrs in Abhängigkeit von der Holzrohddichte ρ_H , der Holzart (künstlich oder natürlich) und der Rechenneigung α .

α [°]	ρ_H [kg/m ³]	ρ_H/ρ_W	$\Delta H/H$ [%]	$\Delta Q/Q$ [%]
15	792*	0,792*	6,42	-8,75
15	792*	0,792*	4,40	**
15	800	0,8	5,10	**
15	800	0,8	5,18	**
15	950	0,95	5,54	**
20	792*	0,792*	4,84	-7,09
20	792*	0,792*	5,76	**
20	800	0,8	7,91	-10,79
20	800	0,8	5,68	**
20	900	0,9	11,45	-15,05
20	950	0,95	11,08	-14,14
20	975	0,975	14,41	-17,08
30	800	0,8	8,93	-11,61
30	800	0,8	8,27	**
30	900	0,9	13,28	-16,54
30	900	0,9	10,49	**
30	950	0,95	12,68	-15,71
30	950	0,95	9,64	**
30	950	0,95	10,25	**
30	950	0,95	11,08	**
30	975	0,975	14,09	-16,74

*Naturholz **ohne 2. Versuchsschritt

Tab. 3.14: Rechenneigung α , Holzrohddichte ρ_H , Verhältnis der Holzroh- zur Wasserdichte ρ_H/ρ_W , Anstieg des Oberwasserstands $\Delta H/H$ und Reduzierung der Abflussleistung $\Delta Q/Q$ infolge Rechenverkläusung für die mittlere Geschwindigkeit $v = 0,348$ m/s bzw. Froude-Zahl $Fr = 0,231$ der Anströmung

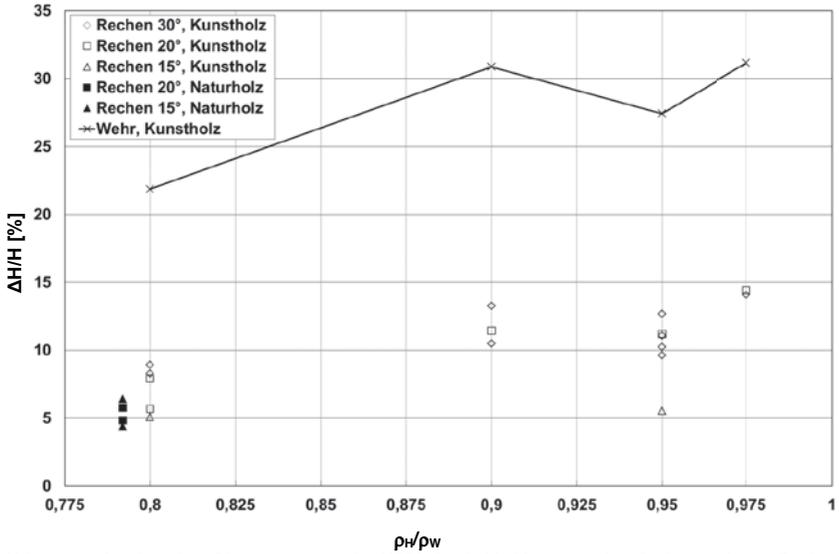


Abb. 3.38: Anstieg des Oberwasserstands $\Delta H/H$ durch Verkläusung des flach geneigten Rechens bzw. durch direkte Wehrverklausung in Abhängigkeit von der Holzrohddichte ρ_H und der Rechenneigung α ($v = 0,348$ m/s, $Fr = 0,231$)

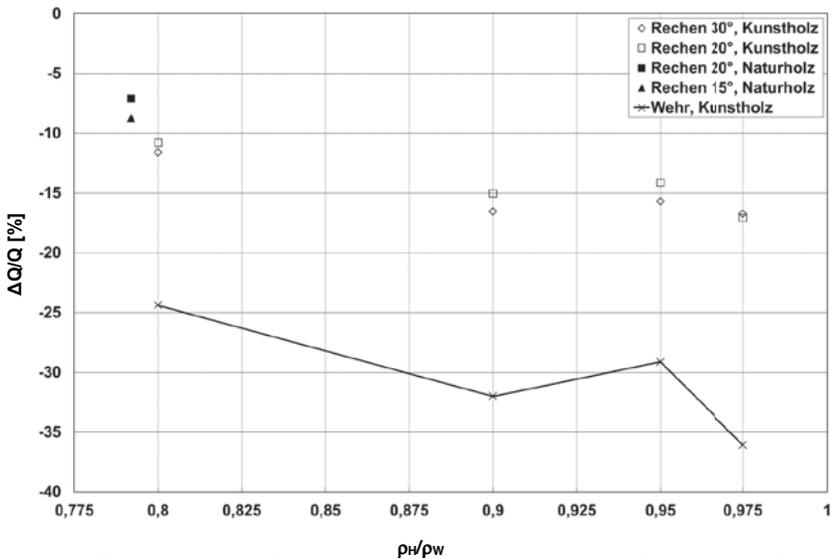


Abb. 3.39: Reduzierung der Abflussleistung $\Delta Q/Q$ durch Verkläusung des flach geneigten Rechens bzw. durch direkte Wehrverklausung in Abhängigkeit von der Holzrohddichte ρ_H und der Rechenneigung α ($v = 0,348$ m/s, $Fr = 0,231$)

Folgende Erkenntnisse lassen sich aus den Ergebnissen ableiten:

- Reproduzierbarkeit der Messergebnisse
 Einige Versuche wurden bei identischen Versuchsparametern zum Teil mehrmals wiederholt. Dabei ergab sich eine zufrieden stellende Reproduzierbarkeit der Messergebnisse. So wurde der Verklausungsversuch mit dem flach geneigten Rechen für Kunstholz, $v = 0,348 \text{ m/s}$, $Fr = 0,231$, $\alpha = 30^\circ$ und $\rho_H = 950 \text{ kg/m}^3$ insgesamt viermal durchgeführt. Die Anstiege des Oberwasserstands $\Delta H/H$ betragen: 9,64 %; 10,25 %; 11,08 %; 12,68 %. Die Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse für Kunstholz scheint aufgrund der größeren Homogenität höher zu sein als für das natürliche Schwemmholz.

- Geschwindigkeit v bzw. Froude-Zahl Fr der Anströmung
 Mit Ausnahme der Versuchsreihe mit der höchsten Anströmungsgeschwindigkeit $v = 0,348 \text{ m/s}$ bzw. Froude-Zahl $Fr = 0,231$ der Anströmung lag der durch die Verklausungen des flach geneigten Rechens mit Kunstholz verursachte Anstieg des Oberwasserstands $\Delta H/H$ unter 3 %. Deshalb wurde dort generell auf den zweiten Versuchsschritt mit der Bestimmung der Reduzierung der Abflussleistung $\Delta Q/Q$ verzichtet. Nur für $v = 0,348 \text{ m/s}$ bzw. $Fr = 0,231$ lagen die Werte für $\Delta H/H$ höher und wurden überhaupt Werte für $\Delta Q/Q$ bestimmt (siehe Abb. 3.38 und Abb. 3.39).

- Rechenneigung α
 Die Rechenneigungen $\alpha = 20^\circ$ und 30° ergeben keine signifikanten Unterschiede in den Werten von $\Delta H/H$ und $\Delta Q/Q$. Die wenigen für die Rechenneigung $\alpha = 15^\circ$ ermittelten Werte deuten auf einen geringeren Anstieg des Oberwasserstands $\Delta H/H$ hin. Dies deckt sich mit Beobachtungen, dass das künstliche Schwemmholz bei der flachsten Rechenneigung etwas stärker entlang der Rechenstäbe nach oben geschoben oder gerollt wird und damit den Abflussquerschnitt weniger verlegt.

- Holzrohddichte ρ_H
 Wie bei den direkten Wehrverklausungen führt auch bei den Rechenverklausungen eine größere Holzrohddichte insgesamt betrachtet zu einem größeren Anstieg des Oberwasserstands $\Delta H/H$ bzw. zu einer größeren Reduzierung der Abflussleistung $\Delta Q/Q$. Insbesondere für die kleinste Rohddichte $\rho_H = 800 \text{ kg/m}^3$ des künstlichen Schwemmholzes ergeben sich deutlich kleinere Werte für den Aufstau und die Abflussreduzierung.

- Vergleich Rechen- und Wehrverkläusungen

Die Verkläusungsfolgen, also explizit die Werte für $\Delta H/H$ und $\Delta Q/Q$, sind bei den Rechenverkläusungen wesentlich kleiner als bei den Wehrverkläusungen. Für die größte Geschwindigkeit $v = 0,348$ m/s bzw. Froude-Zahl $Fr = 0,231$ der Anströmung liegen die Werte für die Rechenverkläusungen unter der Hälfte von denjenigen der Wehrverkläusungen. Der Hauptgrund liegt in den tatsächlich auf das Schwemmholz wirkenden Fließgeschwindigkeiten, die sich in den beiden Fällen deutlich unterscheiden. Am Rechen, der durch seine starke Neigung einen deutlichen Abstand vom eigentlichen Wehrbauwerk aufweist, wirkt tatsächlich die mittlere Anströmungsgeschwindigkeit im Bereich des Vorbodens. Dagegen kommt es zu einer deutlichen Abflussbeschleunigung hin zum Wehrbauwerk, so dass auf das dort zurückgehaltene Schwemmholz eine deutlich höhere Fließgeschwindigkeit einwirkt. Während also bei identischen Randbedingungen das Schwemmholz an einem flach geneigten Rechen noch vergleichsweise gefahrlos in einem lockeren, einlagigen Teppich zurückgehalten werden kann, würde unmittelbar am Wehrbauwerk eine kompakter, mehrlagiger Verkläusungskörper entstehen, der einen wesentlich größeren Anstieg des Oberwasserstands zur Folge hätte. Dieser positive Haupteffekt des Rechens wird noch dadurch verstärkt, dass der Verkläusungskörper, selbst wenn er sich durch sehr hohe Geschwindigkeiten bzw. Froude-Zahlen der Anströmung auch hier kompakt und mehrlagig ausformt, an den flach geneigten Rechenstäben zumindest etwas aus dem Abflussquerschnitt geschoben oder gerollt wird.

- Vergleich Kunst- und Naturholz

Zu Vergleichszwecken wurden Verkläusungsversuche am flach geneigten Rechen mit einem Satz von 100 Stück der abgestorbenen, wassergesättigten Fichtenrundlinge mit der mittleren Holzrohddichte $\rho_H = 792$ kg/m³ und der gleichen Längenverteilung wie beim künstlichen Schwemmholz durchgeführt. Abb. 3.40 zeigt eine Verkläusung am flach geneigten Rechen mit Naturholz. Trotz der größeren Oberflächenrauheit des Naturholzes, die einen Einfluss auf die Ausbildung des Verkläusungskörpers erwarten lässt, ergaben sich keine signifikanten Unterschiede in den Messwerten für $\Delta H/H$ und $\Delta Q/Q$.



Abb. 3.40: Verklausung des flach geneigten Rechens mit Naturholz

YANG ET AL 2009 haben Modellversuche für die Hochwasserentlastungsanlage des Laxvede Damms in Schweden im geometrischen Maßstab 1:60 durchgeführt. Bei mehreren direkten Modellverklausungen der dreifeldrigen Hochwasserentlastungsanlage mit 130 Schwemmholzelementen aus Naturholz, die eine repräsentative Längenverteilung aufwiesen, ergab sich ein Anstieg des Oberwasserstands $\Delta H/H$ im Bereich von 16 % bis 27% gegenüber dem ursprünglichen Oberwasserstand ohne Verklausung. Die Größenordnung für $\Delta H/H$ stimmt gut mit den Werten für die direkte Wehrverklausung in den vorliegenden neuen Untersuchungen überein, die für Kunstholz im Bereich von über 20 % bis über 30 % liegen (vgl. Abb. 3.38). YANG ET AL haben zum Schutz der Anlage vor Verklausungen einen ähnlichen, flach geneigten Rechen mit großem Stababstand wie in den vorliegenden neuen Untersuchungen getestet. Die Verklausungen dieser Rechenkonstruktion mit den gleichen 130 Schwemmholzelementen wie im Fall der direkten Wehrverklausung führten zu einem Anstieg des Oberwasserstands $\Delta H/H$ von nur noch 2 % bis 3 % und zwar unabhängig davon, ob die Rechenstäbe parallel wie in den vorliegenden neuen Untersuchungen angeordnet waren oder radial. Für die vorliegenden neuen Untersuchungen mit kleineren Geschwindigkeiten v bzw. Froude-Zahlen Fr der Anströmung, bei denen die Werte für $\Delta H/H$ durchwegs unter 3 % lagen, ist eine gute Übereinstimmung gegeben. In den vorliegenden neuen Untersuchungen mit der größten Geschwindigkeit $v = 0,348$ m/s bzw. Froude-Zahl $Fr = 0,231$ der Anströmung ergaben sich allerdings deutlich größere $\Delta H/H$ -Werte zwischen 5 % und 15 % (vgl. Abb. 3.38). Ein möglicher Grund sind ausgeprägte Maßstabeffekte, die im Modell von YANG ET AL mit dem geometrischen Maßstab 1:60 im Gegensatz zu den vorliegenden großmaßstäblichen Untersuchungen (geometrischer Maßstab 1:20) aufgetreten sind.

3.5.6 Zusätzliche Krafteinwirkung durch Verklausungen

Durch Verklausungen entstehen an wasserbaulichen Anlagen zusätzliche Krafteinwirkungen, die im Extremfall zum Bruch führen können. In den vorliegenden neuen Untersuchungen waren die zusätzlichen Krafteinwirkungen durch Verklausungen kein Untersuchungsziel. GODTLAND/TESAKER schlagen auf der Basis von Versuchsergebnissen folgende empirische Formel (Gl. 3.8) für die Abschätzung der zusätzlichen Krafteinwirkung F auf eine Wehranlage infolge einer Verklausung vor:

$$F = C_W \cdot b_K \cdot (30 \cdot T + L_K) \cdot \rho_W \cdot v_s^2/2 \quad (\text{Gl. 3.8})$$

mit C_W : Widerstandsbeiwert

$C = 0,06$ für $v_s < v_{su}$; $C = 0,08$ für $v_{su} < v_s < 1,1 \cdot v_{su}$; $C = 0,10$ für $v_s > 1,1 \cdot v_{su}$

v_s : Anströmungsgeschwindigkeit an der Wasseroberfläche

v_{su} : Mittlere Fließgeschwindigkeit unter dem Verklausungskörper

b_K : Breite des Verklausungskörpers quer zur Fließrichtung

T : Höhe des Verklausungskörpers

L_K : Länge des Verklausungskörpers in Fließrichtung

ρ_W : Wasserdichte

In diesem Ansatz werden überschlägig die Krafteinwirkungen aus dem Staudruck, aus der Unterströmung des Verklausungskörpers und aus der Windeinwirkung auf den Verklausungskörper berücksichtigt. Damit schätzen LARIVIERE ET AL 1997 das Spektrum für die maximale zusätzliche Krafteinwirkung F von Verklausungen auf Wehranlagen mit 30 kN/m bis 70 kN/m ab. Die Tatsache, dass die Anströmungsgeschwindigkeit im Quadrat in den Ansatz eingeht, zeigt einen zusätzlichen Aspekt für die Beurteilung einer Verklausung bei hohen Anströmungsgeschwindigkeiten. Nicht nur der Verklausungskörper fällt mehrlagig und kompakter aus und der Anstieg des Oberwasserstands bzw. die Reduzierung der Abflussleistung ist gravierender, wie in Kap. 3.4 und Kap. 3.5 gezeigt. Auch die zusätzliche Krafteinwirkung auf das Bauwerk steigt rapide an. Interessant ist in diesem Zusammenhang die Beobachtung von GODTLAND/TESAKER, dass bei einer mittleren Anströmungsgeschwindigkeit von etwa 0,4 m/s die Krafteinwirkung F aufgrund des beginnenden Abtauchens des Verklausungskörpers deutlich zunimmt. Hier ist eine exakte Übereinstimmung mit der in Kap. 3.4.1 beschriebenen, kritischen Anströmungsgeschwindigkeit im Bereich von 0,4 m/s gegeben, die in den vorliegenden neuen Versuchen für das Abtauchen von Einzelhölzern ermittelt wurde.

3.6 Maßstabs- und Modelleffekte

Zur Überprüfung des Einflusses der Oberflächenspannung des Wassers auf die Versuchsergebnisse wurde die minimale Weber-Zahl We_{\min} in den Grundlagenversuchen mit der minimalen Fließgeschwindigkeit und der zugehörigen Fließtiefe ermittelt:

$$We_{\min} = \rho_W \cdot v_{\min}^2 \cdot h / \sigma = 1000 \cdot 0,106^2 \cdot 0,795 / (74,2 \cdot 10^{-3}) = 120 \quad (\text{Gl. 3.9})$$

mit ρ_W : Wasserdichte

v_{\min} : minimale Fließgeschwindigkeit in den Grundlagenversuchen

h : zugehörige Fließtiefe

σ : Oberflächenspannung von Wasser bei 10°C Wassertemperatur

Die kleinste Trägheitskraft der Strömung in den Grundlagenversuchen ist also 120-mal größer als die Kraft aus der Oberflächenspannung des Wassers, so dass der Einfluss der Oberflächenspannung auf die Versuchsergebnisse vernachlässigt werden kann.

Hinsichtlich eines möglichen Einflusses der Reibungskräfte bei der Umströmung von Modellbestandteilen wurde auch die minimale Reynolds-Zahl Re^*_{\min} der umströmten Schwemmholzelemente mit der minimalen Fließgeschwindigkeit und dem minimalen verwendeten Schwemmholzdurchmesser als maßgebender Länge bestimmt:

$$Re^*_{\min} = v_{\min} \cdot d_{H,\min} / \nu = 0,106 \cdot 0,02 / (1,307 \cdot 10^{-6}) = 1620 \quad (\text{Gl. 3.10})$$

mit v_{\min} : minimale Fließgeschwindigkeit in den Grundlagenversuchen

$d_{H,\min}$: minimaler Schwemmholzdurchmesser in den Grundlagenversuchen

ν : kinematische Viskosität von Wasser bei 10°C Wassertemperatur

Bei der Umströmung der Schwemmholzelemente ist also die kleinste Trägheitskraft 1620-mal größer als die Reibungskraft. Die Reibungskräfte spielen demnach in den Grundlagenversuchen genauso wie im Prototyp keine Rolle.

Sowohl aus der Oberflächenspannung als auch aus Reibungskräften sind bei der Übertragung der Versuchsergebnisse auf den Prototyp keine Maßstabseffekte zu berücksichtigen.

Dagegen war das Dehnungs-, Verformungs- und Bruchverhalten des in den Modellversuchen verwendeten Schwemmholzes im Vergleich zum Prototyp durch Maßstabseffekte verzerrt. Nach dem für die Versuche angewendeten Modellgesetz von Froude entspricht der Maßstab für den Elastizitätsmodul des Materials der Schwemmholzelemente dem geometrischen Maßstab. Bei der vorhandenen maßstäblichen Querschnittsgeometrie der Schwemmholzelemente müsste also das Material der Schwemmholzelemente im Modell einen im Vergleich zum Prototyp um den Faktor 20 verkleinerten Elastizitätsmodul aufweisen. Da aber in den meisten Versuchen Naturholz verwendet wurde und damit der Elastizitätsmodul in der gleichen Größenordnung lag wie im Prototyp, war das Schwemmholz um den Faktor 20 steifer als im Prototyp. Noch deutlich steifer im Vergleich zum Prototyp war das für ausgewählte Versuche verwendete Kunstholz, das im Wesentlichen aus Plexiglasrohren bestand. Der Einfluss des zu steifen Modellschwemmholzes auf die Versuchsergebnisse wird so eingeschätzt, dass die Verklausungswahrscheinlichkeiten im Modell größer sind als im Prototyp. Durch stärkere Verformungen, die möglicherweise auch zu Brüchen einzelner Schwemmholzelemente führen können, werden im Prototyp mehr Schwemmholzelemente trotz Berührung der Berandungen durch die Wehrfelder gezogen als im Modellversuch. Dies bestätigen auch die im Kap. 3.3.2 beschriebenen Versuche mit elastischeren Schwemmholzelementen. Es ist auch zu vermuten, dass durch die Verformbarkeit des Schwemmholzes im Prototyp die Verklausungswahrscheinlichkeit im Gegensatz zum Modell zu einem gewissen Grad von der Geschwindigkeit bzw. Froude-Zahl der Anströmung abhängt. Dann würde im Prototyp die Verklausungswahrscheinlichkeit mit steigender Geschwindigkeit bzw. Froude-Zahl der Anströmung in moderater Weise sinken. In der Dimensionsanalyse für die Verklausungswahrscheinlichkeit (siehe Kap. 3.2.1) wurde der Einfluss der Schwemmholzverformung aufgrund der großen Steifigkeit im Modell vernachlässigt. Hinsichtlich der Verklausungswahrscheinlichkeit liegen die Versuchsergebnisse also auf der sicheren Seite. Für den Verklausungsprozess und die -folgen verhält es sich vermutlich anders. Tendenziell treten im Prototyp durch die stärkere Verformbarkeit vermutlich kompaktere Verklausungskörper mit gravierenderen Verklausungsfolgen als im Modell auf. Je größer die Steifigkeit des Schwemmholzes im Prototyp etwa durch große Stammdurchmesser ist, desto kleiner sind die entsprechenden Maßstabseffekte im Modell.

Modellbedingte Effekte gehen von den seitlichen Begrenzungsmauern des Kanals im Oberwasserbereich und die große Länge des Schwemmholzes in Relation zur Kanalbreite aus. Zum einen wird das Schwemmholz durch die auf großer Länge homogene Anströmung besser ausgerichtet. Als Folge reduziert sich die Verklausungswahrscheinlichkeit, durch die geringen Anströmungsgeschwindigkeiten oberhalb des Vorbodens und die seltenen Berührungen des Schwemmholzes mit den Mauern allerdings in nur geringem Maß. Zum anderen wird - insbesondere beim längeren Schwemmholz - ein Teil der Strömungskräfte vom Schwemmholz in die seitlichen Mauern übertragen und deshalb die Verdichtung der Verklausungskörper verringert. Natürlich kann es auch im Prototyp schmale Kanäle im Oberwasser von wasserbaulichen Anlagen mit ähnlichen Effekten auf die Verklausung geben. Im Regelfall sind aber die Oberwasserbereiche im Prototyp mehr oder weniger aufgeweitet. Dann ist die Verklausungswahrscheinlichkeit im Prototyp etwas größer. Dieser Modelleffekt wirkt gegenläufig zum Maßstabeffekt infolge der zu großen Steifigkeit des Modellholzes, der allerdings deutlich überwiegen dürfte. Außerdem werden bei einem breiteren Oberwasserbereich die Strömungskräfte voll auf das Schwemmholz übertragen und es bilden sich kompaktere Verklausungskörper im Prototyp. Hier wirken der Modelleffekt durch die seitlichen Begrenzungsmauern im Oberwasserbereich und der Maßstabeffekt infolge der zu großen Steifigkeit des Modellholzes beide in die gleiche Richtung kompakterer Verklausungskörper im Prototyp.

Grundsätzlich können die Ergebnisse der großmaßstäblichen Modellversuche trotz gewisser Maßstabs- und Modelleffekte auf den Prototyp übertragen werden. Hinsichtlich der Verklausungswahrscheinlichkeit ist die Reproduzierbarkeit und quantitative Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse bei der hohen Gesamtzahl von 1800 Versuchen und der jeweils 20-maligen Versuchsdurchführung bei identischen Randbedingungen in ausreichendem Maß gegeben. Einschränkungen bestehen dagegen bei der Reproduzierbarkeit und quantitativen Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse zu den Verklausungsfolgen. Hier spielt der Zufallsaspekt bei der Ausbildung jeder einzelnen Verklausung im Modell wie im Prototyp eine große Rolle und ruft bei identischen Randbedingungen deutlich unterschiedliche Verklausungsfolgen hervor. Allerdings sind die qualitativen Zusammenhänge, die sich in den Modellversuchen für den Verklausungsprozess und die Verklausungsfolgen ergaben, auch für den Prototyp gültig. Eine Möglichkeit, die Reproduzierbarkeit von zukünftigen Versuchsergebnissen von Verklausungsfolgen zu erhöhen, ist die Vorgabe von identischen Ausgangsverklausungen in Form von einlagigen Schwemmholzteppichen, die sich im weiteren Verlauf der Versuche mehr oder weniger verdichten. Damit könnte der Zufallsaspekt zu Beginn der Ausbildung der Verklausung zumindest teilweise aus der Betrachtung eliminiert werden.

3.7 Zusammenfassung der Grundlagenversuche zur Verklausung von wasserbaulichen Anlagen

Maßgebend für die Verklausungswahrscheinlichkeit einer wasserbaulichen Anlage sind die Eigenschaften des Schwemmholzes. Entsprechend der Dimensionsanalyse in Kap. 3.2.1 steht dabei das Verhältnis der Holzlänge L zur Wehrfeldbreite W der wasserbaulichen Anlage W an erster Stelle. Für $L \leq W$ liegt die Wahrscheinlichkeit einer dauerhaften Verklausung nahe 0. Mit zunehmender Länge $L > W$ steigt die Verklausungswahrscheinlichkeit rapide an. Für den Bereich $1 \leq L/W \leq 2$ konnte anhand der Versuchsergebnisse für einschwimmende Holzgruppen die folgende lineare Funktion für die Verklausungswahrscheinlichkeit P aufgestellt werden:

$$P = (L/W - 0,96) \cdot 0,73 \quad (\text{Gl. 3.7})$$

Eine wichtige Rolle spielen aber auch die Steifigkeit und die Verastung des Holzes: je steifer das Schwemmholz und je zahlreicher und länger die Äste, desto größer ist die Verklausungswahrscheinlichkeit. Auch führen Holzgruppen mit einer deutlich höheren Wahrscheinlichkeit zu einer Verklausung als einzeln einschwimmende Stämme. Die Erkenntnis aus der Dimensionsanalyse, dass die Holzroh-dichte und die Geschwindigkeit bzw. die Froude-Zahl der Anströmung nur eine geringe Relevanz für die Verklausungswahrscheinlichkeit besitzen, wurde in den Versuchen ohne Begrenzung des Abflussquerschnitts nach oben bestätigt. Deutlich erhöht wird die Verklausungswahrscheinlichkeit bei einer Begrenzung des kritischen Abflussquerschnitts nach oben etwa durch eine Brücke bzw. einen herausgehobenen Verschluss mit geringer lichter Höhe zwischen Wasserspiegel und Unterkante Brücke bzw. Verschluss. Dann ist die Verklausungswahrscheinlichkeit bei einer niedrigeren Geschwindigkeit bzw. Froude-Zahl der Anströmung und vermutlich auch bei einer geringeren Holzroh-dichte wesentlich größer.

Ganz anders sieht dies aus, wenn es zu einer Verklausung mit einer bestimmten Holzmenge kommt. Dann sind entsprechend der Dimensionsanalyse in Kap. 3.2.2 die Froude-Zahl der Anströmung und das Verhältnis der Holzroh- zur Wasserdichte die maßgebenden Einflussgrößen für den Verklausungsprozess, die Form des Verklausungskörpers und die Verklausungsfolgen. Bei kleiner Froude-Zahl der Anströmung und kleiner Holzroh-dichte bildet sich ein lockerer, einlagiger Schwemmholzteppich, der nur einen geringen Anstieg des Oberwasserstands und eine kleine Reduzierung der Abflussleistung hervorruft. Bei großer Froude-Zahl der Anströmung und großer Holzroh-dichte entwickelt sich ein kompakter, mehrlagiger Verklausungskörper, der einen großen Anstieg des Oberwasserstands und eine starke Reduzierung der Abflussleistung verursacht. Die Versuchsergebnisse sprechen dafür, dass

kompakte, mehrlagige Verklausungskörper schon ab Froude-Zahlen der Anströmung von $Fr > 0,15$ auftreten können. Aufgrund des großen Zufallsaspekts beim Verklausungsprozess war die Streuung der Versuchsergebnisse aber so groß, dass eine genauere Quantifizierung der Verklausungsfolgen in Abhängigkeit von der Froude-Zahl der Anströmung und vom Verhältnis der Holzroh- zur Wasserdichte nicht möglich war. Der grundsätzliche Zusammenhang zwischen der Froude-Zahl der Anströmung und den Verklausungsfolgen ist allerdings der Hauptgrund für die gute Schutzwirkung eines stark geneigten Rechens mit großem Stababstand, der der wasserbaulichen Anlage vorgelagert wird und an dem in den meisten Fällen ein ungefährlicher, lockerer und einlagiger Schwemmholzteppich zurückgehalten wird. Am Rechen, der durch seine starke Neigung einen deutlichen Abstand von der eigentlichen wasserbaulichen Anlage aufweist, wirkt eine deutlich geringere Geschwindigkeit auf das zurückgehaltene Schwemmholz bzw. liegt eine deutlich kleinere Froude-Zahl der Anströmung vor als an den Überfällen der wasserbaulichen Anlage. Die positive Wirkung eines derartigen Rechens wird noch dadurch verstärkt, dass der Verklausungskörper, selbst wenn er sich durch eine sehr hohe Geschwindigkeit bzw. Froude-Zahl der Anströmung kompakt und mehrlagig ausformt, an den stark geneigten Rechenstäben zumindest etwas aus dem Abflussquerschnitt geschoben oder gerollt wird.

4 Schwemmholzproblematik in Modellversuchen für konkrete Bauwerke

4.1 Hochwasserentlastungsanlage Grüntensee

Die Talsperre Grüntensee im Oberlauf der Wertach im Oberallgäu wurde von 1959 bis 1961 primär für den Hochwasserschutz und die Niedrigwasseraufhöhung errichtet. Das Absperrbauwerk ist ein Erdamm mit Kerndichtung, der eine Höhe von etwa 20 m und eine Kronenlänge von 180 m aufweist. In Abb. 4.1 ist der Dammkörper mit den Betriebseinrichtungen im Lageplan skizziert. Im Rahmen der vertieften Überprüfung der Talsperre durch die Bayerische Wasserwirtschaftsverwaltung und aufgrund der Erkenntnisse aus dem großen Hochwasserereignis an Pfingsten 1999 wurden Defizite an der Hochwasserentlastungsanlage festgestellt. Die Hochwasserentlastungsanlage besteht aus einem Einlaufbauwerk mit Stauklappe, einem geschlossenen Schusskanal mit Richtungs- und Gefällewechseln und einem Tosbecken, in das auch der Grundablass einmündet. Sie ist in Abb. 4.2 im Lageplan skizziert.

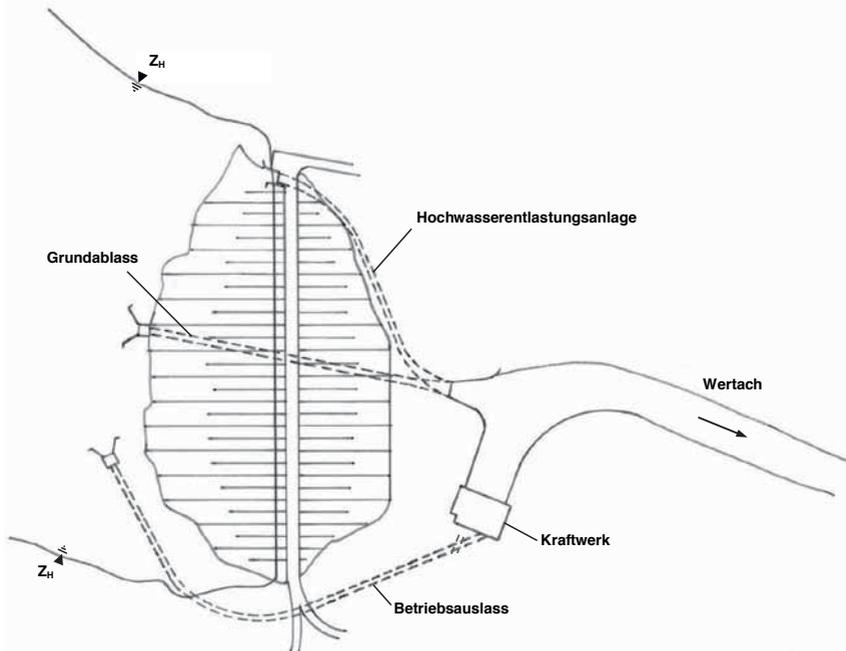


Abb. 4.1: Dammkörper und Betriebseinrichtungen der Talsperre Grüntensee im Lageplan

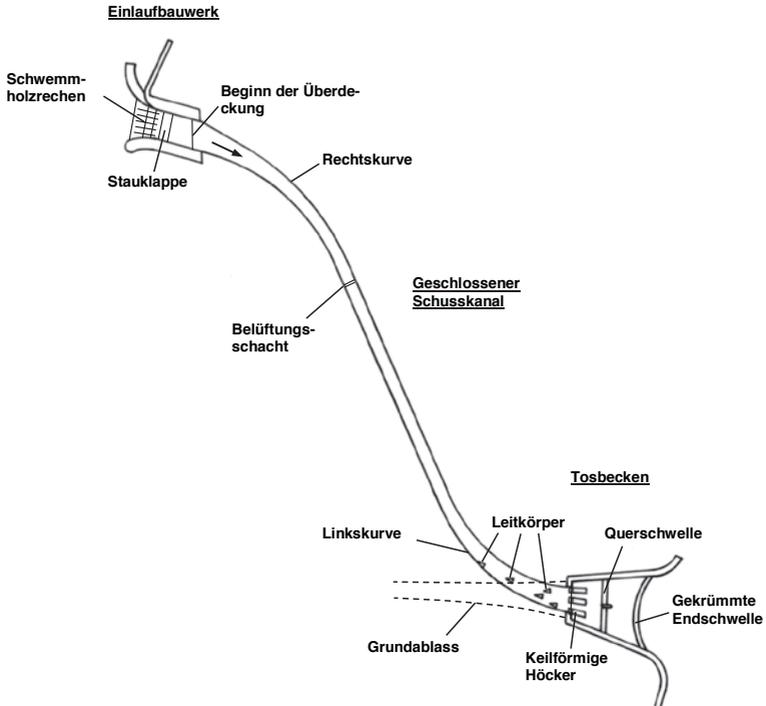


Abb. 4.2: Hochwasserentlastungsanlage der Talsperre Grüntensee (alter Zustand) im Lageplan

In einem vom Wasserwirtschaftsamt Kempten beauftragten hydraulischen Modellversuch (geometrischer Maßstab 1:20, Froude-Modell) an der Versuchsanstalt Oberrach im Jahr 2005 konnte zunächst geklärt werden, dass die bisher bestehende Hochwasserentlastungsanlage in ausreichendem Maße ertüchtigt werden kann und die Errichtung einer neuen Hochwasserentlastungsanlage nicht erforderlich ist. Anschließend wurden weitere Verbesserungen der alten Hochwasserentlastungsanlage im Modell erarbeitet (vgl. HARTLIEB ET AL 2005 sowie HARTLIEB/OVERHOFF 2006). Abb. 4.3. zeigt einen Überblick über das Modell der Hochwasserentlastungsanlage im alten Zustand:

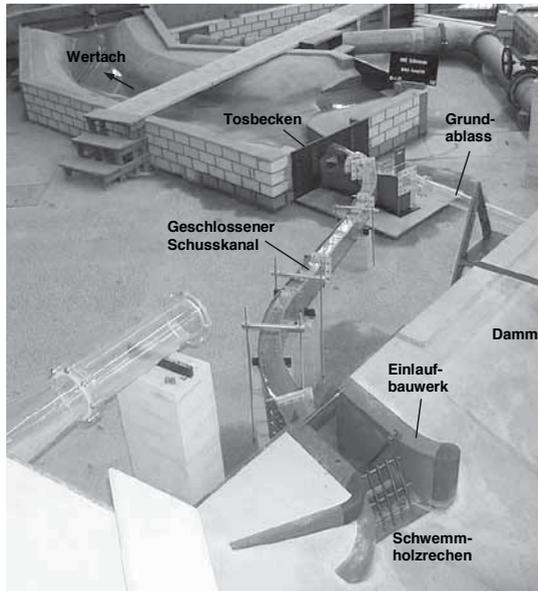


Abb. 4.3: Modell der Hochwasserentlastungsanlage im alten Zustand

Eine der Verbesserungen betraf den Schwemmholzrückhalt vor der Hochwasserentlastungsanlage. Dieser ist dringend erforderlich, da einerseits das Schwemmholzpotential im zum Großteil bewaldeten alpinen und voralpinen Einzugsgebiet des Grüntensees sehr groß ist. Andererseits war die alte Hochwasserentlastungsanlage durch die geringen Breiten- und Höhenabmessungen (minimale Breite: 2,0 m, minimale Höhe 2,6 m), durch die Richtungs- und Gefällewechsel und insbesondere durch die in Abb. 4.2 erkennbaren Leitkörper extrem verklausungsgefährdet. Die Leitkörper waren im geschlossenen Schusskanal kurz vor dem Austritt ins Tosbecken angeordnet und dienten einer Verbesserung der Energieumwandlung.

Mit dem direkt vor der 5 m breiten Überlaufkrone des Einlaufbauwerks angeordneten alten Rechen, der einen Stababstand der vertikalen Stäbe von ca. 80 cm und zwei Querträger aufweist, wird zwar der größte Teil des Schwemmholzes zurückgehalten. Dennoch können einzelne Stämme, insbesondere wenn sie auf einen noch nicht verlegten Rechen treffen, diesen passieren und dann fast unweigerlich zu einer sehr gefährlichen Verklausung etwa an den Leitkörpern führen. Der Schusskanal würde sofort zuschlagen und die Abflussleistung der Hochwasserentlastungsanlage schlagartig abnehmen. Aber selbst ein vollständiger Schwemmholzrückhalt am Rechen ist sehr problematisch. Direkt vor der Überfallkrone ist

die Rechenfläche vergleichsweise klein und die Abflussbeschleunigung im Bemessungsfall voll ausgeprägt. Der Rechen ist deshalb großen Geschwindigkeiten und Froude-Zahlen der Anströmung ausgesetzt. Die Froude-Zahl Fr lässt sich überschlägig aus dem Bemessungsabfluss in einer Größenordnung von $Q = 45 \text{ m}^3/\text{s}$, der Breite der Überlaufkrone $b_0 = 5,0 \text{ m}$ und der Höhendifferenz $h = 3,0 \text{ m}$ zwischen Stauziel und Überlaufkrone als durchströmter Rechenhöhe ermitteln:

$$Fr = Q / (b_0 \cdot h^{1,5} \cdot g^{0,5}) = 45 / (5 \cdot 3^{1,5} \cdot 9,81^{0,5}) = 0,55 \quad (\text{Gl. 4.1})$$

Im Falle eines Schwemmholzurückhalts am Rechen werden bei dieser hohen Froude-Zahl $Fr > 0,15$ Stämme auch unter die Wasseroberfläche gezogen und ein kompakter, mehrlageriger Verklausungskörper entsteht, der den Abflussquerschnitt zumindest teilweise verlegt. Mit der einher gehenden starken Reduzierung der Abflussleistung der Hochwasserentlastungsanlage kommt es zu einem gravierenden Anstieg des Seepiegels im Extremfall bis zur Dammüberströmung. Ein entsprechendes Szenario ist beim Pfingsthochwasser 1999 aufgetreten. Nur durch einen in der Nacht alarmierten Bagger, der die Verklausung des Rechens beseitigte, konnte die Gefahr der Dammüberströmung gebannt werden. Abb. 4.4 zeigt den alten Schwemmholzrechen im Modell im unverlegten, angeströmten Zustand für den Seepiegel in Höhe des Stauziels $Z_S = 882,0 \text{ m ü. NN}$ und Abb. 4.5 den Prototyp ohne Abfluss.

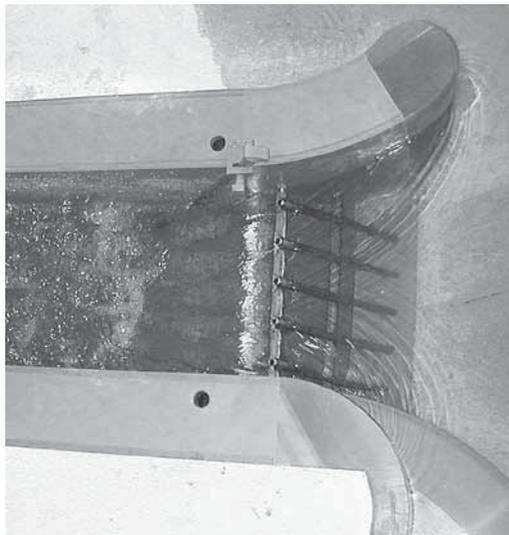


Abb. 4.4: Alter Schwemmholzrechen im unverlegten, angeströmten Zustand (Modell)



Abb. 4.5: Alter Schwemmholzrechen (Prototyp)

Ein zusätzlicher Nachteil des alten Rechen liegt in dem auch durch die großen Anströmungsgeschwindigkeiten bedingten, nicht zu vernachlässigenden Rechenverlust, der eine deutliche Reduzierung der Abflussleistung der Hochwasserentlastungsanlage schon im unverlegten Rechenzustand bedeutet. In Abb. 4.6 sind die im Modell ermittelten Seepiegel-Abfluss-Beziehungen für den Zustand ohne Rechen und mit dem alten, unverlegten Rechen dargestellt.

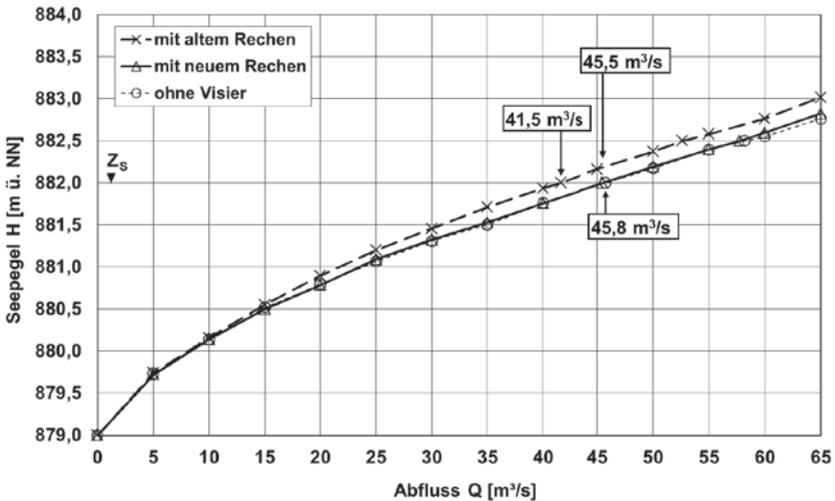


Abb. 4.6: Im Modell ermittelte Seepiegel-Abfluss-Beziehungen für die Hochwasserentlastungsanlage der Talsperre Grüntensee

Beim Seepiegel in Höhe des Stauziels $Z_s = 882,0$ m ü. NN reduziert sich die Abflussleistung von $45,8$ m³/s ohne Rechen um knapp 10 % auf $41,5$ m³/s mit dem alten unverlegten Rechen.

Der im Modellversuch entwickelte und im Jahr 2007 im Prototyp realisierte neue Rechen (siehe Abb. 4.7 im Modell und Abb. 4.8 im Prototyp) stellt eine entscheidende Verbesserung dar, die auch unter dem Gesichtspunkt der Landschaftsästhetik gelungen ist. Die zehn vertikalen Rechensäulen sind im Grundriss auf einem Kreis mit deutlichem Abstand vom Einlaufbauwerk angeordnet. Der lichte Abstand der Rechensäulen untereinander und zu den Wangenmauern des Einlaufbauwerks beträgt etwa 1,63 m. Die Oberkante der Rechensäulen liegt mit $884,10$ m ü. NN auf Höhe der Dammkrone, womit die Säulen teilweise über 7 m hoch sind. Auch auf der in Fließrichtung linken, abgestuften Wangenmauer steht eine Rechensäule. Dadurch ist sichergestellt, dass der Rechen auch bei extremen Ereignissen, in denen ja gerade ein großer Schwemmholtzanfall zu erwarten ist, seine Funktion erfüllt. Aus statischen Gründen wurde ein Durchmesser der Rechensäulen von 60 cm angesetzt. Im Modell wurden alle Säulen an der Oberkante verbunden. Auch im Prototyp wurde dies in Form einer begehbaren Aussichtsbrücke realisiert (siehe Abb. 4.9). Auf darunter liegende Verbindungen oder Verstrebungen zwischen den Rechensäulen wurde verzichtet, weil dadurch die Bildung kompakterer Verklausungskörper begünstigt sowie die Räumung nach einem Rückhalteereignis erschwert werden würde.

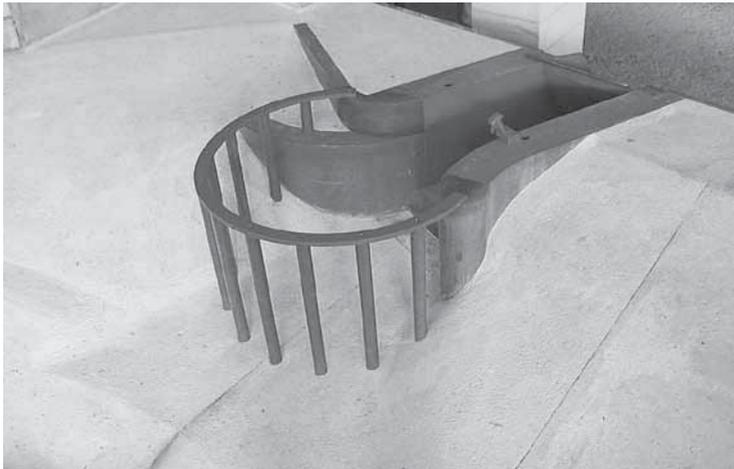


Abb. 4.7: Neuer Schwemmholtzrechen (Modell)



Abb. 4.8: Neuer Schwemmholzrechen (Prototyp)



Abb. 4.9: Rechensäulen mit verbindender Aussichtsbrücke (Blick über den Stausee auf den namensgebenden „Wächter des Allgäus“)

Durch den deutlich größeren Abstand von der Überlaufkante und die größere Anströmungsfläche ist die Geschwindigkeit bzw. Froude-Zahl der Anströmung des neuen Rechens im Vergleich zum alten deutlich reduziert. Mit der mittleren Fließtiefe $h = 5,0$ m im Bereich der Rechenstäbe und einer Kreisbogenlänge des Rechens von etwa $l_K = 25$ m lässt sich überschlägig die Froude-Zahl Fr der Rechenanströmung berechnen:

$$Fr = Q / (l_K \cdot h^{1,5} \cdot g^{0,5}) = 45 / (25 \cdot 5^{1,5} \cdot 9,81^{0,5}) = 0,05 \quad (\text{Gl. 4.2})$$

Die Froude-Zahl der Anströmung des neuen Rechens ist mit $Fr = 0,05$ um den Faktor 10 kleiner als für den alten Rechen mit $Fr = 0,55$ und liegt im unkritischen Bereich $Fr < 0,15$.

Die mit dem neuen, unverlegten Rechen gemessene Seepegel-Abfluss-Beziehung (siehe Abb. 4.6) bestätigt die Vermutung, dass die Verluste am neuen Rechen wesentlich geringer ausfallen und vernachlässigbar sind. Die Messwerte des Seepegels für den Fall mit dem neuem Rechen liegen bei gleichem Abfluss nur minimal über denjenigen für den Fall ohne Rechen. Und die Abflussleistung beim Seepegel in Höhe des Stauziels $Z_s = 882,0$ m ü. NN reduziert sich nur minimal im Rahmen der Messgenauigkeit von $45,8$ m³/s ohne Rechen auf $45,5$ m³/s mit dem neuen unverlegten Rechen.

Bezüglich der wesentlich kleineren Geschwindigkeit bzw. Froude-Zahl der Anströmung fällt schwerer ins Gewicht, dass am Rechen zurückgehaltenes Schwemmholz nicht unter die Wasseroberfläche gezogen wird und sich kein kompakter, mehrlagiger Verkläusungskörper bildet. Stattdessen lagern sich die Holzstämmen an der Wasseroberfläche aneinander an und bilden einen lockeren Holzteppich, der immer weiter anwächst. Der Abfluss an der Rechen-ebene erfolgt unter dem Holzteppich hindurch und wird kaum beeinträchtigt. Dies konnte in Versuchen mit Modellschwemmholz nachgewiesen werden (siehe Abb. 4.10).

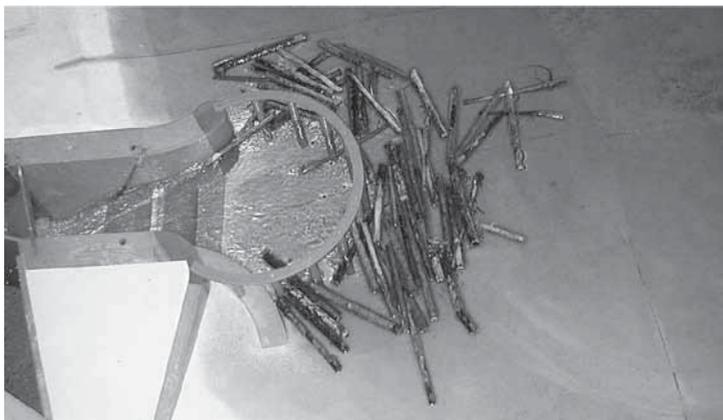


Abb. 4.10: Lockerer Schwemmholzteppich vor dem neuen Rechen

Der alte Schwemmholzrechen konnte erst durch den neuen ersetzt werden, nachdem die Leitkörper kurz vor dem Ende des Schusskanals entfernt worden waren. Nun war und ist es nicht mehr erforderlich, möglichst jeden einzelnen Holzstamm zurückzuhalten. Der lichte Abstand der Säulen des neuen Rechens wurde deshalb mit $1,63$ m gegenüber dem alten Rechen deutlich vergrößert, ist aber immer noch kleiner als die kleinste Engstelle im Verlauf der Hochwasserentlastungsanlage. Jeder nicht zurückgehaltene einzelne Schwemmholzstamm wird, wenn nicht ohnehin bereits geschehen, durch die Rechensäulen in Fließbrich-

tung ausgerichtet (siehe Abb. 4.11) und problemlos durch die gesamte Hochwasserentlastungsanlage ins Unterwasser transportiert. Eine Gefahr geht jetzt nur noch von größeren Holzgruppen aus, die allerdings vom neuen Rechen zuverlässig zurückgehalten werden. Man kann davon ausgehen, dass im Prototyp ein höherer Prozentsatz einzelner Holzstämme zurückgehalten wird als im Modell, weil das natürliche Schwemmholz stärker verzweigt ist und eine rauere Oberfläche aufweist als die unverzweigten, glatten und noch dazu geraden Stämme des Modellholzes.

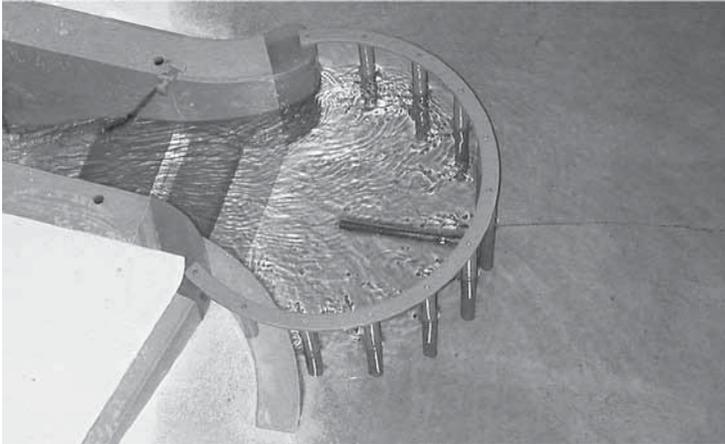


Abb. 4.11: An den Rechensäulen ausgerichteter, einzelner Schwemmholzstamm

Das Räumen des Rechens während eines Hochwasserereignisses ist nicht mehr erforderlich. Mit sinkendem Seepiegel lagert sich das zurückgehaltene Holz im gepflasterten Bereich vor dem Rechen ab und kann im Trockenen geborgen werden.

4.2 Hochwasserentlastungsanlagen Sylvensteinspeicher

Die Sylvensteintalsperre im Oberlauf der Isar wurde in den 1950er vor allem zum Hochwasserschutz und zur Niedrigwasseraufhöhung errichtet und ging 1959 in Betrieb. Abb. 4.12 zeigt die Talsperre und die Betriebseinrichtungen im schematisierten Lageplan. Die Überprüfung der Talsperre nach 30 Jahren ergab einen deutlichen Nachrüstungsbedarf, dem im Zeitraum von 1994 bis 2001 durch konkrete Baumaßnahmen nachgekommen wurde. Darunter waren eine Dammerhöhung zur Vergrößerung des Hochwasserschutzraums, die deshalb erforderliche Anpassung der bestehenden Hochwasserentlastungsanlage (HWE1) und der Neubau einer zweiten Hochwasserentlastungsanlage (HWE2).

4.2.1 Alte Hochwasserentlastungsanlage Sylvensteinspeicher

Die alte HWE1 besteht aus einem Einlaufbauwerk und einem geschlossenen, gekrümmten Stollen mit Abmessungen von 5,10 m in der Breite und 4,70 m in der Höhe, der in einen gemeinsamen Kolksee mit dem Grundablass einmündet. Die Anpassungen betrafen zum einen die Erhöhung der 12 m breiten Überlaufschwelle im Einlaufbauwerk, die aufgrund der Erhöhung des Staudamms um 3 m und des Stauziels auf $Z_S = 767,0$ m ü. NN erforderlich war. Zum anderen sollte eine Rückhalteeinrichtung zum Schutz der HWE1 vor Verklausungen mit Schwemholz realisiert werden. An der Versuchsanstalt Oberrach wurde im Jahr 1995 ein hydraulischer Modellversuch (geometrischer Maßstab 1:40, Froude-Modell) zur Optimierung der Anpassungsmaßnahmen am Einlaufbauwerk der HWE1 im Auftrag des Bayerischen Umweltministeriums durchgeführt (vgl. HARTLIEB ET AL 1996).

Die im Modellversuch erarbeitete Lösung für den Schwemholzrückhalt sah zwei schräge Rechensäulen vor, die in den Drittelpunkten des Einlaufbauwerks bündig mit der Vorderkante der Randpfeiler angeordnet sind. Abb. 4.14 und Abb. 4.15 zeigen das Einlaufbauwerk der HWE1 im Modell und im ausgeführten Prototyp:

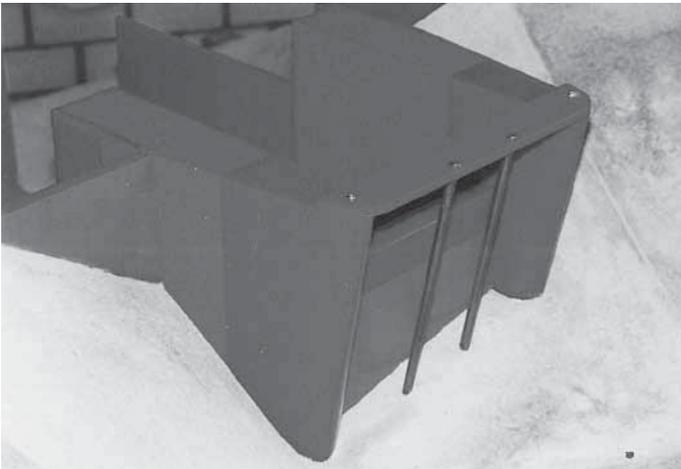


Abb. 4.14: Einlaufbauwerk der nachgerüsteten alten HWE1 im Modell



Abb. 4.15: Einlaufbauwerk der nachgerüsteten alten HWE1 im Prototyp

Die beiden Rechensäulen vor dem Einlaufbauwerk mit einer lichten Weite von ca. 4 m stellen für die gefährlichen Holzgruppen eine zuverlässige Rückhalteeinrichtung dar. Einzelne Stämme können den Rechen wie bei der Hochwasserentlastungsanlage der Talsperre Grüntensee durchaus passieren und werden dann sogar häufig durch die Säulen in Fließrichtung ausgerichtet, so dass sie schadlos durch den Schusskanal in das Unterwasser transportiert werden. Die Rechensäulen weisen zwar nur einen relativ kleinen Abstand von der Überlaufschwelle auf, liegen aber im Bemessungsfall mit dem Seepegel in Höhe des Stauziels $Z_S = 767,0$ m ü. NN - auch bedingt durch die Neigung - etwa am Beginn der Senkungskurve und somit fast schon außerhalb des Bereichs der Abflussbeschleunigung. Abb. 4.16 zeigt einen Schnitt durch die Achse des Einlaufbauwerks mit den im Modell gemessenen Wasserspiegelverläufen für die beiden getesteten Überlaufkronen auf 762,5 und 763,0 m ü. NN.

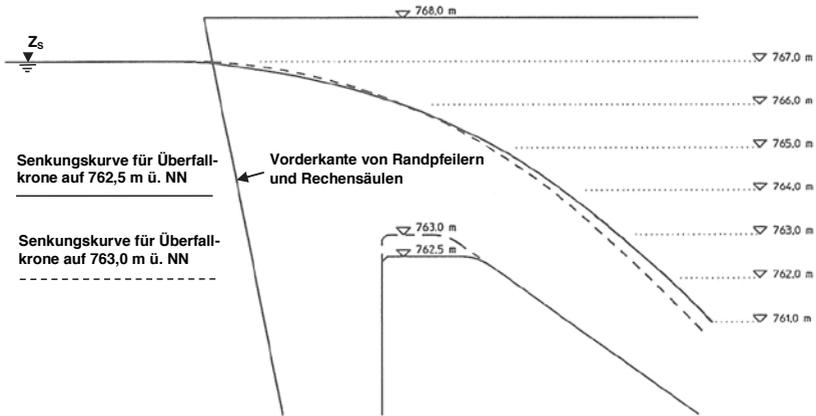


Abb. 4.16: Gemessene Senkungskurven im Einlaufbauwerk der HWE1 für den Bemessungsfall

Der ausreichende Abstand der Rechensäulen von der Überlaufschwelle wurde bei den Messungen der Abflussleistung bestätigt. Durch den unverlegten Rechen reduziert sich die Abflussleistung für die Überlaufschwelle auf 762,5 m ü. NN und den Seepiegel in Höhe des Stauziels $Z_s = 767,0$ m ü. NN von 208,9 m³/s auf 208,0 m³/s. Dieser Messwertunterschied liegt im Rahmen der Messgenauigkeit, somit sind die Verluste des unverlegten Rechens vernachlässigbar.

Im Falle des Schwemmholrückhalts bildete sich im Modellversuch ein eher lockerer, einlagiger Holzteppich, der den Abflussquerschnitt wenig verlegt (siehe Abb. 4.17). Bei wiederholten Verklauungsversuchen im Bemessungsfall wurde bei konstantem Abfluss ein mittlerer Anstieg des Seepiegels von 8 cm und bei konstantem Seepiegel eine mittlere Reduzierung der Abflussleistung um 6 m³/s auf 202,0 m³/s gemessen. Dies sind sicherlich tolerierbare Werte, wobei im Prototyp der Verklauungskörper durch Feinmaterial eher undurchlässiger ausfallen wird und der Anstieg des Seepiegels sowie die Reduzierung der Abflussleistung eher größer sein werden. Allerdings ist die Abflussleistung der HWE1 im Freispiegelabfluss vor dem Zuschlagen des geschlossenen Schusskanals auf 200 m³/s begrenzt und damit die Abflussleistung des Einlaufbauwerks selbst bei verlegtem Rechen nicht das limitierende Anlagenteil.

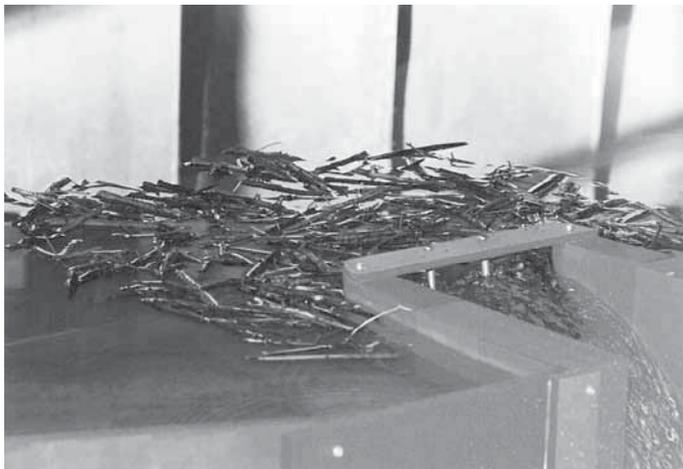


Abb. 4.17: Lockerer Schwemmholzteppich vor dem mit zwei Rechensäulen geschützten Einlaufbauwerk der HWE1 im Bemessungsfall

4.2.2 Neue Hochwasserentlastungsanlage Sylvensteinspeicher

Die neue zusätzliche Hochwasserentlastungsanlage HWE2 wurde im Jahr 1993 im Auftrag des Wasserwirtschaftsamts Weilheim an der Versuchsanstalt Oberrach entworfen und in einem hydraulischen Modellversuch optimiert (geometrischer Maßstab 1:40, Froude-Modell, vgl. KNAUSS ET AL 1993). Sie besteht aus einem Einlaufbauwerk, einem geschlossen, geraden Stollen mit 6,5 m Höhe und mindestens 5,0 m Breite und einer Sprungschanze in den gemeinsamen Kolksee mit Grundablass und HWE1. Es wurde von Beginn an ein Rechen zum Schutz der HWE2 vor Verklausungen mit Schwemmholz vorgesehen. Es handelt sich dabei um fünf vertikale Rechensäulen mit einem Durchmesser von 1 m und einer lichten Säulenweite von 4 m, die im Grundriss auf einem Kreisbogen in ausreichendem Abstand von der durch einen Mittelpfeiler in zwei jeweils 12 m breite Felder geteilten Überlaufschwelle angeordnet sind. Abb. 4.18 zeigt das Einlaufbauwerk mit dem vorgelagerten Schwemmholzrechen im Modell und Abb. 4.19 den ausgeführten Prototyp:

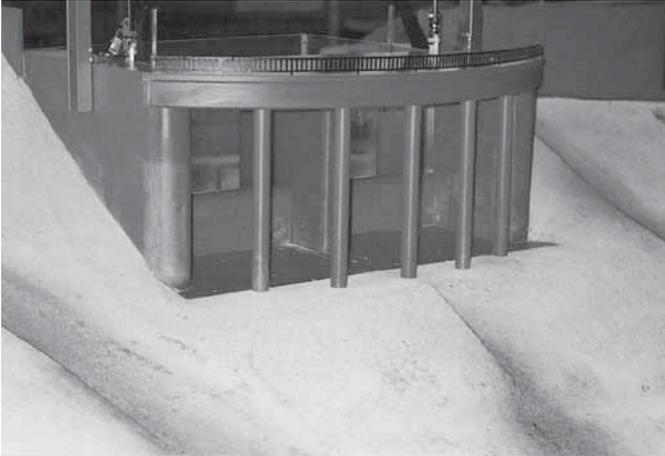


Abb. 4.18: Einlaufbauwerk der zusätzlichen neuen HWE2 im Modell



Abb. 4.19: Einlaufbauwerk der zusätzlichen neuen HWE2 im Prototyp

Wie bei der Hochwasserentlastungsanlage der Talsperre Grüntensee und bei der HWE1 ist auch der Rechen zum Schutz der HWE2 für einzelne Schwemmholzstämmen passierbar. Diese werden aber in Fließrichtung ausgerichtet und gefahrlos durch den geschlossenen Stollen ins Unterwasser transportiert. Die gefährlichen Holzgruppen werden zuverlässig und mit ausreichendem Abstand von der Überlaufschwelle zurückgehalten. Durch die ausreichend große Anströmungsfläche und die damit geringere Geschwindigkeit bzw. Froude-Zahl der Anströmung entsteht ein weniger kompakter Verkläusungskörper, der den Abflussquerschnitt weniger verringert und damit die Abflussleistung der Hochwasserentlastungsanlage nur in vertretbarem Maß reduziert. Beim Seepiegel in Höhe des Stauziels und dem Bemessungsabfluss für die HWE2 von $400 \text{ m}^3/\text{s}$ beträgt die Anströmungsfläche in der Rechenebene 6 Felder \times 4 m lichte Weite \times 8 m Fließtiefe = 192 m^2 . Die mittlere Anströmungsgeschwindigkeit des Rechens ergibt sich damit zu $v = 2,08 \text{ m/s}$ und die Froude-Zahl zu $Fr = 0,235$, also durchaus schon im kritischen Bereich. KNAUSS ET AL 1993 haben aber die Überlegung angestellt, dass bei einer schon als sehr gravierend anzusehenden Verlegung des obersten Meters der Fließtiefe die Anströmungsfläche um $6 \times 4 \text{ m} \times 1 \text{ m} = 24 \text{ m}^2$ auf 168 m^2 reduziert wird und die mittlere Anströmungsgeschwindigkeit auf $v = 2,38 \text{ m/s}$ steigt. Die Geschwindigkeitshöhe $v^2/2g$ und damit der Seepiegel würden unter Beibehaltung des Abflusses um etwa 7 cm ansteigen. Dieser Anstieg ist sicherlich tolerierbar. In Abb. 4.20, die das Einlaufbauwerk im Bemessungsfall ohne Verkläusung zeigt, ist ersichtlich, dass die Rechensäulen noch außerhalb der Abflussbeschleunigung zur Überlaufschwelle liegen. Abb. 4.21 zeigt das Einlaufbauwerk im Bemessungsfall mit einem lockeren, einlagigen Schwemmholzteppich, der am Rechen zurückgehalten wird.

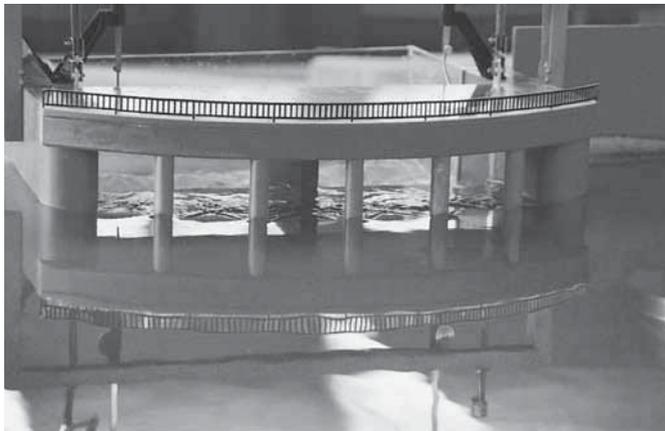


Abb. 4.20: Einlaufbauwerk der zusätzlichen neuen HWE2 im Bemessungsfall ($Q = 400 \text{ m}^3/\text{s}$, Oberwasserstand auf Höhe des Stauziels Z_s) ohne Verkläusung



Abb. 4.21: Einlaufbauwerk der zusätzlichen neuen HWE2 im Bemessungsfall ($Q = 400 \text{ m}^3/\text{s}$, Oberwasserstand auf Höhe des Stauziels Z_S) mit zurückgehaltenem Schwemmholzteppich

4.3 Wehranlage Baierbrunn

Im Gegensatz zu den bisher dargestellten Untersuchungen sollte bei der Wehranlage Baierbrunn an der Isar südlich von München im Auftrag der Eigentümerin und Betreiberin E.ON Wasserkraft GmbH eine Lösung der Verklausungsproblematik gefunden werden, die nicht im Schwemmholzurückhalt, sondern in der gezielten Durchleitung des Schwemmholzes durch die Wehranlage besteht (vgl. HARTLIEB ET AL 2003). Das große Einzugsgebiet und damit das große Schwemmholzpotential, das durch weitere geplante Renaturierungsmaßnahmen an der Isar noch erhöht wird, sowie die große Flussbreite und die großen Abflüsse erscheinen für einen funktionierenden Schwemmholzurückhalt ungeeignet. Außerdem gibt es ökologische Argumente, das Schwemmholz nicht aus dem Fluss zu entnehmen, sondern durch die wasserbaulichen Anlagen durchzuleiten. Die Wehranlage dient zur Ausleitung von Isarwasser in einen Kraftwerkskanal. Sie besteht aus fünf Wehrfeldern mit beweglichen Verschlüssen und einem im gegenwärtigen Zustand bis zur Wehrkrone verlandeten festen Wehr. In Fließrichtung links oberhalb der Wehranlage ist das Einlaufbauwerk in den Kraftwerkskanal angeordnet. In Abb. 4.22 ist die Wehranlage Baierbrunn im Lageplan skizziert. Abb. 4.23 zeigt die Wehrfelder 1-4 aufgenommen von der Brücke über das Einlaufbauwerk.

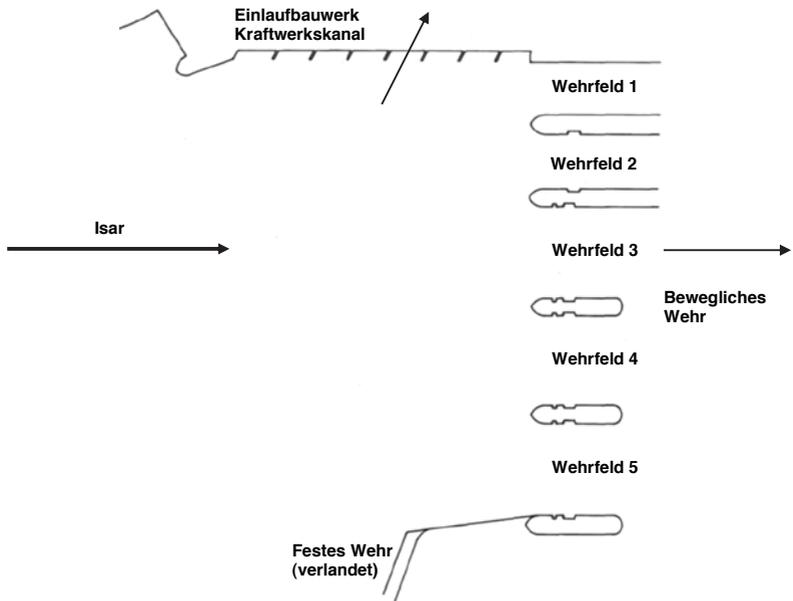


Abb. 4.22: Skizzierter Lageplan der Wehranlage Baierbrunn



Abb. 4.23: Blick von der Brücke über das Ausleistungsbauwerk auf die Wehrfelder 1-4

4.3.1 Theoretische Überlegungen

Es gibt zwar wenige, aber gut funktionierende Beispiele für Einrichtungen zur Verbesserung der Schwemmholzdurchleitung an Wasserbauten. Die effektivste Einrichtung stellen freistehende, senkrechte Pfähle im Oberwasserbereich des jeweiligen Bauwerks dar, an die querschwimmende Stämme anprallen und in Fließrichtung ausgerichtet werden. Als Beispiel sei der aufgrund eines Modellversuchs an der Versuchsanstalt für Wasserbau der ETH Zürich errichtete Pfahl vor dem Einlaufbauwerk des Geschiebeumleitstollens Campo Vallemaggia im Tessin genannt (VAW 1991).

Systematische Analysen der Schwemmholzzusammensetzung bei Hochwasserereignissen wurden in Mitteleuropa nur im Schweizer Alpenraum durchgeführt. Sie zeigen, dass Schwemmholz dort nur selten Längen über 10 m aufweist. Der Grund dürfte in der starken Zerkleinerung des Schwemmholzes durch den Transport in Wildbächen und Flüssen mit steilen Gefällen liegen. In der Isar oberhalb von Baierbrunn kann dagegen die Zerkleinerung von Schwemmholz beim Transport vernachlässigt werden. Deshalb ist am Wehr durchaus mit größeren Schwemmholzlängen zu rechnen, die den natürlichen Baumängen nahe kommen. Daher wurde für diese Untersuchungen von einer maximalen Schwemmholzlänge von $L_{\max} = 25$ m ausgegangen.

Die lichten Wehrfeldbreiten B_i der fünf Wehrfelder der Wehranlage Baierbrunn sind durchwegs deutlich kleiner als die erwarteten Schwemmholzlängen ($B_1 = 7$ m; $B_2 = 7,75$ m; $B_3 = B_4 = B_5 = 12$ m). Die Verklauungsgefahr ist also sehr groß. Wenn aber auf den Schwemmholzurückhalt verzichtet wird, muss eine Lösung für die Durchleitung gefunden werden. Hier sind freistehende Pfähle als Leiteinrichtung zu favorisieren, deren lichter Abstand die maximale Schwemmholzlänge L_{\max} übersteigt.

Bei der zunächst allgemeinen Betrachtung der Lage von Leitpfählen vor einer mehrfeldrigen Wehranlage drängt sich senkrecht zur Fließrichtung grundsätzlich eine Anordnung in der Achse jedes zweiten Wehrpfeilers auf, wenn die maximale Schwemmholzlänge L_{\max} größer ist als die Wehrfeldbreite B_i aber kleiner als die Summe aus zwei Wehrfeldbreiten und einer Pfeilerbreite B_p . Dies lässt sich mit Abb. 4.24 begründen, in der die zwei grundsätzlich verschiedenen Durchleitungsszenarien, auf die sich alle anderen zurückführen lassen, für einen unverzweigten Schwemmholzstamm in mehreren Zeitschritten schematisch dargestellt sind. In beiden Fällen schwimmt ein einzelner Stamm mit der Länge L_{\max} senkrecht zur Fließrichtung auf die Wehranlage zu:

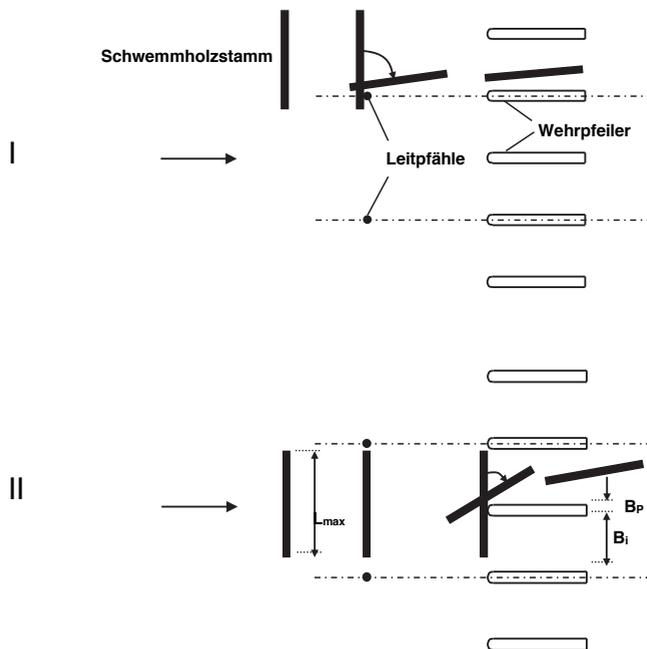


Abb. 4.24: Durchleitungsszenarien für einen querschwimmenden Schwemmholzstamm

Im Fall I prallt der Stamm in Fließrichtung rechts von seinem Schwerpunkt an einen Leitpfahl. Er wird durch den Strömungsdruck im Uhrzeigersinn um den Kontaktpunkt mit dem Leitpfahl gedreht und löst sich mit einer Achsrichtung wieder vom Leitpfahl, die nur noch wenig von der Fließrichtung abweicht. Ohne stärkere weitere Drehung und Versetzung quer zur Fließrichtung erfolgt dann die Durchleitung durch die Wehrpfeiler, wobei ein Anstoßen der beiden Enden an den Pfeilerwänden infolge der von den Pfeilerköpfen verursachten, Wand abweisenden Strömungswirbel nur noch sehr selten auftritt. Falls der Anprallpunkt des Schwemmholzstamms am Leitpfahl links von seinem Schwerpunkt liegt, tritt ein analoges Szenario auf, das zur Achse des Wehrpfeilers, auf der der Leitpfahl liegt, symmetrisch ist.

Im Fall II prallt der querschwimmende Schwemmholzstamm an keinen der Leitpfähle und wird deshalb auch nicht bis zu den Wehrpfeilern ausgerichtet. Der Anprall an einen Pfeilerkopf ist zwangsläufig. Da der Stamm in diesem Fall aber nicht so lang ist, dass er zwei Wehrfelder überspannt - sonst wäre er auch schon an den Leitpfählen aufgefangen worden - kann er sich in Abhängigkeit von der Lage des Schwerpunkts im Uhrzeigersinn (wie im dargestellten Fall) bzw. entgegen des Uhrzeigersinns um den Anprallpunkt drehen. Nach der

Ablösung vom Pfeilerkopf wird das linke bzw. rechte Wehrfeld passiert. Der Pfeilerkopf wirkt wie ein Leitpfahl.

Bei diesen Durchleitungsszenarien wird davon ausgegangen, dass im unmittelbaren Oberwasserbereich nur gering ausgeprägte Querströmungen im Vergleich zur Hauptströmung auftreten. Mit dieser Annahme ist es dann im Fall I unwahrscheinlich, dass sich ein einmal in Fließrichtung orientierter Stamm im Bereich zwischen Leitpfahl und Wehr noch einmal quer dreht. Und ein quer einschwimmender Stamm, der im Fall II die Leitpfähle ohne Anprall passiert hat, wird nur in seltenen Fällen seitlich so versetzt, dass er an zwei Pfeilerköpfen anprallt und das entsprechende Wehrfeld verlegt.

Die bisherigen Überlegungen münden für die Leiteinrichtung an der Wehranlage Baierbrunn in ein Konzept mit zwei Leitpfählen in den Achsen der Wehrpfeiler 2 und 4. Zu klären ist noch der Abstand der Leitpfähle von den Pfeilerköpfen sowie die Problematik des geringen Abstands ($< L_{\max}$) des in Fließrichtung linken Leitpfahls 1 vom Einlaufbauwerk und des rechten Leitpfahls 2 vom Eckpunkt des festen Wehrs:

Der erforderliche lichte Abstand A_L der Leitpfähle von den Pfeilerköpfen ergibt sich aus folgender Überlegung (siehe Abb. 4.25):

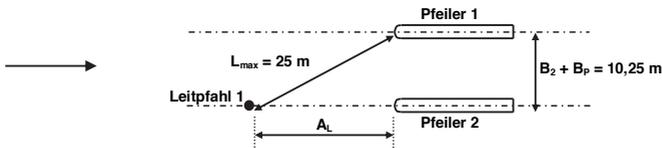


Abb. 4.25: Ermittlung des erforderlichen lichten Abstands A der Leitpfähle von den Pfeilerköpfen

Wenn ein Schwemmholzstamm mit der Länge $L_{\max} = 25 \text{ m}$ sich mit dem äußersten Ende um den Leitpfahl 1 dreht, muss er am Pfeiler 1 gerade noch vorbeikommen, darf aber am Pfeiler 2 anstoßen, um durch das Wehrfeld geleitet zu werden. Mit der Feldbreite $B_2 = 7,75 \text{ m}$ des maßgebenden Wehrfelds 2 und der Pfeilerbreite $B_P = 2,5 \text{ m}$ ergibt sich für den Abstand der Pfeilerachsen $10,25 \text{ m}$. Damit lässt sich A_L überschlägig berechnen:

$$A_L = \sqrt{L_{\max}^2 - (B_2 + B_P)^2} = \sqrt{25^2 - 10,25^2} \approx 23 \text{ m} \quad (\text{Gl. 4.3})$$

Bei einer den bisherigen Überlegungen entsprechenden Anordnung der Leitpfähle beträgt der lichte Abstand des Leitpfahls 1 vom nächsten Pfeilerkopf des Kanaleinlaufbauwerks etwa 17,5 m bzw. des Leitpfahls 2 vom Eckpunkt des festen Wehrüberfalls etwa 17 m. Da diese Abstände deutlich kleiner sind als die maximale Schwemmholzlänge L_{\max} und in der Richtung annähernd senkrecht zur Fließrichtung verlaufen, ist eine Verlegung mit querschwimmendem Schwemmholz möglich. Dies stellt zwischen Leitpfahl 1 und Kanaleinlaufbauwerk kein Problem dar, da in diesem Bereich eine Baggerräumung von der Brücke über den Kanaleinlauf möglich ist. Anders ist die Situation zwischen Leitpfahl 2 und festem Wehrüberfall. Hier sollte die Verlegung vermieden werden. Abhilfe könnte ein zusätzlicher Leitpfahl 3 schaffen, der im Bereich oberhalb von Leitpfahl 2 und Eckpunkt des festen Wehrüberfalls angeordnet wird, um analog wie die Leitpfähle 1 und 2 querschwimmenden Schwemmholzstämme auszurichten und zwischen Leitpfahl 2 und Eckpunkt des festen Wehrüberfalls hindurch zu leiten (siehe Abb. 4.26). Der lichte Abstand des Leitpfahls 3 von Leitpfahl 2, vom Eckpunkt des festen Wehrüberfalls bzw. vom rechten Ufer (Verlandungskörper) sollte jeweils mindestens $L_{\max} = 25$ m betragen. Abb. 4.26 zeigt die theoretisch ermittelte Anordnung der Leitpfähle im Oberwasserbereich der Wehranlage Baierbrunn:

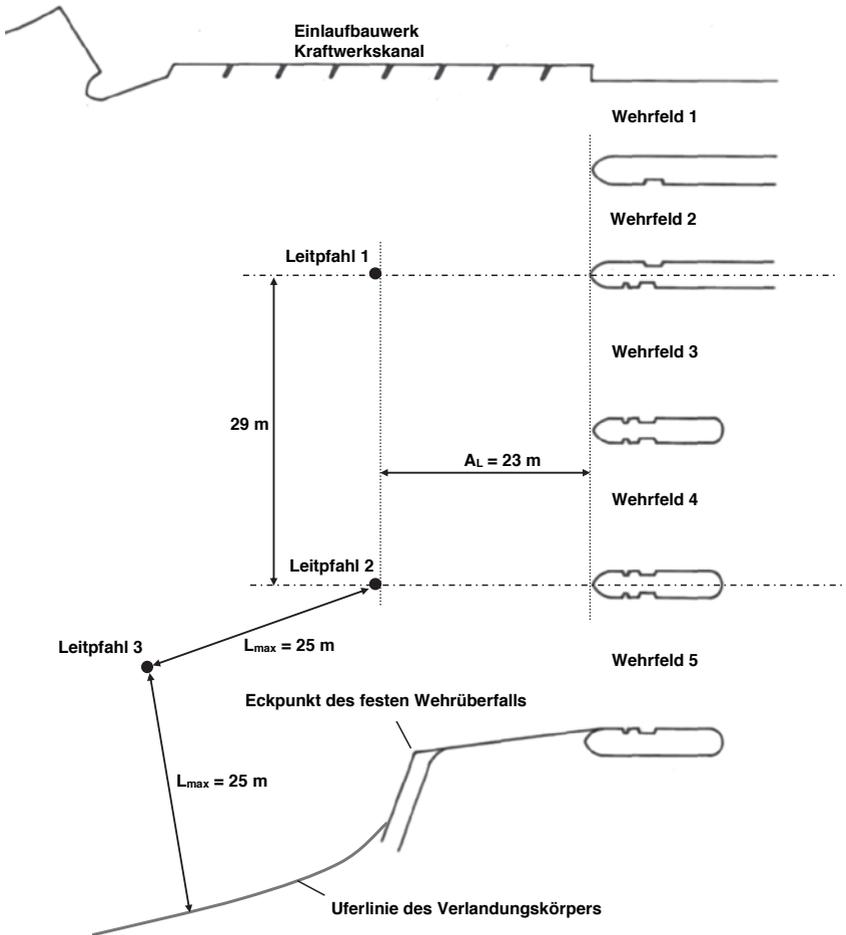


Abb. 4.26: Theoretisch ermittelte Anordnung der Leitpfähle im Oberwasserbereich der Wehranlage Baierbrunn (schematisch)

4.3.2 Überprüfung im Modellversuch

Die Überprüfung erfolgte im Jahr 2003 an einem Vollmodell der Wehranlage Baierbrunn (geometrischer Maßstab 1:25, Froude-Modell), das auch für Untersuchungen zur Energieumwandlung und zum Feststoffeintrag in den Ausleitungskanal verwendet wurde. Abb. 4.27 gibt einen Überblick über das Modell:

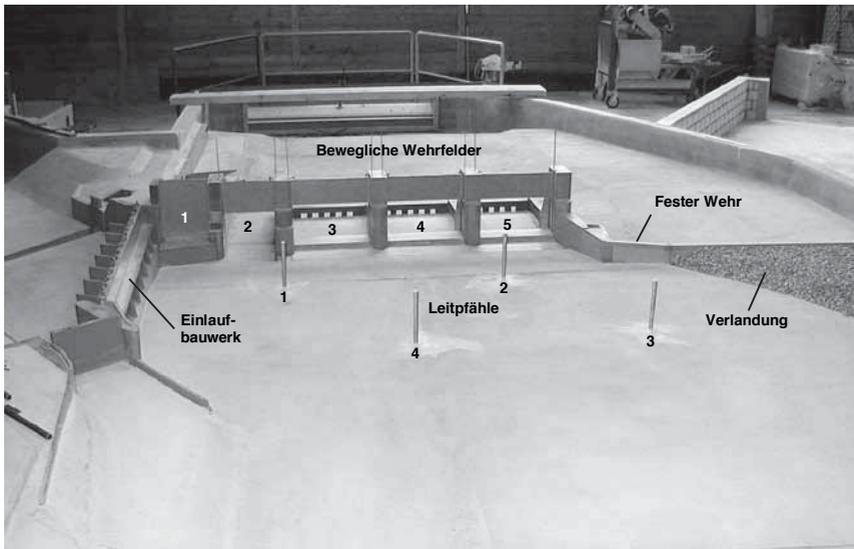


Abb. 4.27: Überblick über das Vollmodell der Wehranlage Baierbrunn im bereits optimierten Zustand (schematisch)

Für das Schwemmholzmaterial wurden im Modell Weidenäste auf eine Länge zwischen 80 und 100 cm zugeschnitten, die in der Natur 20 bis 25 m langen Stämmen entsprechen. Die Länge der Stämme und nicht der Grad der Verzweigung ist maßgebend für die relative Wirkung einer Leiteinrichtung, d.h. wenn die Wirkung einer Leiteinrichtung im Vergleich zu einer anderen besser ist, gilt das sowohl für unverzweigtes als auch für verzweigtes Holz. Deshalb wurde auf die Simulation von verzweigtem Holz bis hin zu ganzen Bäumen oder Wurzelstöcken verzichtet. Aber natürlich wird vor allem verzweigtes Holz immer wieder an den einzelnen Leitpfählen oder an einzelnen Wehrpfeilern hängen bleiben. Dies ist mit keiner Leiteinrichtung zu verhindern. In den Versuchen wurde das Schwemmholzmaterial im Oberwasserbereich einzeln oder in einer Ansammlung mehrerer Stämme per Hand zugegeben und im Unterwasser durch einen Rechen vor dem Ablauf abgefangen. Als Leitpfähle wurden Stahlrohre mit einem Außendurchmesser von 2,5 cm (im Prototyp: 62,5 cm) verwendet. Diese Rohre wurden für erforderliche Positionswechsel mit Schraubzwingen an verschiebbaren Balken und Kragarmen befestigt. Als maßgebender Lastfall für die Schwemmholzversuche wurde ein Abfluss $Q = 545 \text{ m}^3/\text{s} \approx 0,5 \cdot HQ_{100}$ über die vollständig geöffneten Wehrfelder 2 bis 5 bei geschlossenem Wehrfeld 1 und geschlossenem Einlaufbauwerk gewählt. Dabei ergab sich ein Oberwasserstand, der in Natur etwa 5 cm unter dem Stauziel $Z_S = 543,60 \text{ mNN}$ liegt. Dieser Abflusszustand war für zuverlässige und repräsentative Aussagen geeignet.

Referenzversuche ohne Leiteinrichtung bestätigten die Verklauungsgefahr der beweglichen Wehrfelder, insbesondere des Wehrfelds 2 mit der geringsten Breite der geöffneten Felder.

Anschließend wurde das in Kap. 4.3.1 theoretisch entwickelte Konzept mit den drei Leitpfählen getestet. Dabei zeigte sich, dass die drei Leitpfähle in dieser Anordnung grundsätzlich entsprechend den theoretischen Überlegungen wirken. Es konnte beobachtet werden, dass bei einem größeren Abstand der Leitpfähle 1 und 2 von den Wehrpfeilern ($A_L > 23$ m) die Verklauungsgefahr der Wehrfelder wieder ansteigt, weil sich dann bereits ausgerichtete Stämme bis zu den Pfeilerköpfen wieder in Querrichtung zurückdrehen können. In den theoretischen Überlegungen wurde allerdings nicht ausreichend berücksichtigt, dass infolge der seitlichen Einschnürung durch den festen Wehrkörper die Hauptströmung eine starke Komponente nach links erhält (siehe Abb. 4.28). Deshalb war es in den Versuchen zwar nicht oft, aber einige Male möglich, dass quer schwimmende Schwemmholzstämmen die beiden Leitpfähle 1 und 2 wie im Fall II (siehe Abb. 4.24) ohne Berührung passieren und dann so stark nach links versetzt werden, dass sie das Wehrfeld 3 verlegen. Als Konsequenz wurde ein vierter Leitpfahl oberhalb der Leitpfähle 1 und 2 errichtet. Da in diesem Bereich die Querkomponente der Strömung noch kaum vorhanden ist, ist eine Anordnung im gleichen Abstand ($L_{\max} = 25$ m) von den beiden Leitpfählen 1 und 2 sinnvoll. Durch den vierten Leitpfahl wurden im Versuch die meisten quer schwimmenden Stämme ausgerichtet und problemlos durch die Wehrfelder geleitet, die bisher berührungslos zwischen den Leitpfählen 1 und 2 hindurch schwammen. Abb. 4.29 zeigt Schwemmholzstämmen, die an den Leitpfählen 2 und 4 in Fließrichtung ausgerichtet wurden. In den Versuchen konnte auch nachgewiesen werden, dass größere Schwemmholzansammlungen durch die Leitpfähle zumindest teilweise aufgelöst und besser durch die Wehrfelder abgeführt werden (siehe Abb. 4.30). Als abschließendes Ergebnis der Modellversuche wurde die in Abb. 4.27 und Abb. 4.31 dargestellte Leiteinrichtung mit den vier Leitpfählen zur Ausführung vorgeschlagen. Mit dieser Leiteinrichtung kann die Verklauungsgefahr der Wehrfelder deutlich reduziert werden. Bei Entnahme des Verlandungsmaterials vor dem festen Wehr ändert sich die Strömungssituation oberhalb der Wehrfelder 1 bis 5 kaum. Die Wirkung der Leiteinrichtung wird dadurch nicht beeinflusst.

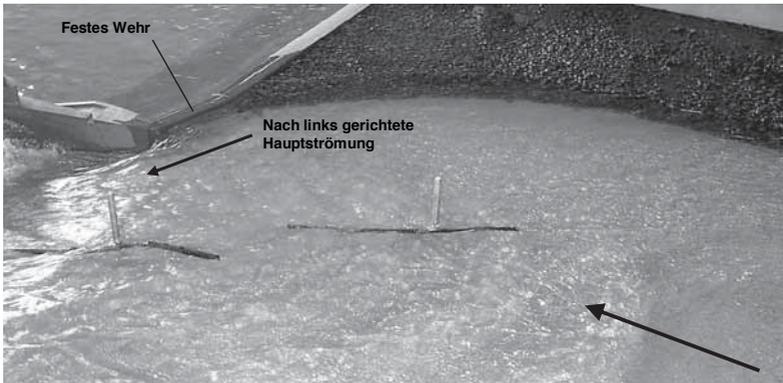


Abb. 4.28: Vom festen Wehrkörper verursachte, nach links gerichtete Hauptströmung



Abb. 4.29: Ausrichtung von einzelnen Schwemmholzstämmen an den Leitpfählen 2 und 4



Abb. 4.30: Auflösung und Ausrichtung einer Schwemmholzansammlung an den Leitpfählen 2 und 4

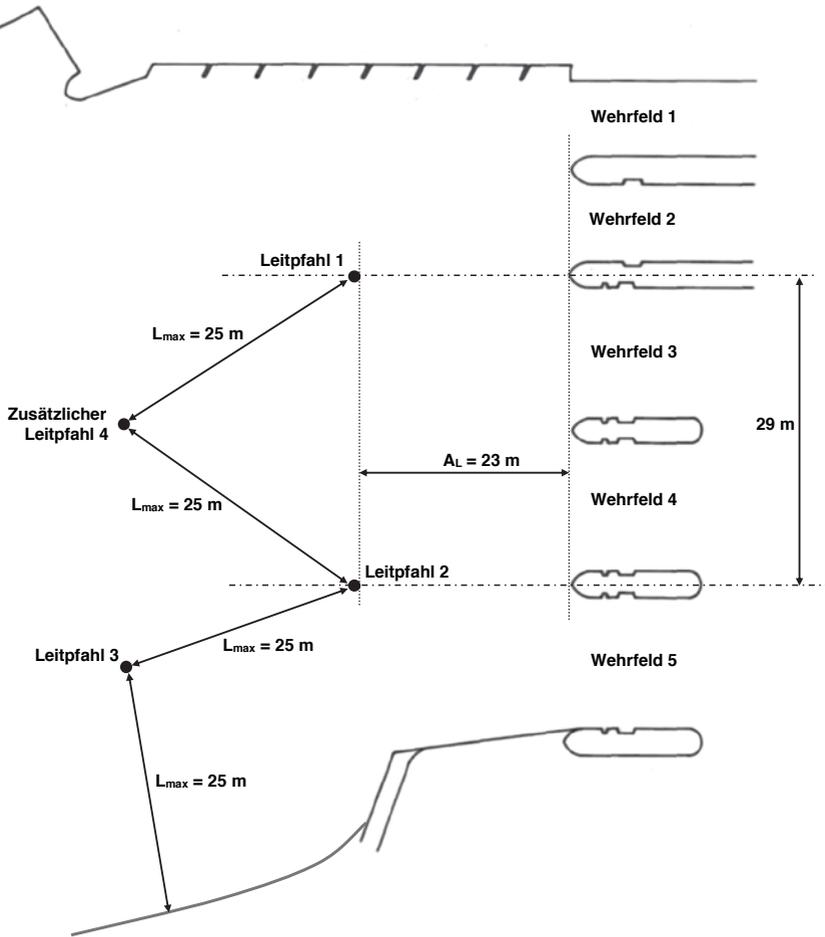


Abb. 4.31: Ausführungsvorschlag für die Anordnung der Leitpfähle im Oberwasserbereich der Wehranlage Baierbrunn (schematisch)

4.4 Neues Hydraulisches Kraftwerk Beznau

Die Axpo AG plant den Neubau ihres über 100 Jahre alten Ausleitungskraftwerks Beznau an der Aare in der Schweiz nur wenige Kilometer oberhalb der Mündung in den Hochrhein. Zur Überprüfung und Optimierung des Entwurfs für den Neubau wurde an der Versuchsanstalt Oberrach im Jahr 2011 ein hydraulischer Modellversuch (geometrischer Maßstab 1:40, Froude-Modell) durchgeführt. Abb. 4.32 zeigt einen Lageplan der Aare im Bereich des geplanten Kraftwerks, in dem der Modellausschnitt gestrichelt umrahmt ist, und Abb. 4.33 das Kraftwerk mit den drei Turbineneinläufen und der rechts daneben angeordneten einfeldrigen Hochwasserentlastungsanlage (HWE) mit geschlossenem Drucksegment und Aufsatzklappe. Vom Oberwasserkanal des Kraftwerks ist ein etwa 150 m langer Abschnitt abgebildet. Der im Modell dargestellte Aareabschnitt erstreckt sich auf eine Länge von 725 m.

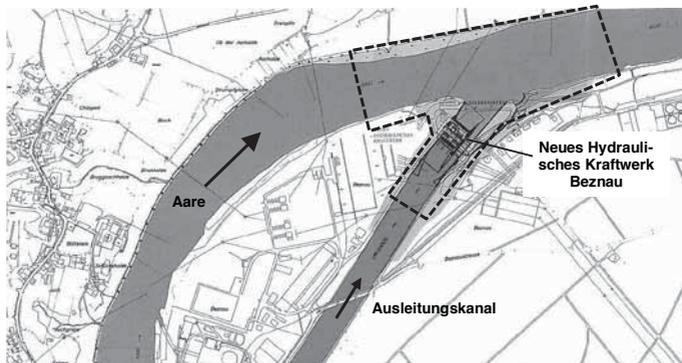


Abb. 4.32: Lageplan der Aare mit gestrichelt umrahmtem Modellausschnitt (Bildgrundlage: Axpo AG)

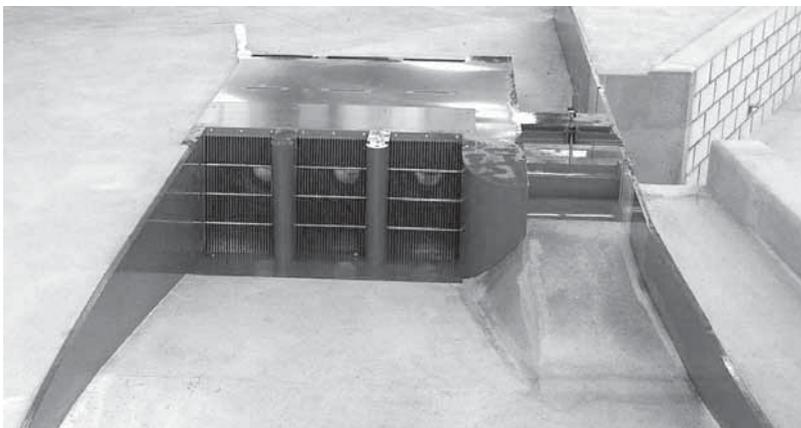


Abb. 4.33: Modell des Kraftwerks mit den drei Turbineneinläufen (links) und der HWE (rechts)

Schwerpunkte der Untersuchungen waren die An- und Abströmung des Kraftwerks, der Einfluss des Kraftwerksbetriebs auf die Sohl- und Uferstabilität der Aare im Bereich der Einmündung des Unterwasserkanals sowie die Abflussleistung und Energieumwandlung der HWE im Ausleitungskanal unmittelbar neben dem Kraftwerk. Zusätzlich wurden auch Versuche zum Schwemmholzverhalten vor den Kraftwerkseinläufen und zur Schwemmholzabfuhr über die HWE durchgeführt (vgl. HARTLIEB ET AL 2011). Für die Versuche wurde zum Großteil unverzweigtes Holz mit Längen von 5 m bis 12 m in Prototypmaßen verwendet, das kürzer war als die Breite der HWE mit 14 m. Die Versuche wurden in mehreren Schritten durchgeführt:

Zunächst wurde im Volllastbetrieb aller drei Turbinen und geschlossener HWE das Schwemmholz am Beginn des Oberwasserkanals im Modell gleichmäßig über die Breite verteilt zugegeben. Das einschwimmende Holz verteilt sich gleichmäßig auf die drei Einläufe und bildet dort einen vergleichsweise lockeren Schwemmholzteppich. Wenn kein neues Holz hinzukommt, bleibt dieser Zustand stationär, es kommt zu keinen Holzzirkulationen an der Wasseroberfläche. Abb. 4.34 zeigt das an den Kraftwerkseinläufen zurückgehaltene Schwemmholz:

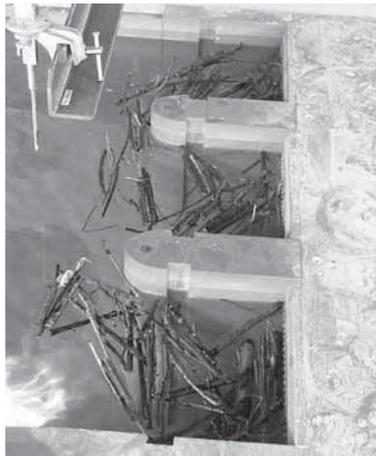


Abb. 4.34: Zurückgehaltenes Schwemmholz vor den Kraftwerkseinläufen bei Volllastbetrieb

Im zweiten Schritt wurde ohne Steigerung des Zuflusses die HWE vollständig geöffnet. Dies hat keinerlei Auswirkungen auf die Holzansammlungen vor den Kraftwerkseinläufen. Nachdem die HWE wieder geschlossen wurde und das Stauziel im Oberwasserkanal wieder erreicht war, wurde die rechte Turbine geschlossen und gleichzeitig die HWE vollständig geöffnet. Das Schwemmholz vor dem rechten Kraftwerkseinlauf lagert sich ausnahmslos zu den anderen Einläufen um. Kein einziges Schwemmholzelement bewegt sich auch nur in Richtung der HWE, von einer Abfuhr von Schwemmholz über die HWE ganz zu schweigen.

Ein analoges Verhalten ist zu beobachten, wenn statt der rechten Turbine die mittlere oder linke Turbine bei gleichzeitiger Öffnung der HWE geschlossen wird. Die HWE besitzt also auch bei nur eingeschränktem Kraftwerksbetrieb keine Abfuhrwirkung für Schwemmholz, das sich bereits vor den Kraftwerkseinläufen angesammelt hat.

Schließlich wurde noch die Abfuhrwirkung der HWE untersucht, wenn die HWE bei Volllastbetrieb des Kraftwerks schon beim Einschwimmen des Schwemmholzes vollständig geöffnet ist. Über die HWE wird dann nur das Schwemmholz ins Unterwasser abgeführt, das entsprechend der Breite der HWE nahe an der rechten Begrenzungsmauer des Kanals herantransportiert wird. Die HWE besitzt also bei Volllastbetrieb des Kraftwerks keine Wirkung in den linken und mittleren Kanalbereich. Außerdem ist die Abfuhrwirkung der HWE sehr begrenzt, wenn bei Volllastbetrieb des Kraftwerks nur die Aufsatzklappe der HWE vollständig geöffnet wird.

Ohne Kraftwerksbetrieb besitzt die vollständig geöffnete HWE bei einem Oberwasserstand in Höhe des Stauziels eine gute Abfuhrwirkung. Ein Großteil des über die gesamte Kanalbreite im Modell zugegebenen Schwemmholzes wird direkt über die HWE abtransportiert (siehe Abb. 4.35). Nur ein kleiner Teil des einschwimmenden Holzes gelangt überhaupt in den Bereich vor den Kraftwerkseinläufen (insbesondere vor den rechten Einlauf), bleibt aber durch die großräumige Zirkulationsströmung an der Wasseroberfläche vor den Kraftwerkseinläufen in Bewegung und wird früher oder später um den Trennpfeilerkopf zur HWE gezogen. Nur ganz vereinzelte Schwemmholzelemente halten sich dauerhaft vor den Kraftwerkseinläufen, insbesondere vor dem rechten Einlauf.



Abb. 4.35: Schwemmholzabfuhr bei vollständig geöffneter HWE ohne Kraftwerksbetrieb

Der Schwemmholzanfall an den Kraftwerkseinläufen und die -abfuhr über die HWE könnte mit einem oberhalb des Kraftwerks installierten schrägen Schwimmbalken verbessert werden. Diese Überlegung wurde in den Versuchen allerdings nicht weiter verfolgt.

4.5 Wehranlage Winznau

Die Wehranlage Winznau bei Olten in der Schweiz dient zum Aufstau der Aare und zur Ausleitung des Abflusses in den Ausleitungskanal des Wasserkraftwerks Gösgen. Angesichts des fast hundertjährigen Bestehens der Wehranlage und der Neukonzessionierung des Kraftwerks Gösgen ist eine umfassende Sanierung des Wehrbauwerks geplant. Dabei sollen als wesentliche Maßnahmen der Wehroberbau abgebrochen, eine neue Wehrbrücke errichtet, die Hubhakenschützen in den fünf Wehrfeldern durch Drucksegmente mit Aufsatzklappen ersetzt und ein neues Tosbecken gebaut werden. Außerdem muss für die Abflussleistung im Hochwasserfall das bestehende Dotierkraftwerk mit einer Heberturbine im rechten Wehrfeld rückgebaut werden. Als Ersatz ist ein neues Dotierkraftwerk am rechten Ufer geplant. In einem von der Eigentümerin und Betreiberin der Wehranlage und des Kraftwerks, der Alpiq Hydro Aare AG, beauftragten hydraulischen Modellversuch (geometrischer Maßstab 1:40, Froude-Modell) an der Versuchsanstalt Oberrach in den Jahren 2012 und 2013 wurde die Planung für die zu sanierende Wehranlage überprüft und optimiert. Abb. 4.36 zeigt ein Luftbild der Aare im Bereich des Stauwehrs Winznau, in dem der Modellausschnitt gestrichelt umrahmt ist. Abb. 4.37 vermittelt einen Überblick über das Modell im Hochwasserfall. Das Modell beginnt ca. 600 m oberhalb des Wehrs vor der markanten Rechtskurve in der Aare und endet ca. 150 m unterhalb des Wehrs. Der oberhalb des Wehrs abzweigende Ausleitungskanal des Kraftwerks Gösgen ist im Modell auf einer Länge von ca. 120 m enthalten.

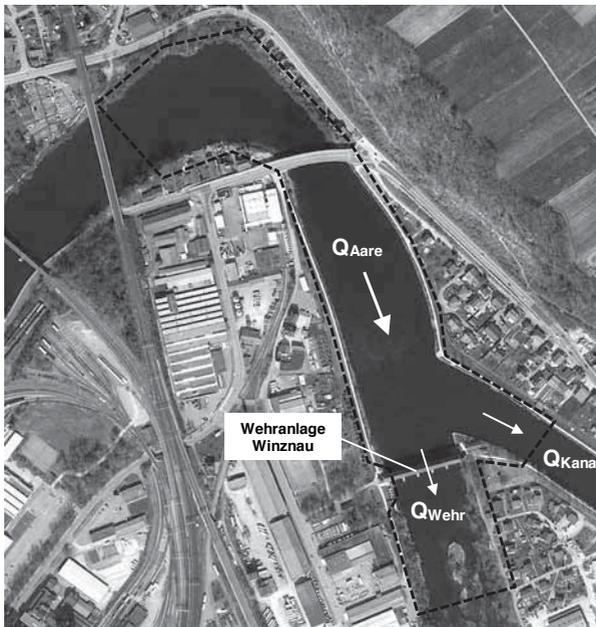


Abb. 4.36: Luftbild der Aare im Bereich des Stauwehrs Winznau mit gestrichelt umrahmtem Modellausschnitt (Bildgrundlage: maps.google.de)

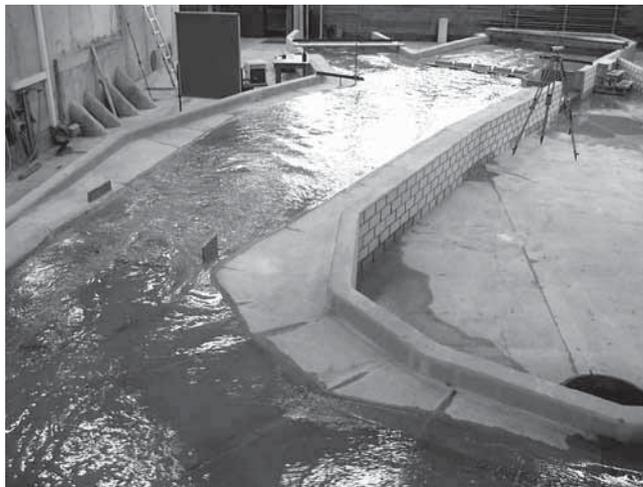


Abb. 4.37: Überblick über das Modell der Wehranlage Winznau im Hochwasserfall

Ein Aspekt der Modellversuche war das Schwemmholzverhalten an der Wehranlage bzw. am Kanaleinlauf im Hochwasserfall (vgl. HARTLIEB ET AL 2013). Schwemmholz mit einer Länge, die kürzer ist als die Breite der Wehrfelder, stellt für Wehranlagen eine nur sehr geringe Verklausungsgefahr dar (siehe Kap. 3.3). Deshalb wurden für die Schwemmholzversuche bei einer Breite der fünf Wehrfelder zwischen 15,53 m und 15,69 m Holzstämmen mit einer Länge von 20 m und 26 m in Prototypmaßen verwendet. Für die Untersuchungen wurde die Verwendung von nicht verzweigten Stämmen als ausreichend erachtet. Die Schwemmholzstämmen wurden einzeln bzw. in Gruppen von 15 Stämmen ($10 \cdot 20 \text{ m} + 5 \cdot 26 \text{ m}$) willkürlich im Modellzulauf zugegeben. Für eine gewisse statistische Belastbarkeit der Versuchsergebnisse wurden die Versuche in jeder Konstellation jeweils zehnmal durchgeführt, d.h. in jedem Lastfall wurden nacheinander und nach der Beseitigung von Holzansammlungen sowohl 10 Einzelhölzer als auch 10 Holzgruppen zugegeben. In Tab. 4.1 sind die Lastfälle der Schwemmholzversuche aufgeführt:

$Q_{\text{Aare}} [\text{m}^3/\text{s}]$	$Q_{\text{Wehr}} [\text{m}^3/\text{s}]$	$Q_{\text{Kanal}} [\text{m}^3/\text{s}]$	Wehröffnung
700	305	395	Aufsatzklappen drei mittlere Felder vollständig; Klappen äußere Felder teilweise; Drucksegmente drei mittlere Felder teilweise
700	550	150	Aufsatzklappen drei mittlere Felder vollständig; Klappen äußere Felder teilweise; Drucksegmente drei mittlere Felder teilweise
1650	1500	150	alle fünf Felder vollständig (n-Fall)
1650	1500	150	vier rechte Felder vollständig [(n-1)-Fall]
1950	1800	150	alle fünf Felder vollständig (n-Fall)

Tab. 4.1: Lastfälle der Schwemmholzversuche

In allen Lastfällen gelangt das im Modellzulauf zugegebene Schwemmholz bedingt durch die Anströmung in der Rechtskurve am linken Ufer in den Stauraum und wird durch die dortigen höheren Fließgeschwindigkeiten zum Großteil in Fließrichtung ausgerichtet (siehe Abb. 4.38). Diese Ausrichtung wird in den Holzgruppen durch Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Stämmen teilweise behindert.



Abb. 4.38: Eintrag einer Schwemmholzgruppe am linken Aareufer für $Q_{\text{Aare}} = 1650 \text{ m}^3/\text{s}$

Beim Wehrabfluss $Q_{\text{Wehr}} = 305 \text{ m}^3/\text{s}$ und Ausbauabfluss im Kanal $Q_{\text{Kanal}} = 395 \text{ m}^3/\text{s}$ gelangt das einzeln wie in Gruppen zugegebene Schwemmholz in allen Fällen ohne Anprall an der rechten Ufermauer am Kanalbeginn in den Kanal und wird dort abgeführt (siehe Abb. 4.39).



Abb. 4.39: Eintrag einer Schwemmholzgruppe in den Kanal ohne Anprall am rechten Kanalufer im Lastfall $Q_{\text{Wehr}} = 305 \text{ m}^3/\text{s}$ und $Q_{\text{Kanal}} = 395 \text{ m}^3/\text{s}$

Bei gleichem Zufluss $Q_{\text{Aare}} = 700 \text{ m}^3/\text{s}$, aber erhöhtem Wehrabfluss $Q_{\text{Wehr}} = 550 \text{ m}^3/\text{s}$ und vermindertem Kanalabfluss $Q_{\text{Kanal}} = 150 \text{ m}^3/\text{s}$ gelangen die einzeln zugegebenen Schwemmholzstämmе mit einer Ausnahme in den Kanal, häufig nach einem Anprall an der rechten Ufermauer am Kanalbeginn (siehe Abb. 4.40 links). Im einen Ausnahmefall berührt der Stamm kurz vor dem Kanalbeginn das linke Aareufer, wird quer zur Fließrichtung ausgerichtet und verklaut dauerhaft das zweite Wehrfeld von links. Die in diesem Lastfall zugegebenen Holzgruppen prallen in allen Fällen an das Trennungsbauwerk zwischen Wehr und Kanal und bleiben zu einem größeren Teil daran hängen (siehe Abb. 4.40 rechts). Bei der plötzlichen Loslösung dieser Holzansammlungen besteht eine große Gefahr der Verklauung einzelner Wehrfelder auch infolge der Teilöffnung der Wehrfelder.



Abb. 4.40: Anprall eines einzelnen Schwemmholzstamms an die rechte Ufermauer am Kanalbeginn (links) und Ansammlung einer Holzgruppe am Trennungsbauwerk zwischen Wehr und Kanal (rechts) im Lastfall $Q_{\text{Wehr}} = 550 \text{ m}^3/\text{s}$ und $Q_{\text{Kanal}} = 150 \text{ m}^3/\text{s}$

In den untersuchten, extremen Hochwasserlastfällen mit den Zuflüssen $Q_{\text{Aare}} = 1650 \text{ m}^3/\text{s}$ bzw. $Q_{\text{Aare}} = 1950 \text{ m}^3/\text{s}$ ($HQ_{1000} = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$) prallt ein Großteil des einzeln wie in Gruppen zugegebenen Schwemmholzes durch die hohe Anströmungsgeschwindigkeit an das Trennungsbauwerk zwischen Wehr und Kanal (siehe Abb. 4.41 links). Im Fall der Schwemmholzzugabe in Gruppen kommt es häufig zur Ansammlung mehrerer Stämme am Trennungsbauwerk (siehe Abb. 4.41 rechts), die bei der gemeinsamen Loslösung eine Verklauungsgefahr für die Wehrfelder darstellt. Möglicherweise könnte durch eine Ausrundung des Trennungsbauwerks zwischen Wehr und Kanal die Wahrscheinlichkeit gefährlicher Holzansammlungen reduziert werden.

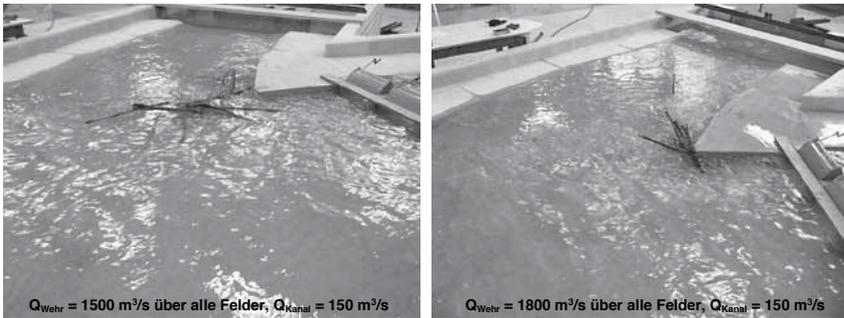


Abb. 4.41: Holzgruppe kurz vor (links) und nach (rechts) dem Anprall an das Trennungsbauwerk zwischen Wehr und Kanal bei extremen Hochwasserlastfällen

Hinsichtlich der quantitativen Schwemmholzaufteilung im Hochwasserfall gelangen in den beiden n-Fällen etwa gleich viele Stämme in den Kanal wie über das Wehr abgeführt werden. Am Wehr erfolgt die Abfuhr fast ausschließlich über das linke Feld und nur in wenigen Ausnahmefällen über das benachbarte Feld. Im (n-1)-Fall mit dem geschlossenen linken Feld verlagert sich die gesamte Anströmung etwas nach rechts und es gelangt etwas weniger Schwemmholz in den Kanal. Die Schwemmholzabfuhr am Wehr erfolgt ausschließlich über das zweite Feld von links.

In den Hochwasserlastfällen passieren die über das Wehr abgeführten Schwemmholzstämme in der Regel ohne Probleme die vollständig geöffneten Wehrfelder (siehe Abb. 4.42 links). In den Versuchen trat keine einzige dauerhafte Verklauung eines Wehrfelds mit einem quer davor liegenden Stamm auf. In wenigen Fällen entwickelte sich ein instabiler Verharrungszustand einzelner Stämme am Pfeiler zwischen den beiden linken Feldern. Ein Teil des zunächst in den Kanal gelangten Schwemmholzes wird durch eine linksdrehende Zirkulationsströmung im Kanaleinlauf und die Rückströmung am linken Kanalufer wieder zurück in die Hauptströmung der Aare transportiert (siehe Abb. 4.42 rechts). Von hier ist erneut der Weg in den Kanal oder über das Wehr möglich.

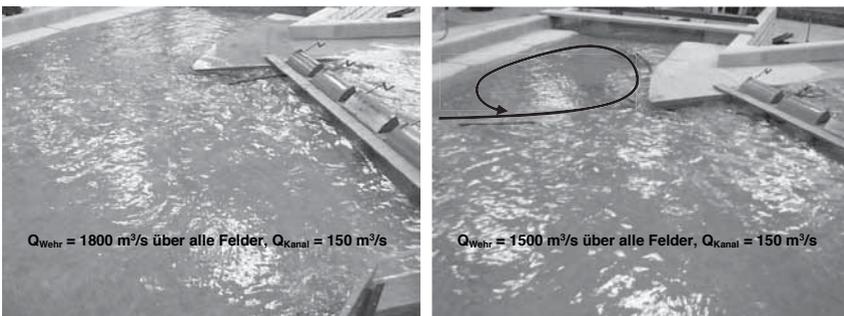


Abb. 4.42: Durchleitung eines Schwemmholzstamms durch das linke Wehrfeld (links) und Rückströmung von Schwemmholz am linken Kanalufer in die Hauptströmung der Aare (rechts) bei extremen Hochwasserlastfällen

5 Numerische Simulation von Schwemmholzverklausungen

Als Einstieg in dieses Thema, das weitgehend Neuland darstellt, wurde von BAUMANN 2009 versucht, die hydraulischen Versuche zum Anstieg des Oberwasserstands infolge von Verklausungen einer einfeldrigen Wehranlage, die in Kap. 3.5.1 beschrieben werden, in einem numerischen Modell zu simulieren. Die dreidimensionale Geometrie des numerischen Modells wurde mit dem Programm Autocad 2010 erstellt. Für die hydraulischen Simulationen wurde das CAD-Modell in das Programm Flow3d importiert. Die Kalibrierung des numerischen Modells erfolgte dann an der im hydraulischen Modell ermittelten Oberwasserstand-Abfluss-Beziehung für die einfeldrige Wehranlage im Falle der vollständigen Öffnung des Drucksegments.

Bei den Berechnungen mit Schwemmholz wurde in allen Fällen eine Verklausung am Wehrfeld vorgegeben, der Verklausungsprozess selbst wurde nicht simuliert. Dafür sind die erforderlichen Rechenzeiten zu lang. Außerdem kann eine Interaktion der Schwemmholzelemente untereinander nicht modelliert werden. Im ersten Schritt wurde für einen einlagigen Schwemmholzteppich in der numerischen Simulation stark vereinfachend ein monolithischer Körper in Form eines dünnen, vollständig undurchlässigen Quaders mit den Abmessungen 2,1 m x 0,5 m x 0,05 m und der Rohdichte 750 kg/m³ angesetzt. Ohne Einschränkung der Freiheitsgrade für die Bewegung kommt es dann in der Simulation dazu, dass sich der Quader um 90° dreht und den Abflussquerschnitt komplett versperrt. Dieses Verhalten ist im Vergleich zum physikalischen Modell wie auch zum Prototyp, bei denen der Verklausungskörper aus einzelnen Elementen besteht, fern der Realität. Außerdem pendelt der Quader in der numerischen Simulation vor und zurück. Es entwickelt sich im Gegensatz zum hydraulischen Modell kein stationärer Zustand. Die 90°-Drehung des Quaders lässt sich im numerischen Modell dadurch verhindern, dass nur die lineare Bewegung in z-Richtung (Vertikale) zugelassen wird. Dann ergibt sich ein realistisches Verklausungsverhalten des Quaders und ein stationärer Zustand stellt sich ein. In Tab. 5.1 sind die Fließgeschwindigkeit v und die Froude-Zahl Fr der Anströmung sowie der durch die Verklausung verursachte Anstieg des Oberwasserstands ΔH in Relation zur Überströmungshöhe H ohne Verklausung sowohl für die numerische Simulation mit dem quaderförmigen Verklausungskörper als auch für die beiden Modellversuche mit den annähernd gleichen hydraulischen Bedingungen aufgelistet:

	v [m/s]	Fr	$\Delta H/H$ [%]
Simulation	0,144	0,062	1,49
Modellversuch	0,155	0,068	0,87
Modellversuch (Wiederholung)	0,155	0,068	5,68

Tab. 5.1: Vergleich der Ergebnisse der numerischen Simulation für den quaderförmigen Verklauungskörper mit Ergebnissen der hydraulischen Modellversuche

Der Anstieg des Oberwasserstands infolge der Verklauung liegt in der numerischen Simulation mit $\Delta H/H = 1,49$ % im Bereich des großen Spektrums von $\Delta H/H = 0,87$ % bis 5,68 %, das sich in den beiden Modellversuchen trotz identischer Randbedingungen durch Zufälligkeiten bei der Bildung des Verklauungskörpers ergab.

Für weitere Simulationen wurde der monolithische Verklauungskörper im numerischen Modell beibehalten, seine Form aber verändert: die Dicke des bisherigen Quaders wurde einmal abgestuft, so dass der Verklauungskörper am Wehrfeld deutlich mächtiger war als an der Oberwasserseite. Dadurch wollte man der Beobachtung aus den Modellversuchen Rechnung tragen, dass bei höheren Geschwindigkeiten bzw. Froude-Zahlen der Anströmung zumindest einzelne Schwemmholzelemente nahe am Wehrfeld abtauchen und sich dort ein mehrlagiger Verklauungskörper bildet. Auch bei dem abgestuften Verklauungskörper wurde nur eine lineare vertikale Bewegung zugelassen. In Tab. 5.2 sind die Fließgeschwindigkeit v und die Froude-Zahl Fr der Anströmung sowie der Aufstauwert $\Delta H/H$ sowohl für die numerischen Simulationen mit dem abgestuften Verklauungskörper als auch für die Modellversuche mit den annähernd gleichen hydraulischen Bedingungen aufgelistet:

	v [m/s]	Fr	$\Delta H/H$ [%]
Simulation	0,144	0,062	48,13
Simulation	0,208	0,082	44,00
Simulation	0,282	0,101	33,59
Simulation	0,360	0,118	6,96
Modellversuch (Mittelwert)	0,155	0,068	3,28
Modellversuch (Mittelwert)	0,178	0,066	6,63
Modellversuch	0,212	0,066	5,33
Modellversuch	0,252	0,069	3,28
Modellversuch	0,386	0,162	7,00
Modellversuch	0,458	0,170	6,49

Tab. 5.2: Vergleich der Ergebnisse der numerischen Simulationen für den abgestuften Verklauungskörper mit Ergebnissen der Modellversuche

Mit steigender Geschwindigkeit v bzw. Froude-Zahl Fr der Anströmung sinken die in den numerischen Simulationen ermittelten Aufstauwerte $\Delta H/H$ deutlich. Dies widerspricht einer der wesentlichen Erkenntnisse der Modellversuche, dass der verklauungsbedingte Aufstau mit steigender Geschwindigkeit bzw. Froude-Zahl der Anströmung zunimmt. Außerdem liegen die Aufstauwerte der Simulationen für die kleineren Geschwindigkeiten bzw. Froude-

Zahlen der Anströmung mit $\Delta H/H > 30\%$ um eine Größenordnung über den Werten der Modellversuche. Erst in der Simulation mit den größten Werten $v = 0,36$ m/s bzw. $Fr = 0,118$ ergibt sich mit $\Delta H/H = 6,96\%$ ein Aufstauwert in der gleichen Größenordnung wie in den Modellversuchen. Der Grund für die von den Modellversuchen stark abweichenden Ergebnisse der Simulationen dürfte in der willkürlich gewählten Abmessung des Verklausungskörpers liegen. Für die größte Geschwindigkeit v bzw. Froude-Zahl Fr der Anströmung entspricht die Mächtigkeit des Verklausungskörpers und damit der Anteil des verlegten Abflussquerschnitts in der Simulation zufällig den Verhältnissen in den Modellversuchen. Mit abnehmender Geschwindigkeit und Froude-Zahl der Anströmung, die in den Modellversuchen mit einlagigen Schwemmholzteppichen einhergehen, wird dieser Verklausungskörper in den Simulationen jedoch zunehmend in der Mächtigkeit überschätzt. Der Anteil des verlegten Abflussquerschnitts wird dadurch in den Simulationen unrealistisch groß. Eine Möglichkeit, der Realität einen kleinen Schritt näher zu kommen, wäre die Vorgabe einer gewissen Durchlässigkeit des monolithischen Verklausungskörpers. Dies wurde aber bisher nicht weiter verfolgt.

Ein Versuch, den Verklausungskörper nicht als Monolith, sondern näher an der Realität als Ansammlung von einzelnen, voneinander unabhängig beweglichen Zylindern zu simulieren, ist an einer nicht ausreichenden Rechnerleistung und an fehlerhaften Verschmelzungsvorgängen von sich berührenden Schwemmholzelementen gescheitert. Die hier beschriebenen Simulationen waren nur ein erster Einstieg in die numerische Berechnung von Schwemmholzverklausungen. Hier sind noch große Fortschritte in der Entwicklung erforderlich, die einerseits eine höhere Rechnerleistung und entsprechend kürzere Rechenzeiten betreffen sowie andererseits ein funktionierendes Kollisionsmodell für die Interaktion zwischen den einzelnen Schwemmholzelementen. Eine entsprechende Weiterentwicklung wurde von RUIZ VILLANUEVA ET AL 2014 veröffentlicht. Die Autoren befassen sich mit der zweidimensionalen numerischen Simulation des Schwemmholztransports in einer Hochwasserströmung.

6 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

6.1 Vorgehen bei der Konzeptplanung von Schutzmaßnahmen für Siedlungsräume vor Schwemmh Holzgefahren (Gesamtbetrachtung im Einzugsgebiet)

In Abb. 6.1 ist das grundsätzliche Vorgehen bei der Konzeptplanung von Schutzmaßnahmen für Siedlungsräume vor Schwemmh Holzgefahren in einem Ablaufschema zusammengefasst. Das Vorgehen wird anschließend genauer erläutert. Dabei handelt es sich um eine auf das Einzugsgebiet bezogene Gesamtbetrachtung.

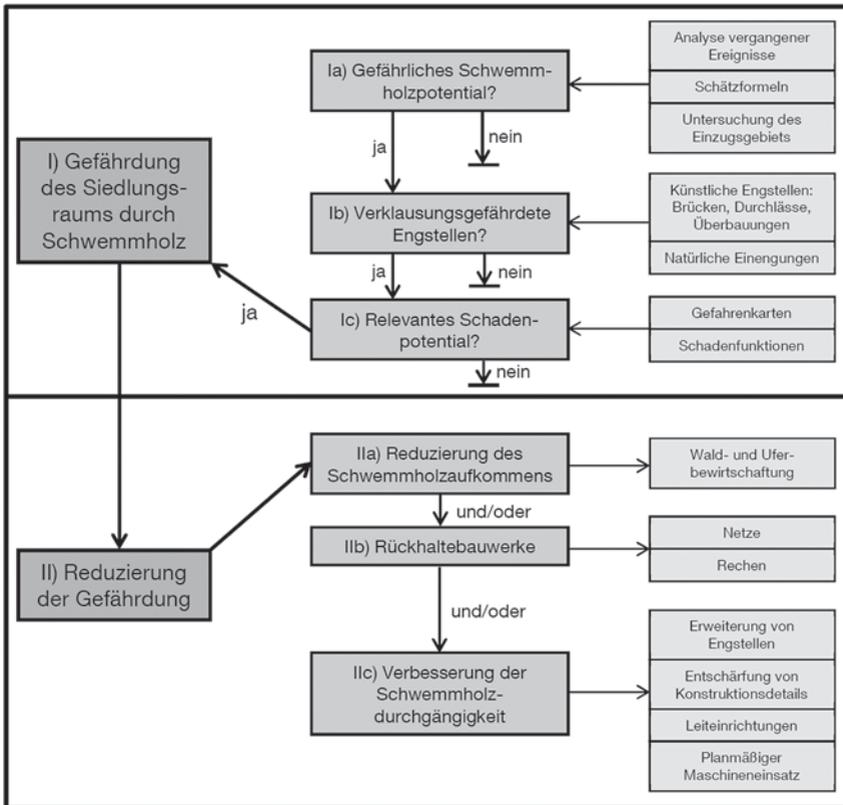


Abb. 6.1: Ablaufschema für das grundsätzliche Vorgehen bei der Konzeptplanung von Schutzmaßnahmen für Siedlungsräume vor Schwemmh Holzgefahren (Gesamtbetrachtung im Einzugsgebiet)

l) Überprüfung der Gefährdung des Siedlungsraums durch Schwemmholz

Unabhängig davon, ob schon ein entsprechendes Schadenereignis stattgefunden hat (häufig werden erst dann konkrete Schutzmaßnahmen in Angriff genommen), ist zunächst die Gefährdung des Siedlungsraums durch Schwemmholz zu ermitteln. Drei Kriterien müssen erfüllt sein, um von einer Gefährdung zu sprechen: ein gefährliches Potential von im Gewässer transportiertem Schwemmholz, die Existenz von verklausungsgefährdeten Engstellen im Gewässer und gravierende Schäden im Verklausungsfall (Schadenpotential).

la) Bestimmung der zu erwartenden Schwemmholzmenge (siehe Kap. 1.2)

Die Schwemmholzmenge bzw. das -potential kann auf mehreren, im Aufwand deutlich unterschiedlichen Wegen bestimmt werden:

- Auswertung von Daten über Schwemmholz mengen bei vergangenen Ereignissen im betrachteten Gewässer. Häufig liegen aber solche Daten überhaupt nicht oder nur in unzureichendem Maße vor.
- Empirische Formeln, die durch die Auswertung von zahlreichen Ereignissen an verschiedenen Gewässern ermittelt wurden, für eine erste, sehr grobe Abschätzung. Hier werden die Schwemmholzmenge bzw. das -potential in Abhängigkeit von der Fläche des gesamten oder des bewaldeten Einzugsgebiets, von der bewaldeten Gerinnelänge, von der Wasserfracht oder von der Feststofffracht eines Hochwasserereignisses bestimmt.
- Eingehende Untersuchung des Einzugsgebiets bezüglich Bewaldung, Waldzustand, Hangneigung, Geologie, Gewässergefälle, Abflussprozessen usw. für eine genauere Abschätzung. Durch neue luftbild- oder GIS-basierte Methoden reduziert sich der Aufwand für diese Untersuchungen.

In vielen Fällen ist aber die maximale Schwemmholzmenge oder das Schwemmholzpotential nicht relevant, weil schon beim Auftreten geringerer kritischer Schwemmholzmengen Folgen auftreten, die sich auch bei höherem Schwemmholzaufkommen nur noch unwesentlich verschärfen. Dann genügt die Überprüfung, ob im Hochwasserfall generell mit Schwemmholzanfall zu rechnen ist.

lb) Identifikation von verklausungsgefährdeten Engstellen

Das gesamte Gewässer oberhalb und im Siedlungsbereich ist im Hinblick auf künstliche Engstellen wie Brücken, Durchlässe und Überbauung, aber auch auf natürliche Gewässerengungen zu untersuchen.

lc) Abschätzung des Schadenpotentials

Im betrachteten Siedlungsraum sind die Schäden abzuschätzen, die Schwemmholzverklausungen insbesondere beim Ausbruch des Gewässers aus dem vorgegebenen Gerinne verursachen können. Hier werden die flächendeckende Erstellung von Gefahrenkarten und standardisierte Methoden zur Erhebung des Schadenpotentials mit Schadenfunktionen in Abhängigkeit von hydraulischen Parametern, die beispielsweise in der Schweiz schon Realität sind und in Bayern gegenwärtig angestrebt bzw. entwickelt werden, zu einer effizienteren und einheitlicheren Arbeitsweise führen.

II) Lösungsmöglichkeiten zur Reduzierung der Schwemmholzgefahren

Grundsätzlich existieren drei Lösungsmöglichkeiten, die einzeln aber auch in Kombination zum Ziel führen können: die Reduzierung des Schwemmholzaufkommens durch Bewirtschaftungsmaßnahmen im Einzugsgebiet, der Schwemmholzurückhalt durch bauliche Einrichtungen im Fließgewässer oberhalb der gefährdeten Bereiche sowie die Verbesserung der Durchgängigkeit an den verklausungsgefährdeten Engstellen. In Zukunft wird man möglicherweise vor der Umsetzung entsprechender Maßnahmen verstärkt und im Rahmen von Kosten-Nutzen-Analysen abwägen, mit welcher der Maßnahmen bei gleichem Aufwand die größere Schutzwirkung erzielt werden kann.

IIa) Reduzierung des Schwemmholzaufkommens

Das Schwemmholzaufkommen im Hochwasserfall könnte durch flächendeckende Bewirtschaftungsmaßnahmen im bewaldeten Einzugsgebiet und insbesondere an den Gewässeruferrn deutlich reduziert werden. Diese regelmäßig erforderlichen Maßnahmen sind allerdings sehr aufwändig, bedeuten einen großen Eingriff in den Naturraum und kommen deshalb häufig nicht in Frage.

IIb) Bauwerke zum Schwemmholzurückhalt im Gewässer

Der Schwemmholzurückhalt erfordert Bauwerke in Form von Rechen- oder Netzkonstruktionen im Gewässer oberhalb der gefährdeten Bereiche, die häufig mit Querbauwerken kombiniert werden:

- Netzkonstruktionen (siehe Kap. 2.5)

Sie kommen bei kleineren Gewässern (Sohlbreite ≤ 15 m) an schlecht erschließbaren Standorten in Betracht. Ihr Vorteil ist der nahezu vollständige Schwemmholzurückhalt, sobald der Wasserspiegel die Netzunterkante erreicht. Von Nachteil ist zum einen, dass ab dem beginnenden Holzurückhalt auch das Geschiebe annähernd vollständig am Netz zurückgehalten wird. Zum anderen muss auch das Verhalten im Überlastfall negativ bewertet werden. Beim Versagen des Netzes bricht die gesamte Rückhaltekonstruktion und es kommt zum schlagartigen und vollständigen Ausbruch des Verklausungskörpers. Entsprechend groß müssen die Sicherheitsfaktoren bei der Bemessung sein.

- Rechenkonstruktionen (siehe Kap. 2.1 bis Kap. 2.4)

Hier gibt es viele Bauwerke, die den Schwemmholzurückhalt mit dem Geschieberückhalt kombinieren. Für den Holzurückhalt bei gleichzeitig möglichst geringem Geschieberückhalt sind Rechenkonstruktionen mit vertikalen Stäben bzw. Säulen am besten geeignet. Sie sind sowohl bei kleinen als auch bei größeren Gewässern einsetzbar. Allein schon für den Bau, aber auch für die Räumung ist eine gute Erschließbarkeit des Standorts erforderlich. In Abhängigkeit vom Säulenabstand ist es bei diesen Konstruktionen durchaus möglich, dass einzelne Schwemmholzelemente durch ihre ungünstige Ausrichtung in Bezug auf die Rechensäulen durch den Rechen schwimmen. Das darf für die unterhalb gelegenen, zu schützenden Bereiche kein Problem darstellen. Die volle Rückhaltewirkung wird erst beim Rückhalt von einzelnen Elementen entlang der gesamten Rechenfront aktiviert. In der vorliegenden Schrift konnte auch durch den Vergleich mit anderen Untersuchungen die Erkenntnis gefestigt werden, dass die Rechensäulen im Grundriss V-förmig, schräg oder sogar parallel zur Fließrichtung statt senkrecht zur Fließrichtung angeordnet werden sollten. Wird diese Regel befolgt, kommt es zu weniger kompakten Verklausungskörpern und einem geringeren Aufstau. Außerdem ist das Verhalten im Überlastfall „gutmütiger“, da nur einzelne Rechensäulen brechen und Teilausbrüche der Verklausungskörper auftreten. Der Vorteil der schrägen Anordnung gegenüber der V-Form liegt darin, dass das zurückgehaltene Schwemmholz eventuell verstärkt durch zusätzliche Einbauten in der Nähe eines Ufers konzentriert und dadurch besser entnommen werden kann. Gerade bei größeren Flüssen mit permanenter Wasserführung kommt dieser Vorteil zur Geltung. Eine gute Lösung bei sehr großem Schwemmholzaufkommen stellen parallel zur Fließrichtung angeordnete Rechen in Kombination mit einer Rezirkulationszone als Holzurückhalteraum dar. Durch eine neue und einheitliche Auswertung verschiedener Versuchsergebnisse konnte auch gezeigt werden, dass bei den Rechenkonstruktionen mit vertikalen Stäben bzw. Säulen für eine gewählte Rechenanordnung die Kompaktheit des Verklausungskörpers und der dadurch hervorgerufene Aufstau mit steigender Froude-Zahl der Anströmung zunimmt. Der gleiche Zusammenhang ergab sich auch bei den Untersuchungen zur Verklausung von wasserbaulichen Anlagen wie Wehren und Hochwasserentlastungsanlagen. Aus heutiger Sicht ist ein Großteil der grundsätzlichen Fragestellungen zum Schwemmholzurückhalt in Wildbächen und -flüssen geklärt. Im einzelnen Anwendungsfall besteht aber weiterhin die Notwendigkeit eines hydraulischen Modellversuchs zur ausreichenden Berücksichtigung der lokalen Besonderheiten. Um bei diesen Fragestellungen hydraulische Modellversuche durch numerische Simulationen zu ersetzen, sind noch große Entwicklungsschritte erforderlich.

Die Rückhaltebauwerke müssen nach einem Rückhalteereignis umgehend geräumt werden, um die Schutzfunktion möglichst schnell wiederherzustellen.

IIc) Verbesserung der Schwemmholzdurchgängigkeit

Die Schwemmholzdurchgängigkeit kann durch folgende Maßnahmen verbessert werden, die in manchen Fällen nur einen vergleichsweise geringen Aufwand bedeuten:

- Erweiterung von verklausungsgefährdeten Engstellen in Breite und Höhe: Ersatz bestehender Brücken durch neue Konstruktionen, die den Verzicht von Brückenpfeilern oder sogar ein Anheben oder Öffnen der Brücke im Hochwasserfall ermöglichen; Beseitigung oder Erweiterung von Durchlässen; Öffnung von Überbauungen und Abdeckungen, die in vielen Fällen Hand in Hand mit einer naturnäheren Gewässer- und attraktiveren Ortsgestaltung gehen kann und deshalb auch zukünftig eine sehr gute Option darstellt.
- Entschärfung von verklausungsgefährdeten Konstruktionsdetails: z.B. Verschalen von Brückenunterseiten, um Verklausungen an Fachwerk- oder Einzelträgern zu vermeiden.
- Errichtung von Leiteinrichtungen zur verbesserten Längsausrichtung des Schwemmholzes oberhalb von Engstellen: dafür existieren bisher nur wenige realisierte Beispiele. In Zukunft sollte diese Option öfter zumindest in die konzeptionellen Überlegungen zu Projektbeginn einbezogen werden. Auch auf der Seite der Forschung sind hier wichtige Fragen noch nicht beantwortet, beispielsweise hinsichtlich der Zuverlässigkeit von Leiteinrichtungen.
- Planmäßiger Maschineneinsatz im Hochwasserfall: z.B. fest stationierte Bagger zur Beseitigung von Verklausungen. Hier könnte die Entwicklung ausgehend von der Rechenreinigungstechnik an Wasserkraftanlagen in Richtung einer sehr robusten, automatisierten Technologie gehen.

7.2 Kriterien für die Beurteilung und Optimierung von wasserbaulichen Anlagen hinsichtlich des Verklauungsrisikos (lokale Betrachtung)

In Abb. 6.2 sind die Kriterien für die Beurteilung und Optimierung von wasserbaulichen Anlagen hinsichtlich des Verklauungsrisikos in einem Ablaufschema zusammengestellt. Das Vorgehen wird anschließend genauer erläutert. Es handelt sich um eine lokale Betrachtung von einzelnen Bauwerken.

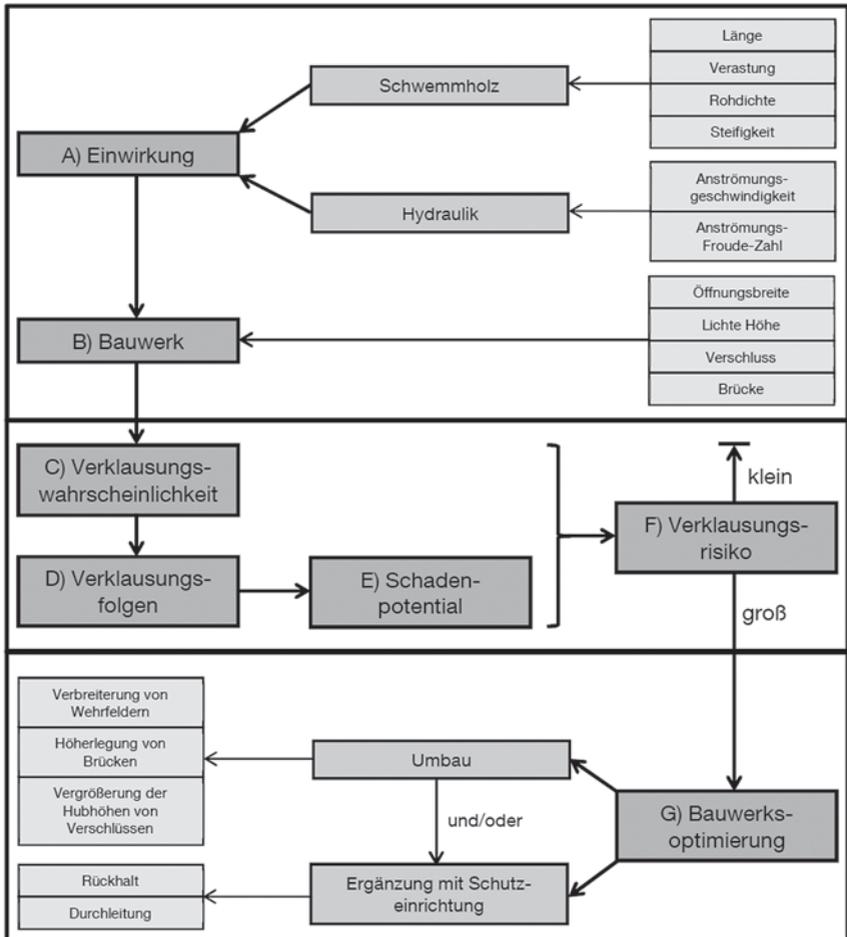


Abb. 6.2: Ablaufschema für die Beurteilung und Optimierung von wasserbaulichen Anlagen hinsichtlich des Verklauungsrisikos (lokale Betrachtung von einzelnen Bauwerken)

A) Einwirkung (Schwemmholz und Hydraulik)

Wie bei einer klassischen Bemessungsaufgabe des Bauingenieurwesens steht am Anfang die Einwirkung auf das Bauwerk, in diesem Fall ein mit Schwemmholz befrachteter Hochwasserabfluss. Für wasserbauliche Anlagen an Fließgewässern in Mitteleuropa mit großen Einzugsgebieten und vielen Seitengewässern stellt sich nicht die Frage, ob und wieviel Schwemmholz im Hochwasserfall anfallen kann. Man muss davon ausgehen, dass Schwemmholz in größeren Mengen anfällt. Die entscheidenden Fragen hinsichtlich des zu erwartenden Schwemmholzes sind diejenigen nach den Abmessungen, insbesondere nach der Länge und der Längenverteilung, und nach der Rohdichte des Schwemmholzes. Die NORWEGIAN WATER RESOURCES AND ENERGY ADMINISTRATION 1992 empfiehlt, die maximale Schwemmholzlänge mit 80 % der für das Einzugsgebiet charakteristischen maximalen Baumlänge anzusetzen und von einer Längenverteilung des Schwemmholzes zwischen 50 % und 80 % der für das Einzugsgebiet charakteristischen maximalen Baumlänge auszugehen.

Für Einzugsgebiete in Mitteleuropa sollten maßgebende Baumängen im Bereich von 20 m bis 25 m angesetzt werden. Für die Schwemmholzrohichte sollte man auf der sicheren Seite hohe Werte im Bereich von $0,90 \text{ kg/m}^3$ bis $0,95 \text{ kg/m}^3$ annehmen. Die Einwirkung wird auch charakterisiert durch die zu bestimmenden hydraulischen Kenndaten des charakteristischen Hochwasserabflusses wie die Geschwindigkeit und insbesondere die Froude-Zahl der Bauwerksanströmung.

B) Bauwerk

Demgegenüber steht das Bauwerk selbst, hier die wasserbauliche Anlage. Bei der Betrachtung der baulichen Parameter spielen die lichten Öffnungsweiten in horizontaler (Öffnungsweite) und vertikaler Richtung (lichte Höhe zwischen Wasserspiegel und Unterkante Brücke bzw. Verschluss in vollständig geöffneter Stellung) die entscheidende Rolle. Es ist auch zu unterscheiden zwischen Anlagen mit und ohne unterströmte bewegliche Verschlüsse. Mit unterströmten beweglichen Verschlüssen besteht immer die Gefahr, dass ein Verschluss nicht vollständig herausgehoben werden kann. Aber auch im vollständig herausgehobenen Zustand stellt ein unterströmter Verschluss eine Begrenzung des Abflussquerschnitts in vertikaler Richtung dar. Natürlich stellt auch jede Brücke an oder über der Anlage eine zusätzliche Gefahr dar.

C) Verklausungswahrscheinlichkeit (siehe Kap. 3.3)

Im nächsten Schritt ist zu klären, mit welcher Wahrscheinlichkeit die Einwirkung das Bauwerk betrifft, d.h. wie groß die Wahrscheinlichkeit einer Verklausung der wasserbaulichen Anlage durch Schwemmholz ist. Maßgebend dafür sind die Eigenschaften des Schwemmholzes. An erster Stelle zu nennen ist dabei die Holzlänge L bezogen auf die Öffnungsbreite W der wasserbaulichen Anlage. Ist $L \leq W$ liegt die Wahrscheinlichkeit einer dauerhaften Verklausung nahe 0. Mit zunehmender Länge $L > W$ steigt die Verklausungswahrscheinlichkeit rapide an. Für den Bereich $1 \leq L/W \leq 2$ konnte anhand der Versuchsergebnisse für einschwimmende Holzgruppen die folgende lineare Funktion für die Verklausungswahrscheinlichkeit P aufgestellt werden:

$$P = (L/W - 0,96) \cdot 0,73 \quad (\text{Gl. 3.7})$$

Eine wichtige Rolle spielen aber auch die Steifigkeit und die Verastung des Holzes: je steifer das Schwemmholz und je zahlreicher und länger die Äste, desto größer ist die Verklausungswahrscheinlichkeit. Auch führen Holzgruppen mit einer deutlich höheren Wahrscheinlichkeit zu einer Verklausung als einzeln einschwimmende Stämme. Die Erkenntnis, dass die Holzrohddichte und die Geschwindigkeit bzw. die Froude-Zahl der Anströmung nur eine geringe Relevanz für die Verklausungswahrscheinlichkeit besitzen, wurde in den Versuchen ohne Begrenzung des Abflussquerschnitts nach oben bestätigt. Deutlich erhöht wird die Verklausungswahrscheinlichkeit bei einer Begrenzung des kritischen Abflussquerschnitts nach oben etwa durch eine Brücke bzw. einen herausgehobenen Verschluss mit geringerer Höhe zwischen Wasserspiegel und Unterkante Brücke bzw. Verschluss. Dann ist die Verklausungswahrscheinlichkeit bei einer niedrigeren Geschwindigkeit bzw. Froude-Zahl der Anströmung und vermutlich auch bei einer geringeren Holzrohddichte wesentlich größer.

D) Verklausungsfolgen (siehe Kap. 3.5)

Der vierte Schritt beschäftigt sich mit der Frage, welche Folgen zu erwarten sind, wenn die Einwirkung das Bauwerk betrifft, d.h. wenn es zu einer Verklausung der wasserbaulichen Anlage mit einer bestimmten Holzmenge kommt. Dann sind die Froude-Zahl der Anströmung und das Verhältnis der Holzroh- zur Wasserdichte die maßgebenden Einflussgrößen für den Verklausungsprozess, die Form des Verklausungskörpers und die Verklausungsfolgen. Bei kleiner Froude-Zahl der Anströmung und kleiner Holzrohddichte bildet sich ein lockerer, einlagiger Schwemmholzteppich, der nur einen geringen Anstieg des Oberwasserstands und eine kleine Reduzierung der Abflussleistung hervorruft. Bei großer Froude-Zahl der Anströmung und großer Holzrohddichte entwickelt sich ein kompakter, mehrlagiger Verklausungskörper, der einen großen Anstieg des Oberwasserstands und eine starke Reduzierung der Abflussleistung verursacht. Hier ist eine große Übereinstimmung mit den Verklausungen

an Schwemmholzrückhalteeinrichtungen gegeben. Bisherige Versuchsergebnisse sprechen dafür, dass kompakte, mehrlagige Verklauungskörper schon ab Froude-Zahlen der Anströmung von $Fr > 0,15$ auftreten können. Aufgrund des großen Zufallsaspekts beim Verklauungsprozess ist eine genauere Quantifizierung der Verklauungsfolgen in Abhängigkeit von der Froude-Zahl der Anströmung und vom Verhältnis der Holzroh- zur Wasserdichte bisher nicht möglich. Für die genauere Quantifizierung dieser Abhängigkeit könnte bei zukünftigen Versuchen die Vorgabe von identischen Ausgangsverklauungen hilfreich sein. Von weiteren Versuchen ist in jedem Fall eine zuverlässigere Bestimmung der kritischen Froude-Zahl der Anströmung zu erwarten, ab der kompakte, mehrlagige Verklauungskörper entstehen.

Zu erfassen ist auch, welche zusätzliche statische Belastung des Bauwerks durch die Verklauung und den Anstieg des Oberwasserstands hervorgerufen wird.

Am Ende dieses Beurteilungsschritts muss in letzter Konsequenz die Einschätzung stehen, ob eine Talsperre infolge einer Verklauung durch die Reduzierung der Abflussleistung der Hochwasserentlastungsanlage überströmt werden kann bzw. ob eine Wehranlage infolge einer Verklauung durch die zusätzliche statische Belastung brechen kann.

E) Schadenpotential

Als nächstes muss das Schadenpotential erfasst werden, das sich aus den Verklauungsfolgen einer wasserbaulichen Anlage durch Schwemmholz ergibt. Als Schadenpotential wird hier sowohl der infolge einer Schwemmholzverklauung an der wasserbaulichen Anlage selbst auftretende mögliche Schaden verstanden, z.B. die Erosion einer Talsperre oder der Bruch eines Wehres, als auch die im Bereich der Unterlieger verursachten, möglicherweise enormen Folgeschäden. Bei der Bestimmung des Schadenpotentials der Unterlieger können zukünftig standardisierte Verfahren den Aufwand reduzieren (siehe Kap. 6.1). Grundsätzlich muss bei jeder wasserbaulichen Anlage allein wegen der möglichen Schäden an der Anlage selbst von einem großen Schadenpotential ausgegangen werden.

F) Verklauungsrisiko

Das Verklauungsrisiko wird als Produkt aus Verklauungswahrscheinlichkeit und Schadenpotential ermittelt.

G) Bauwerksoptimierung

Im Falle eines großen Verklauungsrisikos wird man im letzten Schritt Überlegungen zur risikosenkenden Bauwerksoptimierung anstellen. Natürlich sind dabei auch Umbaumaßnahmen, die in die Kernsubstanz der Anlagen eingreifen, wie die Verbreiterung von Wehrfeldern, die Vergrößerung der Hubhöhe von Verschlüssen oder die Höherlegung von Brü-

cken möglich. Aufgrund verbesserter technischer Möglichkeiten wie größerer Verschlussbreiten und -höhen wird man hier in Zukunft noch größere lichte Öffnungsweiten realisieren können. Wesentlich effizienter können aber zusätzliche Schutzeinrichtungen zum Schwemmholzurückhalt sein, wenn sie in ausreichendem Abstand von der verklausungsgefährdeten Öffnung angeordnet werden. Durch die größere Fläche der Rückhalteebene und die Lage außerhalb des Beschleunigungsbereichs sind dort die Geschwindigkeiten und Froude-Zahlen der Anströmung kleiner. Die Schutzeinrichtungen sollten so konzipiert werden, dass im Bemessungsfall die Froude-Zahl der Anströmung $Fr < 0,15$ ist. Im Rückhaltefall entstehen dann nur lockere, einlagige Schwemmholzteppiche mit geringem Anstieg des Oberwasserstands und kleiner Reduzierung der Abflussleistung der wasserbaulichen Anlage. Als Schutzeinrichtungen in Frage kommen Rechen mit senkrechten Stäben bzw. Säulen sowie stark geneigte Rechen mit weit vorgelagerter Basis. Bei der Variante mit senkrechten Stäben bzw. Säulen ist die problemlose Räumung nach einem Hochwasserereignis von Vorteil. Positiv bei der stark geneigten Variante ist zu bewerten, dass zurückgehaltenes Schwemmholz durch nachfolgendes Holz möglicherweise aus dem Abflussquerschnitt geschoben oder gerollt wird. Allerdings dürfte die große Länge der frei tragenden, geneigten Stäbe eine statische Herausforderung darstellen. Beide Varianten sollten mit großer lichter Stab- bzw. Säulenweite ausgeführt werden, die allerdings kleiner sein muss als die kleinste Engstelle der zu schützenden wasserbaulichen Anlage. Dann können zwar einzelne Schwemmholzelemente die Schutzeinrichtung passieren. Sie werden aber mit hoher Wahrscheinlichkeit an den Stäben bzw. Säulen in Fließrichtung ausgerichtet und anschließend problemlos durch die wasserbauliche Anlage ins Unterwasser transportiert. Die hinsichtlich der Verklausung der wasserbaulichen Anlage gefährlichen Holzgruppen werden dagegen zuverlässig zurückgehalten. Für die Schutzeinrichtungen zum Schwemmholzurückhalt vor wasserbaulichen Anlagen besteht sowohl grundsätzlich als auch im Einzelfall weiterer Forschungsbedarf. Auch bei wachsender Kenntnis der Zusammenhänge sind hier auch auf längere Sicht hydraulische Modellversuche erforderlich, die nur bei großen Fortschritten in der Entwicklung durch numerische Simulationen ersetzt werden können. Wenn man die Einrichtung zum Schwemmholzurückhalt und die dadurch geschützte wasserbauliche Anlage als Einheit betrachtet, erhöht sich sogar die Verklausungswahrscheinlichkeit, da eine funktionierende Rückhalteeinrichtung öfter verklauset als die wasserbauliche Anlage ohne Rückhalteeinrichtung. Da im Falle des Schwemmholzurückhalts an der dafür vorgesehenen Einrichtung generell kein oder nur ein sehr stark reduzierter Schaden auftritt, verringert sich das Verklausungsrisiko aber sehr deutlich.

Eine weitere Möglichkeit der Bauwerksoptimierung stellen Einrichtungen zur Verbesserung der Durchleitung des Schwemmholzes dar. Hier besteht noch großes Entwicklungspotential.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1: Beispiel für Schwemmholzrechen mit einer Anordnung senkrecht zur Fließrichtung (Galsaunerbach, Südtirol, Foto Asenkerschbaumer)	6
Abb. 2.2: Schematischer Grundriss eines verkleauten Schwemmholzrechens senkrecht zur Fließrichtung	6
Abb. 2.3: Schematischer Längsschnitt eines verkleauten Schwemmholzrechens senkrecht zur Fließrichtung	7
Abb. 2.4: Beispiel eines doppelreihigen V-förmigen Schwemmholzrechens (Lainbach, Oberbayern, Foto Asenkerschbaumer)	7
Abb. 2.5: Schematischer Grundriss eines verkleauten V-förmigen Schwemmholzrechens	8
Abb. 2.6: Schematischer Längsschnitt eines verkleauten V-förmigen Schwemmholzrechens	8
Abb. 2.7: Schematischer Lageplan des V-förmigen Schwemmholzrechens am Lainbach (aus KNAUSS)	9
Abb. 2.8: Einbindung der Säulen des V-förmigen Schwemmholzrechens am Lainbach im Untergrund (aus KNAUSS)	10
Abb. 2.9: Schematische Darstellung der auf einen Schwemmholzrechen wirkenden Lasten bei klarer Trennung von Holz und Geschiebe (aus LANGE/BEZZOLA)	11
Abb. 2.10: Vereinfachte Lastannahme für einen Schwemmholzrechen bei klarer Trennung von Holz und Geschiebe (aus LANGE/BEZZOLA)	12
Abb. 2.11: Schematische Darstellung der auf einen Schwemmholzrechen wirkenden Lasten bei einer gemeinsamen Ablagerung von Holz und Geschiebe (aus LANGE/BEZZOLA)	12
Abb. 2.12: Hydraulische Versuchsparameter der Verkleuungsversuche im schematischen Längsschnitt	14
Abb. 2.13: Von KNAUSS untersuchte Anordnungen der Rechensäulen im Grundriss (rot: senkrecht zur Fließrichtung, blau: V-förmig mit 60°-Spitze in Fließrichtung, grün: V-förmig mit 60°-Spitze entgegen Fließrichtung, schwarz: schräg 30°)	14
Abb. 2.14: Aufstau $\Delta h/h$ in Abhängigkeit von der Rechenanordnung (Versuche von KNAUSS)	16
Abb. 2.15: Aufstau $\Delta h/h$ in Abhängigkeit von der Froude-Zahl Fr (Versuche von KNAUSS)	17
Abb. 2.16: Verwendete Schwemmholzmaterialien	17
Abb. 2.17: Aufstau $\Delta h/h$ in Abhängigkeit von der Materialbeschaffenheit (Zugabezeit $t_z = 2,5$ min)	18
Abb. 2.18: Aufstau $\Delta h/h$ in Abhängigkeit von der Zugabezeit t_z (Schwemmholzmaterial „grob“)	18

Abb. 2.19: Verklausungskörper an einem Rechen mit Anordnung senkrecht zur Fließrichtung vor (links) und beim Eintreffen (rechts) einer Schwallwelle	19
Abb. 2.20: Von ASENKERSCHBAUMER untersuchte Anordnungen der Rechensäulen im Grundriss (rot: senkrecht zur Fließrichtung, blau: schräg 45°, grün: schräg 20°)	20
Abb. 2.21: Verklausungskörper in einem Versuch mit einer schrägen Rechenanordnung von 20° mit der Definition der Ablagerungsorte	21
Abb. 2.22: Aufstau $\Delta h/h$ in Abhängigkeit von Rechenneigung und Froude-Zahl (Versuche von ASENKERSCHBAUMER)	22
Abb. 2.23: Ablagerungsanteil M im linken Drittel der Versuchsrinne in Abhängigkeit von Rechenan-neigung und Froude-Zahl	23
Abb. 2.24: Schwemmholzdurchgang N in Abhängigkeit von Rechenneigung und Froude-Zahl	24
Abb. 2.25: Untersuchte Varianten des 20°-Rechen mit zusätzlichen Einbauten	24/25
Abb. 2.26: Ablagerungsanteil M im linken Drittel der Versuchsrinne und Schwemmholzdurchgang N bei den Varianten des 20°-Rechens mit zusätzlichen Einbauten (siehe Abb. 2.25)	26
Abb. 2.27: Untersuchte Rechenanordnungen mit der jeweiligen Referenzverklausung (links) und dem gestauchten Verklausungskörper nach der dritten Schwallwelle (rechts)	28
Abb. 2.28: Längsstauchung der Referenzverklausung für die untersuchten Rechenneigungen in den verschiedenen Versuchsphasen	29
Abb. 2.29: Höhenausdehnung der Referenzverklausung für die untersuchten Rechenneigungen in den verschiedenen Versuchsphasen	30
Abb. 2.30: 90°-Rechen mit der Referenzverklausung (links) und der Restverklausung nach der großen Schwallwelle (rechts)	30
Abb. 2.31: Schwemmholzdurchgang bei den Ausbruchversuchen in Abhängigkeit von der Rechenneigung	31
Abb. 2.32: Aufstau $\Delta h/h$ in Abhängigkeit von der Froude-Zahl Fr der Anströmung in den verschiedenen Versuchsreihen	36
Abb. 2.33: Seilnetzsperrung über Geschiebesperre (Kranzbach, Oberbayern, Foto: Asenkerschbaumer)	37
Abb. 2.34: Verklausung eines Schwemmholznetzes im Modellversuch (Foto: Rimböck)	37
Abb. 3.1: Einfeldmodell im Überblick	41
Abb. 3.2: Einfeldmodell in der Nahaufnahme	41
Abb. 3.3: Dreifeldmodell	41
Abb. 3.4: Schematischer, unmaßstäblicher Lageplan des Einfeldmodells	42

Abb. 3.5: Schematischer, unmaßstäblicher Lageplan des Dreifeldmodells	42
Abb. 3.6: Schematischer, unmaßstäblicher Schnitt in Kanalmitte (für beide Modelle identisch)	42
Abb. 3.7: Schematischer Grundriss eines mit einem Holzstamm verklausten Wehrfelds	44
Abb. 3.8: Schematischer Langsschnitt eines verklausten Wehrfelds	45
Abb. 3.9: Verklausungswahrscheinlichkeit P für Holzgruppen in Abhängigkeit vom Verhältnis der Holzlänge L zur Wehrfeldbreite W	50
Abb. 3.10: Untersuchte Holzarten mit verschiedener Steifigkeit	51
Abb. 3.11: Schwemmholz ohne Äste, mit wenigen und kürzeren Ästen sowie mit vielen und längeren Ästen (von links)	52
Abb. 3.12: Verklausung des teilgeöffneten Drucksegments im Einfeldmodell mit einer Holzgruppe	53
Abb. 3.13: Verklausung der vorgelagerten Brücke mit einer Holzgruppe	55
Abb. 3.14: Verklausung bei geöffneten mittleren und linken Wehrfeldern bzw. bei geöffneten äußeren Feldern	56
Abb. 3.15: Verklausung bei drei teilgeöffneten Wehrfeldern	57
Abb. 3.16: Lockerer, einlagiger Schwemmholzteppich im Einfeldmodell	64
Abb. 3.17: Kompakter, mehrlagiger Verklausungskörper im Dreifeldmodell	65
Abb. 3.18: Rundholz senkrecht zur Fließrichtung, das an den Gewindestangen in der Mitte des Vorbodens zurückgehalten wird	66
Abb. 3.19: 100-Stangen-Satz des Kunstholzes für $\rho_H = 900 \text{ kg/m}^3$ (Farbmarkierung in Stangenmitte für die Rohdichte, an den Stangenenden für die Länge)	68
Abb. 3.20: Längenverteilung eines 100-Stangen-Satzes des Kunstholzes mit einer bestimmten Holzrohddichte	68
Abb. 3.21: Lockerer, einlagiger Schwemmholzteppich ($\rho_H = 800 \text{ kg/m}^3$, $v = 0,168 \text{ m/s}$, $Fr = 0,077$)	69
Abb. 3.22: Kompakter, mehrlagiger Verklausungskörper ($\rho_H = 975 \text{ kg/m}^3$, $v = 0,168 \text{ m/s}$, $Fr = 0,077$)	69
Abb. 3.23: Schematische Darstellung einer H/Q -Beziehung ohne und mit Verklausung zur Veranschaulichung der quantitativen Verklausungsfolgen $\Delta H/H$ und $\Delta Q/Q$	70
Abb. 3.24: Oberwasserstand-Abfluss-Beziehung für das Einfeldmodell ohne Verklausung sowie Wertepaare mit Verklausung	71
Abb. 3.25: Anstieg des Oberwasserstands $\Delta H/H$ durch Verklausung im Einfeldmodell in Abhängigkeit von der mittleren Anströmungsgeschwindigkeit v	72

Abb. 3.26: Anstieg des Oberwasserstands $\Delta H/H$ durch Verklausung im Einfeldmodell in Abhängigkeit von der Froude-Zahl Fr der Anströmung	72
Abb. 3.27: Oberwasserstand-Abfluss-Beziehung für das Dreifeldmodell ohne Verklausung sowie für drei verschiedene Verklausungen	74
Abb. 3.28: Kompakte, mehrlagige Verklausung des Dreifeldmodells mit zusätzlichem Feinmaterial	75
Abb. 3.29: Anstiege des Oberwasserstands $\Delta H/H$ durch Verklausungen im Dreifeldmodell in Abhängigkeit von der mittleren Anströmungsgeschwindigkeit v	76
Abb. 3.30: Anstiege des Oberwasserstands $\Delta H/H$ durch Verklausungen im Dreifeldmodell in Abhängigkeit von der Froude-Zahl Fr der Anströmung	76
Abb. 3.31: Anstieg des Oberwasserstands $\Delta H/H$ durch Verklausung im Dreifeldmodell mit Kunstholz in Abhängigkeit vom Verhältnis der Holzroh- zur Wasserdichte ρ_H/ρ_W und der mittleren Geschwindigkeit v bzw. Froude-Zahl Fr der Anströmung	78
Abb. 3.32: Reduzierung der Abflussleistung $\Delta Q/Q$ durch Verklausung im Dreifeldmodell mit Kunstholz in Abhängigkeit vom Verhältnis der Holzroh- zur Wasserdichte ρ_H/ρ_W und der mittleren Geschwindigkeit v bzw. Froude-Zahl Fr der Anströmung	79
Abb. 3.33: Dreifeldmodell mit zusätzlichem, flach geneigtem Rechen	80
Abb. 3.34: Schematischer, unmaßstäblicher Lageplan des Dreifeldmodells mit zusätzlichem Rechen	81
Abb. 3.35: Schematischer, unmaßstäblicher Schnitt durch das Dreifeldmodell mit zusätzlichem Rechen	81
Abb. 3.36: Lockerer, einlagiger Schwemmholzteppich aus Kunstholz vor flach geneigtem Rechen ($v = 0,139$ m/s; $Fr = 0,058$; $\rho_H = 800$ kg/m ³ ; $\alpha = 20^\circ$)	82
Abb. 3.37: Kompakter, mehrlagiger Verklausungskörper aus Kunstholz vor flach geneigtem Rechen ($v = 0,348$ m/s; $Fr = 0,231$; $\rho_H = 975$ kg/m ³ ; $\alpha = 20^\circ$)	82
Abb. 3.38: Anstieg des Oberwasserstands $\Delta H/H$ durch Verklausung des flach geneigten Rechens bzw. durch direkte Wehrverklausung in Abhängigkeit von der Holzrohndichte ρ_H und der Rechenneigung α ($v = 0,348$ m/s, $Fr = 0,231$)	84
Abb. 3.39: Reduzierung der Abflussleistung $\Delta Q/Q$ durch Verklausung des flach geneigten Rechens bzw. durch direkte Wehrverklausung in Abhängigkeit von der Holzrohndichte ρ_H und der Rechenneigung α ($v = 0,348$ m/s, $Fr = 0,231$)	84
Abb. 3.40: Verklausung des flach geneigten Rechens mit Naturholz	87
Abb. 4.1: Dammkörper und Betriebseinrichtungen der Talsperre Grüntensee im Lageplan	94
Abb. 4.2: Hochwasserentlastungsanlage der Talsperre Grüntensee (alter Zustand) im Lageplan	95
Abb. 4.3: Modell der Hochwasserentlastungsanlage im alten Zustand	96

Abb. 4.4: Alter Schwemmholtzrechen im unverlegten, angeströmten Zustand (Modell)	97
Abb. 4.5: Alter Schwemmholtzrechen (Prototyp)	98
Abb. 4.6: Im Modell ermittelte Seepegel-Abfluss-Beziehungen für die Hochwasserentlastungsanlage der Talsperre Grüntensee	98
Abb. 4.7: Neuer Schwemmholtzrechen (Modell)	99
Abb. 4.8: Neuer Schwemmholtzrechen (Prototyp)	100
Abb. 4.9: Rechensäulen mit verbindender Aussichtsbrücke (Blick über den Stausee auf den namensgebenden „Wächter des Allgäus“)	100
Abb. 4.10: Lockerer Schwemmholtzteppich vor dem neuen Rechen	101
Abb. 4.11: An den Rechensäulen ausgerichteter, einzelner Schwemmholtzstamm	102
Abb. 4.12: Dammkörper und Betriebseinrichtungen der Sylvensteintalsperre im Lageplan (Quelle Wasserwirtschaftsamt Weilheim)	103
Abb. 4.13: Schwemmholtzteppich vor Damm und Einlaufbauwerk der HWE1	103
Abb. 4.14: Einlaufbauwerk der nachgerüsteten alten HWE1 im Modell	104
Abb. 4.15: Einlaufbauwerk der nachgerüsteten alten HWE1 im Prototyp	105
Abb. 4.16: Gemessene Senkungskurven im Einlaufbauwerk der HWE1 für den Bemessungsfall	106
Abb. 4.17: Lockerer Schwemmholtzteppich vor dem mit zwei Rechensäulen geschützten Einlaufbauwerk der HWE1 im Bemessungsfall	107
Abb. 4.18: Einlaufbauwerk der zusätzlichen neuen HWE2 im Modell	108
Abb. 4.19: Einlaufbauwerk der zusätzlichen neuen HWE2 im Prototyp	108
Abb. 4.20: Einlaufbauwerk der zusätzlichen neuen HWE2 im Bemessungsfall ($Q = 400 \text{ m}^3/\text{s}$, Oberwasserstand auf Höhe des Stauziels Z_s) ohne Verklausung	109
Abb. 4.21: Einlaufbauwerk der zusätzlichen neuen HWE2 im Bemessungsfall ($Q = 400 \text{ m}^3/\text{s}$, Oberwasserstand auf Höhe des Stauziels Z_s) mit zurückgehaltenem Schwemmholtzteppich	110
Abb. 4.22: Skizzierter Lageplan der Wehranlage Baierbrunn	111
Abb. 4.23: Blick von der Brücke über das Ausleistungsbauwerk auf die Wehrfelder 1-4	111
Abb. 4.24: Durchleitungsszenarien für einen querschwimmenden Schwemmholtzstamm	113
Abb. 4.25: Ermittlung des erforderlichen lichten Abstands A der Leitpfähle von den Pfeilerköpfen	114
Abb. 4.26: Theoretisch ermittelte Anordnung der Leitpfähle im Oberwasserbereich der Wehranlage Baierbrunn (schematisch)	116

Abb. 4.27: Überblick über das Vollmodell der Wehranlage Baierbrunn im bereits optimierten Zustand (schematisch)	117
Abb. 4.28: Vom festen Wehrkörper verursachte, nach links gerichtete Hauptströmung	119
Abb. 4.29: Ausrichtung von einzelnen Schwemmh Holzstämmen an den Leitpfählen 2 und 4	119
Abb. 4.30: Auflösung und Ausrichtung einer Schwemmh Holzansammlung an den Leitpfählen 2 und 4	119
Abb. 4.31: Ausführungsvorschlag für die Anordnung der Leitpfähle im Oberwasserbereich der Wehranlage Baierbrunn (schematisch)	120
Abb. 4.32: Lageplan der Aare mit rot umrahmtem Modellausschnitt (Bildgrundlage: Axpo AG)	121
Abb. 4.33: Modell des Kraftwerks mit den drei Turbineneinläufen (links) und der HWE (rechts)	121
Abb. 4.34: Zurückgehaltenes Schwemmh Holz vor den Kraftwerkseinläufen bei Volllastbetrieb	122
Abb. 4.35: Schwemmh Holzabfuhr bei vollständig geöffneter HWE ohne Kraftwerksbetrieb	123
Abb. 4.36: Luftbild der Aare im Bereich des Stauwehrs Winznau mit rot umrahmtem Modellausschnitt (Bildgrundlage: maps.google.de)	124
Abb. 4.37: Überblick über das Modell der Wehranlage Winznau im Hochwasserfall	125
Abb. 4.38: Eintrag einer Schwemmh Holzgruppe am linken Aareufer für $Q_{Aare} = 1650 \text{ m}^3/\text{s}$	126
Abb. 4.39: Eintrag einer Schwemmh Holzgruppe in den Kanal ohne Anprall am rechten Kanalufer im Lastfall $Q_{Wehr} = 305 \text{ m}^3/\text{s}$ und $Q_{Kanal} = 395 \text{ m}^3/\text{s}$	126
Abb. 4.40: Anprall eines einzelnen Schwemmh Holzstamms an die rechte Ufermauer am Kanalbeginn (links) und Ansammlung einer Holzgruppe am Trennungsbauwerk zwischen Wehr und Kanal (rechts) im Lastfall $Q_{Wehr} = 550 \text{ m}^3/\text{s}$ und $Q_{Kanal} = 150 \text{ m}^3/\text{s}$	127
Abb. 4.41: Holzgruppe kurz vor (links) und nach (rechts) dem Anprall an das Trennungsbauwerk zwischen Wehr und Kanal bei extremen Hochwasserlastfällen	128
Abb. 4.42: Durchleitung eines Schwemmh Holzstamms durch das linke Wehrfeld (links) und Rückströmung von Schwemmh Holz am linken Kanalufer in die Hauptströmung der Aare (rechts) bei extremen Hochwasserlastfällen	128
Abb. 6.1: Ablaufschema für das grundsätzliche Vorgehen bei der Konzeptplanung von Schutzmaßnahmen für Siedlungsräume vor Schwemmh Holzgefahren (Gesamtbetrachtung im Einzugsgebiet)	132
Abb. 6.2: Ablaufschema für die Beurteilung und Optimierung von wasserbaulichen Anlagen hinsichtlich des Verklausungsrisikos (lokale Betrachtung von einzelnen Bauwerken)	137

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1: Kenngrößen des V-förmigen Schwemmholzrechens am Lainbach in Oberbayern	9
Tab. 2.2: Wesentliche Randbedingungen der Versuche von KNAUSS sowie ASENKERSCHBAUMER (Prototypmaße)	13
Tab. 2.3: Ergebnisse der grundlegenden Verkläusungsversuche von KNAUSS	15
Tab. 2.4: Ergebnisse der ersten Versuchsreihe von ASENKERSCHBAUMER für grundsätzlich verschiedene Rechenanordnungen	21
Tab. 2.5: Ergebnisse der zweiten Versuchsreihe von ASENKERSCHBAUMER für Varianten des 20°-Rechens	26
Tab. 2.6: Wesentliche Randbedingungen der Versuche von WEITBRECHT/SCHMOCKER und ASENKERSCHBAUMER in Modellmaßen	34
Tab. 2.7: Vergleich der Froude-Zahl Fr der Anströmung und des relativen Aufstaus $\Delta h/h$ für die Versuche von WEITBRECHT/SCHMOCKER und von ASENKERSCHBAUMER	35
Tab. 2.8: Anwendungsgrenzen von Seilnetzsperrern nach RIMBÖCK	38
Tab. 3.1: Parameterkombinationen in den Standardversuchen und zugehörige hydraulische Kenngrößen der Anströmung	47
Tab. 3.2: Verkläusungswahrscheinlichkeiten P_1 und P_3 in den Standardversuchen (Einfeldmodell/Dreifeldmodell)	48
Tab. 3.3: Mittlere Verkläusungswahrscheinlichkeiten P (für Holzgruppen)	49
Tab. 3.4: Verkläusungswahrscheinlichkeiten P für verschiedene Holzarten (Holzgruppen, $H/W = 0,35$; $D/H = 2$; $L/W = 1,5$)	51
Tab. 3.5: Verkläusungswahrscheinlichkeiten P für Holz mit unterschiedlicher Astanzahl und -länge (Holzgruppen, $H/W = 0,7$, $L/W = 1,5$)	52
Tab. 3.6: Verkläusungswahrscheinlichkeiten P für verschiedene Teilöffnungen der Drucksegmente ($H/W = 0,35$; $D/H = 2$; $L/W = 1$)	54
Tab. 3.7: Verkläusungswahrscheinlichkeiten P für die vorgelagerte Brücke ($H/W = 0,35$; $D/H = 2$; $L/W = 1$; Einfeldmodell)	55
Tab. 3.8: Beobachtung am Verkläusungskörper bei stufenweiser Anhebung des Vorbodens und entsprechender Steigerung der Geschwindigkeit bzw. Froude-Zahl der Anströmung	65
Tab. 3.9: Kritische Geschwindigkeiten v_{krit} und Froude-Zahlen Fr_{krit} der Anströmung in Abhängigkeit von der Holzrohddichte ρ_H bzw. vom Verhältnis der Holzroh- zur Wasserdichte ρ_H/ρ_W	67

Tab. 3.10: Anstieg des Oberwasserstands $\Delta H/H$ durch Verklausung im Einfeldmodell in Abhängigkeit von H/W sowie der mittleren Geschwindigkeit v und Froude-Zahl Fr der Anströmung	74
Tab. 3.11: Mittlere Geschwindigkeit v und Froude-Zahl Fr der Anströmung ohne Verklausung, Anstieg des Oberwasserstands $\Delta H/H$, Reduzierung der Abflussleistung $\Delta Q/Q$	74
Tab. 3.12: Mittlere Geschwindigkeiten v und Froude-Zahlen Fr der Anströmung sowie die Anstiege des Oberwasserstands $\Delta H/H$ durch Verklausungen im Dreifeldmodell	75
Tab. 3.13: Mittlere Geschwindigkeit v und Froude-Zahl Fr der Anströmung, Holzrohddichte ρ_H , Verhältnis der Holzroh- zur Wasserdichte ρ_H/ρ_W , Anstieg des Oberwasserstands $\Delta H/H$ und Reduzierung der Abflussleistung $\Delta Q/Q$	77
Tab. 3.14: Rechenneigung α , Holzrohddichte ρ_H , Verhältnis der Holzroh- zur Wasserdichte ρ_H/ρ_W , Anstieg des Oberwasserstands $\Delta H/H$ und Reduzierung der Abflussleistung $\Delta Q/Q$ infolge Rechenverklausung für die mittlere Geschwindigkeit $v = 0,348$ m/s bzw. Froude-Zahl $Fr = 0,231$ der Anströmung	83
Tab. 4.1: Lastfälle der Schwemmholzversuche	125
Tab. 5.1: Vergleich der Ergebnisse der numerischen Simulation für den quaderförmigen Verklausungskörper mit Ergebnissen der hydraulischen Modellversuche	130
Tab. 5.2: Vergleich der Ergebnisse der numerischen Simulationen für den abgestuften Verklausungskörper mit Ergebnissen der Modellversuche	130

Literaturverzeichnis

ASENKERSCHBAUMER, M. (2009): Analyse der Schwemmholzproblematik in der Rienz bei Brixen, Diplomarbeit an Lehrstuhl und Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU München (unveröffentlicht).

BAUMANN, B. (2009): Grundlagensimulation zur Treibholzproblematik, Bachelorarbeit an Lehrstuhl und Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU München (unveröffentlicht).

BEZZOLA, G.R.; GANTENBEIN, S.; HOLLENSTEIN R.; MINOR, H.-E. (2002): Verklauung von Brückenquerschnitten, in: Moderne Methoden und Konzepte im Wasserbau, Tagungsband des internationalen Symposiums vom 7. bis 9. Oktober 2002 in Zürich, Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, Nr. 175, S. 87-97.

BOCCHIOLA, D.; RULLI, M.C.; ROSSO, R. (2006): Transport of large woody debris in the presence of obstacles, *Geomorphology*, 76 (1-2), S. 166-178.

BOCCHIOLA, D.; RULLI, M.C.; ROSSO, R. (2008): A flume experiment on the formation of wood jams in rivers, *Water Resour. Res.*, 44(2), W02408.

DIEHL, T.H. (1997): Potential drift accumulation at bridges, Report FHWA-RD-97-028, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington DC.

DUSS, H. (1999): Kommentar zur Abschätzung der Schwemmholzmenge und des Schwemmholzpotentials, Schwemmholzuntersuchungen Riesenstaldnerbach, Zustand 1999 (unveröffentlicht).

GANTENBEIN, S. (2001): Verklauungsprozesse - Experimentelle Untersuchungen, Diplomarbeit an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich (unveröffentlicht).

GODTLAND, K.; TESAKER, E. (1994): Clogging of spillways by trash, *Proceedings of 18th ICOLD Congress*, Q.68-R.36, pp. 543-557, Durban.

HAGA, H.; KUMAGAI, T.; OTSUKI, K.; OGAWA, S. (2002): Transport and retention of coarse woody debris in mountain streams: an in situ field experiment of log transport and field survey of coarse woody debris distribution, *Water Resour. Res. Inst.*, 38(8), 1029-1044.

HARTLIEB, A. (2012a): Large scale hydraulic model tests for floating debris jams at spillways, in: *Water infinitely deformable but still limited*, *Proceedings of 2nd IAHR European Congress*, 27. bis 29. Juni 2012, München, Topic Damage and Risk, Paper C18, 6 pages, USB-Stick, ISBN 978-3-943683-03-5.

HARTLIEB, A. (2012b): Modellversuche zur Verkläuserung von Hochwasserentlastungsanlagen mit Schwemmholz, in: Wasserwirtschaft, Vol. 102, Nr. 6, S. 15-19.

HARTLIEB, A.; KNAUSS, J.; STROBL, Th. (1996): Sylvensteinspeicher - alte Entlastungsanlage, Versuchsbericht Nr. 320 der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU München (unveröffentlicht).

HARTLIEB, A.; OVERHOFF, G. (2006): Die geplante Ertüchtigung der Hochwasserentlastungsanlage an der Talsperre Grüntensee im Allgäu, in: Stauhaltungen und Speicher – Von der Tradition zur Moderne, Tagungsband des Wasserbausymposiums vom 27. bis 29. September 2006 in Graz, Schriftenreihe zur Wasserwirtschaft der Technischen Universität Graz, Nr. 46, Band 2, S. 67-79.

HARTLIEB, A.; RUTSCHMANN, P. (2007): Floating debris model tests, Versuchsbericht Nr. 394 der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU München (unveröffentlicht).

HARTLIEB, A.; RUTSCHMANN, P. (2008): Floating debris model tests 2008, Versuchsbericht Nr. 402 der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU München (unveröffentlicht).

HARTLIEB, A.; SPERER, A.; RUTSCHMANN, P. (2011): Neues Hydraulisches Kraftwerk Bez-nau, Versuchsbericht Nr. 414 der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU München (unveröffentlicht).

HARTLIEB, A.; SPERER, A.; RUTSCHMANN, P. (2013): Stauwehr und Dotierkraftwerk Winznau, Versuchsbericht Nr. 418 der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU München (unveröffentlicht).

HARTLIEB, A.; SPERER, A.; STROBL, Th. (2003): Wehranlage Baierbrunn - Versuche 2003, Versuchsbericht Nr. 372 der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU München (unveröffentlicht).

HARTLIEB, A.; SPERER, A.; STROBL, Th. (2005): Hochwasserentlastungsanlage Grüntensee, Versuchsbericht Nr. 386 der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU München (unveröffentlicht).

ISHIKAWA, Y. (1989): Studies on disasters caused by debris flows carrying floating logs down mountain streams, PhD dissertation, Kyoto University.

JOHANSSON, N.; CEDERSTRÖM, M. (1995): Floating debris and spillways, Proceedings of the International Conference on Hydropower, San Francisco, July 25-28.

KNAUSS, J.; SPERER, A.; STROBL, Th. (1993): Sylvensteinspeicher - zusätzliche Entlastungsanlage, Versuchsbericht Nr. 312 der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU München (unveröffentlicht).

KNAUSS, J. (1995): Treibholzfänge am Lainbach in Benediktbeuern und am Arzbach (ein neues Element im Wildbachausbau), in: Von der oberen zur unteren Isar, Berichte des Lehrstuhls und der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU München, Nr. 76, S. 23-66.

LANGE, D.; BEZZOLA, G.R. (2006): Schwemmholz - Probleme und Lösungsansätze, Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, Nr. 188.

LARIVIERE, R.; LEGER, P.; TINAWI, R.; ROUSSEL, M. (1997): Safety of gravity dams and spillways against floods, Proceedings of the 9th Canadian Dam Safety Conference, pp. 1.17-1.30, Montreal.

MÖLLER, G.; WEITBRECHT, V.; NUSSLE, O. (2009): Matteschwelle Bern - Erkenntnisse zur Hochwassersicherheit aus hydraulischen Modellversuchen, Wasser Energie Luft, 101(2), S. 83-88.

NORWEGIAN WATER RESOURCES AND ENERGY ADMINISTRATION (1992): The Norwegian dam safety project, main report, 1992.

PFISTER, M. (2010): Schwemmholzurückhalt beim Einlaufbauwerk zum Lyssbachstollen, Wasser Energie Luft, 102(4), S. 275-280.

RICKENMANN, D. (1997): Schwemmholz und Hochwasser, Wasser Energie Luft, 89(5/6), S. 115-119.

RIMBÖCK, A. (2001): Luftbildbasierte Abschätzung des Schwemmholzpotentials (LASP) in Wildbächen, Festschrift aus Anlass des 75-jährigen Bestehens des Oskar-von-Miller-Instituts, Berichte des Lehrstuhls und der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU München, Nr. 91, S. 202-213.

RIMBÖCK, A. (2003): Schwemmholzurückhalt in Wildbächen - Grundlagen zu Planung und Berechnung von Seilnetzsperrern, Berichte des Lehrstuhls und der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU München, Nr. 94.

RUIZ VILLANUEVA, V.; BLADE, E.; SANCHEZ JUNY, M.; MARTI CARDONA, B.; DIEZ HERRERO, A.; BODOQUE, J.M. (2014): Two dimensional numerical modeling of wood transport, Journal of Hydroinformatics, doi:10.2166/hydro.2014.026.

RUNDQVIST, J. (2005): Extreme floods and debris - closing the knowledge gap! Proceedings of HYDRO 2005, Surrey, United Kingdom, Aqua-Media International, October 2005.

SCHMOCKER, L.; HAGER, W.H. (2010): Drift accumulation at river bridges, Proceedings of River Flow 2010, Bundesanstalt für Wasserbau, Deutschland, S. 713-720, ISBN: 978-3-939230-00-7.

SCHMOCKER, L.; HAGER, W.H. (2011): Probability of drift blockage at bridge decks, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 137, No. 4, S. 470-479.

SCHMOCKER, L.; HAGER, W.H. (2013): Scale modeling of wooden debris accumulation at a debris rack, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 139, No. 8, S. 827-836.

SENDLHOFER, A.; GEMS, B. (2010): Überprüfung der Verklauungssicherheit von Brücken anhand eines physikalischen Modells, Tagungsband des 12. Treffens junger Wissenschaftler an Wasserbauinstituten vom 11. bis 14. August 2010 an der Universität Stuttgart, Mitteilungen des Instituts für Wasserbau der Universität Stuttgart, Nr. 193, S. 46-53.

SIMONETT, S.; DETERT, M.; WEITBRECHT, V. (2012): Drift wood retention to minimize flood risk for the city of Zurich - physical experiments, Proceedings of 12th congress Interpaevent 2012, Grenoble, France, S. 803-810.

TAMAGNI, S.; WEITBRECHT, V.; MÜLLER, U.; HUNZIKER, R.; WYSS, H.; KOLB, R.; BAUMANN, W. (2010): Schwemmholzurückhalt Ettisbühl/Malters, Wasser Energie Luft, 102(4), S. 269-274.

TAMAGNI, S.; WEITBRECHT, V. (2010): Schwemmholzurückhalt mit parallel angeströmten Rechen, in: Wasserbau in Bewegung ... von der Statik zur Dynamik, Tagungsband des Wasserbausymposiums vom 1. bis 3. Juli 2010 in Wallgau, Berichte des Lehrstuhls und der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU München, Nr. 124, S. 483-492.

UCHIOGI, T.; SHIMA, J.; TAJIMA, H.; ISHIKAWA, Y. (1996): Design methods for wood-debris entrapment; Tagungsband des internationalen Symposiums Interpraevent, Vol. 5, S. 279-288.

VAW (2001): Umleitstollen Campo Vallemaggia, Versuchsbericht Nr. 940 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich (unveröffentlicht).

WEITBRECHT, V.; SCHMOCKER, L. (2012): Driftwood retention in large rivers - a new concept, Proceedings of River Flow 2012 Costa Rica, S. 1073-1080, ISBN 978-0-415-62129-8.

YANG, J.; JOHANSSON, N.; CEDERSTRÖM, M. (2009): Handling reservoir floating debris for safe spillway discharge of extreme floods - laboratory investigations, Proceedings of 25th ICOLD Congress, Q.91-R.4, Brasilia, May 2009.

Verwendete Symbole und Formelzeichen

a	[-]	Exponent
A	[kN]	Auftriebskraft
A_K	[-]	Aufstaufaktor nach KNAUSS
A_L	[m]	lichter Abstand eines Leitpfahls von einem Pfeilerkopf
A_P	[-]	Dimensionsmatrix der Verklauungswahrscheinlichkeit
$A_{T/L}$	[-]	Dimensionsmatrix der Kompaktheit des Verklauungskörpers
b	[-]	Exponent
b_K	[m]	Breite des Verklauungskörpers quer zur Fließrichtung
b_S	[m]	Sohlbreite
$b_{\ddot{U}}$	[m]	Breite der Überfallkrone
B	[-]	Verbauungsgrad
B_i	[m]	lichte Wehrfeldbreiten der Wehranlage Baierbrunn ($i = 1 - 5$)
B_P	[m]	Pfeilerbreite
c	[-]	Exponent
C	[-]	Konstante in Abhängigkeit vom Waldtyp
C_P	[-]	Proportionalitätskonstante für die Verklauungswahrscheinlichkeit
$C_{T/L}$	[-]	Proportionalitätskonstante für die Kompaktheit des Verklauungskörpers
C_W	[-]	Widerstandsbeiwert
d	[-]	Exponent
$d_{H,min}$	[m]	minimaler Schwemmholzdurchmesser in den Grundlagenversuchen (= 0,02 m)
D	[m]	Höhendifferenz zwischen Wehrschwelle und Vorboden
e	[-]	Exponent
E_a	[kN]	aktiver Erddruck
EG	[km ²]	Fläche des Einzugsgebiets
EG_W	[km ²]	Fläche des bewaldeten Einzugsgebiets

f	[-]	Funktion
F	[kN]	Krafteinwirkung auf eine Wehranlage infolge einer Verklausung
Fr	[-]	Froude-Zahl der Anströmung
Fr _{krit}	[-]	kritische Froude-Zahl beim Abtauchen von Schwemmholz
g	[m/s ²]	Erdbeschleunigung (= 9,81 m/s ²)
G	[kN]	Eigengewicht
G _s	[m ³ /m]	spezifische Geschiebemenge
G ₁	[m ³ /m]	kritische spezifische Geschiebemenge, ab der es in einer Verklausung zu einer Interaktion zwischen Holz und Geschiebe kommt
G ₂	[m ³ /m]	spezifische Geschiebemenge, ab der das Geschiebe die Verklausung dominiert
h	[m]	Fließtiefe
H	[m]	Überströmungshöhe
H _B	[m]	Abstand der Unterkante der Brücke vom Oberwasserstand
H _D	[m]	Abstand der Unterkante des Drucksegments vom Oberwasserstand
H _O	[kN]	Holzlast
HQ _i	[m ³ /s]	i-jährlicher Hochwasserabfluss
J	[-]	Sohlgefälle
l	[m]	Länge
l _k	[m]	Kreisbogenlänge des Rechens
L	[m]	Schwemmholzlänge
L _k	[m]	Länge des Verklausungskörpers in Fließrichtung
L _{max}	[m]	maximale Schwemmholzmenge
L _w	[m]	bewaldete Gerinnelänge
m	[kg]	Masse
M	[-]	Ablagerungsanteil im linken Drittel der Versuchsrinne
n	[-]	Anzahl der Wehrfelder
N	[-]	Schwemmholzdurchgang bezogen auf die zugegebene Schwemmholzmenge

P	[-]	Verklausungswahrscheinlichkeit
P_1	[-]	Verklausungswahrscheinlichkeit im Einfeldmodell
P_3	[-]	Verklausungswahrscheinlichkeit im Dreifeldmodell
q	[m ³ /(s·m)]	spezifischer Abfluss
Q	[m ³ /s]	Abfluss
Q_{Aare}	[m ³ /s]	Abfluss in der Aare ($Q_{Aare} = Q_{Wehr} + Q_{Kanal}$)
Q_{Kanal}	[m ³ /s]	Kanalabfluss
Q_{Wehr}	[m ³ /s]	Wehrabfluss
r	[m]	Kurvenradius
Re^*_{min}	[-]	minimale Reynolds-Zahl der umströmten Schwemmholzelemente in den Grundlagenversuchen (= 1620)
t	[s]	Zeit
t_z	[min]	Zugabezeit
T	[m]	Höhe des Verklausungskörpers
T/L_K	[-]	Kompaktheit des Verklausungskörpers
v	[m/s]	Fließgeschwindigkeit
v_{krit}	[m/s]	kritische Fließgeschwindigkeit beim Abtauchen von Schwemmholz
v_{min}	[m/s]	minimale Fließgeschwindigkeit in den Grundlagenversuchen
v_s	[m/s]	Anströmungsgeschwindigkeit des Verklausungskörpers an der Wasseroberfläche
v_{su}	[m/s]	mittlere Fließgeschwindigkeit unter dem Verklausungskörper
$v^2/2g$	[m]	Geschwindigkeitshöhe
V	[m ³]	effektive Schwemmholzmenge
V_F	[m ³]	Feststofffracht
V_{Pot}	[m ³]	Schwemmholzpotential
V_s	[m ³ /m]	spezifische Schwemmholzmenge
V_W	[m ³]	Wasserfracht
W	[m]	Wehrfeldbreite bzw. Öffnungsbreite

W_i	[m]	Breiten der Wehrfelder im Dreifeldmodell ($i = 1 - 3$)
W_s	[m]	lichte Säulenweite
W_o	[kN]	oberwasserseitige Wasserlast
W_u	[kN]	unterwasserseitige Wasserlast
We_{min}	[-]	minimale Weber-Zahl in den Grundlagenversuchen (= 120)
x	[-]	Exponent
y	[-]	Exponent
z	[-]	Exponent
Z_s	[m ü. NN]	Stauziel
α	[°]	Rechenneigung
Δh	[m]	Anstieg der Fließtiefe
$\Delta h/h$	[-]	relativer Anstieg der Fließtiefe
ΔH	[m]	Anstieg des Oberwasserstands
$\Delta H/H$	[-]	relativer Anstieg des Oberwasserstands
ΔQ	[m ³ /s]	Abflussreduzierung
$\Delta Q/Q$	[-]	relative Abflussreduzierung
ν	[m ² /s]	kinematische Viskosität von Wasser bei 10°C Wassertemperatur (= $1,307 \cdot 10^{-6}$ m ² /s)
ρ_H	[kg/m ³]	Schwemmholzrohddichte
ρ_H/ρ_W	[-]	relative Schwemmholzrohddichte
ρ_W	[kg/m ³]	Wasserdichte (= 1000 kg/m ³)
σ	[kg/s ²]	Oberflächenspannung von Wasser bei 10°C Wassertemperatur (= $74,2 \cdot 10^{-3}$ kg/m ²)

Bisher erschienene Berichte des Lehrstuhls und der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische Universität München

- Nr. 1 **Häusler Erich:** Energieumwandlung bei einem frei fallenden, kreisrunden Strahl in einem Wasserpolster, 1962, *vergriffen*
- Nr. 2 **Spiekermann, Günter:** Instabile Formen des Schußstrahles beim Abfluß unter Schützen und seine Kraftwirkungen auf die Schützenkonstruktion, 1962, *vergriffen*
- Nr. 3 **Linder Gaspar:** Über die Gestaltung von Durchlaßausläufen, 1963, *vergriffen*
- Nr. 4 **Knauss Jost:** Modellversuche über die Hochwasserentlastungsanlagen an kleinen Rückhaltespeichern in Südbayern, 1963, *vergriffen*
- Nr. 5 **Mahida Vijaysinh:** Mechanismus der Schnellsandfiltration, 1964, *vergriffen*
- Nr. 6 **Rothmund, Hermann:** Energieumwandlung durch Strahlumlenkung in einer Toskammer, 1966, *vergriffen*
- Nr. 7 **Häusler Erich:** Luftsiphons für den pneumatischen Verschuß von Wassereinläufern, 1966, *vergriffen*
- Nr. 8 **Seus Günther J.:** Die Anfangskavitation, 1966, *vergriffen*
- Nr. 9 **Knauss Jost:** Schießender Abfluß in offenen Gerinnen mit fächerförmiger Verengung, 1967, *vergriffen*
- Nr. 10 **Häusler Erich; Bormann Klaus:** Schießender bzw. strömender Abfluß in Bächen
Schultz Gert A.: Die Anwendung von Computer-Programmen für das Unit-Hydrograph-Verfahren am Beispiel der Iller
Bauch Wolfram: Untersuchungen über Wasserstandsvorhersagen an einem 600 m langen Modell der Donaustrecke Regensburg-Straubing, 1967, *vergriffen*
- Nr. 11 **Schultz Gert A.:** Bestimmung theoretischer Abflußganglinien durch elektronische Berechnung von Niederschlagskonzentration und Retention (Hyreun-Verfahren), 1968, *vergriffen*
- Nr. 12 **Raumer Friedrich von:** Verteilung von Bewässerungswasser in Kanälen - Eine Systematik großer Kanalsysteme zur Verteilung von Bewässerungswasser unter besonderer Berücksichtigung von Regulier- und Meßvorgängen, 1968, *vergriffen*
- Nr. 13 **Bormann Klaus:** Der Abfluß in Schußrinnen unter Berücksichtigung der Luftaufnahme, 1968
- Nr. 14 **Scheuerlein Helmut:** Der Rauhgerinneabfluß, 1968, *vergriffen*
- Nr. 15 **Koch Kurt:** Die gegenseitige Strahlableitung auf horizontaler Sohle, 1968
- Nr. 16 **Bauch Wolfram:** Die Hochwasserwelle im ungestauten und gestauten Fluß, 1968
- Nr. 17 **Marr Gerhard:** Vergleich zweier Differenzenverfahren in einem mathematischen Modell zur Berechnung von instationären Abflußvorgängen in Flüssen, 1970, *vergriffen*
- Nr. 18 **Herbrand Karl:** Der räumliche Wechselsprung, 1970, *vergriffen*
- Nr. 19 **Seus Günther J.:** Betrachtungen zur Kontinuitätsbedingung der Hydromechanik;
Zielke Werner: Zur linearen Theorie langer Wellen in Freispiegelgerinnen, 1971
- Nr. 20 **Häusler Erich:** Entnahmetürme mit Luftsiphons, 1971, *vergriffen*
- Nr. 21 **Herbrand Karl:** Das Tosbecken mit seitlicher Aufweitung, 1971
- Nr. 22 **Knauss Jost:** Hydraulische Probleme beim Entwurf von Hochwasserentlastungsanlagen an großen und kleinen Staudämmen, 1971, *vergriffen*
- Nr. 23 **Zielke Werner:** Berechnung der Frequenzganglinien und Eigenschwingungen von Rohrleitungssystemen
Zielke Werner; Wylie E. Benjamin: Zwei Verfahren zur Berechnung instationärer Strömungen in Gasfernleitungen und Gasrohrnetzen, 1971
- Nr. 24 **Knauss Jost:** Wirbel an Einläufen zu Wasserkraftanlagen, 1972, *vergriffen*
- Nr. 25 **Kotoulas Dimitrios:** Die Wildbäche Süddeutschlands und Griechenlands, Teil 1, 1972, *vergriffen*
- Nr. 26 **Keller Andreas:** Experimentelle und theoretische Untersuchungen zum Problem der modellmäßigen Behandlung von Strömungskavitation, 1973, *vergriffen*
- Nr. 27 **Horn Heinrich:** Hochwasserabfluß in automatisch geregelten Staustufen, 1973
- Nr. 28 **Bonasoundas Markos:** Strömungsvorgang und Kolkproblem am runden Brückenpfeiler, 1973

- Nr. 29 **Horn Heinrich; Zielke Werner:** Das dynamische Verhalten von Flußstauhaltungen, 1973
- Nr. 30 **Uslu Orhan:** Dynamische Optimierung der Fließbeiwerte in mathematischen Flußmodellen und Berücksichtigung der Vorlandüberströmung - Eine Anwendung des Operations Research im theoretischen Flußbau, 1974
- Nr. 31 **Kotoulas Dimitrios:** Die Wildbäche Süddeutschlands und Griechenlands, Teil 2, 1975, *vergriffen*
- Nr. 32 **50 Jahre Versuchsanstalt Oberrach**
Hartung Fritz: Einführung: Was treiben eigentlich die Oberracher?
Knauss Jost: Strategien und Entscheidungshilfen beim Hochwasserschutz in Städten, dargestellt am Beispiel der Hochwasserfreilegung der Stadt Harburg an der Wörnitz
Häusler Erich: Abstürze und Stützwellen in hydraulischer und konstruktiver Betrachtung (Mindestfallhöhen zur Erzielung einer genügenden hydraulischen Wirksamkeit)
Seus Günther J.; Hack Hans-Peter: Erster Vergleich der Ergebnisse des physikalischen Modells in Oberrach mit denen des neuen mathematischen Modells
Uslu Orhan; Schmitz Gerd: Parameteridentifikation und Sensitivitätsanalyse bei mathematischen Modellen in der Hydrologie
Keller Andreas; Zielke Werner: Veränderung des freien Gasgehaltes in turbulenten Rohrströmungen bei plötzlichen Druckabsenkungen
Herbrand Karl: Zusammenführung von Schußstrahlen. Zwei praktische Beispiele konstruktiver Lösungen aus Modellversuchen
Zielke Werner: Grenzen der deterministischen Betrachtungsweise in der Strömungsmechanik, 1976
- Nr. 33 **Probleme der Arbeit des beratenden Ingenieurs in der Wasserwirtschaft der Entwicklungsländer.** Symposium am 13.10.1976 in Wallgau, 1977
- Nr. 34 **50 Jahre Versuchsanstalt Oberrach,** Feierstunde am 14.10.1976 in Wallgau
Hartung Fritz: Die Wasserbauversuchsanstalt Oberrach im Strom der Zeit
Bischofsberger Wolfgang: Laudatio für Professor Dr.-Ing. E. Mosonyi
Mosonyi Emil: Wasserbau, Technik oder Kunst? 1977
- Nr. 35 **50 Jahre Versuchsanstalt Oberrach,**
Ausleitungen aus geschiebeführenden Flüssen, Seminar am 15.10.1976 in Oberrach
Cecen Kazim: Die Verhinderung des Geschiebeeinlaufes zu Wasserfassungsanlagen
Midgley D.C.: Abstraction of water from sediment-laden rivers in Southern Africa
Jacobsen J.C.: Geschiebefreie Triebwasserfassungen - Modellversuche am Beispiel des sogenannten Geschiebeabzuges
Scheuerlein Helmut: Die Bedeutung des wasserbaulichen Modellversuchs für die Gestaltung von Ausleitungen aus geschiebeführenden Flüssen, 1977
- Nr. 36 **Hack Hans-Peter:** Lufteinzug in Fallschächten mit ringförmiger Strömung durch turbulente Diffusion, 1977
- Nr. 37 **Csallner Klausotto:** Strömungstechnische und konstruktive Kriterien für die Wahl zwischen Druck- und Zugsegment als Wehrverschluß, 1978
- Nr. 38 **Kanzow Dietz:** Ein Finites Element Modell zur Berechnung instationärer Abflüsse in Gerinnen und seine numerischen Eigenschaften, 1978
- Nr. 39 **Keller Andreas; Prasad Rama:** Der Einfluß der Vorgeschichte des Testwassers auf den Kavitationsbeginn an umströmten Körpern - Ein Beitrag zur Frage der Rolle der Kavitationskeime bei Strömungskavitation, 1978
- Nr. 40 **Hartung Fritz:** 75 Jahre Nilstau bei Assuan - Entwicklung und Fehlentwicklung, 1979, *vergriffen*
- Nr. 41 **Knauss Jost:** Flachgeneigte Abstürze, glatte und raue Sohlrampen
Scheuerlein Helmut: Wasserentnahme aus geschiebeführenden Flüssen
Häusler Erich: Unkonventionelle neuere Stauhaltungswehre an bayerischen Flüssen als gleichzeitige Sohlsicherungsbauwerke, 1979, *vergriffen*
- Nr. 42 **Seus Günther J.; Joeres Erhard P.; Engelmann Herbert M.:** Lineare Entscheidungsregeln und stochastische Restriktionen bei Bemessung und Betrieb von Speichern, 1979, *vergriffen*
- Nr. 43 **Meier Rupert C.:** Analyse und Vorhersage von Trockenwetterabflüssen - Eine Anwendung der Systemhydrologie, 1980, *vergriffen*
- Nr. 44 **Treske Arnold:** Experimentelle Überprüfung numerischer Berechnungsverfahren von Hochwasserwellen, 1980, *vergriffen*

- Nr. 45 **Csallner Klausotto; Häusler Erich:** Abflußinduzierte Schwingungen an Zugsegmenten - Ursachen, Sanierung und allgemeine Folgerungen
Herbrand Karl; Renner Dietrich: Aufnahme und Wiedergabe der Bewegung von Schwimmkörpern mit einem Video-Meßsystem
Keller Andreas: Messungen des Kavitationskeimspektrums im Nachstrom eines Schiffes - die ersten Großausführungsmessungen mit der Laser-Streulichtmethode
Knauss Jost: Neuere Beispiele für Blocksteinrampen an Flachlandflüssen
Scheuerlein Helmut: Der gelbe Fluß - nach wie vor Chinas Sorge oder die Unerbittlichkeit der Natur gegenüber 4000 Jahren menschlicher Bemühungen
Seus Günther J.: Nochmals: Das Muskingum-Verfahren. Fingerübungen zu einem bekannten Thema als "gradus ad parnassum" sowie neue Gedanken zur Interpretation des Anwendungsbereiches und eine Lösung des Problems der Nebenflüsse
Treske Arnold: Hochwasserentlastung an Dämmen. Zwei konstruktiv ähnliche Lösungen im Modellversuch, 1981, *vergriffen*
- Nr. 46 **Schmitz Gerd:** Instationäre Eichung mathematischer Hochwasserablauf-Modelle auf der Grundlage eines neuen Lösungsprinzips für hyperbolische Differentialgleichungs-Systeme, 1981, *vergriffen*
- Nr. 47 **Scheuerlein Helmut:** Der wasserbauliche Modellversuch als Hilfsmittel bei der Bewältigung von Verlandungsproblemen in Flüssen
Knauss Jost: Rundkronige und breitkronige Wehre, hydraulischer Entwurf und bauliche Gestaltung
Keller Andreas: Maßstabeffekte bei der Anfangskavitation, 1983, *vergriffen*
- Nr. 48 **Renner Dietrich:** Schiffahrtstechnische Modellversuche für Binnenwasserstraßen - Ein neues System und neue Auswertungsmöglichkeiten, 1984, *vergriffen*
- Nr. 49 **Sonderheft: Erhaltung und Umbau alter Wehre** (Wasserbau im historischen Ensemble, drei Beispiele aus dem Hochwasserschutz bayerischer Städte), 1984, *vergriffen*
- Nr. 50 **Knauss Jost; Heinrich B.; Kalcyk H.:** Die Wasserbauten der Minyer in der Kopais - die älteste Flußregulierung Europas, 1984, *vergriffen*
- Nr. 51 **Hartung Fritz; Ertl Walter; Herbrand Karl:** Das Donaumodell Straubing als Hilfe für die Planung und Bauausführung der Staustufe Straubing, 1984
- Nr. 52 **Hahn Ulrich:** Lufteintrag, Lufttransport und Entmischungsvorgang nach einem Wechselsprung in flachgeneigten, geschlossenen Rechteckgerinnen, 1985
- Nr. 53 **Bergmann Norbert:** Entwicklung eines Verfahrens zur Messung und Auswertung von Strömungsfeldern am wasserbaulichen Modell, 1985
- Nr. 54 **Schwarz Jürgen:** Druckstollen und Druckschächte - Bemessung und Konstruktion, 1985, *vergriffen*
- Nr. 55 **Schwarz Jürgen:** Berechnung von Druckstollen - Entwicklung und Anwendung eines mathematischen Modells und Ermittlung der felsmechanischen Parameter, 1987
- Nr. 56 **Seus Günther J.; Edenhofer Johann; Czirwitzky Hans-Joachim; Kiefer Ernst-Martin; Schmitz Gerd; Zunic Franz:** Ein HN-Modellsystem für zweidimensionale, stationäre und instationäre Strömungen beim Hochwasserschutz von Städten und Siedlungen, 1987
- Nr. 57 **Knauss Jost:** Die Melioration des Kopaisbeckens durch die Minyer im 2. Jt.v.Chr.; Kopais 2 - Wasserbau und Siedlungsbedingungen im Altertum, 1987
- Nr. 58 **Mtalo Felix:** Geschiebeabzug aus Kanälen mit Hilfe von Wirbelröhren, 1988
- Nr. 59 **Yalin M. Selim; Scheuerlein Helmut:** Friction factors in alluvial rivers
Yalin M. Selim: On the formation mechanism of dunes and ripples
Keller Andreas: Cavitation investigations at one family of NACA-hydrofoils at different angles of attack, as a contribution to the clarification of scale effects at cavitation inception, 1988
- Nr. 60 **Schmitz Gerd H.:** Strömungsvorgänge auf der Oberfläche und im Bodeninneren beim Bewässerungslandbau. Grundlagen, Kritik der herkömmlichen Praxis und neue hydrodynamisch-analytische Modelle zur Oberflächenbewässerung, 1989
- Nr. 61 **Muckenthaler Peter:** Hydraulische Sicherheit von Staudämmen, 1989, *vergriffen*
- Nr. 62 **Kalenda Reinhard:** Zur Quantifizierung der hydraulischen Versagenswahrscheinlichkeit beweglicher Wehre, 1990
- Nr. 63 **Knauss Jost:** Kopais 3, Wasserbau und Geschichte, Minysche Epoche - Bayerische Zeit (vier Jahrhunderte - ein Jahrzehnt), 1990

- Nr. 64 **Kiefer Ernst-Martin, Liedl Rudolf, Schmitz Gerd H. und Seus Günther J.:** Konservative Strömungsmodelle auf der Basis krummliniger Koordinaten unter besonderer Berücksichtigung von Wasserbewegungen im ungesättigt-gesättigten Boden, 1990
- Nr. 65 **Hartung Fritz:** Der ägyptische Nil 190 Jahre im Spiel der Politik (1798-1988)
Hartung Fritz: Gedanken zur Problematik der Nilwehre
Döscher Hans-Dieter und Hartung Fritz: Kritische Betrachtungen zum Stützwehr im Toschka-Entlastungsgerinne des Assuan-Hochdammes, 1991
- Nr. 66 **Schmitz Gerd H., Seus Günther J. und Liedl Rudolf:** Ein semi-analytisches Infiltrationsmodell für Füllung und Entleerung von Erdkanälen
Keller Andreas P.: Chinese-German comparative cavitation tests in different test facilities on models of interest for hydraulic civil engineering, 1991
- Nr. 67 **Liedl Rudolf:** Funktionaldifferentialgleichungen zur Beschreibung von Wasserbewegungen in Böden natürlicher Variabilität - Beiträge zur Theorie und Entwicklung eines numerischen Lösungsverfahrens, 1991
- Nr. 68 **Zunic Franz:** Gezielte Vermaschung bestehender Kanalisationssysteme - Methodische Studien zur Aktivierung freier Rückhalteräume unter besonderer Berücksichtigung der Abflusssteuerung, 1991
- Nr. 69 **Eickmann Gerhard:** Maßstabeffekte bei der beginnenden Kavitation - Ihre gesetzmäßige Erfassung unter Berücksichtigung der wesentlichen Einflußgrößen, 1991
- Nr. 70 **Schmid Reinhard:** Das Tragverhalten von Erd- und Steinschüttdämmen mit Asphaltbeton-Kerndichtungen, 1991
- Nr. 71 **Kiefer Ernst-Martin:** Hydrodynamisch-numerische Simulation der Wasserbewegung im ungesättigten und gesättigten Boden unter besonderer Berücksichtigung seiner natürlichen Variabilität, 1991
- Nr. 72 **Strobl Th., Steffen H., Haug W. und Geiseler W.-D.:** Kerndichtungen aus Asphaltbeton für Erd- und Steinschüttdämme, 1992
- Nr. 73 **Symposium: Betrieb, Unterhalt und Modernisierung von Wasserbauten**
Garmisch-Partenkirchen, 29. - 31. Oktober 1992
- Nr. 74 **Heilmair Thomas und Strobl Theodor:** Erfassung der sohnnahen Strömungen in Ausleitungsstrecken mit FST-Halbkugeln und Mikro-Flowmeter - ein Vergleich der Methoden, 1994
- Nr. 75 **Godde Dominik:** Experimentelle Untersuchungen zur Anströmung von Rohrturbinen.
Ein Beitrag zur Optimierung des Turbineneinlaufs, 1994
- Nr. 76 **Knauss Jost:** Von der Oberen zur Unteren Isar: Alte und neue Wasserbauten rund um die Benediktenwand. Sohlensicherung an der Unteren Isar., 1995
- Nr. 77 **Knauss Jost:** Argolische Studien: Alte Straßen - alte Wasserbauten. Talsperre von Mykene; Flußumleitung von Tiryns; Hydra von Lerna; Küstenpass Anigraia, 1996
- Nr. 78 **Aufleger Markus:** Ein Beitrag zur Auswertung von Erddruckmessungen in Staudämmen, 1996
- Nr. 79 **Heilmair Thomas:** Hydraulische und morphologische Kriterien bei der Beurteilung von Mindestabflüssen unter besonderer Berücksichtigung der sohnnahen Strömungsverhältnisse, 1997
- Nr. 80 **Maile Willibald:** Bewertung von Fließgewässer-Biozöosen im Bereich von Ausleitungskraftwerken (Schwerpunkt Makrozoobenthos), 1997
- Nr. 81 **Knauss Jost:** Olympische Studien: Herakles und der Stall des Augias. Kladeosmauer und Alpheiosdamm, die Hochwasserfreilegung von Alt-Olympia, 1998
- Nr. 82 **Symposium: Planung und Realisierung im Wasserbau - Vergleich von Zielvorstellungen mit den Ergebnissen,** Garmisch-Partenkirchen 15. - 17. Oktober 1998
- Nr. 83 **Hauger Stefan:** Verkehrssteuerung auf Binnenwasserstraßen - Ein Beitrag zur Optimierung der Schleusungsreihenfolge in Stillwasserkanälen und staueregelten Flüssen, 1998
- Nr. 84 **Herbrand Karl:** Schifffahrtstechnische Untersuchungen der Versuchsanstalt Obernach; Ein Rückblick auf ein traditionelles Untersuchungsgebiet der VAO, 1998
- Nr. 85 **Hartlieb Arnd:** Offene Deckwerke - Eine naturnahe Methode zur Sohlstabilisierung eintiefungsgefährdeter Flußabschnitte, 1999
- Nr. 86 **Spannring Michael:** Die Wirkung von Buhnen auf Strömung und Sohle eines Fließgewässers: Parameterstudie an einem numerischen Modell, 1999
- Nr. 87 **Kleist Frank:** Die Systemdurchlässigkeit von Schmalwänden. Ein Beitrag zur Herstellung von Schmalwänden und zur Prognose der Systemdurchlässigkeit, 1999

- Nr. 88 **Lang Tobias:** Geometrische Kriterien zur Gestaltung von Kraftwerkseinläufen. Experimentelle Untersuchungen an Rohr-S-Turbine und Durchströmturbine, 1999
- Nr. 89 **Aufleger Markus:** Verteilte faseroptische Temperaturmessungen im Wasserbau, 2000
- Nr. 90 **Knauss Jost:** Späthelladische Wasserbauten. Erkundungen zu wasserwirtschaftlichen Infrastrukturen der mykenischen Welt, 2001
- Nr. 91 **Festschrift** aus Anlass des 75-jährigen Bestehens der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Technischen Universität München in Obernach; Oskar v. Miller-Institut, 2001
- Nr. 92 **Wildner Harald:** Injektion von porösem Massenbeton mit hydraulischen Bindemitteln, 2002
- Nr. 93 **Wildbach Naturversuche**
Loipersberger Anton und Sadgorski Constantin: Schwemmholz in Wildbächen: Problematik und Abhilfemaßnahmen; Geschiebeuntersuchungen; 1D und 2D Abflussmodelle in einem Wildbach
Rimböck Andreas: Naturversuch Seilnetzsperrern zum Schwemmholzurückhalt in Wildbächen: Planung, Aufbau, Versuchsdurchführung und Ergebnisse
Hübl Johannes und Pichler Andreas: Zur berührungslosen Erfassung der Fließtiefe und Fließgeschwindigkeit in einem Wildbachgerinne zum Zeitpunkt des Durchganges der Hochwasserwelle, 2002
- Nr. 94 **Rimböck Andreas:** Schwemmholzurückhalt in Wildbächen – Grundlagen zu Planung und Berechnung von Seilnetzsperrern, 2003
- Nr. 95 **Nothhaft Sabine:** Die hydrodynamische Belastung von Störkörpern, 2003
- Nr. 96 **Schmautz Markus:** Eigendynamische Aufweitung in einer geraden Gewässerstrecke: Entwicklung und Untersuchungen an einem numerischen Modell, 2003
- Nr. 97 **Neuner Johann:** Ein Beitrag zur Bestimmung der horizontalen Sicherheitsabstände und Fahrinnenbreiten für Wasserstraßen, 2004
- Nr. 98 **Göhl Christian:** Bypasseinrichtungen zum Abstieg von Aalen an Wasserkraftanlagen, 2004
- Nr. 99 **Haimerl Gerhard:** Groundwater Recharge in Wadi Channels Downstream of Dams: Efficiency and Management Strategies, 2004
- Nr. 100 **Symposium: Lebensraum Fluss – Hochwasserschutz, Wasserkraft, Ökologie. Band 1;** Wallgau, Oberbayern, 16. bis 19. Juni 2004
- Nr. 101 **Symposium: Lebensraum Fluss – Hochwasserschutz, Wasserkraft, Ökologie. Band 2;** Wallgau, Oberbayern, 16. bis 19. Juni 2004
- Nr. 102 **Huber Richard:** Geschwindigkeitsmaßstabseffekte bei der Kavitationserosion in der Scherschicht nach prismatischen Kavitatoren, 2004
- Nr. 103 **Exposed Thermoplastic Geomembranes for Sealing of Water Conveyance Canals,** Guidelines for Design, Supply, Installation, 2005
- Nr. 104 **Workshop „Anwendung und Grenzen physikalischer und numerischer Modelle im Wasserbau“.** Wallgau, Oberbayern, 29. und 30. September 2005
- Nr. 105 **Conrad Marco:** A contribution to the thermal stress behaviour of Roller-Compacted-Concrete (RCC) gravity dams – Field and numerical investigations, 2006
- Nr. 106 **Schäfer Patrick:** Basic Research on Rehabilitation of Aged Free Flow Canals with Geomembranes, 2006
- Nr. 107 **Deichertüchtigung und Deichverteidigung in Bayern.** Beiträge zur Fachtagung am 13. und 14. Juli 2006 in Wallgau, Oberbayern, 2006
- Nr. 108 **Porras Pablo:** Fiber optic temperature measurements – Further Development of the Gradient Method for Leakage Detection and Localization in Earthen Structures, 2007
- Nr. 109 **Perzmaier Sebastian:** Verteilte Filtergeschwindigkeitsmessung in Staudämmen, 2007
- Nr. 110 **Wasserbau an der TU München – Symposium zu Ehren von Prof. Theodor Strobl** am 16. März 2007 in Wallgau, Oberbayern, 2007
- Nr. 111 **Haselsteiner Ronald:** Hochwasserschutzdeiche an Fließgewässern und ihre Durchsickerung, 2007
- Nr. 112 **Schwarz Peter und Strobl Theodor:** Wasserbaukunst - Oskar von Miller und die bewegte Geschichte des Forschungsinstituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft in Obernach am Walchensee (1926-1951). 120 Seiten, Preis: 9,80 €, 2007

- Nr. 113 **Flutpolder: Hochwasserrückhaltebecken im Nebenschluss.** Beiträge zur Fachtagung am 19. und 20. Juli 2007 in Wallgau, Oberbayern. ISBN 978-3-940476-03-6, 240 Seiten, durchgehend farbige Abbildungen, Preis: 34,80 €, 2007
- Nr. 114 **Assessment of the Risk of Internal Erosion of Water Retaining Structures: Dams, Dykes and Levees.** Intermediate Report of the European Working Group of ICOLD. ISBN 978-3-940476-04-3, 220 Seiten, Preis: 29,80 €, 2007
- Nr. 115 **14. Deutsches Talsperrensensymposium (14th German Dam Symposium) and 7th ICOLD European Club Dam Symposium.** Beiträge zur Tagung am 17. bis 19. September 2007 in Freising (Contributions to the Symposium on 17 - 19 September 2007 in Freising, Germany). ISBN 978-3-940476-05-0, 570 Seiten, Preis: 49,80 €, 2007
- Nr. 116 **Niedermayr Andreas:** V-Rampen – Ökologisch weitgehend durchgängige Querbauwerke. ISBN 978-3-940476-06-7, 240 Seiten, Preis: 29,80 €, 2008
- Nr. 117 **Hafner Tobias:** Uferückbau und eigendynamische Gewässerentwicklung – Aspekte der Modellierung und Abschätzungsmöglichkeiten in der Praxis. ISBN 978-3-940476-07-4, 206 Seiten, Preis: 29,80 €, 2008
- Nr. 118 **Wang Ruey-wen:** Aspects of Design and Monitoring of Nature-Like Fish Passes and Bottom Ramps. ISBN 978-3-940476-10-4, 280 Seiten, Preis: 29,80 €, 2008
- Nr. 119 **Fischer Markus:** Ungesteuerte und gesteuerte Retention entlang von Fließgewässern: Beurteilung der Wirksamkeit möglicher Maßnahmen unter Verwendung hydrodynamisch-numerischer Modellierung. ISBN 978-3-940476-11-1, 220 Seiten, Preis: 29,80 €, 2008
- Nr. 120 **Fiedler Katharina:** Erfassung hydromorphologischer Vorgänge in Fließgewässern mit Hilfe von ADCP-Messungen. ISBN 978-3-940476-12-8, Preis: 29,80 €, 2008
- Nr. 121 **Hoepfner Roland:** Distributed Fiber Optic Strain Sensing in Hydraulic Engineering. ISBN 978-3-940476-13-5, Preis: 29,80 €, 2008
- Nr. 122 **Gewässermorphologie und EU-WRRL:** Beiträge zur Fachtagung am 24. und 25. Juli 2008 in Wallgau, Oberbayern. ISBN 978-3-940476-15-9, 230 Seiten, durchgehend farbige Abbildungen, Preis: 34,80 €, 2008
- Nr. 123 **Zukunftsfähiger(s) Wasserbau und Flussgebietsmanagement – Wasser- und Feststofftransport in Fläche und Fluss.** Beiträge zur Fachtagung am 30. und 31. Juli 2009 in Wallgau, Oberbayern. ISBN 978-3-940476-19-7, 104 Seiten, durchgehend farbige Abbildungen, Preis: 9,80 €, 2009
- Nr. 124 **Rutschmann Peter (Hrsg.): Wasserbau in Bewegung ... von der Statik zur Dynamik.** Beiträge zum 15. Gemeinschafts-Symposium der Wasserbau-Institute TU München, TU Graz und ETH Zürich vom 1. bis 3. Juli 2010 in Wallgau, Oberbayern. ISBN 978-3-940476-22-7, 624 Seiten, teils farbige Abbildungen, Preis: 59,00 €, 2010
- Nr. 125 **14. Treffen junger WissenschaftlerInnen an Wasserbauinstituten.** Beiträge zum JuWi-Treffen am 25. und 26. Juni 2012 an der Technischen Universität München. ISBN 978-3-940476-23-4, 220 Seiten, Preis: 14,80 €, 2012
- Nr. 126 **Efthymiou Nikolaos:** Transient Bedload Transport of Sediment Mixtures under Disequilibrium Conditions - An Experimental Study and the Development of a New Dynamic Hiding Function. ISBN 978-3-940476-24-1, 300 Seiten, Preis: 29,80 €, 2012
- Nr. 127 **Contributions on Sediment Transport**
Hutter Kolumban: Tutorial on Prograding and Retrograding Hypo- and Hyper-pycnal Deltaic Formations into Quiescent Ambients
Hutter Kolumban and Luca Ioana: A Global View of Sediment Transport in Alluvial Systems
Vetsch David: Force-coupled Lagrangian Approach for Numerical Modelling of Bed-load Transport, ISBN 978-3-940476-25-8, 202 Seiten, Preis: 19,80 €, 2013
- Nr. 128 **Ökohydraulik - Leben im, am und mit dem Fluss.** Beiträge zur Fachtagung am 27. und 28. Juni 2013 in Obernach. ISBN 978-3-943683-04-2, 300 Seiten, durchgehend farbige Abbildungen, Preis: 29,80 €, 2013, *vergriffen*
- Nr. 129 **Shokry Mohamed Ahmed Abdelaziz:** Numerical Simulation of Fish Behaviour and Fish Movement Through Passages. ISBN 978-3-943683-05-9, 130 Seiten, durchgehend farbige Abbildungen, Preis: 24,80 €, 2013

- Nr. 130 **Hochwasser und kein Ende! Statusberichte, aktuelle Vorhaben, neue Planungswerkzeuge.** Beiträge zur Fachtagung am 3. und 4. Juli 2014 in Obernach. 978-3-943683-06-6, 200 Seiten, durchgehend farbige Abbildungen, Preis: 29,80 €, 2013
- Nr. 131 **Skublics Daniel Alexander:** Großräumige Hochwassermodellierung im Einzugsgebiet der bayerischen Donau. Retention, Rückhalt, Ausbreitung. ISBN 978-3-940476-07-3, 200 Seiten, Preis: 19,80 €, 2014
- Nr. 132 **Cuchet Mathilde:** Fish Protection and Downstream Migration at Hydropower Intakes: Investigation of Fish Behavior under Laboratory Conditions. ISBN 978-3-940476-08-0, 145 Seiten, Preis: 19,80 €, 2014
- Nr. 133 **Hartlieb Arnd:** Schwemholz in Fließgewässern - Gefahren und Lösungsmöglichkeiten. ISBN 978-3-940476-09-7, 158 Seiten, Preis: 19,80 €, 2015

Die Berichtsbände können beim Lehrstuhl für Wasserbau und Wasserwirtschaft bestellt werden:
E-Mail: sigrid.machauer@tum.de - Telefon: +49.89.289.23174

Eine PDF-Fassung der Berichtsbände seit 2007 mit teils farbigen Abbildungen und Grafiken kann von der Homepage des Lehrstuhls kostenlos heruntergeladen werden:

<http://www.wb.bgu.tum.de/publikationen/berichtshefte/>