



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

**Bundesamt für Energie BFE**  
Aufsicht Talsperren

Schlussbericht Version 2.0 vom 23. März 2023

---

# Schwemmholz am Mauerüberfall von Talsperren

---

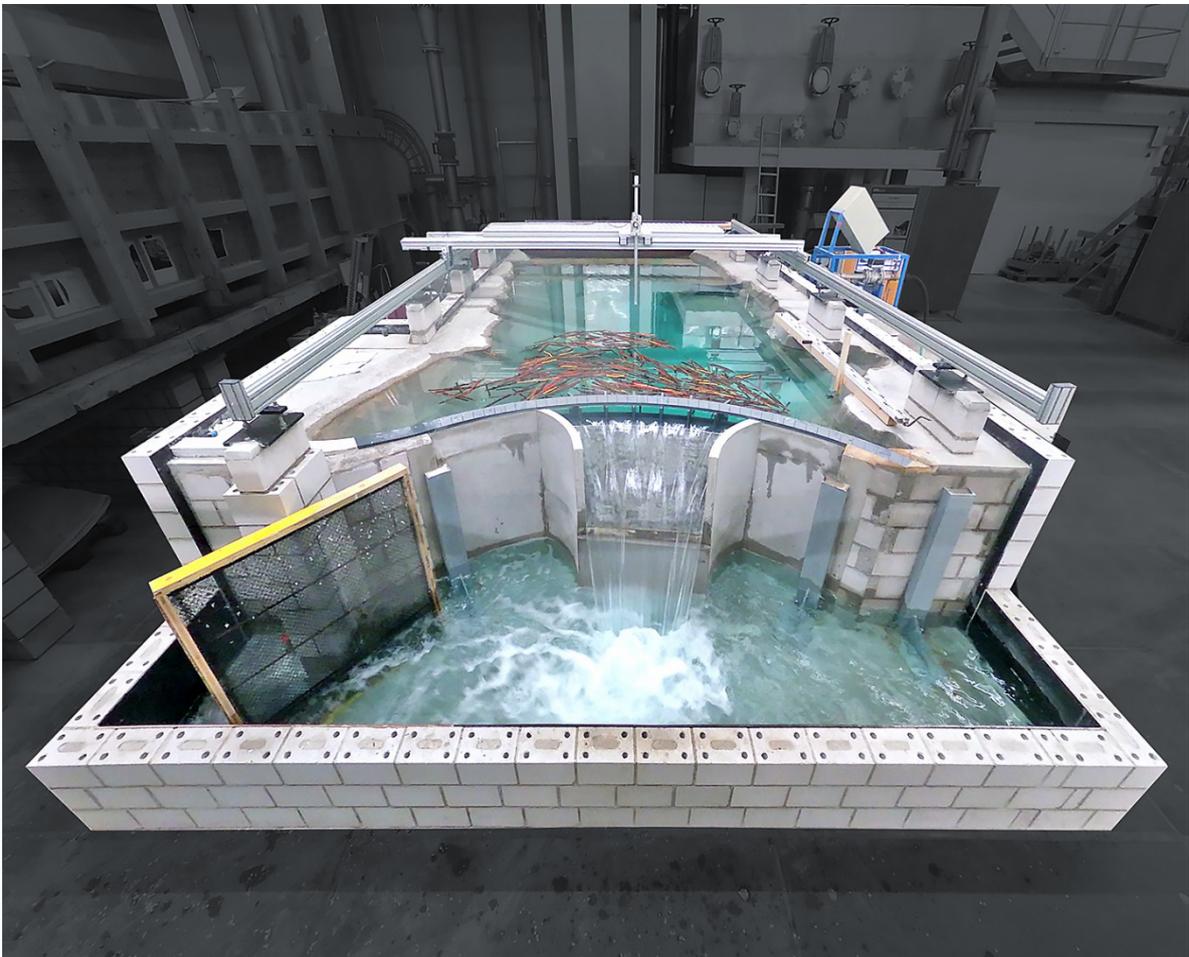


Foto: VAW 2020



| <b>Versionshistorie</b> | <b>Bemerkungen</b>   |
|-------------------------|--|
| V 1.0 (16.06.2022)      | Erstausgabe  |
| V 2.0 (23.03.2023)      | Anpassung von Gleichung (5) zur Bestimmung des lichten Abstands $a$ , so dass sie für einen grösseren Wertebereich der Pfeilerauskrägung $p_k$ anwendbar ist |

**ETH** zürich



Versuchsanstalt für Wasserbau,  
Hydrologie und Glaziologie

**Datum:** 23. März 2023

**Auftraggeberin:**

Bundesamt für Energie BFE  
Sektion Aufsicht Talsperren  
CH-3003 Bern  
[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

**Beauftragte:**

ETH Zürich  
Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW)  
Hönggerbergring 26, CH-8093 Zürich  
[www.vaw.ethz.ch](http://www.vaw.ethz.ch)

**Autoren:**

Barbara Stocker  
Adriano Lais  
Prof. Dr. Robert Boes

**BFE-Projektbegleitung:**

Dr. Markus Schwager  
Dr. Helge Fuchs

**BFE-Vertragsnummer:** SI/502153-01

Diese Studie wurde im Rahmen des Forschungsprogrammes Stauanlagensicherheit durchgeführt. Für den Inhalt der Studie sind ausschliesslich deren Autoren verantwortlich.

## Zusammenfassung

Zur gefahrlosen Ableitung von Hochwasser an einem Sperrenbauwerk kommen Hochwasserentlastungen (HWE) zum Einsatz. Im Hochwasserfall werden neben Geschiebe und Schwebstoffen meist auch Schwimmstoffe wie Schwemmholz und Zivilisationsmüll transportiert. Verklausen die Schwimmstoffe an Einlaufbauwerken von HWE-Anlagen, kann dies zu Problemen führen. Insbesondere Verklausungen von Schwemmholz an Wehrkronen oder Wehrpfeilern reduzieren die Abflusskapazität der HWE. Wird dabei das erforderliche Freibord infolge des resultierenden Aufstaus nicht mehr eingehalten, kann es gar zur Überströmung des Sperrenbauwerks kommen.

Frühere Untersuchungen zum Wasserspiegelaufstau infolge der Verklausung von Schwemmholz konzentrieren sich auf Wehranlagen mit flussähnlichen Zulaufbedingungen und weisen den Wasserspiegelaufstau in Funktion der Zulauf-Froudezahl aus, ein Konzept, das nur bedingt auf Mauerüberfälle mit Reservoirbedingungen anwendbar ist.

Ein gezielter Rückhalt von Schwemmholz in ausreichender Distanz zum Wehrbauwerk verhindert einen übermässigen Wasserspiegelaufstau im Speicher, wie es unter anderem mit Schwemmholzrechen oder ins Oberwasser auskragenden Wehrpfeilern gelingt. Die Literatur gibt eine Empfehlung zur erforderlichen Auskragung der Wehrpfeiler für eine vernachlässigbare Abflussreduktion an einem USACE-Standardwehr. Hingegen wurde die Wirkung unterschiedlich weit in den Stauraum auskragender Pfeiler auf die Verklausung und den Wasserspiegelanstieg kaum betrachtet und Untersuchungen zur Verklausungen an Pfeilern von Wehren, dessen Profilformen vom Standardwehr abweichen, fehlen gänzlich. Auch sind die Empfehlungen zur Pfeilerauskrragung nicht auf unterschiedlich poröse Verklausungskörper bezogen und es liegen keine Gleichungen zur Berechnung des Wasserspiegelanstiegs vor.

Die vorliegende Studie der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich befasst sich mit der Verklausungswahrscheinlichkeit von Einzelhölzern an den Wehrpfeilern, dem Schwemmholzrückhalt bei der Durchleitung grosser Schwemmholzgruppen, dem Wasserspiegelaufstau infolge der Verklausung an unterschiedlich stark auskragenden Wehrpfeilern eines mehrfeldrigen, unregulierten Mauerüberfalls einer Talsperre und dessen Beeinflussung durch die Porosität des sich ausbildenden Verklausungskörpers. Die Versuche wurden an einem gegenständlichen physikalischen Modell der Bogenstaumauer des Ausgleichsbeckens *Ova Spin* der Engadiner Kraftwerke AG (EKW) im Massstab 1:30 durchgeführt. Der Mauerüberfall dieser Talsperre ist durch sechs um 4.4 m auskragende Wehrpfeiler in sieben Wehrfelder unterteilt. Im Rahmen der Untersuchungen wurden die Pfeilerauskrragungen systematisch variiert, die Wehrfeldbreiten angepasst und zusätzlich das bestehende Wehr der Sperre *Ova Spin* durch ein USACE-Standardwehr ersetzt.

Die Verklausungsversuche mit Einzelhölzern gehen auf die erforderlichen Wehrfeldbreiten zur gefahrlosen Durchleitung ein und zeigen, dass die Einzelhölzer im Nahbereich vor der Wehrkrone in Fließrichtung ausgerichtet und grösstenteils durch die Entlastungsöffnung geleitet werden. Die

Versuche mit Schwemmholzgruppen wurden für unterschiedliche Längenverteilungen durchgeführt. Diese geben Hinweise zur relevanten Stammlänge, die für den Nachweis des Durchleitens eines Schwemmholzteppichs mit heterogener Längenverteilung seiner Stammhölzer anzusetzen ist. Demnach ist als relevante Stammlänge das 90%-Perzentil dem Median und dem Mittelwert der Längenverteilung vorzuziehen.

Die Ergebnisse der Versuche zum Wasserspiegelaufstau umfassen Gleichungen zur Abschätzung des charakteristischen Schwemmholzvolumens, welches für den primären Wasserspiegelaufstieg infolge der Verklausung der Wehröffnungen verantwortlich ist. Die vorliegende Arbeit liefert zudem Gleichungen zur Ermittlung der Oberflächengeschwindigkeit im Zulaufbereich zur Wehrkrone, der Eintauchtiefe des Verklausungskörpers, der dem Abfluss unter der Verklausung freistehenden Durchflussfläche und des Wasserspiegelaufstaus. Zusätzlich wird der Einfluss der Porosität des Verklausungskörpers auf den Wasserspiegelaufstau aufgezeigt.

Bei schmalen Wehrfeldern können auskragende Wehrpfeiler die Funktion eines Schwemmholzrechens übernehmen. Durch die entsprechende Dimensionierung der Pfeilerauskrägung wird der Verklausungskörper in einem Bereich mit geringerer Oberflächenfließgeschwindigkeit gebildet und dessen Eintauchtiefe entsprechend reduziert. Betragen die Oberflächenfließgeschwindigkeiten an den Pfeilernasen weniger als 1 m/s, bildet sich ein loser Schwemmholzteppich, ohne Ausbildung eines vertikalen Verklausungskörpers. Die Untersuchungen der VAW zeigen, dass bei einer Auskrägung ab Wehrkronenscheitel um das Mass der Überfallhöhe, respektive einem lichten Abstand zwischen dem Verklausungskörper und dem Überfallprofil von mindestens 85% der Überfallhöhe, selbst bei komplett verlegtem, dichtem Verklausungskörper der ungehinderte Abfluss gewährleistet wird. Es kommt somit lediglich zu einer vernachlässigbaren Abflussreduktion der Entlastung.

Der Wasserspiegelaufstau infolge Verklausung der Wehrpfeiler kann auch an Wehren mit vom Standardwehr abweichendem Profil abgeschätzt werden, solange die Überfallprofile scharfkantig oder konvex gekrümmt sind und kein breitkroniges Wehr vorliegt.

## Résumé

Les déversoirs sont des éléments indispensables pour assurer le transit des pointes de crue à travers un barrage. En cas de crue, des bois flottants et des déchets de civilisation sont habituellement transportés à la surface des cours d'eau ou des retenues d'eau. Des obstructions de ces matériaux flottants aux déversoirs peuvent mener à de graves problèmes. Les embâcles de bois flottant sur les crêtes ou à l'amont des piliers du déversoir réduisent notamment la capacité de décharge en cas de crue. Si les niveaux d'eau montent à cause du remous, le franc-bord requis ne peut plus être garanti. Au pire, ceci peut mener à la submersion du barrage.

Les études précédentes sur ce sujet considéraient en premier lieu les barrages dans des conditions fluviales, en définissant le remous dû aux embâcles de bois en fonction du nombre de Froude. Ce concept n'est que partiellement applicable aux retenues d'eau.

Pour éviter un exhaussement excessif du plan d'eau, les bois flottants doivent être retenus à une distance suffisante du barrage. Ceci peut être effectué avec des râteliers ou en prolongeant les têtes des piliers vers l'amont. La littérature scientifique donne des recommandations sur la saillie des piliers nécessaire pour empêcher une réduction du débit sur un déversoir standard USACE. Cependant, l'effet des piliers en saillie sur l'accumulation des bois flottants et l'augmentation subséquente des plans d'eau ont été peu considérés. Des études sur les effets des embâcles de bois à l'amont des déversoirs à profils non-standard font défaut. De plus, les recommandations actuelles pour le dimensionnement de la saillie des piliers ne font pas référence à des porosités différentes des embâcles de matériaux flottantes et ils n'existent pas de formule pour le calcul du remous.

La présente étude du laboratoire hydraulique VAW de l'EPF Zurich traite la probabilité de blocage des bois isolés sur les piliers du déversoir ainsi que la rétention de grands groupes de bois flottants. De plus, les influences de la saillie des piliers ainsi que de la porosité des embâcles ont été investiguées sur l'exemple d'un déversoir non régulé à plusieurs passes. Les essais ont été réalisés sur un modèle physique du barrage-voûte d'Ova Spin des Engadiner Kraftwerke AG (EKW) à l'échelle 1:30. Le déversoir de ce barrage est composé de sept passes séparées par six piliers en saillie de 4,4 mètres. Au cours des études, les saillies des piliers ainsi que les largeurs des passes du déversoir ont été systématiquement variées. De plus, le déversoir existant du barrage d'Ova Spin a été remplacé par un déversoir standard USACE.

Les essais sur la probabilité de blocage des bois isolés prennent la largeur de la passe du déversoir ainsi que la longueur des troncs en considération et montrent que les bois isolés sont en général orientés dans le sens de l'écoulement. Par conséquence, ils sont en grande partie dirigés à travers l'évacuateur de crue. Pour les tapis de bois flottants, les essais ont été réalisés pour différentes distributions de longueurs et donnent des indications sur la longueur de tronc significative à prendre en considération pour le dimensionnement d'un déversoir. Selon les études de la VAW, la largeur relative des passes du déversoir doit être au minimum de 110% du percentile 90% de la distribution des longueurs.

Les résultats des essais sur le remous du plan d'eau sont combinés à des équations afin d'estimer le volume caractéristique de bois flottants responsable de l'exhaussement primaire des niveaux d'eau. Le présent document propose en outre des équations permettant de déterminer la vitesse de surface à l'amont du déversoir, la profondeur d'immersion des accumulations de matériaux flottants, l'espace libre pour l'écoulement de l'eau sous l'accumulation ainsi que du remous. De plus, l'influence de la porosité des embâcles sur le remous est présentée.

Si les passes du déversoir sont étroites, des piliers en saillie peuvent prendre le rôle de râteliers. Avec une saillie suffisamment grande, les accumulations des bois flottants sont formées dans une zone à vitesse de surface réduite. Par conséquent, la profondeur d'immersion des accumulations est minimisée. Si les vitesses de surface sont inférieures à 1 m/s, les tapis de bois flottants sont d'une faible densité et ne montrent pas d'accumulation verticale.

Pour assurer le débit de dimensionnement du déversoir, même lorsque le corps d'accumulation est entièrement étanche, la saillie doit être égale à la hauteur déversante. En suivant cette recommandation, l'espace libre entre les accumulations et la crête du déversoir est d'au moins 85% de la hauteur de déversement. Ceci garantit un écoulement libre sous le bois accumulé.

Avec les méthodes présentées, le remous dû aux embâcles de bois flottants peut également être estimé pour les déversoirs dont le profil diffère du type standard, tant qu'il s'agit de profils en paroi mince ou à crête arrondie. Ils ne sont pas applicables pour des déversoirs à seuil épais.

## Summary

Overflow spillways are used for the safe discharge of water during floods at dam structures. During a flood, floating materials such as driftwood and civilization waste can be transported in addition to bedload and suspended material. The accumulation of these floating materials at the inlet structures of HWE facilities can lead to problems. In particular, the accumulation of driftwood at weir crests or weir piers reduces the discharge capacity of overflow spillways. If the required freeboard is no longer maintained due to the resulting backwater rise, the dam structure may even be overtopped.

Earlier studies on backwater rise due to wood accumulations mainly focused on weirs with fluvial flow conditions (high flow velocities) and identified the backwater rise as a function of the approach flow Froude number and wood characteristics. However, this concept is only conditionally applicable to dam overflow spillways with reservoir conditions (low flow velocities). Driftwood retention at a sufficient distance from the weir structure can prevent a significant backwater rise in the reservoir. This can be achieved, for example, with driftwood racks or weir piers protruding into the headwater. A recent study proposed recommendations on the required weir pier extension for negligible flow reduction at a USACE standard weir. However, systematic experiments are still missing on the effect of different pier extensions into the reservoir on driftwood accumulation and backwater rise as well as studies of accumulations at weirs with profiles different from the standard weir. Up to now, the recommendations on the required weir pier extension are not related to different porosities of driftwood accumulations and there are no design equations to determine the backwater rise due to driftwood accumulations in reservoir conditions.

The present study by the Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology (VAW) at ETH Zurich investigated the blocking probability of individual logs at weir piers, the driftwood retention during the passage of large driftwood groups, the backwater rise as a result of driftwood accumulation at weir piers extending into the headwater of an unregulated dam overflow spillway, and the influence of the resulting accumulation porosity. The experiments were conducted using a physical model of the arch dam *Ova Spin* of Engadiner Kraftwerke AG (EKW) with a model scale of 1:30. The dam spillway is divided into seven weir fields by six weir piers, extending 4.4 m into the headwater. For systematic investigations, the pillar extensions were varied, the weir field widths were adjusted and, in addition, the existing weir profile of the *Ova Spin* dam was replaced by a USACE standard weir profile.

The blocking probability tests with single logs address the criterion of the required dimensions of the weir field widths and show that single logs are aligned in the direction of flow in the area close to the weir crest and are mostly guided through the spillway. The tests with large driftwood groups were conducted for different length distributions. They provide information on the relevant log length to ensure the safe passage of a driftwood carpet consisting of logs with a heterogeneous length distribution. According to these tests, the 90% percentile of the length distribution shall be used to calculate the required weir field width.

The results of the experiments on backwater rise were combined in design equations for estimating the characteristic driftwood volume, which is responsible for the primary backwater rise due to blocking of the weir openings at the pier noses. In addition, equations were derived to determine the surface velocity in the inflow area to the weir crest, the immersion depth of the accumulation body, the free flow area below the accumulation, and the backwater rise. In addition, this study presents the influence of the accumulation porosity on the backwater rise.

Weir piers of narrow weir fields can act as a driftwood rack. A sufficiently large pier extension ensures driftwood accumulation in areas with low surface flow velocities, reducing the immersion depth of the forming accumulation. If the surface flow velocities at the pier noses are less than 1 m/s, the accumulation forms as a loose driftwood carpet without a vertical accumulation. A pier extension from the crest of the weir by the amount of the overflow height or a free distance between the accumulation body and the weir profile of at least 85% of the overflow height, respectively, causes a negligible reduction in discharge coefficient even with a completely dense accumulation body.

The backwater rise due to driftwood blockage at weir piers with weir profiles different from the standard weir can also be estimated as long as the profiles are sharp-crested or convexly curved and no broad-crested weir is present.

## Inhaltsverzeichnis

|   |            |
|---|------------|
| <b>Zusammenfassung</b> .....  | <b>iii</b> |
| <b>Résumé</b> .....   | <b>v</b>   |
| <b>Summary</b> .....  | <b>vii</b> |
| <b>Inhaltsverzeichnis</b> .....   | <b>ix</b>  |
| <b>1 Einleitung</b> .....   | <b>12</b>  |
| 1.1 Hintergrund & Problemstellung.....  | 12         |
| 1.2 Zielsetzung.....  | 16         |
| <b>2 Grundlagen und Stand des Wissens</b> .....   | <b>17</b>  |
| 2.1 Verklausungswahrscheinlichkeit und Schwemmholzdurchleitung .....                                  | 17         |
| 2.2 Aufstau bei Schwemmholzverklausung.....   | 19         |
| 2.3 Vermessung von Verklausungskörpern .....  | 22         |
| 2.4 Schwemmholz.....  | 24         |
| 2.4.1 Schwemmholzvolumen.....   | 24         |
| 2.4.2 Längenverteilung des Schwemmholzes.....   | 24         |
| 2.4.3 Schwemmholzdichte.....  | 25         |
| 2.5 Talsperre Ova Spin .....  | 26         |
| <b>3 Physikalisches Modell</b> .....  | <b>28</b>  |
| 3.1 Perimeter und Modellkonstruktion .....  | 28         |
| 3.2 Überfallprofile .....   | 29         |
| 3.3 Hydraulische und geometrische Eingangsparameter .....   | 29         |
| 3.3.1 Überfallhöhe $H_o$ und relative Überfallhöhen $\chi$ .....                                      | 30         |
| 3.3.2 Pfeilerauskrägung ab Wehrkronenscheitel $p_K$ .....   | 30         |
| 3.3.3 Wehrfeldbreite $B$ .....  | 32         |
| 3.4 Modellschwemmholz und dessen Eingangsparameter .....  | 34         |
| 3.4.1 Stammholz .....   | 34         |
| 3.4.2 Feinmaterial .....  | 35         |
| 3.4.3 Schwemmholzabmessungen, -dichte, und -festvolumen .....   | 36         |
| 3.5 Gemessene Ergebnisparameter .....   | 40         |
| 3.5.1 Durchfluss $Q$ , Überfallhöhen $H$ , Wasserspiegelaufstau $\Delta H$ und $\Delta H_{max}$ ..... | 40         |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 3.5.2    | Fliessgeschwindigkeiten $v$ und Oberflächengeschwindigkeit $v_S$ .....           | 40        |
| 3.5.3    | Eintauchtiefe der Verklausung $t_H$ und lichter Abstand $a$ .....                | 41        |
| 3.6      | Messtechnik und Koordinatensystem .....  | 41        |
| 3.6.1    | Messtechnik .....  | 41        |
| 3.6.2    | Koordinatensystem .....  | 42        |
| 3.7      | Modellähnlichkeit .....  | 42        |
| <b>4</b> | <b>Hydraulik</b> .....   | <b>43</b> |
| 4.1      | Abflusscharakteristik .....  | 43        |
| 4.2      | Oberflächengeschwindigkeit .....   | 44        |
| <b>5</b> | <b>Verklausungswahrscheinlichkeit und Durchleitung</b> .....                     | <b>46</b> |
| 5.1      | Verklausungswahrscheinlichkeit von Einzelhölzern an den Wehrpfeilern .....       | 46        |
| 5.1.1    | Versuchsaufbau und Methode .....   | 46        |
| 5.1.2    | Ergebnisse .....   | 47        |
| 5.1.3    | Prozesse & Erkenntnisse .....  | 49        |
| 5.2      | Durchleiten grosser Schwemmholzgruppen .....                                     | 50        |
| 5.2.1    | Versuchsaufbau und Methode .....   | 50        |
| 5.2.2    | Ergebnisse .....   | 51        |
| 5.2.3    | Erkenntnisse und Anwendbarkeit .....   | 55        |
| <b>6</b> | <b>Wasserspiegelaufstau infolge Schwemmholzverklausung</b> .....                 | <b>58</b> |
| 6.1      | Versuchsaufbau, Methoden und Versuchsprogramm .....                              | 58        |
| 6.1.1    | Versuche mit Stammholz .....   | 58        |
| 6.1.2    | Versuche zur Porosität des Verklausungskörpers .....                             | 60        |
| 6.2      | Ergebnisparameter .....  | 61        |
| 6.3      | Datenanalyse .....   | 61        |
| 6.3.1    | Verklausungsprozesse bei unterschiedlichen Schwemmholzzugabemethoden .....       | 61        |
| 6.3.2    | Charakteristisches Schwemmholzvolumen .....                                      | 66        |
| 6.3.3    | Eintauchtiefe $t_H$ des Verklausungskörpers .....                                | 69        |
| 6.3.4    | Wasserspiegelaufstau .....   | 72        |
| 6.3.5    | Reduzierte Abflusskapazität .....  | 74        |
| 6.3.6    | Einfluss der Porosität des Verklausungskörpers auf den Wasserspiegelaufstau .... | 75        |

|                 |  |            |
|-----------------|--|------------|
| 6.4             | Validierung der Gleichungen zur Abschätzung von $\Delta H_{max}$ ..... | 78         |
| 6.4.1           | Validierung anhand der Messdaten der vorliegenden Studie .....         | 79         |
| 6.4.2           | Validierung anhand von Literaturdaten .....                            | 80         |
| 6.5             | Erkenntnisse und Anwendbarkeit .....                                   | 83         |
| 6.5.1           | Charakteristisches Schwemmholzvolumen .....                            | 83         |
| 6.5.2           | Wasserspiegelaufstau.....  | 83         |
| <b>7</b>        | <b>Beurteilung der Schwemmholzsituation am Mauerüberfall.....</b>      | <b>87</b>  |
| 7.1             | Voraussetzungen.....   | 87         |
| 7.2             | Berechnungsverfahren .....   | 89         |
| 7.2.1           | Ermittlung des maximalen Wasserspiegelaufstaus.....                    | 89         |
| 7.2.2           | Bemessung von Schwemmholzrückhaltmassnahmen.....                       | 91         |
| 7.3             | Berechnungsbeispiel .....  | 92         |
| <b>8</b>        | <b>Schlussfolgerungen .....</b>  | <b>96</b>  |
|                 | <b>Quellenangaben.....</b>   | <b>99</b>  |
|                 | <b>Literaturverzeichnis.....</b>                                       | <b>100</b> |
|                 | <b>Symbol- und Abkürzungsverzeichnisse .....</b>                       | <b>102</b> |
| <b>Anhang A</b> | <b>Lichter Abstand <math>a</math>.....</b>                             | <b>105</b> |
| <b>Anhang B</b> | <b>Geschwindigkeitsverteilungen und Selbstähnlichkeit.....</b>         | <b>108</b> |
| <b>Anhang C</b> | <b>Ergebnisparameter .....</b>   | <b>114</b> |

# 1 Einleitung

## 1.1 Hintergrund & Problemstellung

Zur sicheren Ableitung von Hochwasser werden an Talsperren Hochwasserentlastungsanlagen (HWE) betrieben. Mithilfe dieser Anlagen wird der Zufluss, der im Hochwasserfall weder turbiert noch im Stauraum zurückgehalten oder anderweitig abgeleitet werden kann, sicher ins Unterwasser der Stauanlage geleitet. Es soll damit die Überströmung der Stauanlage verhindert werden. Im Fall eines Erd- oder Schüttdammes könnte eine Überströmung zur Erosion des Dammes führen, bei einer Beton- bzw. Massivmauer wäre die Foundation bzw. Mauerfussicherung gefährdet. In beiden Fällen droht ein Sperrenbruch mit katastrophalen Auswirkungen.

Insbesondere bei hohen Bogenmauern kommt oftmals ein Mauerüberfall als Kopf-/Einlaufbauwerk der HWE zur Anwendung. Dabei wird das Wasser mittels eines regulierten oder unregulierten Stirnüberfalls direkt über die Mauer ins Unterwasser geleitet. Der Mauerüberfall ist dann meist durch Pfeiler in einzelne Wehrfelder unterteilt, sei es zur Aufnahme von Kräften aus beweglichen Stauklappen oder als Zwischenaufleger einer Brücke über den Mauerüberfall.

Bei einem Hochwasserereignis können über die zufließenden Bäche meist zerkleinertes Schwemmholz oder direkt über Hangrutschungen ganze Bäume mit Wurzelwerk den Stauraum einer Talsperre erreichen. Das Schwemmholz schwimmt auf und kann über die Oberflächenströmung zur HWE gelangen. Im Idealfall wird das Schwemmholz dabei mit dem Wasser durchgeleitet. Je nach baulicher Ausführung des Überfalls und der Charakteristik des ankommenden Schwemmholzes verklaust es jedoch zwischen den Pfeilern z.B. eines Mauerüberfalls. Eine Verklausung führt dabei zur teilweisen oder – in Verbindung mit Feianteilen sogar fast vollständigen – Blockierung des freien Abflussquerschnitts und somit zu einer Reduktion der Abflusskapazität. Dadurch kann die Funktion der HWE nicht mehr gewährleistet werden und es droht ein unkontrollierter Wasserspiegelanstieg.

Ein Beispiel dafür ist die Stauanlage Palagnedra im Tessin. Im Jahr 1978 wurden während eines Hochwassers riesige Mengen an Schwemmholz in den Stausee eingetragen. Die Schätzungen des zugeschwemmten Schwemmholzes belaufen sich ca. auf 30'000 m<sup>3</sup>. Das Schwemmholz verklauste an den Brückenpfeilern des Mauerüberfalls und blockierte den Abflussquerschnitt bis über die Brücke. Die Verklausung führte zur Überströmung der Staumauer und zur Erosion des rechtsufrig anschliessenden Dammbereichs. Abb. 1-1 zeigt die Verklausung am Überfall sowie die Erosionsstelle seitlich der Mauer. Die Brückenpfeiler lagen auf dem luftseitigen Quadranten des Überfallprofils auf, wobei die Pfeilernasen auf der Wehrkrone ohne Auskragung ausgebildet waren. Nach dem Ereignis wurden die Brückenpfeiler zu Strahlaufreissern rückgebaut und die Wehrbrücke verlegt (Abb. 1-2).



Abb. 1-1 Schwemmholzverklausung an der Staumauer Palagnedra (TI) im Jahr 1978 (Quelle: [1])



Abb. 1-2 Mauerüberfall der Staumauer Palagnedra im Jahr 2020 mit rückgebauten Brückenpfeilern  
VAW0902\_00003

Um den Wasserspiegelanstieg im Falle einer Verklausung gering zu halten, werden vorbeugende Massnahmen empfohlen [1] (Schmocker & Boes, 2018). Kann der Nachweis zum sicheren Durchleiten über den Überlauf oder zur Verminderung des Schwemmholzeintrages in den Stauraum im Einzugsgebiet nicht erbracht werden, so ist ein Schwemmholzrückhalt in genügendem Abstand zur Entlastungsöffnung und in Bereichen geringer Fliessgeschwindigkeiten zu gewährleisten [2] (Schmocker & Boes, 2018).

Für den Nachweis zum Durch- und Weiterleiten basieren die erforderlichen Abmessungen der Entlastungsöffnungen hauptsächlich auf Erkenntnissen von Godtland & Tesaker, 1994 (Abschn. 2.1). Sie sind abhängig von der relevanten Stammlänge  $L$  des Schwemmholzes.

Ein Rückhalt des Schwemmholzes soll in ausreichend grossem Abstand zur Entlastungsvorrichtung angeordnet werden, damit die Fliessgeschwindigkeiten im Rechenquerschnitt gering sind. Das Schweizerische Talsperrenkomitee (STK) gibt dabei als Richtwert eine mittlere Fliessgeschwindigkeit von  $<1$  m/s im Rechenquerschnitt an [1] (Schmocker & Boes, 2018).

Systematische Forschung bezüglich Schwemmholzverklausungen an Wehren wurden bis anhin an Rinnenversuchen mit geringer Wehrhöhe  $w$  unter anderem von Hartlieb (2015), Schmocker (2017) und Bénet et al. (2021) durchgeführt (Abschn. 2.2). In Bénet et al. (2021) werden die Auswirkungen von auskragenden Brückenpfeilern und Rechenstäben auf die Abflusskapazität eines Wehrs im Falle einer Verklausung dargestellt. Sie beschreiben den resultierenden Wasserspiegelaufstau  $\Delta H$  infolge Verklausung mit der Reduktion des Überfallbeiwerts  $C_d$ . Bei einer Auskragung  $p$  der Pfeiler (bezogen auf die wasserseitige Stauwand) von mehr als  $0.35 \cdot H_o$  nach oberstrom resultiert praktisch keine Kapazitätseinbusse, wobei  $H_o$  der initialen Überfallhöhe bezogen auf den Wehrscheitel entspricht.

Methoden zur Abschätzung des charakteristischen Schwemmholzvolumens  $V_c$ , welches für den Hauptanteil des Aufstaus verantwortlich ist, sowie zum Aufstau  $\Delta H$  bei einer Verklausung an einem Schwemmholzrechen wurden von Schalko (2018) in Rinnenversuchen mit flussähnlichem Charakter erarbeitet (Abschn. 2.4).

Gilt es jedoch, einen Schwemmholzrückhalt an einem bestehenden Mauerüberfall einer Talsperre umfassend zu beurteilen oder zu planen, fehlen weitergehende Kenntnisse und Dimensionierungsangaben, denn die bis anhin ermittelten Grundlagen bezüglich Schwemmholzverklausung sind nur bedingt auf Mauerüberfälle mit Reservoirbedingungen anwendbar. Die grosse Mauerhöhe und damit einhergehend sehr kleine Zuströmgeschwindigkeit sowie Zufluss-Froudezahl  $F_o$  im Stauraum lassen z.B. eine Verwendung der Gleichungen nach Schalko (2018) nicht zu. Eine systematische Untersuchung der Pfeilerauskragung  $p$  und der Überfallhöhen  $H_o$  grösser als die Dimensionierungsgrösse  $H_D$  des Überfallprofils ist in der Fachliteratur nicht zu finden.

Im Auftrag der Engadiner Kraftwerke AG (EKW) untersuchte die Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich von Januar bis Juni 2020 die Auswirkungen einer Schwemmholzverklausung am Mauerüberfall über die 73 m hohe Bogenstaumauer der

Sperre *Ova Spin* [3]. Dazu wurde die Sperre mit Mauerüberlauf, das Auslaufbauwerk einer Überleitung in der Nähe der Staumauer sowie die Topografie im unteren Stauraumbereich in einem gegenständlichen Modell im Massstab 1:30 nachgebaut (Abb. 1-3).

In der vorliegenden Studie wurden am bereits bestehenden physikalischen Modell weiterführende, systematische Modellversuche zum Verhalten und den Auswirkungen von Schwemmholz an Mauerüberfällen durchgeführt, um allgemeingültige Schlussfolgerungen für eine Vielzahl möglicher Anlagengeometrien zu erarbeiten.

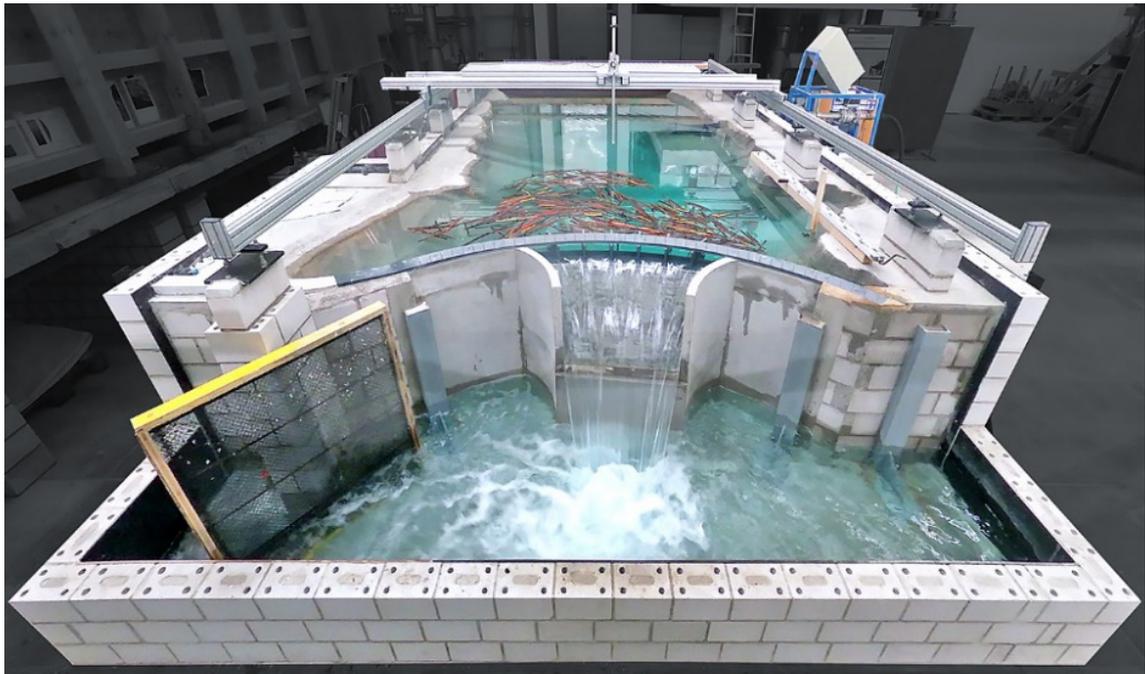


Abb. 1-3 VAW-Modell der Staumauer Ova Spin im Massstab 1:30

VAW4386\_00242\_STB

## 1.2 Zielsetzung

In der vorliegenden Studie soll die Schwemmholzverklausung an den Wehrpfeilern eines Mauerüberfalls mit Reservoir-typischer Zulaufbedingung systematisch untersucht werden (Zuflussgeschwindigkeit  $v \approx 0$ ). Der Fokus liegt dabei auf Verklausungen von Schwemmholz an den Pfeilern (in der Fachliteratur als *large wood (LW) accumulations* bezeichnet). Der Einfluss der Wehrbrücke und Verklausungen auf dem Wehrrücken sind hingegen nicht Bestandteil der Untersuchung. Für die physikalischen Modellversuche werden folgende Ziele definiert:

- Untersuchung der Verklausungswahrscheinlichkeit  $P$  von Einzelhölzern und des Rückhalteverhältnisses  $RV$  bei der Durchleitung grosser Schwemmholzgruppen in Funktion der relativen lichten Wehrfeldbreite  $B/L$
- Beschreibung des Verklausungsprozesses
- Bestimmung des Wasserspiegelanstiegs  $\Delta H$  im Falle einer Verklausung an den Pfeilernasen in Funktion der Pfeilerauskrugung  $p$  unter Berücksichtigung des Feinmaterialanteils  $m$  resp. der Porosität  $n$  des Verklausungskörpers
- Einfluss unterschiedlicher Überfallprofile auf den Wasserspiegelanstieg  $\Delta H$  infolge Verklausung, sodass die Resultate für verschiedene Stauanlagen angewendet werden können
- Abschätzung des charakteristischen Schwemmholzvolumens  $V_c$
- Bestätigung oder Widerlegung der Erkenntnisse früherer Studien

## 2 Grundlagen und Stand des Wissens

Es existieren bereits einige Studien zu Verklausungen von Schwemmholz an Einlaufbauwerken von Hochwasserentlastungsanlagen, Schwemmholzrechen, aber auch an Hindernissen in Bächen und Flüssen. Die für die vorliegende Untersuchung relevanten Erkenntnisse werden hier aufgeführt.

### 2.1 Verklausungswahrscheinlichkeit und Schwemmholzdurchleitung

#### Godtland & Tesaker, 1994

Godtland & Tesaker (1994) haben die Verklausungswahrscheinlichkeiten  $P$  von Einzelhölzern und Schwemmholzgruppen an einem freien Wehrüberfall mit und ohne Brückenstrukturen (Pfeiler, Wehrbrücke) im physikalischen Modellversuch mit geometrischem Massstab 1:50 untersucht und folgende Parametervariationen vorgenommen (dimensionsbehaftete Größen im Natur-/Prototypmassstab):

- Wehrhöhe  $w = 2.0 \text{ m}, 15.6 \text{ m}$
- Überfallhöhe  $H_o = 1.0 \text{ m} \dots 1.80 \text{ m}$
- Einzelhölzer der Stammlänge  $L = 10 \text{ m}$
- Wurzeldurchmesser  $D_W = 0.16 \cdot L$

Die Schwemmholzgruppen sind aus 30 Hölzern mit  $L = 8.3 \text{ m} \dots 10 \text{ m}$  und  $D_W = 0.16 \cdot L$  zusammengesetzt und bei kleinem Überfalldurchfluss nach Modus (a), (b) oder (c) dem Versuch beigegeben:

- (a) systematisch vor dem Wehrüberfall zu losen Teppichen der Abmessungen  $15 \text{ m} \cdot 15 \text{ m}$  und  $25 \text{ m} \cdot 25 \text{ m}$
- (b) natürliche, lose Packung durch Zugabe der Einzelhölzer vor dem Wehrüberfall
- (c) systematisch vor dem Überfall zu kompaktem Teppich  $7 \text{ m} \cdot 10 \text{ m}$  mit einer mittleren Mächtigkeit von ca.  $1 \text{ m}$ .

In den Versuchen mit Schwemmholzgruppen wurde die Überfallhöhe  $H_o$  schrittweise erhöht und beobachtet, wie viele Hölzer sich bei welcher Überfallhöhe aus dem Verbund lösten und mit der Strömung über den Wehrrücken gespült wurden.

Die Autoren haben folgende Empfehlungen zur Verhinderung eines Schwemmholzrückhalts am freien Wehrüberfall von mehr als 10-20% des angeschwemmten Holzes aus ihrer Studie abgeleitet (ausreichender lichter Abstand zur Brückenunterkante vorausgesetzt):

- Einzelhölzer werden an der Überfallkrone zurückgehalten, solange die Überfallhöhe  $H_o$  kleiner als der Wurzeldurchmesser  $D_W$  ist.
- Einzelhölzer werden bei genügender Überfallhöhe grösstenteils durchgeleitet, falls die lichte Wehrbreite  $B$  mindestens 80% der Stammlänge  $L$  des angeschwemmten Holzes beträgt.
- Schwemmholzgruppen werden grösstenteils durchgeleitet, falls die lichte Breite  $B$  der Wehröffnungen mindestens 110% der Stammlänge  $L_{max}$  beträgt.

### Hartlieb, 2015

Hartlieb (2015) hat Versuche zur Schwemmholzverklausung an einem drei-feldrigen Wehr in einem 2 m breiten und 2.5 m hohen Rechteckkanal mit verstellbarem, doppeltem Boden im Zulauf zum Wehr durchgeführt. Der Stirnüberfall weist ein Standard-Profil nach USACE (1987) auf, das auf eine Dimensionierungsüberfallhöhe  $H_D = 0.675$  m bemessen ist. Die lichten Breiten  $B$  der Wehrfelder betragen 0.5 m. Die Pfeiler sind 0.33 m breit, die Pfeilernasen sind bündig mit der wasserseitigen Stirnseite des Überfallbauwerks (d.h. Auskragung  $p = 0$ ).

Folgende Parameter wurden systematisch variiert:

- Überfallhöhe bezogen auf die Breite einer Wehröffnung  $H_o/B = 0.35, 0.5, 0.7, 0.9$
- Relative Überfallhöhe  $\chi = H_o/H_D = 0.26, 0.37, 0.52, 0.67$
- Wehrhöhe bezogen auf die Überfallhöhe  $w/H_o = 0.1, 1, 2$
- Froudezahlen im Zulauf zum Wehr  $F_o = 0.07 \dots 0.35$

Die Schwemmholzeigenschaften waren:

- Einzelstämme und Gruppen à 5 Hölzer
- Stammlänge bezogen auf die Breite einer Wehröffnung  $L/B = 1, 1.5, 2$
- Holzdicke  $\rho = 800 \dots 975 \text{ kg/m}^3$ , Variation von Elastizität (elastische grüne respektive abgestorbene steife Fichtenzweige) und Verastung

Für steife Hölzer mit nur wenigen kurzen Verästelungen wurde beobachtet, dass Einzelhölzer so gut wie nie an den Wehrpfeilern verklausen, da die Hölzer in der Strömung ausgerichtet werden.

Für Schwemmholzgruppen, bestehend aus fünf abgestorbenen Fichtenrundlingen mit wenigen und kurzen Ästen wurde folgende Verklausungswahrscheinlichkeit  $P$  gefunden, wobei  $P$  die Wahrscheinlichkeit darstellt, dass mindestens ein Stammholz einer Fünfer-Gruppe dauerhaft verklaust:

$$P = \left( \frac{L}{B} - 0.96 \right) \cdot 0.73 \quad (1)$$

Die Verklausungswahrscheinlichkeit von Holzgruppen wird durch grüne Hölzer grösserer Elastizität um 30% bzw. 40% unter diejenige nach Gl. (1) reduziert, wohingegen sie für Schwemmholz mit vielen und langen Ästen  $P$  um einen Faktor 3-4 erhöht wird. Keinen signifikanten Einfluss übt hingegen die Holzdicke  $\rho$  auf  $P$  aus.

### Furlan, 2019

Furlan (2019) hat die Verklausungswahrscheinlichkeit künstlicher Rundhölzer am Wehrüberfall bei moderaten Überfallhöhen  $H_o$  sowohl für Einzelhölzer als auch für unterschiedlich grosse Gruppen untersucht. Die Überfallhöhe  $H_o$  war in den Versuchen bewusst mit bis maximal 1.56 des Stammdurchmessers  $D$  klein gewählt, um die Verklausung der Rundhölzer auf der Wehrkrone herbeizuführen ( $H_o/D \leq 1.56, H_o/H_D \leq 0.18$ ).

Die Autorin führte ihre Versuche in einem 1.50 m breiten und 0.70 m hohen Kanal durch. Das Wehr wies ein Standardprofil auf (USACE, 1987), das auf eine Höhe von  $H_D = 0.15$  m bemessen war. Die Wehrhöhe  $w$  betrug 0.42 m, so dass  $w/H_o \geq 15.6$ . Das Wehr wies 5 Wehrfelder der Breite  $B = 0.26$  m auf.

Die Schwemmholzeigenschaften sind:

- Stammlänge bezogen auf die Breite einer Wehröffnung  $L/B = 0.8, 1.0, 1.2, 1.5, 2.0$
- Stammdurchmesser  $D = 0.010$  m, 0.012 m, 0.016 m, 0.020 m, 0.025 m, wobei  $L/D \cong 20$
- Relative Holzdichte  $\rho_s = 0.4 \dots 0.99$

Die Stämme wurden mit einer mechanischen Vorrichtung 4 m stromaufwärts des Wehrs in der Mittelachse des Kanals positioniert. Die Stämme wurden mit unterschiedlichen Zugabewinkeln, im Allgemeinen aber quer zur Abflussrichtung sanft der Strömung beigegeben. Der Zugabewinkel beeinflusste die Bewegung der Stämme kaum, da sich die Stämme mit der Strömung vor dem Wehr ausrichteten (s. auch Hartlieb, 2015).

Bei der gleichzeitigen Zugabe mehrerer Stämme im Rahmen der Gruppenversuche können die Stämme bereits in der Zuströmung miteinander interagieren. Es treten häufigere Interaktionen zwischen den Stämmen bei grösseren Gruppen auf ( $\geq 16$  Stämme), was sich auf die Verklauungswahrscheinlichkeit auswirkt. Diese wurde für kleine relative Überfallhöhen  $H_o/D < 1.2$  systematisch untersucht. Bei steigender Gruppengrösse erhöht sich die Verklauungswahrscheinlichkeit gegenüber dem Einzelholz.

Bei Einzelhölzern führt eine höhere Schwemmholzdichte als auch eine kleinere relative Überfallhöhe  $H_o/D$  aufgrund der grösseren relativen Eintauchtiefe  $h_s/D$  zu einer grösseren Verklauungswahrscheinlichkeit. Bei relativen Überfallhöhen von  $H_o/D > \text{ca. } 1.5$  werden praktisch alle Hölzer durchgeleitet (vgl. mit Hartlieb, 2015). Der Einfluss der relativen Stammlänge  $L/B$  konnte nicht quantifiziert werden.

## 2.2 Aufstau bei Schwemmholzverklauung

### Hartlieb, 2015

Hartlieb (2015) hat Versuche zur Quantifizierung des Aufstaus infolge Verklauung am Wehrüberfall an der in Abschn. 2.1 beschriebenen Modellanlage durchgeführt (Massstab 1:20). In dieser Versuchsreihe wurden sowohl künstliche Plexiglaszylinder mit auf Prototypmass bezogenem Durchmesser  $D = 0.5$  m als auch natürliches Astholz eingesetzt. Die Plexiglaszylinder erlaubten die Variation der Rohdichten  $\rho = 800, 900, 950$  und  $975 \text{ kg/m}^3$ . Das verwendete Astholz wies eine mittlere Rohdichte von  $792 \text{ kg/m}^3$  auf.

Hartlieb (2015) gibt an, dass die Froudezahl der Zulaufströmung  $F_o$  entscheidend die Verklauungsfolgen beeinflusst. Die Asthölzer der Untersuchung Hartlieb (2015) werden unter die Wasseroberfläche bei Überschreitung eines kritischen Wertes der Zufluss-Froudezahl von  $F_o = 0.15$

gezogen, lagern sich unter der obersten Holzschicht an und führen damit einen kompakten, mehrlagigen Verklausungskörper herbei. Bei grösseren Rohdichten in den Versuchsreihen mit Kunstholz sind die kritischen Werte für  $F_o$  deutlich kleiner; die schwereren Hölzer werden bereits bei kleineren Geschwindigkeiten resp. Zufluss-Froudezahlen zu einem kompakten Körper verdichtet.

Infolge einer Verklausung reduziert sich die Abflussleistung einer Hochwasserentlastung, so dass sich für einen vorgegebenen Abfluss  $Q$  ein Wasserspiegelanstieg  $\Delta H$  ergibt. Die Abflussleistung infolge einer Verklausung wird demnach reduziert. Bei Zufluss-Froudezahlen kleiner des kritischen Wertes von  $F_o = 0.15$  bildeten sich einlagige Schwemmholzteppiche, die nur einen kleinen relativen Aufstau  $\Delta H/H_o < 0.06$  für einen vorgegebenen Abfluss  $Q$  verursachen. Aufgrund der eher schmalen, kanalartigen Zuströmung und der in Relation dazu grossen Länge des Schwemmholzes wird jedoch ein Teil der Strömungskräfte über den lockeren Schwemmholzteppich in die Seitenwände des 2 m breiten Rechteckkanals übertragen (Kraftbrücken), infolgedessen die Hölzer an der Wehranlage weniger stark belastet werden.

Bei Zufluss-Froudezahlen, die grösser als der kritische Wert  $F_o = 0.15$  sind, bilden sich hingegen mehrlagige und kompakte Verklausungskörper, die einen Aufstau  $\Delta H/H_o > 0.12$  bei den Versuchen mit Astholz der mittleren Rohdichte von  $792 \text{ kg/m}^3$  bewirken. Eine grössere Rohdichte des Holzes beeinflusst den Wasserspiegelanstieg  $\Delta H/H_o$ , der im Maximum 0.46 bei den schwersten Kunsthölzern der Dichte  $975 \text{ kg/m}^3$  erreicht.

Hartlieb (2015) weist in seinen Versuchsreihen auf Zufallsaspekte hin, welche die Bildung des Verklausungskörpers beeinflussen und damit die Reproduzierbarkeit sowie die quantitative Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse zu den Verklausungsfolgen bei identischen Randbedingungen einschränken.

### **Schmocker, 2017**

Schmocker (2017) hat Versuche zum Wasserspiegelanstieg bei Verklausung direkt am Wehrfeld und an einem vorgelagerten Schwemmholzrechen durchgeführt. Der horizontale Kanal war 0.4 m breit, 0.7 m hoch und 8 m lang. Ein Holzbrett mit zwei rechteckigen Öffnungen mit lichten Wehrräumen  $B$  von 0.18 m repräsentierte einen Wehrüberfall mit einer Wehrhöhe  $w = 0.2$  m. Der Schwemmholzrechen, bestehend aus 5 Vertikalstäben mit Durchmesser 5 mm, wurde vor der Wehröffnung platziert.

Schmocker (2017) wählte in seinen Experimenten folgende Eingangsparameter:

- Überfallhöhe  $H_o = 0.061, 0.099$  und  $0.110$  m
- Abstand des Rechens zur Wehrfront  $p = 0.10$  m
- Lichter Stababstand  $0.066$  m

Die Schwemmholzeigenschaften waren:

- entastetes, trockenes Naturholz
- Stammlänge  $L = 0.05 \dots 0.25$  m
- Stammdurchmesser  $D = 0.01 \dots 0.02$  m
- Schwemmholzlockervolumen  $V_L$  von  $12 \text{ dm}^3$

Die Zugabe der Hölzer erfolgte zufällig, nicht ausgerichtet und in kleineren Gruppen von 5 Hölzern.

Die Akkumulation von Schwemmholz an den Wehröffnungen ohne Schwemmholzrechen erfolgte nach der Initialverklausung, bei der sich ein Schlüsselholz (key log) quer vor die Wehröffnungen gelegt hat. Nachfolgend zugegebenes Holz wurde praktisch ausnahmslos und unabhängig von der Stammlänge  $L$  zurückgehalten.

Der beobachtete Akkumulationsprozess teilt sich in zwei Phasen. In der initialen Phase verdichtet sich das Stammholz an den Wehröffnungen und es türmt sich über die Höhe auf. Der Wasserspiegel steigt konstant an und die Zulauf-Fliessgeschwindigkeit sinkt. Nachfolgend angeschwemmtes Schwemmholz sammelt sich sodann in der zweiten Phase zu einem losen Schwemmholzteppich. Schmocker (2017) beobachtete dabei in Übereinstimmung mit Rimböck (2003), dass sich Holz bei Strömungsgeschwindigkeiten  $v < 0.8 \dots 1.0$  m/s nicht auftürmt, sich zu einem Teppich ansammelt und kein zusätzlicher Aufstau mehr erfolgt. Schmocker (2017) erfasste in seinen Versuchen einen maximalen Wasserspiegelaufstau  $\Delta H_{max} \approx 0.3 \cdot H_o$ .

Bei Installation des Schwemmholzrechens stellte sich keine Verklausung am Wehr ein, da sämtliches Holz am Rechen verklauste. Am Rechen haben sich lediglich 1-2 Lagen Schwemmholz angehäuft. Der Wasserspiegelaufstau  $\Delta H_{max}$  betrug  $\approx 0.1 \cdot H_o$ .

Als Worst-Case-Szenario wurde in Schmocker (2017) das gesamte Schwemmholzvolumen händisch verdichtet und als dichter mehrlagiger Verklausungskörper vor dem Wehrfeld respektive dem Schwemmholzrechen platziert. Hierbei resultierte ein relativer Wasserspiegelaufstau von 0.4 für die Verklausung am Wehr und 0.1 für die Verklausung am Rechen.

Der Wasserspiegelaufstau mit Rechen fiel signifikant kleiner aus als ohne Rechen. Schmocker (2017) begründet dies damit, dass bei Verklausung am Rechen die Wehrfelder selbst frei von Holz sind und aufgrund der grossen Rechenfläche genügend Durchflussfläche zur Verfügung steht, da das Wasser unter dem aufgestauten Holz hindurchfliessen kann.

### **Bénet et al., 2021**

Bénet et al. (2021) haben die Auswirkungen einer extremen Schwemmholzverklausung am Überfallbauwerk der Forschungseinrichtung von Furlan (2019) untersucht (Abschn. 2.1) und u.a. den Einfluss von in den Stauraum auskragenden Wehrpfeilern auf die Reduktion des Wasserspiegelanstiegs infolge Verklausung beurteilt. Drei Konfigurationen von Wehrpfeilern mit runden Nasen wurden betrachtet: Die Pfeilernasen waren entweder bündig mit der Mauerfront (Auskrägung

$p = 0$ ) oder die Pfeiler kragten um das Mass  $p = 0.04$  m, respektive  $0.08$  m ins Oberwasser aus (Abb. 3-2). Das Schwemmholz, bestehend aus unverzweigtem, natürlichem Stammholz, wurde in grossen Mengen vor Versuchsbeginn im stehenden Wasser vor dem Wehrüberfall homogen verteilt. Die Verteilung der Stammlängen  $L$  folgte der Verteilung von Totholzstücken, wie sie Rickli & Hess (2009) in Abflussbereichen von Wildbächen erhoben (Abschn. 2.4.2). Der Stammdurchmesser  $D$  betrug  $L/D \cong 20$ , wie in Felduntersuchungen nach dem Hochwasserereignis im Jahr 2005 durch Bezzola & Hegg (2007) ermittelt.

Bei Erhöhung des Durchflusses sprang der Überlauf an und das Schwemmholz verklauste an den Wehrpfeilern und verdichtete sich. Den Aufstau quantifizieren Bénét et al. (2021) mit der Reduktion des Abflussbeiwerts  $C_{dH}$  infolge der Verklausung. Es zeigt sich, dass sich bei einer Schwemmholzverklausung an bündig zur Mauerfront gesetzten Pfeilernasen ( $p = 0$ ) der Überfallbeiwert von  $C_{dH} = 0.42 \dots 0.5$  (abhängig von  $\chi$ ) auf einen Wert von  $C_{dH} = 0.38$  (unabhängig von  $\chi$ ) reduziert. Die maximale Überfallhöhe  $H_o$  in der Versuchsreihe entsprach der Dimensionierungsüberfallhöhe  $H_D$ . Dabei kann kein Einfluss der relativen Wehrfeldbreite  $B/L_{max}$  (mit  $L_{max}$  = maximale Stammlänge) oder des Durchflusses  $Q$  auf die Durchflussreduktion infolge Verklausung nachgewiesen werden.

Hingegen reduziert die Auskrugung  $p$  der Pfeilernasen den negativen Effekt einer Verklausung. Bei einer Auskrugung  $p$  von mehr als  $0.35 \cdot H_o$  hat eine Schwemmholzverklausung quasi keinen Effekt mehr auf den Abflussbeiwert und somit keinen Wasserspiegelanstau zur Folge.

Verklausungsversuche ohne Pfeiler von Bénét et al. (2021), aber auch von Pfister et al. (2013) an Klaviertastenwehren zeigen, dass bei einem Verhältnis von maximalem Holzdurchmesser  $D_{max}$  zu Überfallhöhe  $H_o$  zwischen  $0.35$  und  $0.6$  einzelne Hölzer auf der Wehrkrone verklausen. Bei einem Verhältnis grösser als  $0.6$  verklaust die gesamte Schwemmholzgruppe, bei Werten kleiner als  $0.35$  wird sämtliches Schwemmholz durchgeleitet (vgl. mit Furlan, Abschn. 2.1).

### 2.3 Vermessung von Verklausungskörpern

Eine Verklausung bezeichnet eine durch einen fluvialen Prozess gebildete Ansammlung von Holz an einem Hindernis mit drei oder mehr grossen Holzstücken in Kontakt zueinander. Diese Ansammlung wird als Verklausungskörper bezeichnet und beinhaltet Holz, andere Feststoffe und Hohlräume. Sein Volumen wird als Lockervolumen  $V_L$  bezeichnet. Wenig poröse Strukturen von Verklausungskörpern verringern die Abflusskapazität, was zu Rückstauwirkungen führt. Die Porosität  $n$  wird als Verhältnis der Volumina  $V$  der zusammenhängenden Hohlräume zwischen den Feststoffen und des Verklausungskörpers definiert

$$n = \frac{V_{HR}}{V_L} = \frac{V_L - V_S}{V_L} \quad (2)$$

wobei  $V_{HR}$  = Hohlraumvolumen und  $V_S$  = Feststoffvolumen.

Zu den Feststoffen zählen neben der Hauptkomponente Holz auch Sedimente, organisches Material und möglicherweise auch Zivilisationsmüll wie z.B. Plastik.

Der Auflockerungsfaktor  $AF$  gibt das Verhältnis zwischen dem lose angehäuften Holz  $V_L$  und dem Festvolumen des verklausten Schwemmholzes  $V_{vS}$  (Index vS: verklaustes Grossholz) an und variiert gemäss Feldmessungen nach Überschwemmungsereignissen in der Schweiz zwischen 2 (sehr kompakt) und 5 (lockere Akkumulation; entnommen aus Lange & Bezzola, 2006), woraus sich Porositäten  $n = 0.5 \dots 0.8$  ohne Berücksichtigung des Feinmaterials ergeben.

Manners et al. (2007) übernehmen die in der Fachliteratur übliche Klassifizierung des in Verklausungen angesammelten Schwemmholzes in Kleinholz mit Durchmessern  $D < 1$  cm, Mittelholz mit  $1 \text{ cm} < D < 10$  cm und Grossholz (LW) mit  $D \geq 10$  cm und Stammlängen  $L > 1$  m. Manners et al. (2007) beobachten, dass sich die Mittel- und Grosshölzer im Verklausungsprozess am Schlüsselholz (initiale Verklausung) zu einer sehr porösen Grundstruktur anreichern und das eigentliche Gerippe des Verklausungskörpers bilden. Hingegen verfüllen das Kleinholz, anderes organisches Material wie Blätter sowie Sedimente die Zwischenräume, weshalb diese Bestandteile der Feststoffe dem Feinmaterial zugeordnet werden.

Livers et al. (2020) setzen sich mit verschiedenen Methoden zur Bestimmung der Porosität  $n$  eines Verklausungskörpers auseinander und definieren Gleichung (3) zur genaueren Abschätzung des aus mittleren und grossen Hölzern zusammengesetzten verklausten Schwemmholzfestvolumens  $V_{vS}$ .

$$V_{vS} = V_L \cdot (1 - n) \cdot (1 - m) \quad (3)$$

wobei  $m = (V_S - V_{vS})/V_S$  dem Feinmaterialanteil der Feststoffe entspricht.

Die Studie von Livers et al. (2020) zeigt die Schwierigkeiten auf, die Porositäten eines Verklausungskörpers zu evaluieren. In jüngster Zeit werden photogrammetrische Techniken eingesetzt (Spreitzer et al., 2019), um die äussere Oberfläche des Verklausungskörpers resp. sein Lockervolumen  $V_L$  zu erfassen (2.5D Oberflächenmodell). Wenn nicht auf einfachere Methoden zur Abschätzung der Porosität zurückgegriffen wird, ist das gesamte Material innerhalb des Verklausungskörpers in einem sehr aufwendigen Verfahren direkt zu messen. Verschiedene Methoden ergeben zwangsläufig unterschiedliche Porositätswerte.

Eine von Livers & Wohl (2021) durchgeführte Vermessung von 183 natürlich gebildeten Schwemmholzverklausungen in Flüssen im Rocky Mountain National Park in Colorado, USA, zeigt die grosse Variabilität in der Porosität von natürlichen Verklausungen auf. Die Porosität  $n$  wurde visuell abgeschätzt. Obwohl diese visuellen Schätzungen relativ subjektiv sind, liess diese einheitliche Methodik den Vergleich innerhalb des grossen Datensatzes zu. Die ermittelten Porositäten  $n$  von jenen Verklausungen, die das gesamte Flussbett überspannten, variierten zwischen 0.05 und 0.75. Der Median betrug 0.35.

Komplexe Schwemmholzansammlungen an Brückenpfeilern, bei denen die Stämme im Verklausungsmuster zufällig ausgerichtet sind, weisen in den Experimenten von Spreitzer et al. (2020) Porositäten im Bereich von 0.6 bis 0.7 auf. Diese Werte stimmen gut mit den im Feld beobachteten oberen Grenzen der Porosität eines Verklausungskörpers überein (Lange & Bezzola, 2006; Livers & Wohl, 2021).

Die geringste Porosität der dichtesten Packung von länglichen Zylindern beträgt 0.093 (entnommen aus Spreitzer et al., 2020), wobei sich dieser Wert auf einen eingeschlossenen Hohlraum bezieht. Demnach erzeugen ausgerichtete Stämme in einem Verklausungsmuster geringere Porositäten als wenn sie willkürlich angeordnet sind.

## 2.4 Schwemmholz

### 2.4.1 Schwemmholzvolumen

Beim Schwemmholzvolumen wird zwischen dem effektiv anfallenden Schwemmholzfestvolumen  $V_S$  und dem theoretischen Schwemmholzpotential (oberer Grenzwert) unterschieden. Ersteres kann nach Rickenmann (1997), letzteres nach Uchiogi et al. (1996) oder [1] abgeschätzt werden.

Das charakteristische Schwemmholzvolumen  $V_c$ , das für den primären Wasserspiegelaufstau bei einer Verklausung eines Schwemmholzrechens verantwortlich ist, kann gemäss Schalko et al. (2019) für flussähnliche Zustände in Abhängigkeit der Zufluss-Froudezahl  $F_o$ , der Zuströmbreite  $b$  und der Zufluss-Wassertiefe  $h_o$  abgeschätzt werden.

$$\frac{V_c}{bh_o^2} = 3.1 \cdot F_o \quad (4)$$

Das charakteristische Schwemmholzvolumen  $V_c$  ist an jenem Punkt der Kurve definiert, wo die Ableitung der Funktion  $\Delta H/H_o = f(V_{vS}/(b \cdot h_o^2))$  nach  $V_{vS}$  0.1 beträgt (s. Abb. 6-5). Eine Ableitung von 0.1 bedeutet, dass die Funktion an jenem Punkt eine Steigung von 10% aufweist. Eine weitere Zugabe von Schwemmholz führt mit einer 10%-igen Steigung lediglich noch zu einem kleinen weiteren Wasserspiegelaufstieg  $\Delta H$ . D.h., über  $V_c$  hinausgehendes, zusätzlich angeschwemmtes Schwemmholz wird hauptsächlich als loser Schwemmholzteppich an den Verklausungskörper angelagert, der nur noch einen kleinen Zusatzeffekt auf den Wasserspiegelaufstau aufweist. Die Gleichung (4) basiert auf Rinnenversuchen mit flussähnlichem Charakter, wobei der Gültigkeitsbereich für die Berechnung von  $V_c$  bei  $0.3 < F_o < 1.5$  liegt.

### 2.4.2 Längenverteilung des Schwemmholzes

Die Längenverteilung des in der vorliegenden Studie zur Durchleitung von grossen Schwemmholzgruppen (Abschn. 5.2) eingesetzten Modellholzes war auf die Messdaten aus dem Landesforstinventar (LFI) der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft

(WSL) abgestimmt. Auf 14 Probeflächen im Einzugsgebiet (EZG) der Sperre *Ova Spin* hat die WSL liegende tote Probeflächen ab 12 cm Brusthöhendurchmesser (BHD, Stammdurchmesser auf Brusthöhe bzw. 1.3 m ab Boden) vermessen [4] und die Längenverteilung aus diesen Messdaten bestimmt (Abb. 2-1).

Zum Vergleich werden zwei Summenkurven herangezogen, die eine typische Längenverteilung von transportiertem und wieder abgelagertem Schwemmholz darstellen. Die Kurve von Bezzola & Hegg (2007) stammt aus der Ereignisanalyse des Hochwassers 2005, in der das während diesem Ereignis im Mittelland abgelagerte Schwemmholz vermessen wurde. Dieses weit transportierte Schwemmholz wurde sehr stark verkleinert, sodass knapp 90% der vermessenen Stücke kürzer als 2 m waren (Abb. 2-1). Rickli & Bucher (2006) haben hingegen liegendes Schwemmholz im Hochwasserabflussbereich von Wildbächen vermessen. Der Transportweg dieses Schwemmholzes ist deutlich kürzer als jener der Studie von Bezzola & Hegg (2007). Es resultiert eine Verteilung mit deutlich grösseren Längen (Abb. 2-1). Der Vergleich dieser beiden Längenverteilungen von abgelagertem Schwemmholz zur Längenverteilung im EZG *Ova Spin* zeigt deutlich den Verkleinerungsprozess, dem Schwemmholz während dem Transport im Gerinne unterliegt. Da bei einer Stauanlage im alpinen Raum der Eintrag von Bäumen durch Hangrutschungsprozesse direkt oder auf nur sehr kurzer Transportstrecke in den Stauraum erfolgen kann, kann Schwemmholz auch unzerkleinert an der Hochwasserentlastung anstehen.

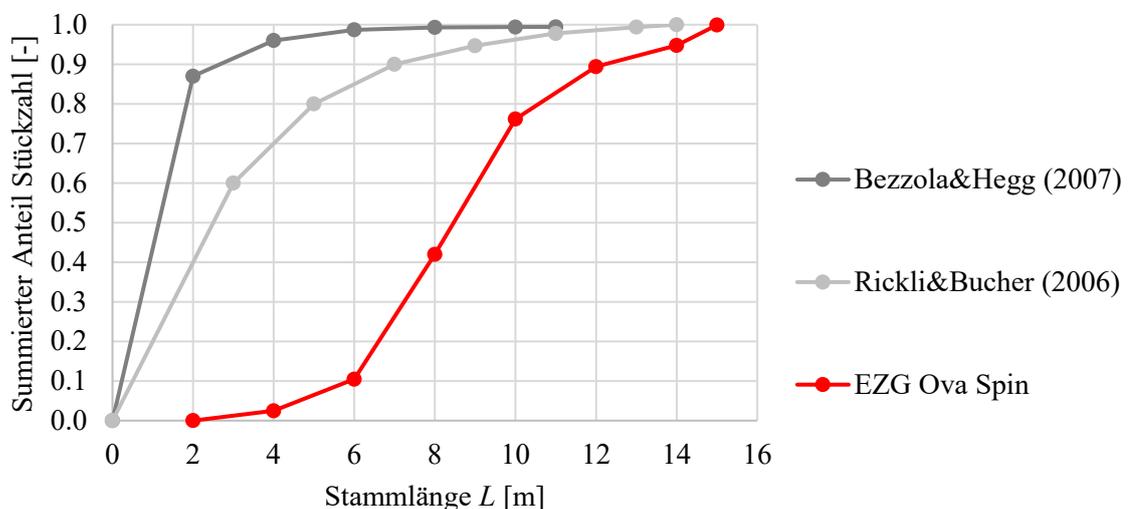


Abb. 2-1 Summenkurven von Schwemmholzlängenverteilungen: Bezzola & Hegg (2007) und Rickli & Bucher (2006) sind Längenverteilungen von Schwemmholz, das fluvialen Zerkleinerungsprozessen unterzogen war. EZG Ova Spin ist die Längenverteilung der Bäume im Einzugsgebiet Ova Spin nach der Messmethode der WSL.

### 2.4.3 Schwemmholzdichte

Die Holzdichte kann in der Natur in Abhängigkeit der Wassersättigung, die im Wesentlichen durch die Verweildauer im Wasser bedingt ist, sowie der Baumart stark variieren. Dabei stellt dichtes Holz im Verkläusungsszenario ein grösseres Problem als trockenes Holz mit kleiner

Dichte dar, da Holz mit zunehmender Dichte an Hindernissen weiter nach unten gezogen wird und somit einen tieferen Verklauungskörper bilden sowie dadurch einen grösseren Wasserspiegelanstieg  $\Delta H$  verursachen kann (Hartlieb, 2015; Schalko, 2018). Bei grosser Holzdichte kann jedoch das Schwemmholz auf dem Transportweg zur Talsperre absinken und sich ablagern und damit gar nicht erst bis zum Mauerüberfall gelangen.

Der Waldbestand von hochgelegenen, alpinen Bergwäldern besteht vor allem aus Arven, Fichten, Föhren und Lärchen. In Tab. 2-1 sind die Dichten für die erwähnten Baumarten im waldfrischen Zustand aufgelistet (Wagenführ & Scheiber, 1974). Die Holzdichten für Arve, Fichte, Föhre und Lärche bewegen sich demnach zwischen  $580 \text{ kg/m}^3$  und  $900 \text{ kg/m}^3$ .

Tab. 2-1 Dichten waldfrischer Baumarten alpiner Bergwälder (Wagenführ & Scheiber, 1974). \* Für die Arve ist die Dichte der Weymouthskiefer angegeben, welche der Arve sehr ähnlich ist.

|        | Rohdichte grün [ $\text{kg/m}^3$ ] |
|--------|------------------------------------|
| Arve   | 580 – 720 *                        |
| Fichte | 700 – 850                          |
| Föhre  | 750 – 850                          |
| Lärche | 750 – 900                          |

## 2.5 Talsperre Ova Spin

Die 73 m hohe Bogenstaumauer *Ova Spin* wurde im Jahre 1968 am Spöl mit einer Kronenlänge von 129 m errichtet. Die drei Entlastungsvorrichtungen werden durch einen Mauerdurchlass (1) am Fuss der Mauer, einen Grundablassstollen (2) durch die rechte Talflanke sowie den Mauerüberfall (3) gebildet (Abb. 2-2). Der Einlauf der Wasserfassung (4) zum Druckstollen nach Pradella liegt direkt oberhalb des Grundablasseinlaufs. Oberhalb des Mauerdurchlasses befindet sich das Ein-/Auslaufbauwerk (5) der Pumpturbine der Kraftwerksanlage *Ova Spin*. Circa 100 m oberstrom der Staumauer fliesst das dem Inn in S-kanf entnommene und durch einen Freispiegeltollen geleitete Wasser auf der orographisch linken Seite in das Ausgleichsbecken *Ova Spin*.

Auf der Mauerkrone ist der Mauerüberfall ausgebildet, der das abzuführende Wasser über das Dach des Maschinenhauses (7) hinweg in den Spöl zurückleitet. Über die Mauerkrone führt eine befahrbare Brücke mit sechs Wehrpfeilern im Bereich des Mauerüberfalls. Die 0.5 m breiten Wehrpfeiler kragen 4.4 m in radialer Richtung bezogen auf den Wehrkronenscheitel in den Stauraum aus (Abb. 2-3a) und unterteilen den Mauerüberfall in sieben unterschiedlich breite Wehrfelder. Bei den drei mittleren Entlastungsöffnungen beträgt die lichte Breite im Eintrittsquerschnitt auf Höhe der Pfeilernasen 5.55 m (Abb. 2-3b), die totale lichte Wehrbreite auf Höhe der Wehrkrone beträgt  $W = 42.9 \text{ m}$ . In Fliessrichtung verjüngt sich die Breite des Überfallprofils. Der horizontale Bogen entlang der Wehrkrone weist einen Radius von 60 m auf.

Durch die Auskragung der Brückenpfeiler werden Querströmungen im Bereich des Mauerüberfalls bei Betrieb der Überleitung S-kanf verhindert. Die Strömung ist vor dem Überfall durch die

Leitwirkung der Pfeiler demnach strömungstechnisch günstig, d.h. radial zum Überfall ausgerichtet. Im Abschn. 3.2 wird im Speziellen auf die Formgebung des Überfallprofils eingegangen.

Das Bemessungshochwasser (BHQ), ein 1000-jährliches Hochwasser  $HQ_{1000}$ , ist für den Hochwassernachweis unter Einhaltung eines Sicherheitsfreibordes von 1 m zwischen dem Wasserspiegel und der Gefahrenkote schadlos abzuleiten, wenn zusätzlich die leistungsfähigste unter den  $n$ -Entlastungs- und Ablassvorrichtungen mit beweglichen Verschlüssen ausser Betrieb ist. Die leistungsstärkste Entlastungsvorrichtung an der Sperre Ova Spin ist der Mauerdurchlass. Das BHQ von  $384 \text{ m}^3/\text{s}$  muss demnach über den Grundablass und den Mauerüberfall schadlos abgeführt werden können, wobei der über den Mauerüberfall zu entlastende Abfluss  $204 \text{ m}^3/\text{s}$  beträgt.

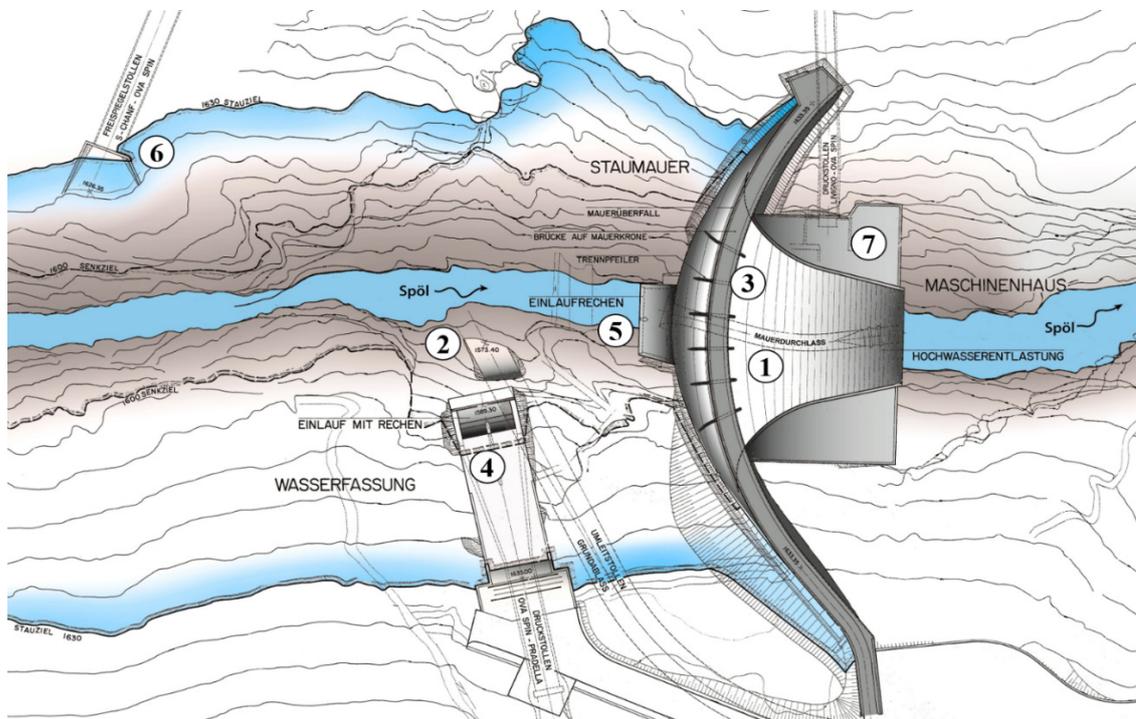


Abb. 2-2 Situation der Staumauer Ova Spin mit den einzelnen Anlageteilen: 1) Mauerdurchlass, 2) Grundablass, 3) Mauerüberfall, 4) Triebwasserfassung Ova Spin – Pradella, 5) Aus-/Einlaufbauwerk Pumpturbinen, 6) Auslaufbauwerk Zuleitung S-chanf – Ova Spin und 7) Maschinenhaus

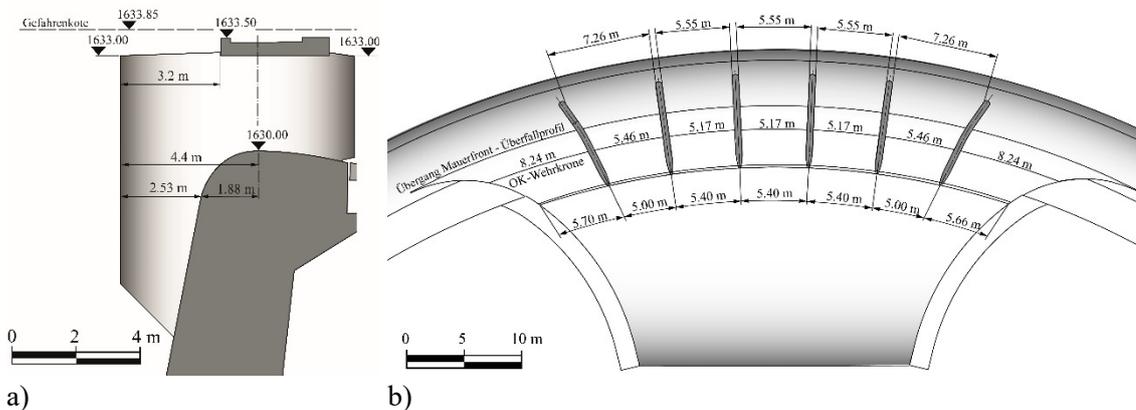


Abb. 2-3 a) Querschnitt und b) Grundriss des Mauerüberfalls Ova Spin mit sechs Wehrpfeilern zur Strömunglenkung

### 3 Physikalisches Modell

Für die Untersuchung der Schwemmholzsituation am Mauerüberfall einer Talsperre wurde das physikalische Modell der Talsperre *Ova Spin* (Abschn. 2.5) mit geometrischem Modellmassstab 1:30 genutzt. Den Zielsetzungen des Forschungsvorhabens folgend (Abschn. 1.2) wurden der Einfluss eines weiteren Überfallprofils auf die Verkläusungssituation am Mauerüberfall untersucht (Abschn. 3.2). Die Eingangs- und Ergebnisparameter sind in den Abschnitten 3.3, 3.4 und 3.5 definiert.

#### 3.1 Perimeter und Modellkonstruktion

Das physikalische Modell ist in einem 1.2 m hohen Trog aus Kalksandstein im geometrischen Massstab 1:30 errichtet und bildet einen Bereich des Ausgleichsbeckens *Ova Spin* sowie die Stau-mauer *Ova Spin* inklusive dem Mauerüberfall und der Schussrinne nach (Abb. 3-1). Ein grosses Einlaufbecken nimmt den Zufluss ins Modell auf und führt das Wasser über Beruhigungselemente turbulenzarm und homogen verteilt dem Speicherbecken zu. Die Wasserrückgabe in den Wasserkreislauf des Labors findet über den Mauerüberlauf der Sperre statt.

Abb. 3-1 zeigt das gebaute Modell in der Draufsicht. Es ist (von links nach rechts) der Einlaufbereich mit Beruhigungsbecken (1), der Stauraum (2), das Sperrenbauwerk mit dem Mauerüberfall (3) sowie das Auslaufbecken (4) abgebildet. Die wasserseitige Ansicht des Mauerüberfalls ist der Abb. 3-6a zu entnehmen.

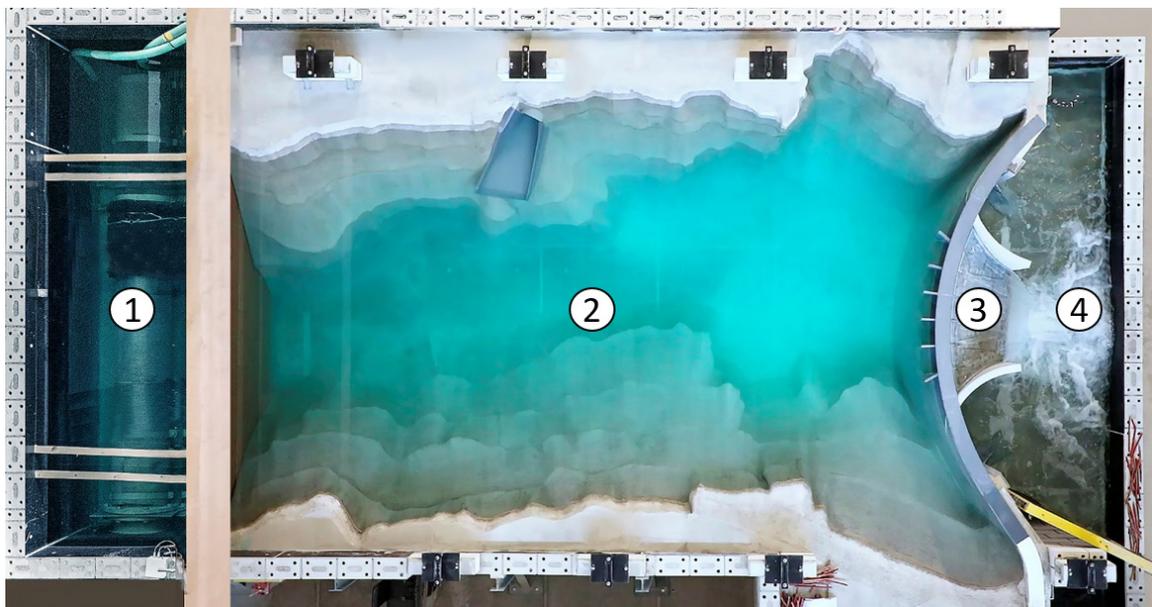


Abb. 3-1 *Physikalisches Modell Ova Spin der VAW, Fließrichtung von links nach rechts, Draufsicht. 1) Einlaufbereich mit Beruhigungsbecken, 2) Stauraum, 3) Sperrenbauwerk mit dem Mauerüberfall, 4) Auslaufbecken*  
VAW4386\_00041\_AS

### 3.2 Überfallprofile

Im Modell werden zwei verschiedene Überfallprofile untersucht (Abb. 3-2):

- Wehr *Ova Spin*: Die Formgebung des Überfalls der Staumauer *Ova Spin* weicht von einem standardisierten Profil ab. Der wasserseitige Quadrant ist als Kreissektor mit Radius  $R = 1.91$  m ausgebildet und führt tangential an dessen Enden an die 1:0.19 geneigte Wasserseite der Mauer und den luftseitigen Quadranten über (Abb. 3-2a). Der luftseitige Quadrant hingegen folgt der Gleichung  $x^{1.78} = -1.852H_D^{0.78}z$ , die den USACE – Designvorschlag bei einer wasserseitigen Neigung der Sperre von 1:1 beschreibt (USACE, 1987).  $x$  und  $z$  spannen das karthesische Koordinatensystem mit Ursprung auf dem Wehrkronenscheitel auf, die Dimensionierungsüberfallhöhe  $H_D$  beträgt 17.9 m beim Mauerüberfall *Ova Spin*. Das Überfallprofil an der Sperre *Ova Spin* ist demnach sehr langgezogen ausgebildet für einen Bemessungslastfall eines  $HQ_{1000}$  mit einer Überfallhöhe  $H_o$  von 2.04 m (relative Überfallhöhe  $\chi = H_o/H_D = 0.11$ ). Das Wehr wird in der folgenden Untersuchung mit Wehr *Ova Spin* bezeichnet.
- *Standardprofil* nach USACE (1987) bei senkrechter Wasserseite der Mauer im Kronenbereich: Das Standardprofil wurde nach USACE (1987) mit  $H_D = 2$  m erstellt (Abb. 3-2b). Das Wehr wird in der folgenden Untersuchung als *Standardwehr* bezeichnet.

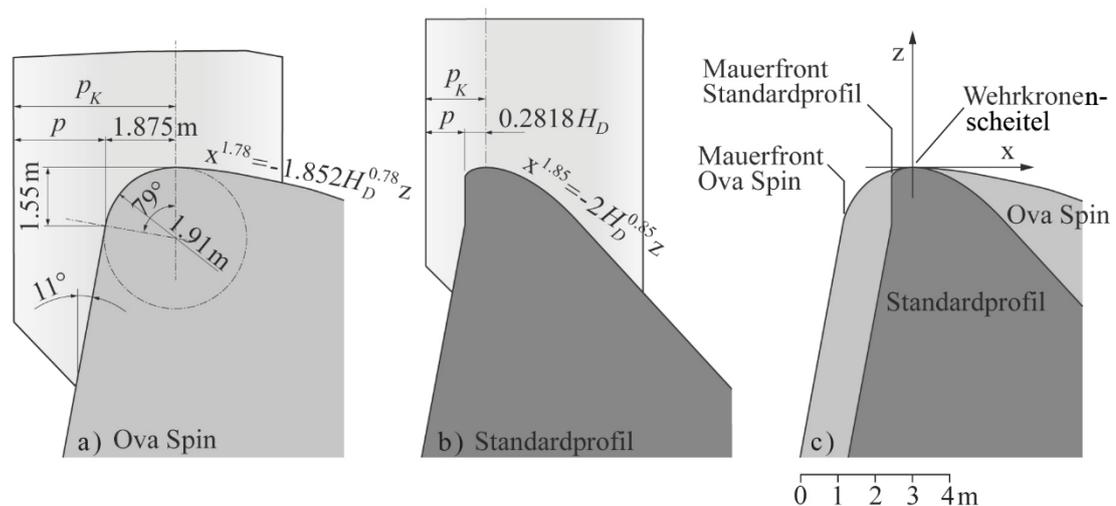


Abb. 3-2 Definitionsskizze des Überfallprofils: a) *Ova Spin* mit  $H_D = 17.9$  m, b) *Standardwehr* mit  $H_D = 2$  m und c) beide Profile im direkten Vergleich

### 3.3 Hydraulische und geometrische Eingangsparameter

In diesem Abschnitt werden die massgeblichen Eingangsparameter der Untersuchung definiert. Die Definitionsskizze im Vertikalschnitt ist der Abb. 3-3 zu entnehmen. Als Eingangsparameter, wozu geometrische, hydraulische und gravimetrische Größen zählen, fließen u.a. die Überfallhöhe  $H_o$  im unverklausten Zustand (Referenzzustand), die Auskrägung der Pfeiler  $p_K$  bezogen auf den Wehrkronenscheitel (Index  $K$ : Krone), die lichte Wehrbreite  $W$ , die Wehrfeldbreiten  $B$ , die

horizontale Distanz zwischen dem Wehrkronenscheitel und der Mauerfront resp. die grosse Halbachse der Ellipse  $c$ , das zugegebene Schwemmholzfestvolumen  $V_{vS}$ , die Stammlänge  $L$ , die statistischen Kennwerte der Längenverteilung der Stämme grosser Schwemmholzgruppen sowie der Stammdurchmesser  $D$  und die Holzdichte  $\rho$  ein.

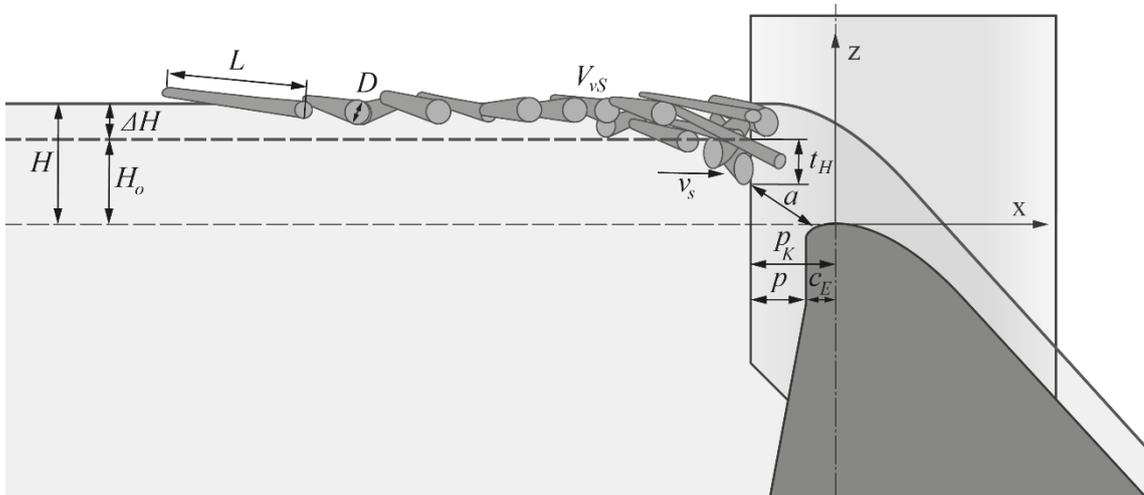


Abb. 3-3 Definitionsskizze mit Darstellung der Eingangsparameter  $H_o$ : Referenz-Überfallhöhe,  $v_s$ : Referenz-Oberflächengeschwindigkeit an der Pfeilernase,  $p$ : Pfeilerauskragung bezogen auf die wasserseitige Stauwand der Talsperre (nach Definition Bénet et al, 2021),  $p_K$ : Pfeilerauskragung bezogen auf den Wehrkronenscheitel,  $c_E$ : horizontale Distanz zw. Wehrkronenscheitel und Mauerfront und Ergebnisparameter  $H$ : Überfallhöhe durch Aufstau infolge Verklauung des Schwemmholzvolumens  $V_{vS}$ ,  $\Delta H$ : Wasserspiegelanstieg infolge Verklauung,  $t_H$ : Eintauchtiefe des Verklauungskörpers an der Pfeilernase,  $a$ : lichter Abstand zw. UK Verklauungskörper und wasserseitigem Quadrant des Überfallprofils,  $L$ : Stammlänge und  $D$ : Stammdurchmesser

### 3.3.1 Überfallhöhe $H_o$ und relative Überfallhöhen $\chi$

Die Lage des Wasserspiegels wurde im Modell 1.2 m oberstrom der Wehrkrone gemessen. Die Differenz aus der Lage dieses Wasserspiegels zur Wehrkrone ergibt die Überfallhöhe  $H_o$ .

Der initiale Zustand der Versuche wurde mit Überfallhöhen  $H_o = 1, 2$  und  $3$  m eingestellt, woraus sich relative Überfallhöhen  $\chi = H_o/H_D = 0.5, 1.0$  und  $1.5$  am *Standardwehr* mit  $H_D = 2$  m, resp.  $0.06, 0.11$  und  $0.17$  für das Wehr *Ova Spin* ergeben (Tab. 6-1). Die dem Wehr *Ova Spin* zugewiesene Dimensionierungsüberfallhöhe  $H_D = 17.9$  m ist aus der Form des unterwasserseitigen Quadranten abgeleitet (Abschn. 3.2).

### 3.3.2 Pfeilerauskragung ab Wehrkronenscheitel $p_K$

Die Länge der Pfeiler und damit die Auskragung der Pfeiler in den Stauraum kann variiert werden. In Abweichung zu Bénet et al. (2021), welche die Pfeilerauskragung  $p$  auf die wasserseitige Stauwand beziehen (Abschn. 2.2), verweist die Auskragung  $p_K$  in der vorliegenden Studie auf den Abstand der oberwasserseitigen Pfeilernase und somit auch des Verklauungskörpers zum Wehrkronenscheitel (Abb. 3-2). Wie in der nachfolgenden Studie zum Wasserspiegelaufstau infolge

Verklausage beobachtet (Kap. 6), haften verklauste Stämme quer an zwei Wehrpfeilern und lagern damit parallel zur Wehrkrone im Abstand der Pfeilerauskragung vor den Wehrfeldern. Da jedoch die Wehrkrone in der Draufsicht mit einem Radius von 60 m leicht gebogen ist, kommen quer an den Pfeilernasen verspannte Stämme in der Wehrfeldmitte etwas näher an der Wehrkrone zu liegen als im Auflagerbereich an den Wehrpfeilern (Abb. 3-4). Die Verklausageprozesse und der infolge einer Verklausage hervorgerufene Aufstau sind massgeblich einerseits von den auf die Stämme einwirkenden Strömungskräften und andererseits der Ausdehnung der freien Durchflussfläche zwischen dem Verklausage- und dem Wehrkörper beeinflusst (s. lichter Abstand  $a$ , Abb. 3-3 und Abschn. 3.5.3). Die Strömungskräfte nehmen dabei mit abnehmender Distanz zur Überfallkrone zu, wohingegen die freie Durchflussfläche abnimmt. Die auf den Stamm wirkenden Strömungskräfte sind daher in der Wehrfeldachse aufgrund der kleineren Distanz zur Überfallkrone grösser als auf Höhe der Pfeilernasen. Die in der vorliegenden Studie angesetzte Masse der Auskragung  $p_K$  sind die arithmetischen Mittelwerte der Pfeilerauskragung  $p_{K,Pf}$  und des Abstandes  $p_{K,WA}$  des Stammes zum Wehrkronenscheitel in der Wehrfeldachse (Abb. 3-4). Mit der Pfeilerauskragung  $p_K$  ist damit die über die Wehrfeldbreite gemittelte Distanz des Verklausagekörpers zum Wehrkronenscheitel definiert und nicht die Auskragung  $p_{K,Pf}$  der Pfeiler an sich. Die prozentualen Abweichungen von  $p_K$  auf  $p_{K,Pf}$  betragen zwischen  $-2.5\% \dots -6.8\%$ . Für geradlinige Überfallbauwerke resultiert  $p_K = p_{K,Pf}$ . Mit dieser Anpassung gelingt eine vereinfachte Übertragung der Ergebnisse an moderat gekrümmten Wehrkronen auf geradlinige Überfallbauwerke. Die am physikalischen Modell der VAW erarbeiteten Ergebnisse an gekrümmter Wehrkrone werden dadurch direkt vergleichbar mit Ergebnissen an geradlinigen Überfallbauwerken (Hartlieb, 2015; Schmocker, 2017; Bénet et al., 2021), insbesondere, da die horizontale Krümmung der Wehrkrone mit  $0.0167 \text{ m}^{-1}$  in diesem Kontext moderat ist.

Der Tab. 3-1 sind die Auskragung der Pfeiler  $p_{K,Pf}$  sowie die angepassten und in der Analyse berücksichtigten Pfeilerauskragungen  $p_K$  für die beiden Wehre zu entnehmen.

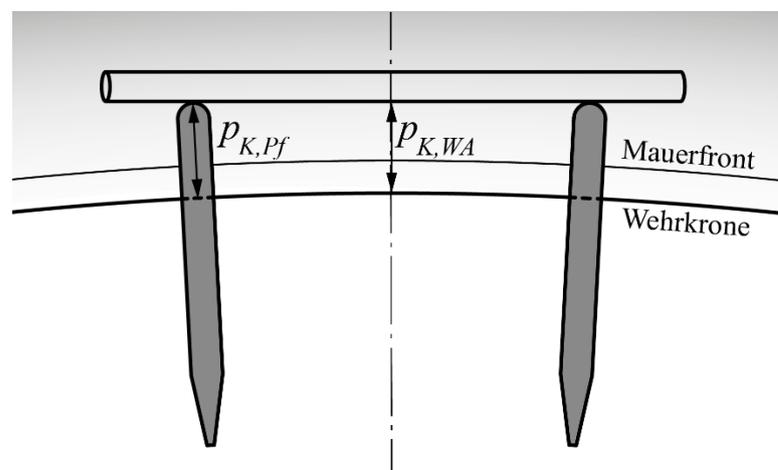


Abb. 3-4 Auskragung der Pfeiler  $p_{K,Pf}$  und Abstand  $p_{K,WA}$  des Stammes zum Wehrkronenscheitel in Wehrfeldachse am bogenförmigen Mauerüberfall. Das in der Untersuchung angesetzte Mass der Pfeilerauskragung  $p_K$  resp. des mittleren Abstandes des Stammes zum Wehrkronenscheitel ist der Mittelwert aus  $p_{K,Pf}$  und  $p_{K,WA}$ .

Tab. 3-1 Parameterwerte der Pfeilerauskragungen  $p_{K,Pf}$  und  $p_K$  in [m]. Die horizontale Distanz  $c_E = p_K - p$  zwischen Wehrkronenscheitel und Mauerfront (Abb. 3-3) beträgt im Profil *Ova Spin* 1.88 m und im Standardprofil 0.56 m

| <i>Ova Spin</i> |       | <i>Standardprofil</i> |       |
|-----------------|-------|-----------------------|-------|
| $p_{K,Pf}$      | $p_K$ | $p_{K,Pf}$            | $p_K$ |
| 0               | -0.04 | 0                     | -0.04 |
| 2.13            | 2.08  | 0.56                  | 0.53  |
| 2.72            | 2.67  | 1.01                  | 0.97  |
| 3.27            | 3.22  | 1.26                  | 1.22  |
|                 |       | 1.61                  | 1.57  |

### 3.3.3 Wehrfeldbreite $B$

Die lichte Wehrbreite  $W$ , die Wehrfeldbreiten  $B$ , die Stammlänge  $L$  und die Längenverteilung der Stämme grosser Schwemmholzgruppen wurden insbesondere bei den Versuchen zur Abschätzung der Wahrscheinlichkeit der Verklauung von Einzelhölzern an den Wehrpfeilern und zur Durchleitung von Schwemmholzgruppen systematisch aufeinander abgestimmt.

Der Mauerüberfall *Ova Spin* wird von 0.5 m breiten Wehrpfeilern in sieben unterschiedlich breite Wehrfelder unterteilt (Abb. 2-3b und Abb. 3-6a). Die totale Wehrbreite  $W_{tot}$  entlang des Wehrkronenscheitels beträgt 45.9 m (einschl. Breite der Wehrpfeiler).

Der Mauerüberfall des *Standardwehrs* wird von 0.5 m breiten Wehrpfeilern in Wehrfelder gleicher Breite  $B$  unterteilt. Die Anzahl und Lage der Pfeiler kann variiert werden, wodurch die Anzahl der Wehrfelder sowie deren lichte Breite  $B$  verändert wird (Abb. 3-6b). Die totale Wehrbreite  $W_{tot}$  entlang des Wehrkronenscheitels beträgt 32 m (einschl. Breite der Wehrpfeiler) und ist damit im Vergleich zur Anlage *Ova Spin* um 13.9 m kürzer (vgl. Abb. 2-3 mit Abb. 3-5).

Die Situation mit der Unterteilung des Überfalls in fünf Wehrfelder, wie sie für die Untersuchung zur Verklauungswahrscheinlichkeit von Einzelhölzern (Abschn. 5.1) und der Erfassung des Aufstaus infolge Schwemmholzverklauung (Kap. 6) verwendet wurde, ist der Abb. 3-5 zu entnehmen. Bei dieser Konfiguration beträgt die lichte Wehrbreite  $W = 30$  m auf dem Wehrkronenscheitel.

Für die Untersuchung zur Durchleitung von Holzgruppen wurde die lichte Wehrfeldbreite  $B$  variiert. Eine Übersicht der verwendeten Wehrfeldbreiten am *Standardwehr* findet sich in Tab. 3-2.

Im Gegensatz zur Situation bei *Ova Spin* verjüngt sich die Schussrinne in Fließrichtung kaum (Abb. 2-3), sodass sich die Breite der Durchlassöffnungen im Bereich der Pfeiler nur geringfügig verändert (Abb. 3-5).

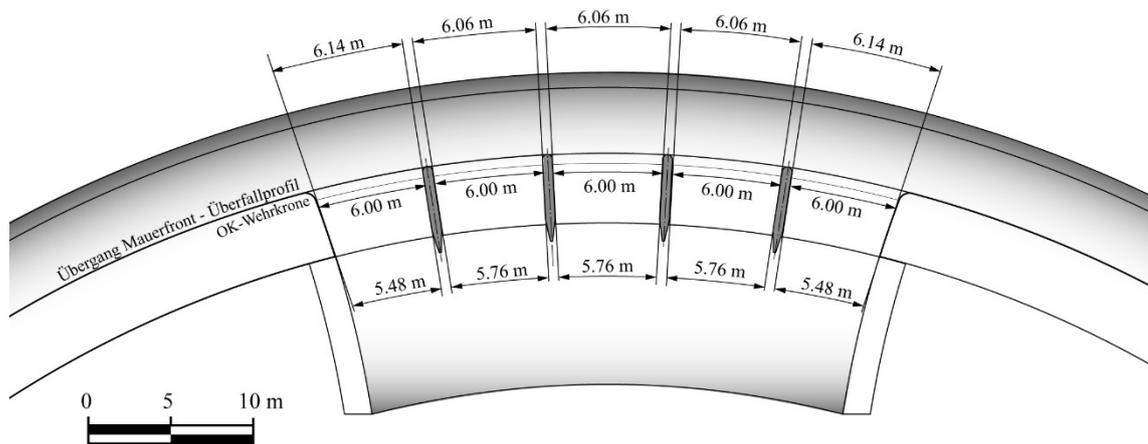


Abb. 3-5 Grundriss des Standardwehrs mit vier Wehrpfeilern bei einer Pfeilerauskragung  $p_{K,Pf} = 0.56 \text{ m}$  (Pfeilernasen bündig mit Mauerfront)

Tab. 3-2 Lichte Wehrfeldbreiten auf Höhe der Pfeilernasen (bündig mit Mauerfront) am Standardwehr für die Untersuchung der Verklauungswahrscheinlichkeiten von Einzelhölzern und zur Durchleitung von Schwemmholzgruppen

|   | # Pfeiler<br>[-] | # Wehrfelder<br>[-] | lichte Wehrfeldbreite<br>$B$ [m] |
|---|------------------|---------------------|----------------------------------|
| Verklauungswahrscheinlichkeit von Einzelhölzern | 4                | 5                   | 6.06                             |
| Durchleitung von Holzgruppen                    | 2                | 3                   | 10.43                            |
|   | 3                | 4                   | 7.70                             |
|   | 4                | 5                   | 6.06                             |



Abb. 3-6 *Detailansicht des Mauerüberfalls im Modell für a) Ova Spin mit sechs und b) Standardwehr mit vier ins Oberwasser auskragenden Pfeilern VAW4386\_00043\_AS / VAW0902\_00085*

### 3.4 Modellschwemmholz und dessen Eingangsparameter

#### 3.4.1 Stammholz

Das Modellschwemmholz wird mit geometrisch skaliertem, entastetem Schnittholz abgebildet (Abb. 3-9 und Abb. 3-10), d.h. das potentielle Verhaken von Hölzern wird vernachlässigt und damit eine dichte Packung des Verkläusungskörpers begünstigt.

Die Steifigkeit der Modellhölzer ist bezogen auf den Naturmassstab zu gross. Effekte der Biegsamkeit des Holzes können im Modell nicht nachgebildet werden. Die Tendenz zur Verkläusung ist damit im Modell erhöht, da ein starres Holz zwischen den Pfeilern hängen bleibt, wohingegen das in Realität elastischere Holz sich durch Verformung der Blockade entziehen kann. Nach Hartlieb (2015) liegt die Verkläusungswahrscheinlichkeit von biegsamen Stämmen ca. 30% - 40% unter derjenigen von starren Stämmen. Wenn Schwemmholz an einem Pfeiler hängen bleibt, kann es bei Hochwasser in der Natur infolge der dynamischen Kräfte eher in kleinere Stücke brechen

und die Blockade auflösen. Dieser Prozess wird in verkleinerten Froude-Modellen nicht beobachtet, da das zugegebene Holz verhältnismässig stabiler ist (Schmocker & Hager, 2011).

Bleibt ein Baumstamm an einem Wehrpfeiler hängen, kommt es meist rasch zu einer Verklausung, da sich nachfolgende Stämme und Äste verkeilen und den Verklausungskörper vergrössern. Der Wasserspiegel im Reservoir steigt an und die Überfallhöhe  $H$  nimmt zu. Wie Hartlieb (2015) aufzeigt, führt eine höhere Dichte zu einem grösseren Wasserspiegelaufstau  $\Delta H$  (Abschn. 2.2), begründet durch die grössere Eintauchtiefe des dichteren Holzes. Die Dichte des Schwemmholzes im Modell wurde nun derart gewählt, dass sich kompakte Verklausungen bilden können. Die Modellhölzer wurden deswegen zwecks der Bildung mehrlagiger Verklausungskörper vor der Zugabe gewässert, um eine relativ hohe Zieldichte entsprechend den in Tab. 2-1 angegebenen Maxima zu erreichen (Tab. 3-5). Hingegen wurde aber auch darauf geachtet, dass die Hölzer noch aufschwammen und nicht auf den Grund des Modells absanken.

### 3.4.2 Feinmaterial

Wird einzig Stammmaterial bei den Versuchen zur Ermittlung des Wasserspiegelaufstaus infolge Verklausung eingesetzt, fehlt der Anteil  $m$  des losen Feinmaterials der Feststoffe, z.B. partikuläre organische Stoffe wie Kleinholz ( $D < 1\text{cm}$ ), Laub, Nadeln und Grasbüschel am Schwemmgut (Abschn. 2.3). Dieses lose Feinmaterial kann sich in den Zwischenräumen des Verklausungskörpers festsetzen. In den Verklausungskörper eingeschwemmtes Feinmaterial, welches das Feststoffvolumen  $V_S$  um das zusätzliche Volumen des Feinmaterials erhöht, reduziert die Porosität  $n$  des Verklausungskörpers bei unverändertem Lockervolumen des Verklausungskörpers  $V_L$ , Gl. (2) und Gl. (3).

Um den Einfluss des Feinmaterialanteils  $m$  auf einen zusätzlichen Wasserspiegelaufstau zu modellieren, wurde, anstatt Feinmaterialien zu dosieren, die Porosität  $n$  des Verklausungskörpers variiert. Diese Modellierung erfolgte abstrakt, indem der Verklausungskörper durch ein Lochblech der Porosität  $n$  oder durch eine dichte Tauchwand ( $n = 0$ ) in den Versuchen der VAW ersetzt wurde (Abb. 3-7). Die untersuchten Porositäten  $n$  sind 0, 0.1, 0.2, 0.3 und 0.4. Mit  $n = 0$  wird eine komplett dichte Schwemmholzverklausung modelliert. Die komplett dichte Verklausung kann als Worst-Case-Szenario angesehen werden, wurde beispielsweise aber von Livers & Wohl (2021) bei natürlichen Verklausungen in Flüssen nicht beobachtet.



Abb. 3-7 Abstraktion des Verkläusungskörpers durch ein Lochblech mit Porosität  $n = 0.4$  bei der Pfeilerauskrägung  $p_K = 0.56$  m am Standardwehr VAW0902\_00087\_AS

### 3.4.3 Schwemmholzabmessungen, -dichte, und -festvolumen

In der vorliegenden Arbeit wurden Versuche zur Verkläusungswahrscheinlichkeit von Einzelhölzern an den Wehrpfeilern, der Durchleitung grosser Schwemmholzgruppen und zum Wasserspiegelaufstau infolge einer Schwemmholzverkläusung durchgeführt. Für jeden Untersuchungsschwerpunkt wurde der Zielsetzung folgend unterschiedliches Modellschwemmholz eingesetzt, jedoch stets von der Klasse *Grossholz* (*large wood LW*, Abschn. 2.3).

In diesem Abschnitt wird auf die unterschiedlichen Schwemmholzzusammensetzungen eingegangen und die jeweiligen relevanten Parameter wie Schwemmholzlängen  $L$ , Stammdurchmesser  $D$ , statistische Kennwerte der Längenverteilung, Holzdichten  $\rho$  sowie zugegebenes Schwemmholzfestvolumen  $V_S$  quantifiziert.

#### Verkläusungswahrscheinlichkeit von Einzelhölzern

Die Variation der Stammlängen  $L$  wurde in der Untersuchung zur Verkläusungswahrscheinlichkeit von Einzelhölzern genutzt (Abschn. 5.1), um das Verhältnis von der Stammlänge  $L$  zu Wehrfeldbreite  $B$  anzupassen. Letztere bezieht sich dabei auf den lichten Abstand der Pfeiler im Eintrittsquerschnitt auf Höhe der Pfeilernasen am bogenförmigen Überlaufbauwerk und betrug 6.06 m (Tab. 3-2, Abb. 3-5). Die Verkläusungswahrscheinlichkeit des Einzelholzes wurde am mittleren Wehrfeld anhand drei unterschiedlicher Stammlängen  $L$  untersucht:

- ein kurzes Holz mit Länge  $L = B$
- ein mittleres Holz mit  $L = 1.25 \cdot B$  und
- ein langes Holz mit  $L = 2 \cdot B$ .

Das mittlere Holz entspricht dabei dem Kriterium nach Godtland & Tesaker (1994), wonach bei einer Wehrfeldbreite  $B > L/1.25$  Schwemmholz grösstenteils am freien Wehrüberfall durchgeleitet und nicht zurückgehalten wird (Abschn. 2.1).

#### Durchleitung von Schwemmholzgruppen

Für die Versuche zur Durchleitung von grossen Schwemmholzgruppen über den Mauerüberfall (Abschn. 5.2) wurden drei verschiedene Schwemmholzgruppen à je 120 Stämme definiert, die sich durch ihre Längenverteilung voneinander unterscheiden. Gruppe (a) besteht aus einer uniformen Verteilung, Gruppe (b) weist eine schmale und Gruppe (c) eine breite Verteilung auf (Abb. 3-8). Die Längenverteilungen wurden derart gewählt, dass der Median  $L_{50}$  aller Gruppen identisch ist, hingegen die statistischen Kennwerte u.a. des 90%-Perzentils  $L_{90}$  und der maximalen Stammlänge  $L_{\max}$  zueinander abweichen. Die Motivation hinter der Wahl von drei unterschiedlichen Längenverteilungen war, den Einfluss der Stammlängenverteilung auf die Verklauungswahrscheinlichkeit zu untersuchen sowie möglicherweise eine relevante Stammlänge für die Beurteilung der Verklauungswahrscheinlichkeit von grossen Schwemmholzgruppen zu bestimmen. Die Verteilungen orientieren sich an den Stammlängen des liegenden Totholzes im EZG der Sperre Ova Spin (Abschn. 2.4.2). Die gewählten Verteilungen sind als Summenkurven dargestellt.

Abb. 3-9 zeigt das verwendete Schwemmholz für die drei verschiedenen Schwemmholzlängenverteilungen. In Tab. 3-3 sind die statistischen Kennwerte der drei verwendeten Längenverteilungen angegeben.

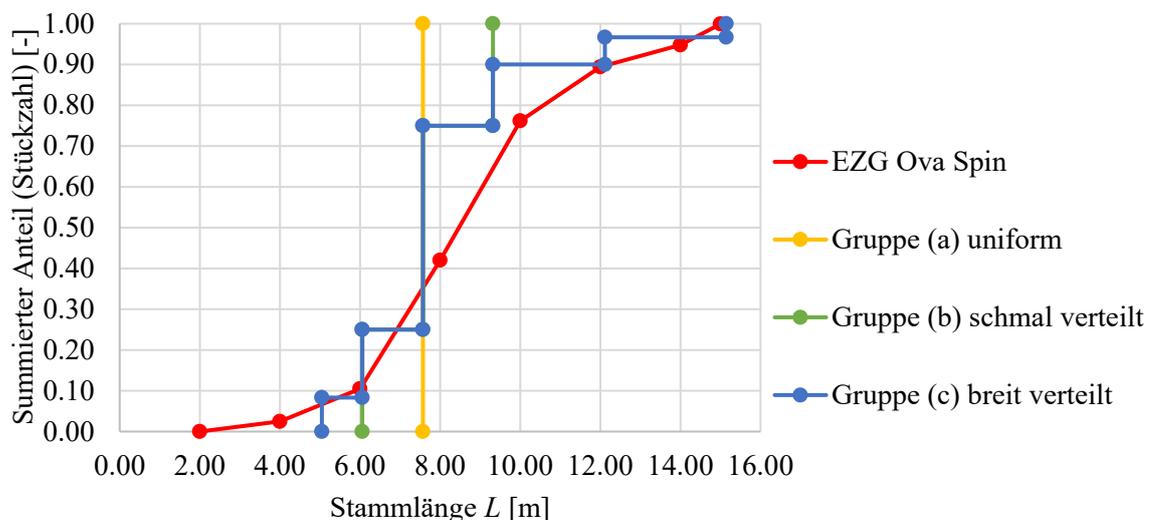


Abb. 3-8 Summenkurven der Schwemmholzlängenverteilungen der Bäume im Einzugsgebiet Ova Spin (Referenzverteilung) und der Modellhölzer der Gruppen (a), (b) und (c).

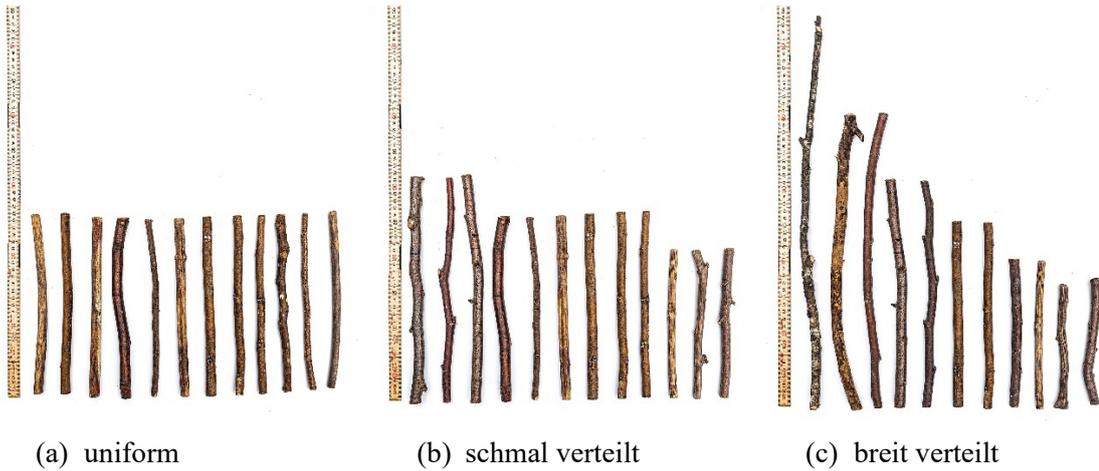


Abb. 3-9 Schwemmholzgruppen im Modellversuch der VAW. (a) uniform, (b) schmal und (c) breit verteilt  
VAW0902\_00077/78/80

Tab. 3-3 Kennzahlen der verwendeten Schwemmholzlängenverteilungen:  $L_{50}$  = Medianlänge,  $L_m$  = mittlere Länge,  $L_{max}$  = maximale Stammlänge,  $L_{90}$  = 90% Perzentil,  $L_{min}$  = minimale Stammlänge und  $\sigma$  = Standardabweichung der Verteilung

|           | Gruppe (a)<br>uniform | Gruppe (b)<br>schmal verteilt | Gruppe (c)<br>breit verteilt |
|-----------|-----------------------|-------------------------------|------------------------------|
| $L_{50}$  | 7.6 m                 | 7.6 m                         | 7.6 m                        |
| $L_m$     | 7.6 m                 | 7,6 m                         | 7.9 m                        |
| $L_{90}$  | 7.6 m                 | 9.3 m                         | 10.7 m                       |
| $L_{max}$ | 7.6 m                 | 9.3 m                         | 15.1 m                       |
| $L_{min}$ | 7.6 m                 | 6.1 m                         | 5.1 m                        |
| $\sigma$  | 0.0 m                 | 1.2 m                         | 2.1 m                        |

Um nun das Verhältnis  $L/B$  auch in den Versuchen zur Durchleitung von grossen Schwemmholzgruppen unter der Verwendung der gleichen Mischungen (a), (b) oder (c) zu variieren, wurden die lichten Wehrfelddbreiten  $B$  gemäss Tab. 3-2 verändert. Die lichten Wehrfelddbreiten  $B$ , die auf  $L_{50}$  bezogenen relativen Wehrfelddbreiten  $B/L_{50}$  sowie die relativen Stammlängen  $L_{50}/B$  dieser Versuchsreihen sind in Tab. 3-4 dargestellt. Auch hier bezieht sich  $B$  auf die lichte Weite im Eintrittsquerschnitt an den Pfeilernasen (Abschn. 3.3.3).

Tab. 3-4 Relative Wehrfelddbreiten  $B/L_{50}$  der Versuchsreihen zur Durchleitung von grossen Schwemmholzgruppen

| lichte Wehrfelddbreite<br>$B$ | rel. Wehrfelddbreite<br>$B/L_{50}$ | rel. Stammlänge<br>$L_{50}/B$ |
|-------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|
| 10.43 m                       | 1.38                               | 0.73                          |
| 7.70 m                        | 1.02                               | 0.98                          |
| 6.06 m                        | 0.80                               | 1.25                          |

Der Durchmesser  $D$  wurde jeweils so gewählt, dass das Verhältnis  $L/D \approx 20$  wie in Bénét et al. (2021) eingehalten wurde.

Die aus jeweils 120 Stück zusammengesetzten Mischungen der Schwemmholzgruppen (a), (b) und (c) wiesen ein Schwemmholzfestvolumen  $V_S$  von 91, 100 und 113 m<sup>3</sup> auf.

#### Aufstau infolge Schwemmholzverklausung

Für die Versuche zum Wasserspiegelaufstau infolge Schwemmholzverklausung wurde die Länge der Versuchshölzer mit  $1.3 \cdot B$  respektive  $1.4 \cdot B$  etwas länger als die Wehrfeldbreite gewählt, sodass die Hölzer bei der systematischen Schwemmholzzugabe, wie sie in Abschn. 6.1.1 beschrieben ist, zwischen zwei Wehrpfeilern verklausten.

Die Schwemmholzdichte wurde im Sinne einer konservativen Untersuchung mittels Wässerung möglichst hoch gehalten, sodass sie den maximalen Werten von grünem Holz aus Tab. 2-1 entsprachen. Die Variabilität der Dichte der einzelnen Hölzer untereinander war dennoch relativ gross, sodass auch bei mittleren Dichten von weniger als 850 kg/m<sup>3</sup> einzelne Hölzer absanken. Anhand des Stammdurchmessers  $D$  wurde das Modellschwemmholz in drei Klassen A, B und C unterteilt (Abb. 3-10). Die gemessenen mittleren Durchmesser  $D$ , Längen  $L$  und Dichten  $\rho$  der drei verwendeten Schwemmholzklassen finden sich in Tab. 3-5. Die Standardabweichung der Dichte bezieht sich hierbei nicht auf die einzelnen Hölzer untereinander, sondern auf die Standardabweichung des Mittelwerts über die verschiedenen Versuche hinweg.

Das Schwemmholzfestvolumen  $V_S$  des zugegebenen Holzes wurde jeweils vor der Zugabe bestimmt, um u.a. den Wasserspiegelaufstau infolge einer Verklausung in Funktion von  $V_{vS}$  zu ermitteln. Das total verklauste Schwemmholzvolumen  $V_{vS}$  variierte für die einzelnen Versuche zwischen 17 und 415 m<sup>3</sup>.

Tab. 3-5 *Eigenschaften des verwendeten Stammholzes zur Abschätzung des Wasserspiegelaufstaus infolge Verklausung*

|                 |                      | Klasse A        | Klasse B        | Klasse C        |
|-----------------|----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Durchmesser $D$ | [m]                  | $0.37 \pm 0.05$ | $0.20 \pm 0.05$ | $0.54 \pm 0.07$ |
| Stammlänge $L$  | [m]                  | $7.91 \pm 1.04$ | $7.59 \pm 0.45$ | $7.80 \pm 0.53$ |
| Dichte $\rho$   | [kg/m <sup>3</sup> ] | $843 \pm 23$    | $779 \pm 10$    | $817 \pm 32$    |

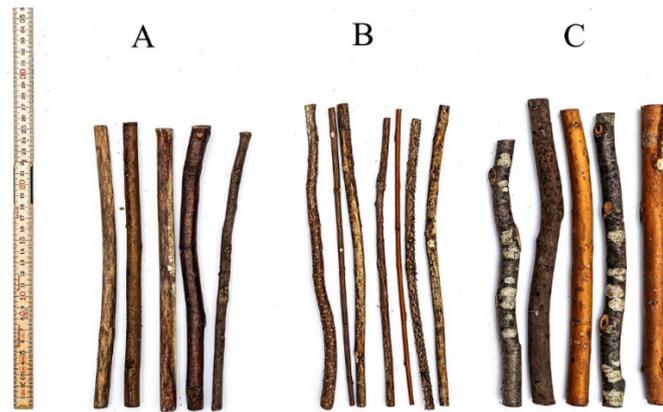


Abb. 3-10 Schwemmholzklassen A, B und C für die Versuche zum Wasserspiegelaufstau VAW0902\_00079

### 3.5 Gemessene Ergebnisparameter

In diesem Abschnitt werden die gemessenen Ergebnisparameter der Untersuchung definiert. Die Definitionsskizze im Vertikalschnitt ist der Abb. 3-3 zu entnehmen. Die gemessenen Ergebnisparameter sind der Durchfluss  $Q$ , die Fließgeschwindigkeiten  $v$  und insbesondere die Oberflächengeschwindigkeit  $v_s$  im Zulauf zum Überfall (Index s: surface), die Anzahl verklauster Einzelhölzer an den Wehrpfeilern, das verklauste Schwemmholzfestvolumen  $V_{vS}$  sowie die infolge der Verklauung von Schwemmholz an den Wehrpfeilern gemessenen Größen Überfallhöhe  $H$ , Eintauchtiefe der Verklauung  $t_H$  und lichter Abstand  $a$ .

#### 3.5.1 Durchfluss $Q$ , Überfallhöhen $H$ , Wasserspiegelaufstau $\Delta H$ und $\Delta H_{max}$

Der sich bei den vorgegebenen, initialen Überfallhöhen  $H_o$  einstellende Durchfluss  $Q$  wurde messtechnisch erfasst.

Die Überfallhöhe  $H$  nahm mit zunehmender Verklauung von Schwemmholz an den Wehrpfeilern zu und wurde nach jeder Zugabe von je einem Schwemmholz pro Wehrfeld gemessen, wobei der Durchfluss  $Q$  konstant gehalten wurde.

Der sich ausbildende Aufstau  $\Delta H$  in Funktion des verklausten Schwemmholzfestvolumens  $V_{vS}$  wurde aufgezeichnet. Mit  $\Delta H = H - H_o$  wird die Wasserspiegeländerung definiert, wobei  $\Delta H_{max}$  den maximalen Aufstau am Ende des Versuchs bezeichnet.

#### 3.5.2 Fließgeschwindigkeiten $v$ und Oberflächengeschwindigkeit $v_s$

Auf der Wehrkrone und im Bereich vor dem Mauerüberfall wurden die Fließgeschwindigkeiten in einem engen Messraster gemessen. Die auf die Holzstämmen auftretenden Strömungskräfte sind proportional zum Staudruck resp. dem Quadrat der Geschwindigkeiten. In der vorliegenden Studie ist deswegen vor allem die Oberflächengeschwindigkeit  $v_s$  auf Höhe der Pfeilernasen von Bedeutung.

### 3.5.3 Eintauchtiefe der Verklausung $t_H$ und lichter Abstand $a$

Die Eintauchtiefe  $t_H$  des Verklausungskörpers wird als vertikale Distanz der Verklausungsunterkante zur Wasseroberfläche  $H_o$  bei unverklausen Verhältnissen definiert. Das Mass  $t_H$  ist somit explizit nicht als resultierende Verklausungsmächtigkeit zu verstehen, sondern als Eintauchtiefe der Verklausung gegenüber dem Ausgangswasserspiegel und ist ein Mass dafür, wie tief ein Schwemmholz bei gegebener Dichte und Fliessgeschwindigkeit unter die Wasseroberfläche gezogen werden kann.

Der graphisch ermittelte Ergebnisparameter  $a$  bezeichnet den lichten Abstand zwischen der Unterkante des Verklausungskörpers auf Höhe der Auskragung  $p_K$  und dem wasserseitigen Quadranten des Überfallprofils (Abb. 3-3). Der lichte Abstand  $a$  ist also die über die Wehrfeldbreite gemittelte kürzeste Distanz zwischen dem Überfallprofil und der Verklausungsunterkante. Er ist ein Mass für die der Strömung zur Verfügung stehenden Durchflussfläche zwischen dem Verklausungskörper und dem Überfallprofil.

Der lichte Abstand  $a$  ist abhängig von  $p_K$ ,  $H_o$ ,  $t_H$  und der Kronenform und kann für ellipsenähnliche Kronenformen (z.B. wasserseitiger Quadrant des USACE-Profiles, Abb. 3-2b) vereinfacht wie folgt angenähert werden:

$$a = \sqrt{\left(p_K - \frac{2}{3}k\right)^2 + \left(H_o - t_H + \frac{c_E - \sqrt{c_E^2 - \frac{4}{9}k^2}}{2}\right)^2} \quad \text{für } p_K \geq 0, R^2 = 0.997 \quad (5)$$

wobei  $c_E$  dem Mass der grossen Halbachse der Ellipse, respektive der horizontalen Distanz zwischen Wehrkronenscheitel und Mauerfront, entspricht und  $k$  einer geometrischen Variable mit entweder  $k = p_K$  für  $0 \leq p_K \leq c_E$  (die Pfeilernase liegt zwischen Wehrkronenscheitel und Mauerfront) oder  $k = c_E$  für  $p_K > c_E$  (die Pfeiler kragen über die Mauerfront ins Reservoir aus). Die Herleitung dieser Gleichung findet sich im Anhang A, genauso wie jene für das Überfallprofil *Ova Spin*.

## 3.6 Messtechnik und Koordinatensystem

### 3.6.1 Messtechnik

Der Zufluss ins Modell resp. der Durchfluss  $Q$  wurde mittels magnetisch-induktivem Durchflussmesser (MID) bestimmt. Die Messgenauigkeit des MID beträgt  $\pm 0.5\%$  vom Messwert für Prototypdurchflüsse grösser als  $100 \text{ m}^3/\text{s}$ . Für kleinere Prototypdurchflüsse beträgt die Genauigkeit der im Messquerschnitt des MID erfassten Geschwindigkeit  $\pm 0.002 \text{ m/s}$  auf den Messwert, was einem absoluten Fehler von  $0.48 \text{ m}^3/\text{s}$  in Prototypgrösse entspricht. Zusätzlich zum Messfehler kommen  $\pm 0.062\%$  des Messbereichs durch den Fehler des Analogausgangs hinzu.

Die Wasserspiegellagen  $H$  im Becken wurden mittels Stechpegel mit einer Genauigkeit von  $\pm 0.5 \text{ mm}$  ( $15 \text{ mm}$  im Prototyp) erfasst.

Die Geschwindigkeiten  $v$  über die Tiefe im Zulauf der Sperre in der Achse durch die mittlere Entlastungsöffnung wurden mittels Akustik-Doppler-Methode (ADV-Sonde) in einem engen Raster aufgenommen. Die Messgenauigkeit beträgt  $\pm 0.5\%$  vom Messwert zuzüglich  $+2.5$  mm/s. Bei einer auf Prototyp umgerechneten gemessenen Geschwindigkeit von  $1$  m/s ergibt dies einen Fehlerbereich von  $\pm 18.7$  mm/s. Die drei Geschwindigkeitskomponenten in x-, y- und z-Richtung werden in einem endlichen Messvolumen von  $6 \times 6 \times 6$  mm<sup>3</sup> mit einer Abtastrate von  $200$  Hz erfasst.

Zur Dokumentation der Verklausungsprozesse und insbesondere der sich ausbildenden Eintauchtiefe  $t_H$  der Verklausung wurden Video- und Fotoaufnahmen gemacht.

### 3.6.2 Koordinatensystem

Das Modellkoordinatensystem hat seinen Nullpunkt auf dem Wehrkronenscheitel mittig in der mittleren Entlastungsöffnung. Die positive x-Achse zeigt in Fließrichtung und die positive z-Achse lotrecht nach oben (Abb. 3-3).

### 3.7 Modellähnlichkeit

Das hydraulische Modell wurde nach dem Froude'schen Modellähnlichkeitsgesetz mit einem geometrischen Massstabsfaktor von  $\lambda = 30$  erstellt. Die Froude'sche Modellähnlichkeit wird für Abflüsse mit freier Oberfläche angewendet und besagt, dass das Verhältnis von Trägheitskräften zur Schwerkraft eine dominierende Rolle sowohl in Natur als auch im Modell spielt. Dieses Modell setzt in der modellierten Strömung turbulente Verhältnisse voraus. Bei der Ähnlichkeit nach Froude wird verlangt, dass die entsprechende Kennzahl  $F = v/(g \cdot L)^{0.5}$  (mit  $L$  = charakteristische Länge) sowohl im Modell als auch im Prototyp identisch ist.

Bei Modellversuchen zu Überfällen ist zu beachten, dass es bei Überfallhöhen im Modell von  $H < 5$  cm zu Massstabeffekten kommen kann, die durch den Einfluss der Oberflächenspannung und der Viskosität verursacht werden (Fritz & Hager, 1998). Im vorliegenden Modell sind daher Massstabeffekte bei relativen Überfallhöhen von  $\chi < 0.75$  am *Standardprofil* resp.  $\chi < 0.08$  am Überfall der Anlage *Ova Spin* nicht ausgeschlossen. Solche Massstabeffekte können nach Froude'schem Modellähnlichkeitsgesetz kleinere Überfallhöhen im Modell bewirken, als am Prototyp zu erwarten sind. Damit ist das in der vorliegenden Studie dargestellte Verfahren zur Berechnung des Wasserspiegelaufstaus infolge der Verklausung der Wehrpfeiler bei kleinen  $\chi$  bei leicht höheren Fließgeschwindigkeiten entwickelt worden, als was an der Prototypanlage zu erwarten ist. Die Massstabeffekte wirken sich somit konservativ aus. Am *Standardwehr* resultiert eine massstabsabhängige Abweichung in der Geschwindigkeit von ca.  $1\%$  für  $\chi = 0.5$ , was im Kontext vernachlässigbar ist (Abschn. 4.1).

## 4 Hydraulik

Es wurden die Abflusscharakteristika und die vertikalen Strömungsfelder im Bereich der zwei unterschiedlichen Überfallwehre im unverklausen Zustand untersucht. Die Untersuchung der Abflusscharakteristik erlaubt die Ermittlung des Abflussbeiwertes  $C_d$  (Abschn. 4.1), der in der vorliegenden Studie zur reduzierten Abflussleistung bei Verklausung der Wehrfelder mit dem reduzierten Abflussbeiwert  $C_{dH}$  über den Abflussreduktionsfaktor  $\eta$  in Beziehung gesetzt wird.

Im Abschn. 4.2 und seinem Anhang B liegt der Fokus auf der Herleitung der Gleichung zur rechnerischen Ermittlung der Oberflächenströmungsgeschwindigkeit  $v_s$  in Funktion des Abstandes zum Wehrkronenscheitel resp. an den Pfeilernasen als massgebende Grösse für die Berechnung des Aufstaus infolge der Verklausung der Wehrfelder.

Das *Standardwehr* und das Überfallwehr *Ova Spin* sind im Abschnitt 3.2 dargestellt. Das *Standardwehr* ist auf eine Dimensionierungsüberfallhöhe von  $H_D = 2$  m ausgelegt. Bei *Ova Spin* wird eine Überfallhöhe von  $H_o = 2.04$  m beim Bemessungshochwasser beobachtet, das eine Wiederkehrperiode von 1'000 Jahren aufweist. Während das *Standardwehr* den Kriterien nach USACE (1987) folgt, besitzt *Ova Spin* eine in Fliessrichtung sehr langgezogene Wehrkrone (Abb. 3-2c). Diese Geometrie lässt eine geringe Abflusskapazität erwarten.

### 4.1 Abflusscharakteristik

Der Abflussbeiwert  $C_d$  des Mauerüberfalls berechnet sich zu

$$C_d = \frac{Q}{W_w \sqrt{2gH_o^3}} \quad (6)$$

wobei  $W_w$  die wirksame Wehrbreite bezeichnet, indem die lichte Wehrbreite  $W$  anhand von Seiten- und Pfeilerkontraktionskoeffizienten nach USACE (1987) reduziert wird.

In Abb. 4-1 sind die nach Gl. (6) ermittelten Abflussbeiwerte in Abhängigkeit von der relativen Überfallhöhe  $\chi = H_o/H_D$  dargestellt. Die Pfeilerauskrugung  $p_k$  hat für  $\chi > 0.5$  praktisch keinen Einfluss auf den Abflussbeiwert. Die angegebene Überfallcharakteristik gilt somit für alle untersuchten Pfeilerauskrugungen. Bei einer Überfallhöhe  $H_o = H_D$  von 2 m weist der *Standardüberfall* einen  $C_d$ -Wert von 0.49 auf, bei gleichem  $H_o$  wird bei *Ova Spin* 0.37 ermittelt (Tab. 4-1). Die ermittelten Abflussbeiwerte  $C_d$  am *Ova Spin*-Profil liegen deutlich unter denen des *Standardprofils*. Die tiefen Überfallbeiwerte von *Ova Spin* lassen sich dadurch erklären, dass der Mauerüberfall selbst beim Bemessungshochwasser bei sehr kleinem  $\chi$  betrieben wird, der wasserseitige Quadrant strömungstechnisch ungünstig gestaltet ist und sich die Überfallbreite in Fliessrichtung verjüngt.

Der Abflussbeiwert  $C_d$  an einem Standardprofil ist lediglich von  $\chi$  abhängig und kann nach Hager (1991) nach folgender Gleichung abgeschätzt werden:

$$C_d = \frac{2}{3\sqrt{3}} \left( 1 + \frac{4\chi}{9+5\chi} \right) \quad (7)$$

In Abb. 4-1 sind ebenfalls die nach Gl. (7) berechneten Abflussbeiwerte aufgenommen. Im *Standardprofil* werden im Vergleich zur Berechnung leicht höhere Abflussbeiwerte am Modell im Massstab 1:30 infolge von Massstabeffekten für  $\chi < 0.75$  erfasst (Abschn. 3.7), wohingegen die Krümmung des Wehrüberfalls im Grundriss die Abflusskapazität für grössere  $\chi$  sehr leicht reduziert. Die Abweichungen sind gering. Z.B. ist der am *Standardwehr* für  $\chi = 0.264$  bestimmte  $C_d$ -Wert 3.5% höher als nach Gl. (8).

Tab. 4-1 Abflussbeiwerte  $C_d$  der beiden Überfallwehre bei  $H_o = 2$  m

| Mauerüberfall    | Abflussbeiwert $C_d$ |
|------------------|----------------------|
| Standardüberfall | 0.49                 |
| Ova Spin         | 0.37                 |

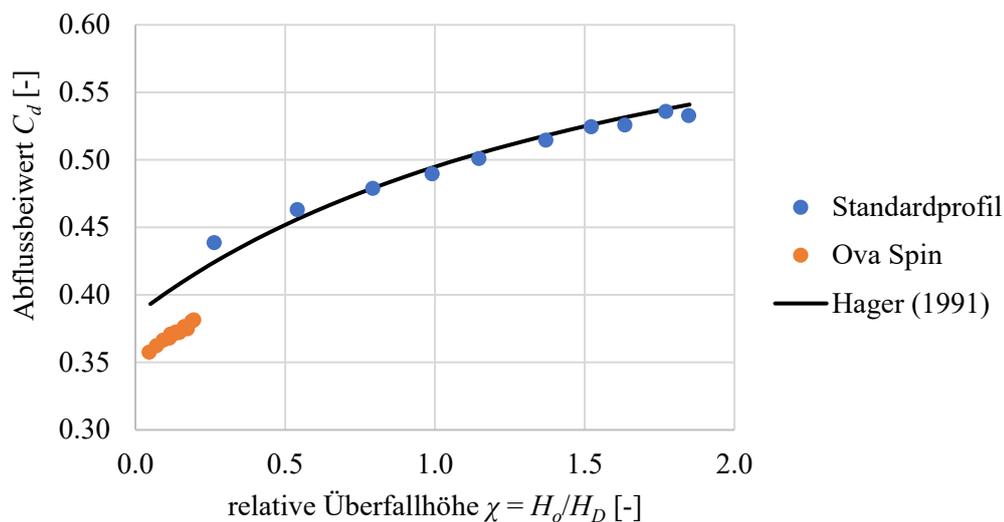


Abb. 4-1 Ermittelte und berechnete Abflussbeiwerte

## 4.2 Oberflächengeschwindigkeit

Die im Abstand  $p_K$  gemessenen Oberflächengeschwindigkeiten  $v_s$  sind in Tab. 4-2 für das *Standard-* respektive in Tab. 4-3 für das *Ova Spin-*Wehr aufgelistet. Im Anhang B1 sind die Verteilungen der Geschwindigkeiten in guter Näherung mit der Überfallhöhe  $H_o$  in Übereinstimmung gebracht. Damit sind aber insbesondere auch die Fliessgeschwindigkeiten  $v_s$  an der Wasseroberfläche annähernd selbstähnlich abgebildet. Diese  $v_s$  sind massgeblich dafür, ob angeschwemmte Stämme unter eine initiale Verklausung an den Pfeilern gezogen werden oder ob sich das Holz horizontal an die Verklausung anlagert und einen losen Schwemmholzteppich bildet (Hartlieb, 2015; Schmocker, 2017). Die Oberflächengeschwindigkeit  $v_s$  ist somit eine wichtige Grösse zur Beschreibung der Schwemmholzsituation an einem Mauerüberfall (Abschn. 3.5.2). Die normierte

Oberflächenfliessgeschwindigkeit  $v_{sn}$  lässt sich also in Funktion von  $X = x/H_o$  ausdrücken. Da die Grösse von  $v_s$  auf Höhe der Pfeilernasen interessiert, wird die normierte Lagekoordinate  $X$  nun ersetzt durch den normierten Abstand der Pfeilernase zum Wehrkronenscheitel  $P_K = p_K/H_o$  und es gilt:

$$v_{sn} = \frac{v_s}{\sqrt{2gH_o}} = f(P_K) \quad (8)$$

Basierend auf den Erkenntnissen von Hager (1991) beträgt an der Wasseroberfläche auf dem Wehrkronenscheitel  $v_{sn} = v_{Kn} = 0.5$  (Anhang B2). Die normierte Oberflächenfliessgeschwindigkeit  $v_{sn}$  lässt sich in Abhängigkeit der Distanz zum Wehrkronenscheitel gegen die Fliessrichtung für  $0 \leq P_K \leq 2$  am *Standardwehr* resp. im Bereich  $0.6 \leq P_K \leq 2$  für *Ova Spin* Verhältnisse (s. Anhang B1) wie folgt beschreiben ( $R^2 = 0.92$ , Abb. B-4):

$$v_{sn} = \frac{v_s}{\sqrt{2gH_o}} = 0.5 \cdot e^{-\frac{2}{3}P_K} \quad (9)$$

Nähere Ausführungen u.a. mit der Darstellung des Geschwindigkeitsprofils auf dem Wehrkronenscheitel sind den Anhängen B2 und B3 zu entnehmen.

Tab. 4-2 Oberflächengeschwindigkeiten  $v_s$  in [m/s] auf Höhe der Pfeilernase am Standardwehr bei verschiedenen Pfeilerauskragungen  $p_{K,Pf}$  und Überfallhöhen  $H_o$

| $H_o$ [m] | $p_{K,Pf}$ [m] |      |      |      |      |
|-----------|----------------|------|------|------|------|
|           | 1.61           | 1.26 | 1.01 | 0.56 | 0.00 |
| 1.00      | 0.80           | 1.00 | 1.10 | 1.60 | 2.50 |
| 2.00      | 1.80           | 2.10 | 2.20 | 2.50 | 3.60 |
| 3.00      | 2.60           | 2.80 | 2.90 | 3.40 | 4.00 |

Tab. 4-3 Oberflächengeschwindigkeiten  $v_s$  in [m/s] auf Höhe der Pfeilernase am Wehr Ova Spin bei verschiedenen Pfeilerauskragungen  $p_{K,Pf}$  und Überfallhöhen  $H_o$

| $H_o$ [m] | $p_{K,Pf}$ [m] |      |      |      |
|-----------|----------------|------|------|------|
|           | 3.27           | 2.72 | 2.13 | 0.00 |
| 1.00      | 0.50           | 0.60 | 0.90 | 1.90 |
| 2.00      | 1.20           | 1.40 | 1.80 | 2.90 |
| 3.00      | 1.80           | 2.00 | 2.50 | 3.50 |

## 5 Verklausungswahrscheinlichkeit und Durchleitung

Es werden Verklausungswahrscheinlichkeiten von Einzelhölzern an den Wehrpfeilern (Abschn. 5.1) und die Durchleitung grosser Holzgruppen durch die Wehröffnungen (Abschn. 5.2) untersucht. Die verwendeten Holzstämme gehören der Klasse Grossholz an (Abschn. 2.3).

### 5.1 Verklausungswahrscheinlichkeit von Einzelhölzern an den Wehrpfeilern

Das Hauptziel dieses Teils der Untersuchung ist die Analyse der Verklausungswahrscheinlichkeit  $P$  von Einzelhölzern an den Wehrpfeilern in Abhängigkeit von den Anströmungsbedingungen und der relativen Wehrfeldbreite  $B/L$ .

#### 5.1.1 Versuchsaufbau und Methode

Sämtliche Versuche zur Verklausungswahrscheinlichkeit wurden am *Standardwehr* mit den Pfeilernasen auf Höhe der Mauerfront am mittleren Wehrfeld durchgeführt (Abb. 3-5).

Jedes Schwemmholz wurde einzeln manuell im Abstand einer Stammlänge  $L$  oberstrom der Pfeilernase zugegeben und es wurde notiert, ob das Holz an den Pfeilern verkleuste oder nicht. Bei Verklausung wurde es vor Zugabe des nächsten Holzes entfernt. Die Ausrichtungen und die Positionierungen des Einzelholzes am Zugabeort waren (s. Abb. 5-2)

quer zur Fliessrichtung

- mittig vor dem Wehrfeld
- halbmittig vor dem Wehrfeld
- mittig vor dem Pfeiler

und längs zur Fliessrichtung

- mittig vor dem Pfeiler

Als Verklausungswahrscheinlichkeit  $P$  wird der Anteil der an den Wehrpfeilern verkleusten Einzelhölzer in Bezug zur Gesamtanzahl zugegebener Hölzer gewertet. In einem Testlauf für eine Konfiguration konvergiert  $P$  mit zunehmenden Wiederholungen gegen den Erwartungswert, wobei nach ca. 20 Wiederholungen der Erwartungswert nur noch leicht schwankt (Abb. 5-1). Furlan et al. (2019) empfiehlt für Einzelholzversuche mindestens 30 Wiederholungen, um den Fehler in der Schätzung von  $P$  unter 0.09 zu halten. In der experimentellen Untersuchung der VAW wurden jeweils 30 Versuche durchgeführt um die statistische Signifikanz der ermittelten Verklausungswahrscheinlichkeit sicherzustellen.

Das Versuchsprogramm sah für die vier Zugabepositionierungen des Einzelholzes vor dem Wehrfeld folgende Parametereinstellungen zur Ermittlung der Verklausungswahrscheinlichkeit  $P$  vor:

- relative Holzlängen  $L/B = 1, 1.25$  und  $2$  (Tab. 3-2, Abschn. 3.4.3)
- relative Überfallhöhen  $\chi = 0.5, 1.0$  und  $1.5$

Es resultieren demnach 36 Versuchsreihen.

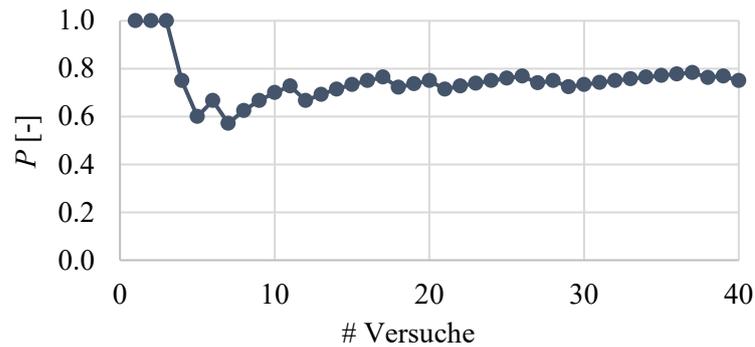


Abb. 5-1 Entwicklung der Verklauungswahrscheinlichkeit  $P$  mit der Anzahl der Versuche für die wehrfeldmittige Zugabe eines Schwemmholzes der Länge  $L = 1.25 \cdot B$  bei einer relativen Überfallhöhe  $\chi = 1.0$  ( $v_s = 2.5$  m/s für  $p_{K,Pf} = 0.56$  m, Tab. 4-2)

### 5.1.2 Ergebnisse

Der Abb. 5-2 sind die Erwartungswerte der Verklauungswahrscheinlichkeit  $P$  zu entnehmen.

Es zeigt sich, dass ein Einzelholz mit der Länge  $L = B$  unabhängig von der Ausrichtung, der Zugabeposition und der Fließgeschwindigkeit  $v_s$  auf Höhe der Pfeilernasen (Tab. 4-2) grundsätzlich nicht an den Wehrpfeilern verklaut.

Beträgt die Länge des Holzes  $L = 1.25 \cdot B$ , so verklaut es bei der Positionierung *quer*, *Wehrfeld mittig* mit einer sehr hohen Wahrscheinlichkeit ( $P \approx 0.8 - 0.9$ ). Bei jeder anderen Positionierung sinkt  $P$  jedoch gegen Null.

Beträgt die Länge des Holzes  $L = 2 \cdot B$ , so weisen sowohl die Positionierung *quer*, *Wehrfeld mittig* und *quer*, *Wehrfeld halbmittig* eine hohe Verklauungswahrscheinlichkeit auf ( $P \approx 0.5 - 0.9$ ). Bei den Positionierungen des Holzes *quer*, *Pfeiler mittig* und *längs*, *Pfeiler mittig* sinkt  $P$  gegen Null.

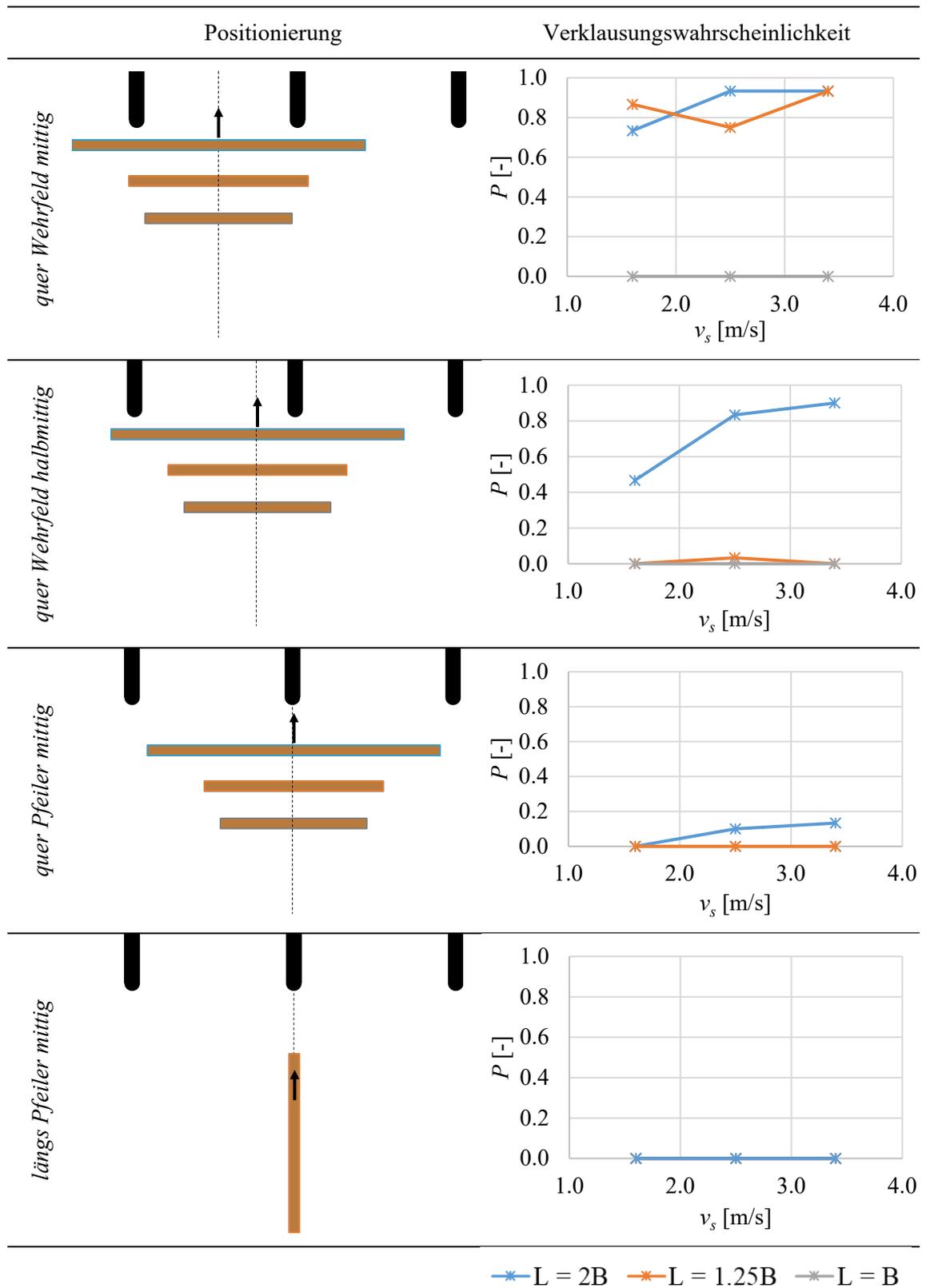


Abb. 5-2 Verklauungswahrscheinlichkeit  $P$  von Einzelhölzern der Stammlängen  $L/B = 1.0, 1.25$  und  $2.0$  für  $\chi = 0.5, 1.0$  und  $1.5$ . Die Oberflächengeschwindigkeit  $v_s$  beträgt dabei auf Höhe der um  $0.56$  m auskragenden Pfeiler  $1.60, 2.50$  und  $3.40$  m/s (Tab. 4-2).

### 5.1.3 Prozesse & Erkenntnisse

Die Ergebnisse der Verklauungsversuche zeigen, dass das Einzelholz vor allem in jenen Fällen verklaut, bei denen eine Verklauung aus rein geometrischen Betrachtungen hinsichtlich der Stammlänge  $L$  zur Wehrfeldbreite  $B$  und der Ausrichtung des angeschwemmten Holzes bezüglich der Wehrfeldachse wahrscheinlich erscheint. Wird das Holz bei der Zugabe z.B. derart positioniert, dass seine Länge über zwei Pfeiler spannt und damit auf zwei Wehrpfeiler auftrifft, so verklaut es mit hoher Wahrscheinlichkeit. Tritt es jedoch nur mit einer Pfeilernase in Interaktion, so geht  $P$  gegen Null. Diese Beobachtung deckt sich mit Schalko (2018). Schalko (2018) ermittelte in Rinnenversuchen u.a. die Verklauungswahrscheinlichkeit  $P$  eines Einzelholzes an einem Brückenpfeiler und weist sie mit  $P \approx 0$  bei Fließgeschwindigkeiten von  $v > 0.80$  m/s aus.

Bei der längsgerichteten Zugabe vor dem Wehrpfeiler wurde jeweils beobachtet, dass sich das anfangs längs ausgerichtete Holz um den Auftreffpunkt an der Pfeilernase zu drehen beginnt (Abb. 5-3). Die einsetzende Drehung erfolgt jedoch nicht um den anfänglichen Drehpunkt auf der Pfeilernase. Sobald das Holz leicht abgedreht ist, wirken entlang des Stammes unterschiedliche Strömungskräfte (sie sind im Bereich der Pfeilernase höher als am oberwasserseitigen Ende des Stammes). Diese unsymmetrische Belastung bewirkt ein Abgleiten des unterwasserseitigen Endes des Stammes von der Pfeilernase und damit die anschliessende Durchleitung durch das offene Wehrfeld (s. dazu auch Hartlieb, 2015).

Die Ergebnisse der Verklauungsversuche mit Einzelhölzern zeigen, dass die Versuchsanordnung einen entscheidenden Einfluss darauf hat, ob das Holz verklaut oder durchgeleitet wird. Eine Verklauung über die Wehrfeldbreite gelingt einzig für jene Fälle, wenn  $L$  grösser als  $B$  und der Aufprall des Stammes auf zwei benachbarte Pfeiler erfolgt, was die exakte rechtwinklige Ausrichtung des Stammes zur Hauptströmungsrichtung bedingt. Bei einer leichten Auslenkung hingegen wird der Stamm vor dem Wehrüberfall in Strömungsrichtung ausgerichtet und durchgeleitet, wie es Hartlieb (2015) und Furlan (2019) beschreiben. Hartlieb (2015) beobachtete selbst für  $L = 2 \cdot B$  praktisch keine Verklauung von Einzelhölzern an den Wehrpfeilern (Abschn. 2.1).

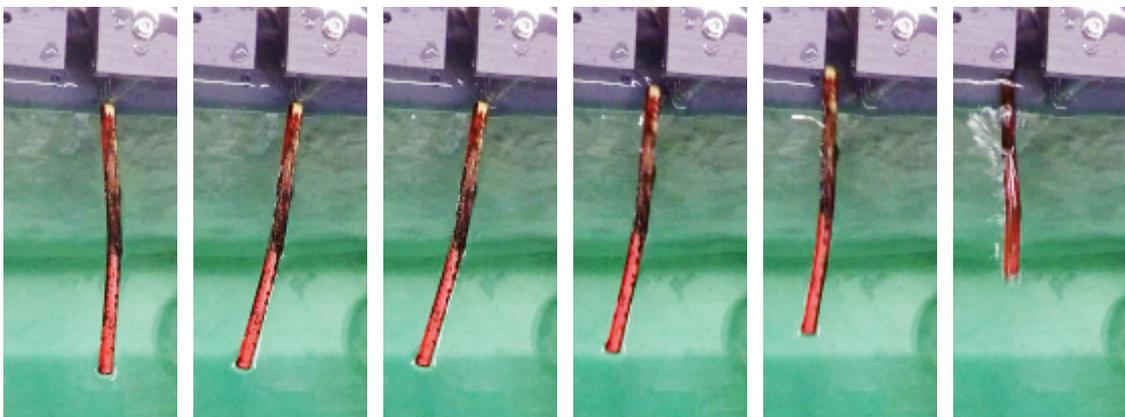


Abb. 5-3 *Aufprall eines längs zur Strömung ausgerichteten Stammes auf die Pfeilernase. Der Stamm erfährt eine leichte Drehung und verliert die Haftung von der Pfeilernase, worauf die Durchleitung erfolgt.*

VAW0902\_00005

## 5.2 Durchleiten grosser Schwemmholzgruppen

Die Durchleitung von Schwemmholzgruppen wurde bereits von Godtland & Tesaker (1994), Hartlieb (2015) und Furlan (2019) untersucht. Während Hartlieb (2015) Gruppen aus 5 Hölzern betrachtete, setzten Godtland & Tesaker (1994) Schwemmholzgruppen aus 30 Stück und Furlan (2019) Gruppen bis 32 Stück zusammen. Bei Letzteren war jedoch das Verhältnis von  $H_o/D$  bewusst klein, sodass die Verklausung auf dem Wehrkörper selbst und nicht an den Wehrpfeilern auftrat (Abschn. 2.1).

Im folgenden wird die Untersuchung zur Durchleitung einer grossen Schwemmholzgruppe (Schwemmholzteppich) an einem Mauerüberfall in Abhängigkeit des Durchflusses und der relativen Wehrfeldbreite  $B/L$  präsentiert, resp. systematisch der bei der Durchleitung an den Wehrpfeilern zurückgehaltene Anteil dieser Gruppe bestimmt (Rückhalteverhältnis  $RV$ ). Dabei weisen die untersuchten Schwemmholzgruppen unterschiedliche Verteilungen der Stammlängen  $L$  auf.

### 5.2.1 Versuchsaufbau und Methode

Die Versuche zur Durchleitung grosser Schwemmholzgruppen wurden am *Standardwehr* durchgeführt (Abb. 3-5). Die Pfeilerauskragung  $p_{K,Pf}$  betrug 0.56 m.

Die Schwemmholzgruppen bestehend aus 120 Holzstämmen (Abschn. 3.4.3) wurden als zusammenhängender, durchschnittlich 2-lagiger, homogen verteilter Schwemmholzteppich in den Stauraum des Modells gegeben. Der Schwemmholzteppich wurde vor Versuchsbeginn hinter einer Schwimmsperre aufgebaut, die dann zu Versuchsbeginn aus dem Wasser gehoben wurde (Abb. 5-4). Die durchgeleiteten Stämme wurden vermessen und ausgezählt, sodass auf die Anzahl und die Länge der verklausen Stämme geschlossen werden konnte. Das Rückhalteverhältnis  $RV$  ist demnach das Verhältnis des zurückgehaltenen Schwemmholzvolumens  $V_{VS}$  zum zugegebenen Schwemmholzfestvolumen  $V_S$  des Schwemmholzteppichs (Abschn. 3.4.3).

Das Versuchsprogramm beinhaltete folgende Eingangsparameter zur experimentellen Bestimmung des Rückhalteverhältnisses  $RV$ :

- Schwemmholzgruppe (a) uniform, (b) schmal und (c) breit verteilt (Abb. 3-8, Abb. 3-9, Tab. 3-3)
- relative Stammlängen  $L_{50}/B = 1.25, 0.98$  und  $0.73$  (Tab. 3-3, Tab. 3-4)
- relative Überfallhöhen  $\chi = 0.5, 1.0$  und  $1.5$

Es resultieren 27 Versuchsreihen, wobei in jeder Reihe drei Versuche durchgeführt wurden. Gemäss Furlan (2019) führt eine grössere Gruppengrösse zu einer verminderten Anzahl von benötigten Repetitionen. Furlan (2019) empfiehlt 10 Versuche pro Experiment als statistisch vertretbare Anzahl bei Gruppengrössen von 8 bis 32 Stück, um den Fehler in der Abschätzung des Rückhalteverhältnisses bei 0.1 einzugrenzen. Da es sich im Rahmen der vorliegenden Arbeit um Versuche mit Vorversuchscharakter handelt und die Gruppengrösse mit 120 Stück deutlich grösser als 32 ist, wurde die Anzahl der Versuche pro Experiment auf drei gesetzt.



Abb. 5-4 Zugabe eines Schwemmholzteppichs am Beispiel eines Versuchs mit relativer Stammlänge  $L_{50}/B = 0.98$ , Schwemmholzgruppe (b), schmal verteilt und relative Überfallhöhe  $\chi = 0.5$ . Am oberen Bildrand liegt die verwendete Schwimmsperre auf dem Querbalken.  
VAW0902\_00081

### 5.2.2 Ergebnisse

In den Abb. 5-5, Abb. 5-6 und Abb. 5-7 ist das Rückhalteverhältnis  $RV$  für die drei verschiedenen, relativen Stammlängen  $L_{50}/B$  in Abhängigkeit sowohl der verwendeten Schwemmholzlängenverteilung als auch der relativen Überfallhöhe  $\chi$  dargestellt. Der Fehlerbalken stellt die durchschnittliche absolute Abweichung der drei Versuche pro Experiment von ihrem Mittelwert dar und ist ein Mass für die Streuung der Versuchsergebnisse.

Abb. 5-5 zeigt die Resultate für die kleinste untersuchte Stammlänge  $L_{50} = 1.25 \cdot B$ . Es wurde bei jeder Versuchsanordnung eine Verklausung beobachtet, wobei das Rückhalteverhältnis  $RV$  zwischen 0.24 und 0.84 liegt. Die mittlere Abweichung pro Experiment beträgt dabei zwischen 0.03 und 0.23.

Grundsätzlich ist eine Erhöhung des Rückhalteverhältnisses  $RV$  erkennbar, wenn die uniforme Verteilung (a) durch eine heterogene Mischung (b) oder (c) ersetzt wird. Eine Erhöhung des Abflusses (Erhöhung von  $\chi$ ) und somit eine Erhöhung der Geschwindigkeit auf Höhe der Pfeilernase (Tab. 4-2) führt zu einer Reduktion von  $RV$ . Demzufolge weist der Versuch mit einer uniformen Längenverteilung (a) bei der grössten relativen Überfallhöhe  $\chi = 1.5$  mit 0.24 den kleinsten Anteil an zurückgehaltenem resp. den höchsten Anteil von durchgeleitetem Schwemmholz auf.

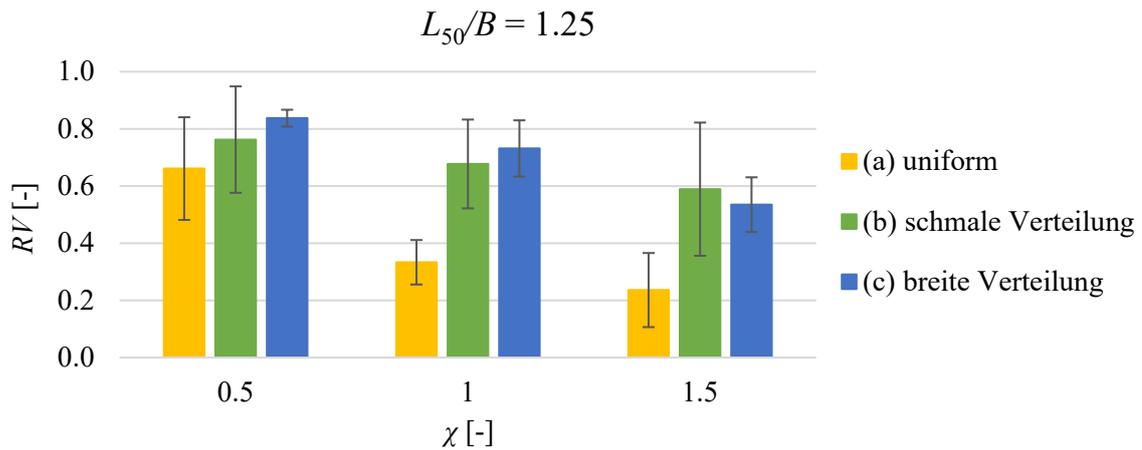


Abb. 5-5 Rückhalteverhältnis  $RV$  in Abhängigkeit von  $\chi$  und der Längenverteilung (a), (b) und (c) der Stämme des Schwemmholzteppichs für  $L_{50}/B = 1.25$ . Der Fehlerbalken stellt die durchschnittliche absolute Abweichung pro Experiment von ihrem Mittelwert dar.

Abb. 5-6 zeigt vergleichbare Resultate für die mittlere relative Stammlänge  $L_{50}/B = 0.98$ . Der Anteil verklauster Hölzer für  $\chi = 1$  und  $1.5$  ist im Vergleich zu  $L_{50}/B = 1.25$  deutlich gesunken. Sämtliches Schwemmholz der Versuchsserie mit uniformer Verteilung (a) wird bei  $\chi = 1.5$  durchgeleitet.

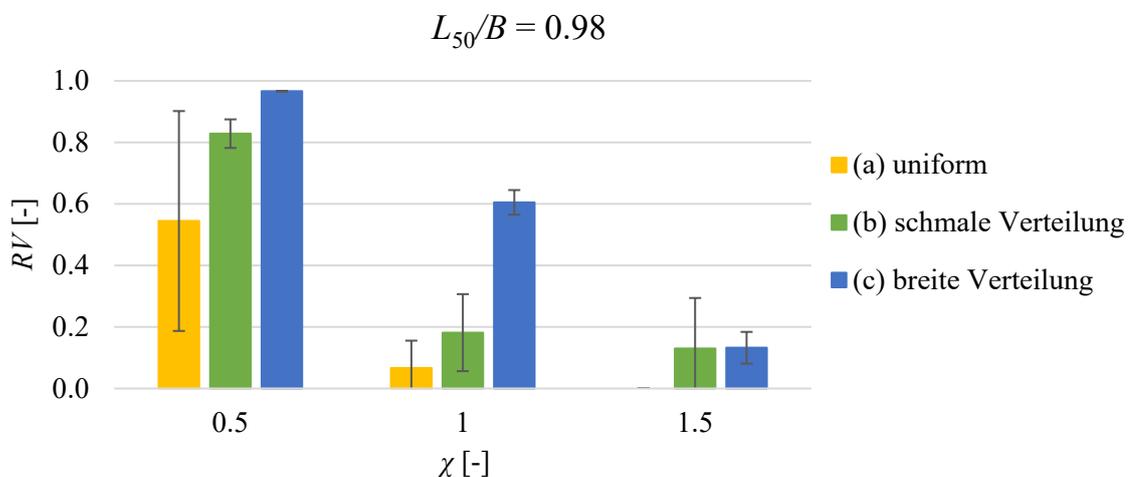


Abb. 5-6 Rückhalteverhältnis  $RV$  in Abhängigkeit von  $\chi$  und der Längenverteilung (a), (b) und (c) der Stämme des Schwemmholzteppichs für  $L_{50}/B = 0.98$ . Der Fehlerbalken stellt die durchschnittliche absolute Abweichung pro Experiment von ihrem Mittelwert dar.

In der Abb. 5-7 sind die Versuchsergebnisse für  $L_{50}/B = 0.73$  dargestellt. Bei dieser relativen Stammlänge wird das in Form eines Schwemmholzteppichs an den Mauerüberfall herangeschwemmte Grossholz für einige Konfigurationen durchgeleitet. Ein signifikanter Anteil des Schwemmholzes verklauste einzig noch bei  $\chi = 0.5$  und bei  $\chi = 1$  mit der breiten Schwemmholzstammlängenverteilung (c). Für  $\chi = 0.5$  beträgt  $H_o = 1$  m am *Standardwehr*. Es wird beobachtet, dass Schwemmholz nicht nur an den Wehrpfeilern, sondern auch auf der Wehrkrone verklaust (Abb. 5-8). Bei maximalen

Schwemmholzdurchmessern  $D_{max}$  für die drei Verteilungen (a), (b) und (c) von 0.45 m, 0.54 m und 0.55 m ergeben sich  $D_{max}/H_o$ -Werte von 0.45 bis 0.55. Die Resultate mit einer Teilverklauung auf der Wehrkrone decken sich also mit den Erkenntnissen von Bénét et al. (2021) und Pfister et al. (2013) (Abschn. 2.2). Da in der vorliegenden Untersuchung der Fokus auf der Verklauung der Hölzer an den Wehrpfeilern steht, werden die Resultate mit  $\chi = 0.5$  in der weiteren Analyse nicht berücksichtigt.

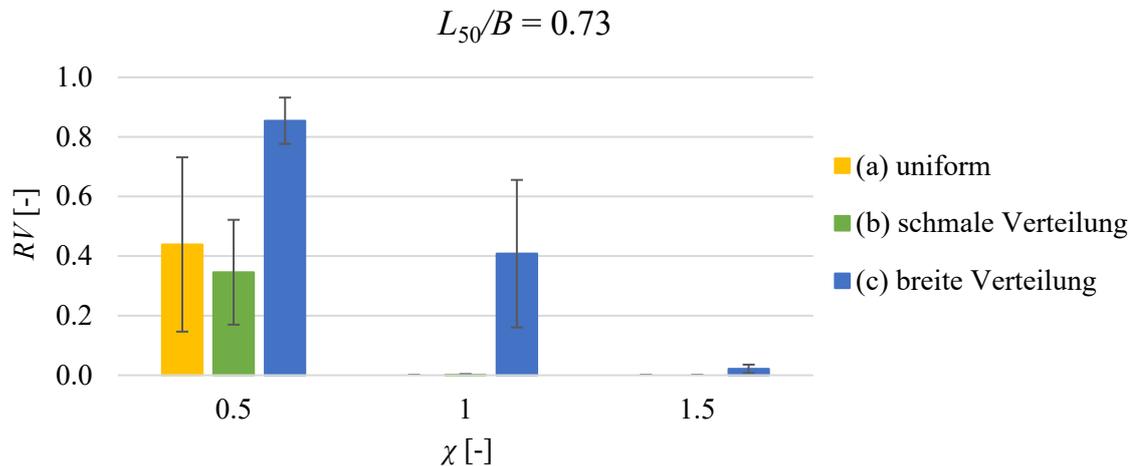


Abb. 5-7 Rückhalteverhältnis  $RV$  in Abhängigkeit von  $\chi$  und der Längenverteilung (a), (b) und (c) der Stämme des Schwemmholzteppichs für  $L_{50}/B = 0.73$ . Der Fehlerbalken stellt die durchschnittliche absolute Abweichung pro Experiment von ihrem Mittelwert dar.



Abb. 5-8 Verklauungen auf der Wehrkrone für den Versuch mit relativer Stammlänge  $L_{50}/B = 0.73$ , Schwemmholzgruppe (c), breit verteilt und relative Überfallhöhe  $\chi = 0.5$ . Schwemmholz liegt auf der Wehrkrone auf. VAW0902\_00084

Abb. 5-9 verdeutlicht den Einfluss eines einzelnen verklausten Holzes auf die Ergebnisse. In diesem Versuch mit der kleinsten relativen Stammlänge  $L_{50}/B = 0.73$ , der breit verteilten Schwemmholzgruppe (c) und einer Überfallhöhe  $H_o = 2$  m verklauste ein einzelner langer Stamm der Länge  $L_{max} = 15.1$  m (Tab. 3-3) quer an den Wehrpfeilern des mittleren Wehrfeldes. Dieser Stamm, für den die relative Länge  $L_{max}/B = 1.45$  beträgt, bildete daraufhin ein Hindernis für alle nachkommenden Stämme (Schlüsselement), die im Stauraum als loser Teppich zurückgehalten wurden. Im Gegensatz dazu sind die beiden äusseren Wehrfelder frei von Schwemmholz. Ein einzelner langer Stamm hat so zu einem Rückhalt von 0.64 des beigegebenen Schwemmholzes geführt.



Abb. 5-9 Endverklauung des Versuchs mit relativer Stammlänge  $L_{50}/B = 0.73$ , Schwemmholzgruppe (c), breit verteilt und relative Überfallhöhe  $\chi = 1.0$ . VAW0902\_00082

Das Rückhalteverhältnis  $RV$  wird in Abb. 5-10 a) – d) in Abhängigkeit der relativen relevanten Stammlänge  $L/B$  für  $\chi = 1$  und 1.5 aufgetragen. Als relevante Stammlänge gilt in diesen Darstellungen a) die Medianlänge  $L_{50}$ , b) die mittlere Länge  $L_m$ , c) das 90%-Perzentil  $L_{90}$  sowie d) die maximale Länge  $L_{max}$  (Tab. 3-3). In diese Punktwolken ist eine lineare Regression gelegt und deren Bestimmtheitsmass  $R^2$  ermittelt und angegeben worden. Während  $R^2$  für  $L_{50}$ ,  $L_m$  und  $L_{max}$  lediglich zwischen 0.49 und 0.58 beträgt, steigt es für  $L_{90}$  auf 0.73 an. Offenbar zeigt das 90% Perzentil in dieser einfachen Betrachtung die höchste Signifikanz und scheint die relevante Stammlänge für die Abschätzung des Rückhalteverhältnisses  $RV$  zu sein.

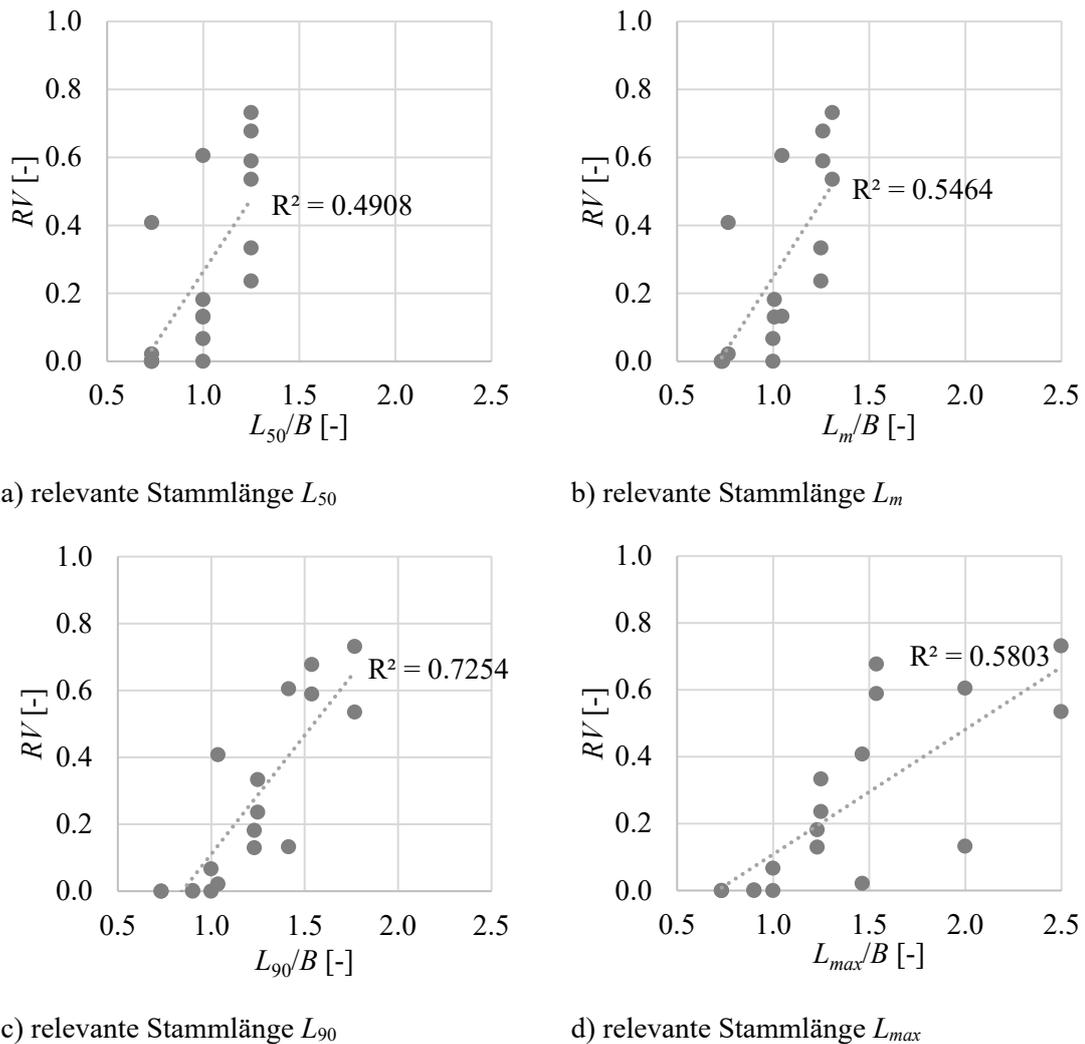


Abb. 5-10 Lineare Regression zwischen dem Rückhalteverhältnis  $RV$  und der relativen Stammlänge  $L/B$  mit Bestimmtheitsmass  $R^2$ , wobei relevante Stammlänge  $L =$  a) Medianlänge  $L_{50}$ , b) mittlere Länge  $L_m$ , c) 90%-Perzentil  $L_{90}$  und d) maximale Länge  $L_{max}$ . Es wurden die Datenpunkte für  $\chi = 1$  und  $1.5$  berücksichtigt.

### 5.2.3 Erkenntnisse und Anwendbarkeit

Grundsätzlich zeigen sich in den Resultaten zur Untersuchung des Schwemmholzrückhaltes an den Wehrpfeilern eines Mauerüberfalls bei Eintreffen eines grossen Schwemmholzteppichs folgende Tendenzen:

- Je kleiner die relative Stammlänge  $L/B$  bzw. je grösser die relative Wehrfeldbreite  $B/L$ , desto kleiner der Anteil verklauster Hölzer
- Je grösser die relative Überfallhöhe  $\chi$  und somit die Geschwindigkeit auf Höhe der Pfeilernasen, desto kleiner der Anteil verklauster Hölzer
- Je breiter die Längenverteilung der verwendeten Holzgruppe, desto grösser der Anteil verklauster Hölzer

- Die Medianlänge  $L_{50}$  ist nicht zwingend die relevante Stammlänge zur Abschätzung des Rückhaltevolumens  $RV$ , sondern vielmehr  $L_{90}$  als charakteristisches Mass für die grossen, verklausungsanfälligeren Stämme.

Der vergleichsweise hohe verklauste Anteil bei der relativen Überfallhöhe  $\chi = 0.5$  ist auf die relativ geringe Überfallhöhe  $H_o$  resp. den hohen Wert des relativen Stammdurchmessers  $D/H_o$  zurückzuführen, was die Verklausung des Schwemmholzes bei diesem Parametersatz auf der Wehrkrone auslöste (Abschn. 5.2.2). Es sollte daher bei der Betrachtung der Schwemmholzdurchleitung eine Fallunterscheidung der Verklausung auf der Wehrkrone z.B. nach Bénét et al. (2021) oder an den Wehrfeilern getroffen werden.

Aus den Resultaten mit  $\chi = 1.0$  und  $1.5$  zeigt sich, dass das Kriterium nach Godtland & Tesaker (1994), wonach eine relative Wehröffnung von  $B/L = 0.8$  für die Durchleitung von Einzelstämmen nötig ist, in den vorliegenden Versuchen bei Anfall eines aus starren Hölzern aufgebauten Schwemmholzteppichs nicht genügt. Godtland & Tesaker (1994) empfehlen denn auch für Schwemmholzgruppen von 30 Stück eine minimale relative Wehröffnung von  $B/L_{max} = 1.1$  zur Verhinderung eines Rückhalteverhältnis von  $RV > 0.1 \dots 0.2$  (Abschn. 2.1). Ein ähnliches Resultat wurde am vorliegenden Modell mit  $RV \approx 0$  für  $B/L_{90}$  resp.  $B/L_{max} = 1.1$  erzielt (s. Abb. 5-10c) für  $L_{90}/B = 0.9$  resp. Abb. 5-10d) für  $L_{max}/B = 0.9$ ).

Schwemmholzprozesse sind stark zufallsbehaftet, weshalb grundsätzlich bei Versuchen zur zuverlässigen Bestimmung des Rückhalteverhältnisses  $RV$  viele Wiederholungen für einen statistisch signifikanten Erwartungswert empfohlen werden. Die in dieser Untersuchung durchgeführte Anzahl von lediglich drei Versuchen pro Experiment genügt – trotz der hohen Stückzahl von 120 Stämmen pro Versuch – dieser Empfehlung kaum. Die Resultate der vorliegenden Studie zum prozentualen Rückhalt von Schwemmholz an Wehrfeilern weisen demnach qualitativen Charakter auf.

Der Vergleich der verschiedenen relevanten Stammlängen hat gezeigt, dass weder die mittlere Länge  $L_m$ , noch die Medianlänge  $L_{50}$  als relevante Stammlänge für die Beurteilung des Rückhalteverhältnisses  $RV$  eines Schwemmholzteppichs mit heterogener Verteilung seines Stammholzes verwendet werden sollten. Als relevant scheint hingegen eine Stammlänge mit Perzentil in der Grössenordnung 90% zu sein. Für eine statistisch signifikante Aussage zur relevanten Stammlänge sind weitergehende Versuche einerseits mit stetiger (und nicht wie vorliegend abgestufter) Verteilung sowie, wie oben erwähnt, mit einer höheren Anzahl an Wiederholungen notwendig.

In diesen Versuchen wurde das Schwemmholz mit skaliertem, entastetem, steifem Schnittholz modelliert. Dabei werden Prozesse, die in Natur auftreten, im Modell nicht erfasst. Dazu gehören verklausungslösende Prozesse wie das Brechen von bereits verklausten Stämmen oder die Durchleitung von langen Stämmen infolge ihrer Biegsamkeit, besonders der Baumwipfel unzerkleinerter Stämme (Hartlieb, 2015). Hingegen sind vor allem aber auch verklausungsbildende Prozesse zu berücksichtigen. Erwähnenswert hierbei sind z.B. die Verastung der Bäume, aber auch der Einfluss des Wurzelwerks. Eher weniger signifikant auf die Verklausungswahrscheinlichkeit  $P$

wirkt sich gemäss Hartlieb (2015) die Holzdicke aus. All diese Einflüsse wurden in der vorliegenden Untersuchung nicht berücksichtigt, was die Aussagekraft der vorliegenden Studie einschränkt. Anforderungen an weitergehende Untersuchungen zur Bestimmung des Rückhalteverhältnisses  $RV$  von Schwemmholzteppichen an Wehrpfeilern sind demnach:

- Modellähnliche Nachbildung des Schwemmholzes hinsichtlich Verästelung, Wurzelwerk und Biogsamkeit
- Abbildung einer charakteristischen, stetigen Stammlängenverteilung
- Aufbau des Schwemmholzteppichs hinsichtlich Ausdehnung, Kompaktheit, Verzahnung und Eintauchtiefe

Neben den Wehrpfeilern können auch andere Bauteile einer Hochwasserentlastung zu einer Schwemmholzverklausung führen. Insbesondere Verklausungen an der Wehrkrone oder einer Brückenunterkante wurden in der vorliegenden Studie ausser Acht gelassen. Um die Verklausungswahrscheinlichkeit am Mauerüberfall ganzheitlich zu beurteilen, müssen konsequenterweise alle zur Verklausung führenden Prozesse betrachtet werden.

## 6 Wasserspiegelaufstau infolge Schwemmholzverklausung

Bleibt ein Baumstamm als Schlüsselement an einem Wehrpfeiler eines Mauerüberfalls einer Talsperre hängen, kommt es meist rasch zu einer Verklausung, da sich nachfolgende Stämme und Äste verkeilen und den Verklausungskörper vergrössern.

Am Modell der Talsperre *Ova Spin* wurde der Verklausungsprozess und der dadurch bewirkte Wasserspiegelaufstau  $\Delta H$  detailliert für einen umfangreichen Parametersatz untersucht (Tab. 6-1). Die gemessenen Ergebnisparameter sind in Abschn. 3.5 definiert und in Anhang C angegeben.

In den Experimenten der VAW wurden die Sensitivität unterschiedlicher Zugabemethoden des Schwemmholzes auf den resultierenden Verklausungskörper an den Wehrpfeilern (Abschn. 6.3.1), das charakteristische Schwemmholzvolumen  $V_c$  (Abschn. 6.3.2), die Eintauchtiefe  $t_H$  des Verklausungskörpers (Abschn. 6.3.3) und die für den Abfluss zur Verfügung stehende freie Durchflussfläche zwischen dem Verklausungskörper und dem Überfallprofil erfasst, um mit diesen Daten eine Gleichung zur Ermittlung des Wasserspiegelaufstaus  $\Delta H$  herzuleiten (Abschn. 6.3.4).

Am oder im Verklausungskörper abgelagertes Feinmaterial verringert dessen Porosität. Stellvertretend dafür wurde der Einfluss verschiedener Lochbleche mit unterschiedlicher Porosität untersucht. Die Ergebnisse sind dem Abschnitt 6.3.6 zu entnehmen.

Die hergeleiteten Gleichungen zur Ermittlung des Wasserspiegelaufstaus werden in Abschn. 6.4 mit Mess- und Literaturdaten validiert. Die aus der Studie gewonnenen Erkenntnisse zur Schwemmholzverklausung an Wehrpfeilern eines Mauerüberfalls werden in Abschn. 6.5 mit der Angabe der grundlegenden Kenngrössen diskutiert.

### 6.1 Versuchsaufbau, Methoden und Versuchsprogramm

Die Versuche zum Wasserspiegelaufstau wurden am Modell der Talsperre *Ova Spin* durchgeführt (Abschn. 3.1). In einer ersten Versuchsserie war das Überfallwehr der Anlage *Ova Spin* eingebaut, wonach es in einer zweiten Serie durch ein *Standardwehr* nach USACE ersetzt wurde. Die beiden Überfallwehre und dessen Kenngrössen sind im Abschn. 3.2 dargestellt.

Die Anzahl Wehrpfeiler resp. die Anzahl der Wehröffnungen wurden in beiden Modellen zur Untersuchung des Wasserspiegelaufstaus nicht variiert. Es galten die Anordnungen der Wehrpfeiler, wie sie den Abb. 2-3b) und Abb. 3-5 zu entnehmen sind.

#### 6.1.1 Versuche mit Stammholz

Die Relativlänge der Versuchshölzer betrug  $L/B = 1.4$  (Überfallwehr *Ova Spin*) bzw. 1.3 (*Standardwehr*). Die Hölzer wurden länger als die Wehrfeldbreiten  $B$  gewählt, damit die Stammhölzer bei der systematischen Zugabe, wie sie in Abschn. 6.3.1 beschrieben ist, zwischen zwei Wehrpfeilern verklausen. Die Eigenschaften des eingesetzten Schwemmholzes der Klassen A, B und C sind in der Tab. 3-5 gelistet.

Zuerst wurden am Wehrüberfall *Ova Spin* drei verschiedene Zugabemethoden mit der Schwemmholzklasse A untersucht und analysiert. Es sind dies:

- 5er-Gruppen

Die fünf Hölzer der Gruppe waren kreuzweise und zufällig ausgerichtet in zwei Lagen übereinandergelegt. Die Gruppen wurden ohne gegenseitige Interaktionen mit den nachfolgenden Gruppen gleichmässig verteilt über die Breite des Ausgleichsbeckens *Ova Spin* zugegeben (Abb. 6-1a1). Das Experiment mit 5-er Gruppen wurde zweimal wiederholt (Versuche i, ii und iii).

- Schwemmholzteppiche

Es wurden vier Schwemmholzteppiche zeitlich gestaffelt dem Stauraum zugegeben. Die Stammhölzer eines Teppichs waren zufällig ausgerichtet und ein- bis zweilagig dicht zueinander dem Versuch beigegeben, wobei die Hölzer in Abweichung zu Béné et al. (2021) nicht im stehenden Wasser vor Versuchsbeginn homogen vor dem Überfallbauwerk verteilt wurden (Abschn. 2.2), sondern die Zugabe bei Betrieb des Mauerüberfalls geschah (Abb. 6-1b1).

- Systematische Einzelzugabe

Die Stammhölzer wurden bei der systematischen Einzelholzzugabe einzeln mittig vor die Wehrfelder und quer zur Strömungsrichtung ausgerichtet (Abb. 6-1c1).

Die detaillierte Auswertung der Zugabemethode auf den Verklausungsprozess und den resultierenden Wasserspiegelaufstau  $\Delta H$  findet sich im Abschnitt 6.3.1. Zusammenfassend zeigt sich, dass die systematische Zugabe einzelner Stammhölzer den grössten Aufstau erwirkt. Um die Reproduzierbarkeit trotz begrenzter Versuchsanzahl möglichst hoch zu halten und um den potentiell maximalen Aufstau an einem Mauerüberfall einer Talsperre auszuweisen, wurde das Schwemmholz in den Versuchsserien zur Ermittlung des Aufstaus stets systematisch, d.h. zentriert vor jedem Wehrfeld und quer zur Strömungsrichtung in einem Abstand von 3 m zur Verklausung ausgerichtet (Abb. 6-1c1). Die Versuche wurden nicht wiederholt.

Nach jeder Zugabe von je einem Schwemmholz pro Wehrfeld wurde der sich ausbildende Aufstau  $\Delta H = f(V_{vS})$  messtechnisch erfasst. Die Masse des zugegebenen Holzes wurde vor der Zugabe gewogen. Dieses Zugabeprozedere wurde so lange wiederholt, bis sich bei weiterer Zugabe von Schwemmholz kein zusätzlicher Aufstau mehr ausbildete und der maximale Aufstau  $\Delta H_{max}$  somit erreicht war. Zum Ende jeden Versuches wurde mit einer Unterwasserkamera die Verklausung unter Wasser gefilmt. Anhand einer angebrachten Skala an den Brückenpfeilern wurde aus diesen Aufnahmen die Eintauchtiefe  $t_H$  der Verklausung abgeschätzt und grafisch der lichte Abstand  $a$  zwischen der Unterkante des Verklausungskörpers und dem wasserseitigen Quadranten des Überfallprofils ermittelt. Die gemessenen Ergebnisparameter sind detailliert in Abschn. 3.5 erläutert.

Die wesentlichen Eingangsparameter waren die Pfeilerauskrugung  $p_K$ , die initiale Überfallhöhe  $H_o$  (Abschn. 3.3) und der Schwemmholzdurchmesser  $D$ , repräsentiert in den Schwemmholzklassen A, B und C (Abschn. 3.4.3). Diese Eingangsparameter des Versuchsprogramms, aufgeschlüsselt nach den beiden Versuchsserien am *Standardwehr* und am Überfallwehr *Ova Spin*, sind der Tab. 6-1 zu entnehmen. Es wurden fünf respektive vier verschiedene Pfeilerauskrugungen  $p_K$  mit jeweils drei verschiedenen Überfallhöhen am *Standardwehr* respektive am Überfallwehr *Ova Spin* untersucht.

Tab. 6-1 Versuchsprogramm mit Auskrugung  $p_K$ , Überfallhöhe  $H_o$  und relative Überfallhöhe  $\chi$  der durchgeführten Versuche am *Standardwehr* und am Wehr *Ova Spin*

| Wehr                | Schwemmholzklasse | $p_K$<br>[m] | $H_o$<br>[m] | $\chi$<br>[-]    |
|---------------------|-------------------|--------------|--------------|------------------|
| <i>Standardwehr</i> | A                 | -0.04        | 1, 2, 3      | 0.5, 1, 1.5      |
|                     |                   | 0.53         | 1, 2, 3      | 0.5, 1, 1.5      |
|                     |                   | 0.97         | 1, 2, 3      | 0.5, 1, 1.5      |
|                     |                   | 1.22         | 1, 2, 3      | 0.5, 1, 1.5      |
|                     |                   | 1.57         | 1, 2, 3      | 0.5, 1, 1.5      |
|                     | B                 | 0.53         | 1, 2, 3      | 0.5, 1, 1.5      |
|                     | C                 | 0.53         | 1, 2, 3      | 0.5, 1, 1.5      |
| <i>Ova Spin</i>     | A                 | -0.04        | 1, 2         | 0.06, 0.11       |
|                     |                   | 2.08         | 1, 2         | 0.06, 0.11       |
|                     |                   | 2.67         | 1, 2, 3      | 0.06, 0.11, 0.17 |
|                     |                   | 3.22         | 1, 2, 1.5, 3 | 0.06, 0.12, 0.17 |

### 6.1.2 Versuche zur Porosität des Verklausungskörpers

Lochbleche und eine Tauchwand wurden eingesetzt, um den Einfluss der Porosität  $n$  und des Feinmaterialanteils  $m$  eines natürlichen Verklausungskörpers zu untersuchen. Die Überlegungen dazu sind dem Abschn. 3.4.2 zu entnehmen.

Das Lochblech resp. die Tauchwand wurde leicht gekrümmt bündig an die Mauerfront und die Pfeilernasen angelegt (Abb. 3-7). Damit entsprach der Eingangsparameter der Pfeilerauskrugung  $p_K$  dem Mass  $p_{K,Pf} = p_{K,WA}$  (Abschn. 3.3.2). Durch unterschiedliche Eintauchtiefen  $t_L$  des Lochblechs resp. der Tauchwand sowie unterschiedliche Überfallhöhen  $H_o$  wurde zudem der normierte lichte Abstand  $a/H_o$  variiert und der jeweilige sich ausbildende Wasserspiegelaufstau  $\Delta H$  messtechnisch erfasst. Es wurde darauf geachtet, dass der Parameter  $t_L$  einmal dem gemessenen Wert der Eintauchtiefe  $t_H$  des Verklausungskörpers der Versuche mit Stammholz bei (nahezu) gleichen Parameterkombination von  $p_k$  und  $H_o$  entsprach (Tab. 6-2). Damit lag die Unterkante des Lochblechs oder der Tauchwand in diesen Versuchen auf Höhe der beobachteten Unterkante des Verklausungskörpers, was Annahmen zur Porosität  $n$  des natürlichen Verklausungskörpers der Stammholzversuche durch Analogiebetrachtungen zuließ (Abschn. 6.3.6).

Der Parametersatz des Versuchsprogramms mit Lochblech und Tauchwand ist der Tab. 6-2 zu entnehmen.

Tab. 6-2 *Eingangsparameter der Lochblech- und Tauchwandversuche am Standardwehr mit Porosität  $n$ , Pfeilerauskrugung  $p_K$ , Überfallhöhe  $H_o$ , relative Überfallhöhe  $\chi$  und Eintauchtiefe  $t_L$ . Bei  $t_L = t_H$  entspricht die Eintauchtiefe des Lochblechs der gemessenen Eintauchtiefe des Verkläusungskörpers der Stammholzversuche. Weitere untersuchte Eintauchtiefen sind mit  $t_{Li}$  gekennzeichnet und in Tab. C- 2 angegeben.*

|           | $n$<br>[-] | $p_K$<br>[m] | $H_o$<br>[m] | $\chi$<br>[-] | $t_L$<br>[m]  |
|-----------|------------|--------------|--------------|---------------|---------------|
| Lochblech | 0.4        | 0.56         | 1, 2, 3      | 0.5, 1, 1.5   | $t_{Li}, t_H$ |
|           | 0.3        | 0.56         | 1, 2, 3      | 0.5, 1, 1.5   | $t_{Li}, t_H$ |
|           | 0.2        | 0.56         | 1, 2, 3      | 0.5, 1, 1.5   | $t_{Li}, t_H$ |
|           | 0.1        | 0.56         | 1, 2, 3      | 0.5, 1, 1.5   | $t_{Li}, t_H$ |
| Tauchwand | 0          | 0.56         | 1, 2, 3      | 0.5, 1, 1.5   | $t_{Li}, t_H$ |
|           | 0          | 1.01         | 1, 2, 3      | 0.5, 1, 1.5   | $t_H$         |
|           | 0          | 1.26         | 1, 2, 3      | 0.5, 1, 1.5   | $t_H$         |
|           | 0          | 1.61         | 1, 2, 3      | 0.5, 1, 1.5   | $t_H$         |

## 6.2 Ergebnisparameter

In Anhang C sind in Tab. C- 1 die Ergebnisparameter Eintauchtiefe  $t_H$ , lichter Abstand  $a$  und maximaler Wasserspiegelaufstau  $\Delta H_{max}$  der durchgeführten Stammholzversuche aufgelistet. Zusätzlich ist der reduzierte Abflussbeiwert  $C_{dH}$  infolge der Schwemmholzverkläusung angegeben.

Der Tab. C- 2 sind die Ergebnisparameter der Lochblech- und Tauchwandversuche zur Porosität  $n$  zu entnehmen. Die Analyse dieser Ergebnisse findet sich in Abschnitt 6.3.6.

## 6.3 Datenanalyse

### 6.3.1 Verkläusungsprozesse bei unterschiedlichen Schwemmholzzugabemethoden

Am Wehrüberfall *Ova Spin* mit modifizierter Pfeilerauskrugung  $p_K = -0.04$  m (Pfeilernase bündig mit dem Wehrkronenscheitel) wurden drei unterschiedliche Methoden der Zugabe von Stammhölzern bei einer Überfallhöhe  $H_o = 2$  m untersucht. In Abschn. 6.1.1 sind die Zugabemethoden beschrieben. Die Versuche sollten zeigen, ob das sich ausbildende Verkläusungsmuster der Stämme an den Wehrpfeilern und der infolge dieses Verkläusungskörpers bewirkte Wasserspiegelaufstau  $\Delta H$  durch die Art und Weise der Schwemmholzzugabe beeinflusst sind. Die Zielsetzung hinter diesem Vorgehen war, eine geeignete Zugabemethode für die systematischen Untersuchungen zur Ermittlung des charakteristischen Schwemmholzvolumens  $V_c$  und des Wasserspiegelaufstaus  $\Delta H$  zu bestimmen.

In Abb. 6-1 findet sich für die drei Zugabemethoden jeweils eine beispielhafte Abbildung für die Zugabemethode und für das sich bildende Verkläusungsmuster.

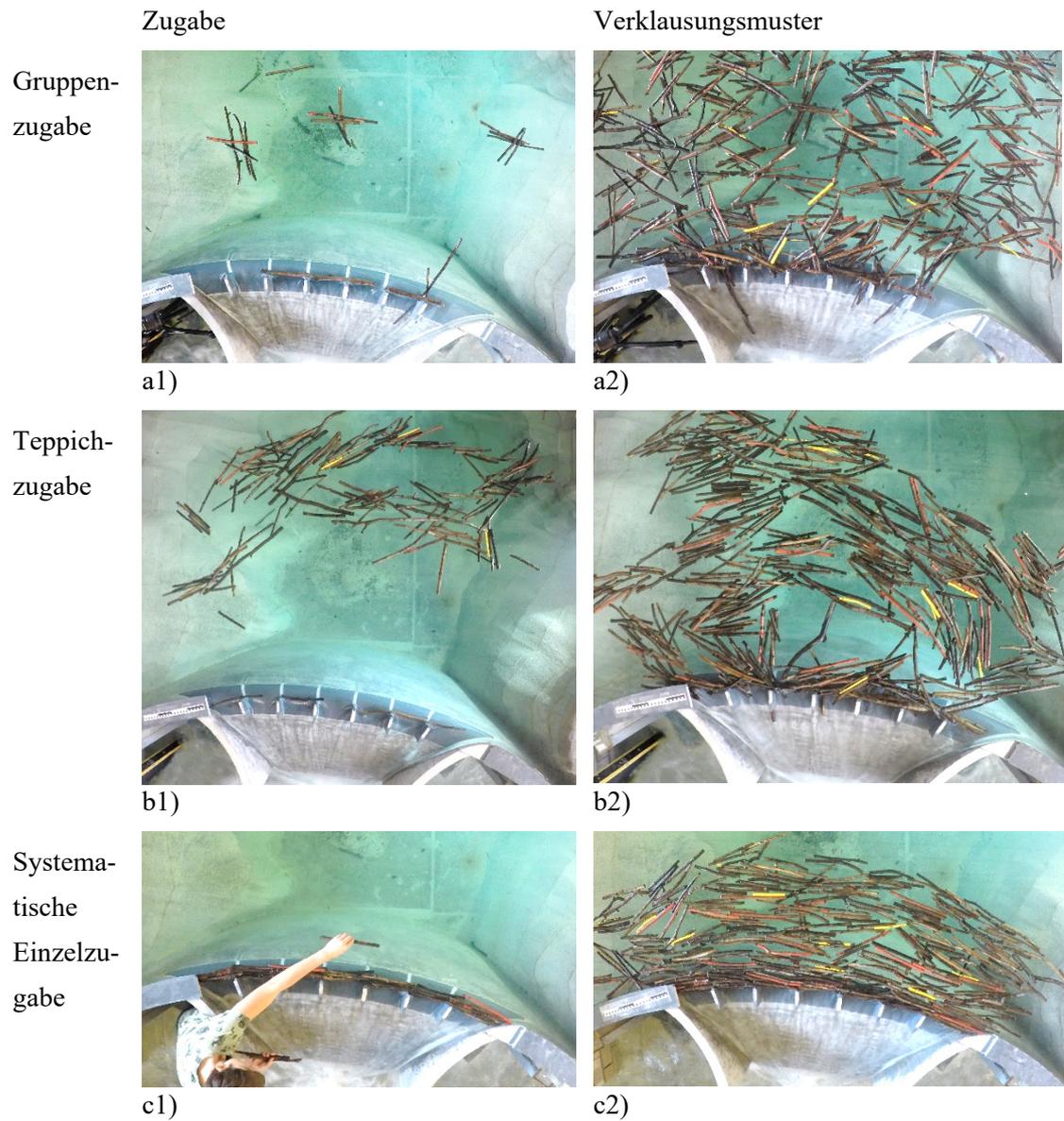


Abb. 6-1 Schwemmholzsituation am Mauerüberfall Ova Spin mit Eingangsparemeter  $p_K = -0.04$  m,  $H_o = 2$  m und  $v_s = 2.9$  m/s an der Wehrpfeilernase. Zugabe von a1) 5er-Gruppe und b1) Schwemmholzteppich sowie c1) Einzelzugabe. Das Verkläusungsmuster zu Versuchsende ist in a2), b2) und c2) dargestellt. VAW0902\_00017/22/25/26/31/32

### 5-er Gruppen

Zu Beginn der Versuche mit Gruppenzugabe passieren jeweils einige Schwemmholzgruppen den Mauerüberfall, bis ein Stamm die Initialverklauung quer an den Pfeilern verursacht (Abb. 6-1a1). An diesem Schlüsselement wird ankommendes Holz grösstenteils zurückgehalten. Im Nahbereich der Wehrkrone verdichtet sich das ankommende Schwemmholz aufgrund der hohen Oberflächengeschwindigkeit  $v_s = 2.90$  m/s (Tab. 4-3). Oft reichen die Strömungskräfte dennoch nicht aus, um die Stämme an der Verklauung auszurichten, d.h. das Muster der zufällig ausgerichteten Stämme der 5-er Gruppen ändert nur unwesentlich, wenn sich die Gruppe an den Verklauungskörper anlegt. Somit sind einzelne Stämme auch ins Oberwasser ausgerichtet und halten nachfolgend angeschwemmtes Holz in den Zonen sehr geringer Fliessgeschwindigkeiten von der Wehrkrone fern. Das Verklauungsmuster zum Ende des Versuchs ist durch eine dichte Packung an den Pfeilernasen und einen weit ins Ausgleichsbecken auffächernden, losen Schwemmholzteppich charakterisiert (Abb. 6-1a2). Der Wasserspiegelanstieg  $\Delta H$  in Funktion des an den Pfeilern verklauten Schwemmholzvolumens  $V_{vS}$  ist der Abb. 6-2 zu entnehmen. Die drei Versuchsserien i)-iii) mit Gruppen à fünf Stämmen erwirken dabei einen unterschiedlichen Anstieg des Wasserspiegels im Stauraum über die Versuchsdauer. Die Ausbildung des Verklauungskörpers an den Pfeilern und des dadurch erwirkten Aufstaus unterliegt demnach stark dem Zufall, wie dies auch Hartlieb (2015) in seinen Versuchen zur Ermittlung des Aufstaus infolge der Verklauung von Schwemmholz beobachtet hat (Abschn. 2.2). Gemeinsam ist den drei Versuchen i)-iii) der asymptotische Verlauf hin zu einem  $\Delta H_{max}$ .

### Schwemmholzteppiche

Die Stammhölzer der Schwemmholzteppiche richten sich tendenziell eher parallel zueinander aus und erwirken damit eine leicht dichtere Packung an den Wehröffnungen im Vergleich zur Zugabemethode von 5-er Gruppen (Abb. 6-1b2). Aber auch bei dieser Zugabemethode fangen ins Oberwasser ausgerichtete Stämme nachfolgende Stämme auf. Es bildet sich ein in den Stauraum auffächernder, loser Schwemmholzteppich. Abb. 6-2 zeigt, dass der Versuch mit Teppichzugabe einen höheren Aufstau  $\Delta H_{max}$  im Vergleich zur Versuchsserie i)-iii) mit 5er-Gruppen bewirkt.

### Analyse und systematische Einzelholzzugabe

Die im Verklauungsmuster an den Schlüsselementen zufällig ausgerichteten Hölzer halten Schwemmholz von den Wehrpfeilern fern (s. oben). Stämme gelangen demnach nur bedingt in die Zone, wo sie durch die Strömungskräfte unter den Verklauungskörper an den Wehrpfeilern gezogen werden. Andererseits weisen solche komplexe Schwemmholzansammlungen an Hindernissen im physikalischen Modellversuch relativ hohe Porositäten  $n = 0.6 \dots 0.7$  auf (Spreitzer et al., 2020), wenn dem Experiment kein Feinmaterialanteil dazugegeben wird (Abschn. 2.3). Beides verringert tendenziell den zusätzlichen Wasserspiegelanstau.

Um den Aufbau eines mächtigen, mehrlagigen Verklauungskörper an den Wehrpfeilern zu ermöglichen, wurden die Stammhölzer bei der systematischen Einzelholzzugabe mittig vor die

Wehrfelder und quer zur Strömungsrichtung ausgerichtet (Abb. 6-1c1). Damit fehlten im Experiment zufällig ausgerichtete Stämme (Abb. 6-1c2), was bewirkte, dass der Wasserspiegel im Reservoir infolge der Verklausung an den Wehrpfeilern deutlich höher im Vergleich zu den Experimenten mit zufällig ausgerichteten Stämmen (Zugabe von 5-er Gruppen oder Schwemmholzteppichen) anstieg. Es wurde der maximale Wasserspiegelanstieg  $\Delta H_{max}$  in diesem Experiment der Untersuchung der Zugabemethoden beobachtet (Abb. 6-2).

Die Bildung des Verklausungskörpers an den Wehrpfeilern bei der systematischen Zugabe von ausgerichteten Stammhölzern ist nachfolgend anhand der Bildstrecke der Abb. 6-3 für einen Versuch am *Standardwehr* detailliert dargestellt (Schwemmholzklasse A,  $p_K = -0.04$  m,  $\chi = 1$ ). Die Strömungskraft an der Wasseroberfläche ( $v_s = 3.60$  m/s, Tab. 4-2) zieht einen zwischen zwei Pfeilern spannenden Einzelstamm durch den Druckabfall auf der Unterseite des Stammes infolge der Umströmung meist tief unter den Wasserspiegel (Abwärtssog). Ein anschliessend zugegebener Einzelstamm lagert sich dann entweder über dem ersten Stamm an, oder kann durch die Strömungskraft auch unter den ersten Stamm gezogen werden. Es baut sich ein mit Holräumen durchsetzter, räumlicher Verklausungskörper an den Wehrpfeilern aus kreuz und quer, aber entlang des Wehrs ausgerichteten Stämmen auf, an den sich aufgrund der starken Abnahme der Oberflächengeschwindigkeit im Staubecken ein weit ins Speicherbecken auffächernder, loser Schwemmholzteppich anlegt (Abb. 6-1c2, Abb. 6-3, s. auch Abb. 6-4b). In dieser Phase steigt der Wasserspiegel nur noch leicht oder gar nicht mehr an.

Da Schwemmholzprozesse, wie oben beschrieben, zufallsbehaftet sind und sich nicht ausschliessen lässt, dass sich das eingetragene Holz quer zur Fliessrichtung parallel vor der HWE ausrichtet, wurde die systematische Einzelschwemmholzzugabe als konservatives Szenario in der vorliegenden Untersuchung angewendet. Die systematische Zugabe von ausgerichteten Hölzern erfolgte in Abweichung zu Hartlieb (2015) und Bénet et al. (2021), welche das Schwemmholz zufällig einzeln respektive als Schwemmholzteppich beigegeben haben (Abschn. 2.2), und sie führte zu maximal möglichen Wasserspiegelanstiegen  $\Delta H_{max}$  im physikalischen Modellversuch mit Stammhölzern. Ausserdem minimiert die systematische Zugabe die Zufallsabhängigkeit während dem Verklausungsprozess und erhöht dadurch die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse.

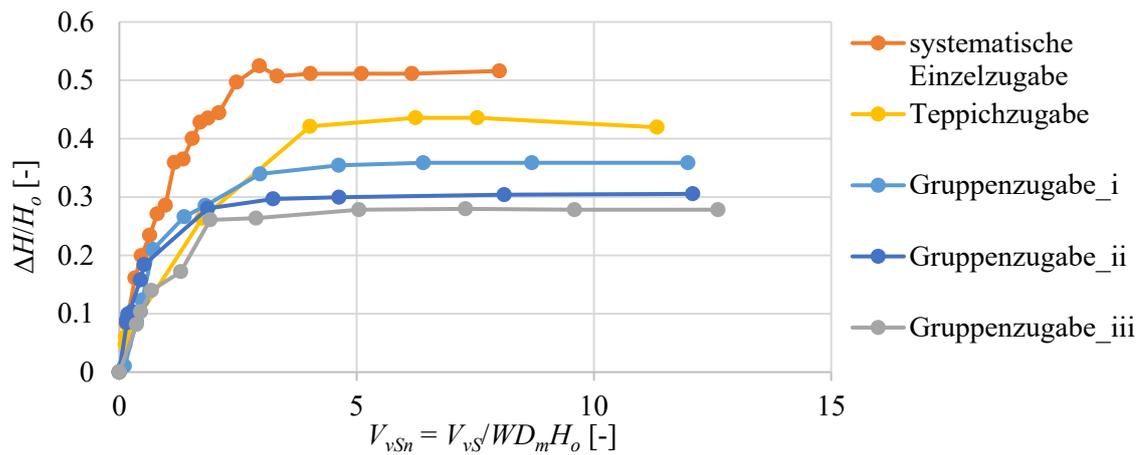


Abb. 6-2 Relativer Wasserspiegelaufstau  $\Delta H/H_0$  in Funktion des verklausten, normierten Schwemmholzvolumens  $V_{vSn}$  bei der Zugabe von 5-er Gruppen, Schwemmholzteppichen und der systematischen Zugabe von einzelnen, ausgerichteten Hölzern. Der Wasserspiegelaufstieg nähert sich asymptotisch dem maximalen Aufstau  $\Delta H_{max}$  an.

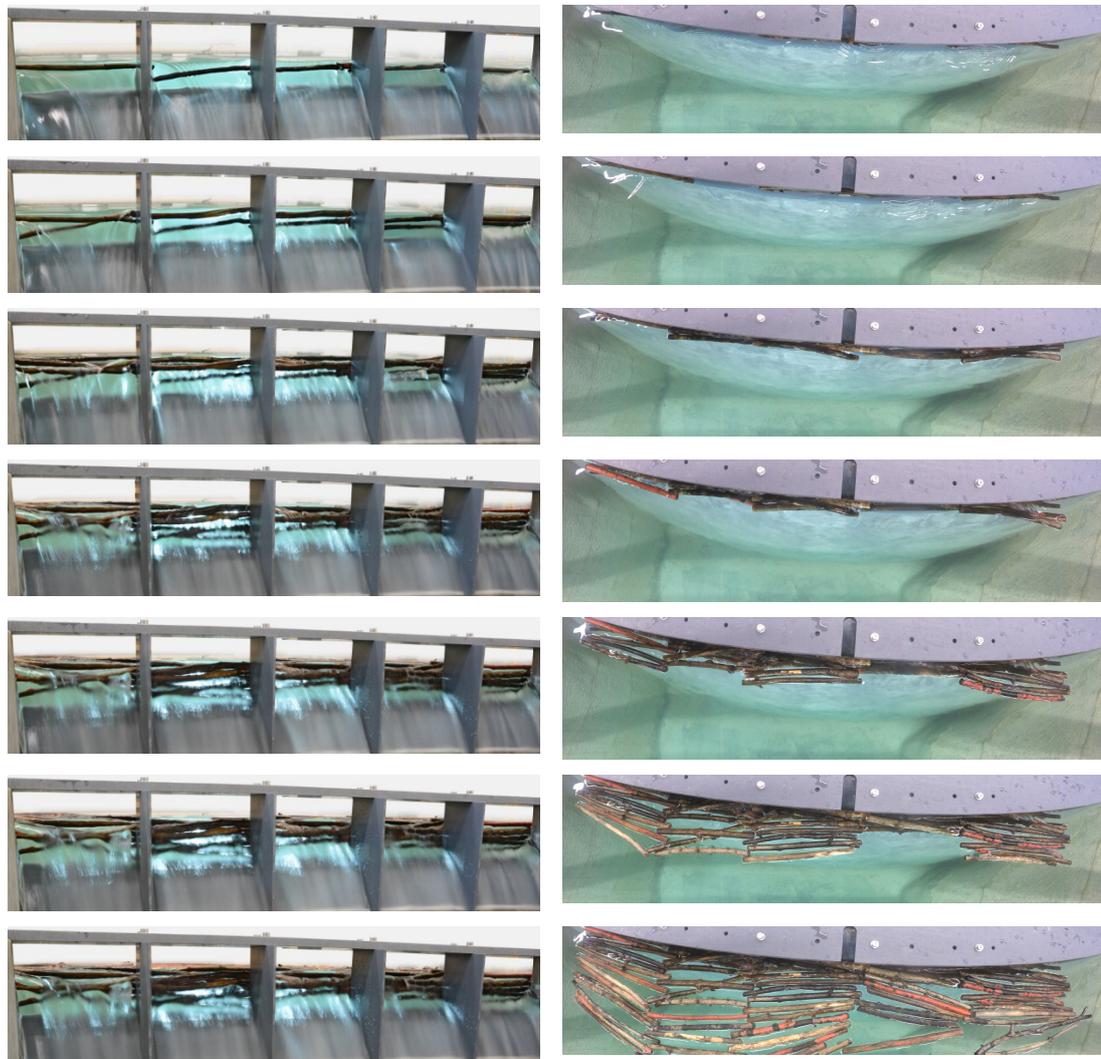


Abb. 6-3 Systematische Einzelholzzugabe am Standardwehr, Schwemmholzklasse A,  $p_K = -0.04$ ,  $\chi = 1$  (li: Blick von der Luftseite gegen die Fließrichtung, re: Draufsicht). Aufbau eines mit Hohlräumen durchsetzten, ein- bis zweilagigen Verkläusungskörpers an den Wehrpfeilern sowie anschließende Bildung eines losen Schwemmholzteppichs (vgl. auch Abb. 6-4b). Sämtliche Holzstämmen des Verkläusungsmusters sind entlang des Wehrs ausgerichtet.

### 6.3.2 Charakteristisches Schwemmholzvolumen

Wie in der Abb. 6-2 zu erkennen ist, steigt der Wasserspiegel bei der Zunahme des an den Wehrpfeilern verklausten Schwemmholzvolumens  $V_{vS}$  anfänglich steil an. Ab einem gewissen Volumen an verklaustem Schwemmholz flachen die Kurven ab und nähern sich asymptotisch dem maximalen Wasserstand, d.h. ein gewisses verklaustes Volumen verursacht den Hauptanteil des Wasserspiegelanstiegs. Schalko et al. (2019) beobachteten ebenfalls diesen charakteristischen Verlauf des Wasserspiegelanstiegs  $\Delta H$  in Funktion des verklausten Volumens  $V_{vS}$  an einem Schwemmholzrechen bei flussähnlichem Charakter und definierten ein sogenanntes «charakteristisches Schwemmholzvolumen»  $V_c$  (Abschn. 2.4.1). Mit Gleichung (4) lässt sich das verklauste Volumen  $V_c$  an einem Schwemmholzrechen bestimmen, das den Hauptanteil des Wasserspiegelanstiegs in einem Fluss bewirkt.

Die sehr kleinen Zuströmgeschwindigkeiten im Reservoir der Talsperre bedingen Zufluss-Froudezahlen  $F_o \ll 0.3$ , die ausserhalb des Gültigkeitsbereichs der Gl. (4) liegen. Schalko et al. (2019) beschreiben den idealisierten Querschnitt des Verkläusungskörpers am Schwemmholzrechen quadratförmig und definieren das idealisierte Volumen des Verkläusungskörpers am Rechen mit  $b \cdot h_o^2$ . Mit diesem idealisierten Volumen wird  $V_c$  in Gl. (4) normiert. Die in den Versuchen der VAW mit systematischer Zugabe von ausgerichteten Stämmen beobachtete Querschnittsfläche des Verkläusungskörpers zwischen den Wehrpfeilern weicht deutlich von der quadratischen Form  $h_o^2$  resp.  $H_o^2$  ab. Die Gl. (4) eignet sich demnach nicht,  $V_c$  an einem Mauerüberfall einer Talsperre zu bestimmen.

Ein Analogiemodell zu Schalko et al. (2019) wird im folgenden Abschnitt angewendet, um das charakteristische Volumen  $V_c$ , das den Hauptanteil des Aufstaus infolge einer Verkläusung der Wehrpfeiler eines Mauerüberfalls einer Talsperre verursacht, zu bestimmen. Demnach wird das verklauste Schwemmholzvolumen  $V_{vS}$  in einem ersten Schritt (1) mit einem idealisierten Volumen normiert und der relative Wasserspiegelaufstau  $\Delta H/H_o$  gegen dieses normierte verklauste Schwemmholzvolumen  $V_{vSn}$  aufgetragen. Diese Parameterpaare lassen sich in einem zweiten Schritt (2) mit einer mathematischen Funktion  $\Delta H/H_o = f(V_{vSn})$  beschreiben. Das normierte charakteristische Schwemmholzvolumen  $V_{cn}$  ist nun durch jenen Punkt definiert (3), an dem die Ableitung dieser Funktion 0.1 beträgt (vgl. Abschn. 2.4.1). Die Eingangsparameter der Versuche sind der Tab. 6-1 zu entnehmen, die Methode der Versuchsdurchführung ist in Abschn. 6.1.1 beschrieben.

(1) Mit der systematischen Zugabe von ausgerichteten Einzelhölzern der Holzklassen A, B und C spannen die Stämme nach der Initialphase zwischen den Wehrpfeilern übereinander und bewirken entlang des Wehrs einen idealisierten, einlagigen Verkläusungskörper (Abb. 6-3, Abb. 6-4b). Das idealisierte Volumen dieses Körpers ist  $W \cdot H_o \cdot D_m$ , und das normierte verklauste Schwemmholzvolumen kann demnach definiert werden zu

$$V_{vSn} = \frac{V_{vS}}{W H_o D_m} \quad (10)$$

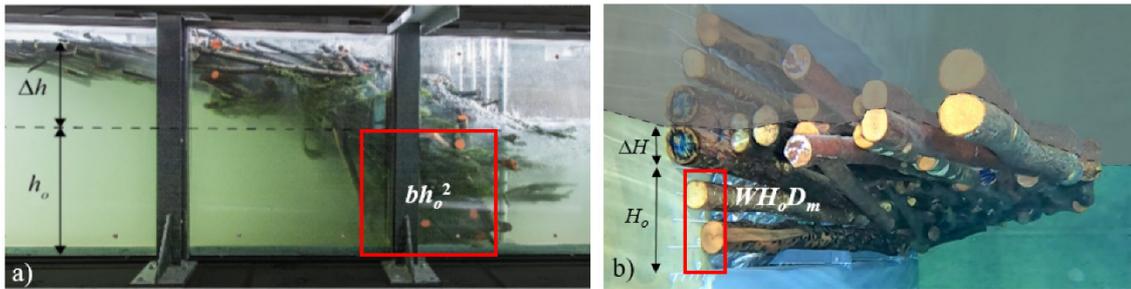


Abb. 6-4 Verklauungsformen mit idealisiertem Volumen a) bei flussähnlichen Bedingungen nach Schalko et al. (2019) an einem Schwellholzrechen, b) am Mauerüberfall des Standardwehrs und einer Pfeilerauskrugung auf Höhe Mauerfront. Der Verklauungskörper der Abbildung b) ist aus der Unterwasserperspektive aufgenommen und spiegelt sich dadurch an der Wasseroberfläche (---). a) Quelle: Schalko et al., 2019; b) VAW0902\_00033

(2) Zur mathematischen Beschreibung des beobachteten asymptotischen Verlaufs des relativen Anstiegs des Wasserspiegels  $\Delta H/H_o$  hin zu einem relativen maximalen Wasserstand  $\Delta H_{max}/H_o$  mit zunehmendem, normiertem, verklautem Schwemmholzfestvolumen  $V_{vSn}$  eignet sich die Hyperbelfunktion des Tangens.

$$\frac{\Delta H}{H_o} = \frac{\Delta H_{max}}{H_o} \cdot \tanh\left(b_f \cdot \frac{V_{vS}}{W H_o D_m}\right) = \frac{\Delta H_{max}}{H_o} \cdot \tanh(b_f \cdot V_{vSn}) \quad (11)$$

Der Faktor  $b_f$  folgt aus einem Datenfit für jeden einzelnen Versuch. Abb. 6-5 zeigt beispielhaft den Datenfit für den Versuch am *Standardwehr* mit  $p_K = -0.04$ ,  $\chi = 1$  mit den Stämmen der Holzklasse A ( $D_m = 0.37$  m) einschliesslich den Werten für  $\Delta H_{max}/H_o$  und  $b_f$ . Die Bestimmtheitsmasse  $R^2$  der Datenfits sämtlicher Versuche liegen im Bereich zwischen 0.74 und 1.

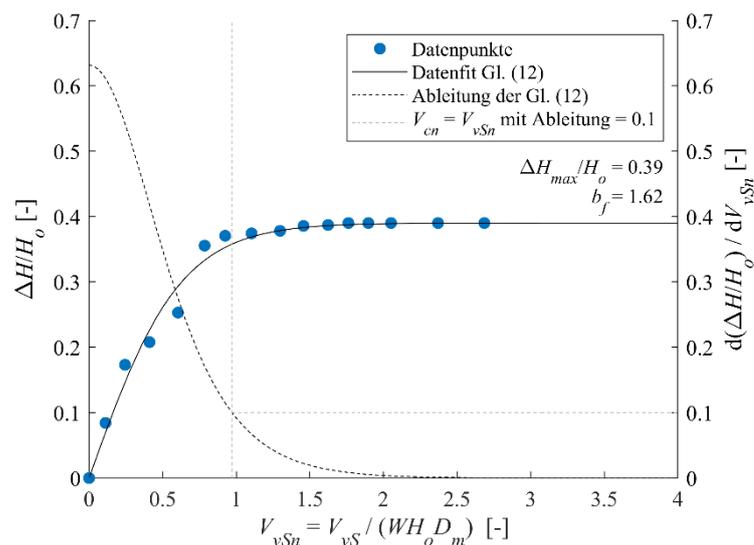


Abb. 6-5 Relativer Wasserspiegelanstieg  $\Delta H/H_o$  (linke Ordinate) und Steigung des relativen Wasserpiegelanstiegs (rechte Ordinate) in Funktion des normierten Schwemmholzvolumens  $V_{vSn}$  für  $p_K = -0.04$  m,  $\chi = 1$ ,  $D_m = 0.37$  m im Versuch mit Standardwehr. Blaue Punkte: Messdaten, schwarze Linie: Datenfit nach Gl. (11) mit  $\Delta H_{max}/H_o = 0.39$ ,  $b_f = 1.62$  und  $R^2 = 0.98$ , gestrichelte Linie: Ableitung der Gl. (11), grau gestrichelte Linie:  $V_{cn} = V_{vSn} = 0.97$  für Ableitung = 0.1

(3) Das normierte charakteristische Schwemmholzvolumen  $V_{cn}$  eines jeden Versuches ist mit der Tangens Hyperbolicus-Funktion bestimmbar. In Abb. 6-6 ist  $V_{cn}$  gegen die normierte Pfeilerauskrugung  $P_K = p_K/H_o$  aufgetragen. Mit einem Bestimmtheitsmass von  $R^2 = 0.86$  berechnet sich  $V_{cn}$  innerhalb des  $\pm 30\%$  Fehlerbandes zu:

$$V_{cn} = \frac{V_c}{WH_o D_m} = \max[1.4 \cdot (1 - P_K), 0] \quad R^2 = 0.86 \quad (12)$$

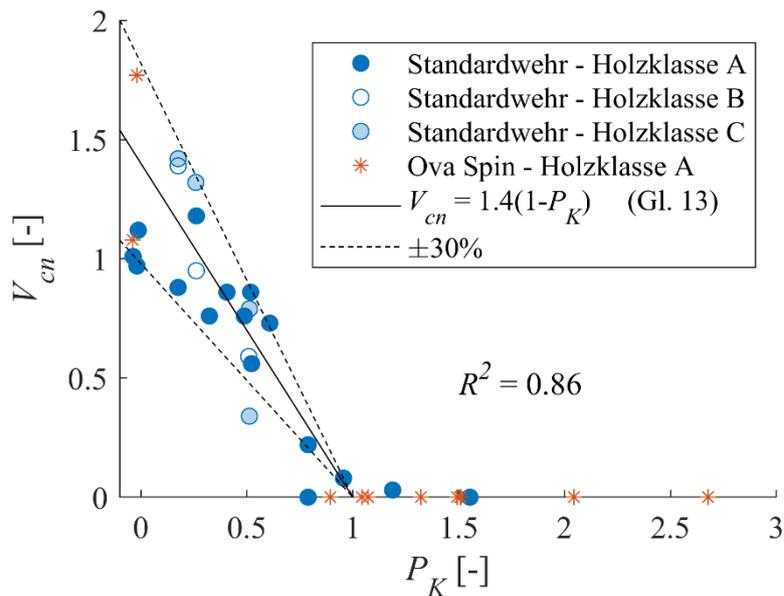


Abb. 6-6 Normiertes charakteristisches Schwemmholzvolumen  $V_{cn}$  in Funktion der normierten Pfeilerauskrugung  $P_K$  für die Schwemmholzklassen A, B und C mit jeweiligen Holzdurchmessern 0.37, 0.2 und 0.54 m. Die Messdaten liegen weitgehend innerhalb eines Fehlerbandes von  $\pm 30\%$  zur Abschätzung von  $V_{cn}$  nach Gl. (12).

Per Definition führt das charakteristische Volumen  $V_c$  zum Hauptanteil des Wasserspiegelanstiegs  $\Delta H_c$ . Zusätzlich verklaustes Schwemmholz lagert sich als loser Teppich an und führt lediglich noch zu einem zusätzlichen, sehr kleinen Anstieg. In Abb. 6-7 ist der relative Wasserspiegelanstieg  $\Delta H/\Delta H_c$  gegenüber dem relativen Schwemmholzvolumen  $V_{vs}/V_c$  für alle Versuche mit signifikantem Wasserspiegelanstieg ( $\Delta H_c/H_o \geq 0.03$ ) dargestellt.  $\Delta H/\Delta H_c$  kann hierbei mit folgender Gleichung beschrieben werden, wobei ein Grossteil der Datenpunkte im Fehlerband  $\pm 15\%$  liegen:

$$\frac{\Delta H}{\Delta H_c} = \frac{\tanh\left(1.2 \cdot \frac{V_{vs}}{V_c}\right)}{\tanh(1.2)} \quad R^2 = 0.94 \quad (13)$$

Gleichung (13) sagt aus, dass bei einer Erhöhung des verklausten Schwemmholzvolumens  $V_{vS}$  deutlich über  $V_c$  (z.B.  $V_{vS}/V_c \geq 2.5$ ) sich ein Wasserspiegelaufstau  $\Delta H$  von maximal  $1.2 \cdot \Delta H_c$  einstellt, hingegen bei  $V_{vS}/V_c = 0.5$  lediglich ein  $\Delta H$  von 64% dessen resultiert, was bei  $V_c$  zu erwarten ist ( $\Delta H = 0.64 \cdot \Delta H_c$ ). Bei Schwemmholzverklauungen an den Wehrpfeilern eines Mauerüberfalls wird somit ab einem verklausten Volumen  $V_{vS}/V_c \geq 2.5$  der maximale Wasserspiegelanstieg  $\Delta H_{max}$  erreicht und zusätzlich angeschwemmtes Holz bewirkt keinen zusätzlichen Aufstau. Da für Talsperren die effektive Schwemmholzmenge für  $V_c$  generell sehr klein ist (Abschn. 6.5.1), sollte bei Verklauungen jeweils mit dem maximalen Aufstau  $\Delta H_{max}$  gerechnet werden. Um diesen abzuschätzen, kann die Gleichung (16) aus Abschnitt 6.3.4 angewendet werden.

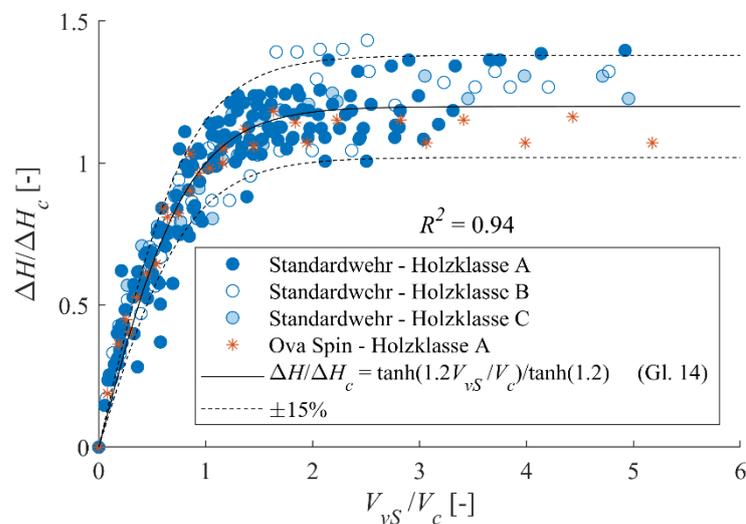


Abb. 6-7 Relativer Wasserspiegelanstieg  $\Delta H / \Delta H_c$  in Funktion des relativen Schwemmholzvolumens  $V_{vS} / V_c$ . Die Messdaten liegen grösstenteils innerhalb eines Fehlerbandes von  $\pm 15\%$  zur Abschätzung des Wasserspiegelverlaufs nach Gl. (13) mit einem Bestimmtheitsmass von  $R^2 = 0.94$ .

### 6.3.3 Eintauchtiefe $t_H$ des Verklauungskörpers

Wie u.a. Rimböck (2003) und Schmocker (2017) darlegen, beeinflussen die auf die Stammhölzer einwirkenden Strömungskräfte die Mächtigkeiten der Verklauungskörper an Seilnetzsperrern in Wildbächen oder vorgelagerten Schwemmholzrechen an HWE (Abschn. 2.2). Bei grossen Fließgeschwindigkeiten türmen sich die Hölzer am Rückhalteelement in vertikaler Richtung auf, während sich das Holz bei kleinen Geschwindigkeiten zu einem losen Schwemmholzteppich anlegt.

Nach Erreichen der maximalen Überfallhöhe  $H_{max}$  wurden die Eintauchtiefe  $t_H$  des Verklauungskörpers auf Höhe der Pfeilnasen und der lichte Abstand  $a$  zwischen dem Verklauungskörper und dem Überfallprofil bestimmt (Tab. C- 1). Diese gemessenen Ergebnisparameter sind im Abschn. 3.5.3 definiert.

In Abb. 6-8 sind die mit  $H_o$  normierten Eintauchtiefen  $T_H = t_H / H_o$  gegen die auf Höhe der Pfeilnasen auftretenden, normierten Geschwindigkeiten  $v_{sn}$  aufgetragen (Gl. (9)). Es ist ersichtlich,

dass die normierte Eintauchtiefe  $T_H$  innerhalb eines Fehlerbandes von  $\pm 30\%$  linear von  $v_{sn}$  abhängt (Gl. (14)):

$$T_H = 1.82 \cdot v_{sn} \quad R^2 = 0.55 \quad (14)$$

Für die Pfeilerauskrägung  $p_K = 0.53$  m wurde der Einfluss der Holzklasse auf die Eintauchtiefe  $t_H$  untersucht (Tab. 6-1). Es zeigt sich, dass  $T_H$  insbesondere mit zunehmendem Durchmesser  $D$  infolge der zunehmenden hydrodynamischen Strömungskräfte anwächst. Die wenigen Datenpunkte und die unterschiedlichen Holzdichten der drei Klassen A, B und C lassen jedoch keine systematische Auswertung des Einflusses des Stammdurchmessers  $D$  auf die relative Eintauchtiefe  $T_H$  im Rahmen dieser Versuche zu. Da zudem einige  $T_H$  relativ breit um die Regressionsgerade streuen, wurde  $D$  in der weiteren Analyse für die Ermittlung des Aufstaus  $\Delta H$  nicht berücksichtigt.

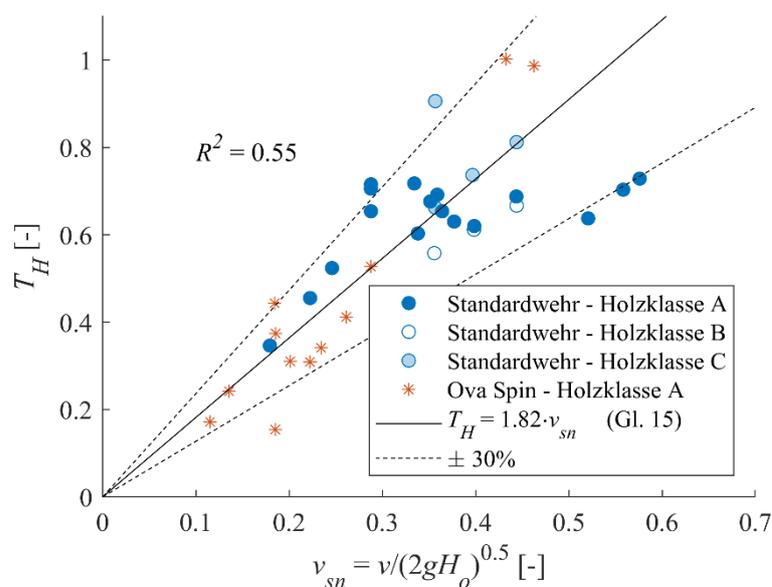


Abb. 6-8 Normierte Eintauchtiefe  $T_H$  in Funktion der normierten Oberflächengeschwindigkeit  $v_{sn}$  nach Gl. (14). Die Messdaten liegen grösstenteils innerhalb eines Fehlerbandes von  $\pm 30\%$ .

Der Abb. 6-9 ist die auf den mittleren Stammdurchmesser bezogene relative Eintauchtiefe  $t_H/D_m$  zu entnehmen. Bei einer Oberflächengeschwindigkeit von  $v_s = 0.8$  m/s auf Höhe der Pfeilernasen ist kein Auftürmen der Hölzer zu beobachten (eine Lage), wohingegen z.B. bei 2 m/s bis zu vier kompakt aufeinanderliegende Lagen unter dem initialen Wasserspiegel möglich sind. Die Mächtigkeit der Verklausung kann näherungsweise zu  $t_H + \Delta H$  angenommen werden.

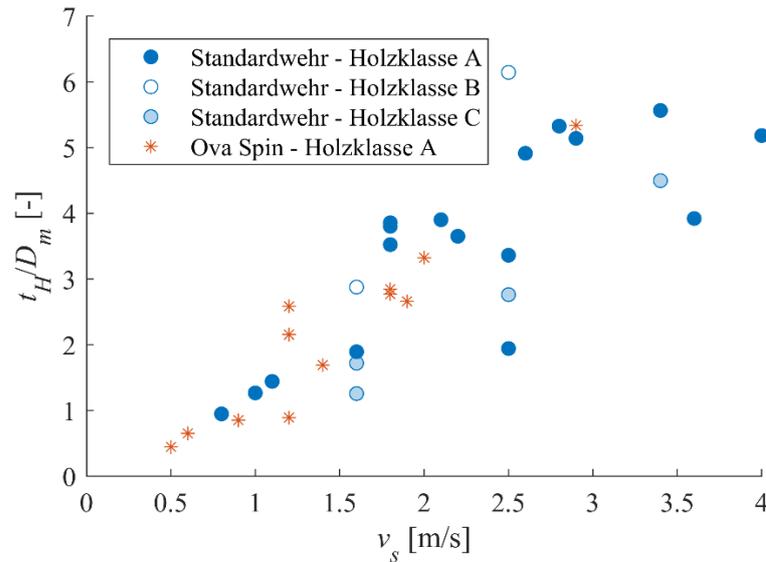


Abb. 6-9 Auf den Stammdurchmesser bezogene relative Eintauchtiefe  $t_H/D_m$  in Funktion der Oberflächengeschwindigkeit  $v_s$  auf Höhe der Pfeilernasen

Die relative Eintauchtiefe  $T_H$  nimmt mit zunehmender normierter Oberflächenfließgeschwindigkeit  $v_{sn}$  zu (Abb. 6-8). Es lässt sich damit die normierte Eintauchtiefe  $T_H$  in Anwendung der Gleichungen (9) und (14) in Beziehung zur normierten Pfeilerauskrägung  $P_K$  setzen (Abb. 6-10):

$$T_H = 0.91 \cdot e^{-\frac{2}{3}P_K} \quad R^2 = 0.65 \quad (15)$$

Schwemmholzversuche sind grundsätzlich schwierig zu reproduzieren und somit auch die Bildung einer Verkläuserung. Mit der systematischen Zugabeart des Schwemmholzes ist die Zufallsabhängigkeit bestmöglich reduziert (Abschn. 6.3.1). Dennoch streuen die Daten der Eintauchtiefe relativ stark (Form des Stammes, Dichteeffekte), was sich in einem Bestimmtheitsmass  $R^2 = 0.65$  für Gl. (15) ausdrückt. Ein Fehlerbereich von  $\pm 30\%$  deckt die meisten, aber nicht alle Datenpunkte ab.

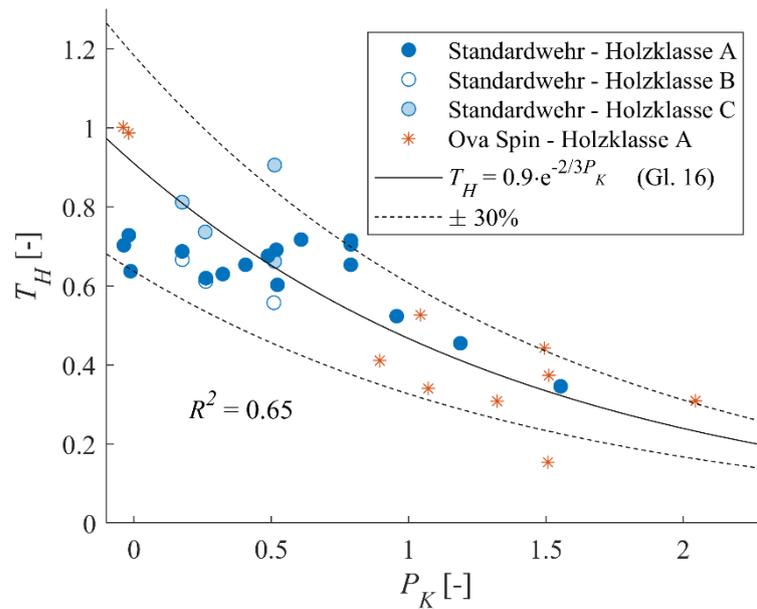


Abb. 6-10 Normierte Eintauchtiefe  $T_H$  in Funktion der normierten Pfeilerauskrägung  $P_K$  nach Gl. (15). Die Messdaten liegen grösstenteils innerhalb eines Fehlerbandes von  $\pm 30\%$ .

Neben den Strömungskräften resp. dem Stammdurchmesser (s.o.) beeinflusst die Holzdicke das Abtauchen der Stämme. Je dichter das Holz, desto kleiner ist die benötigte Strömungskraft, um es in die Tiefe zu ziehen. In dieser Untersuchung wurde die Schwemmholzdichte nicht systematisch berücksichtigt; sie schwankte aber moderat innerhalb der Schwemmholzklassen und entsprach einer hohen Dichte von nassen, waldfrischen Nadelhölzern (Abschn. 2.4.3 u. Tab. 3-5), weshalb die hier gefundene Gl. (15) zur Ermittlung der Eintauchtiefe  $t_H$  als repräsentativ für Frischholz angesehen wird. Dennoch ergeben die mit Gl. (15) ermittelten Eintauchtiefen eher eine Maximaleintauchtiefe, wie die Überlegungen zur Zugabemethode des Schwemmholzes in Abschnitt 6.3.1 zeigen (s. dazu auch Abschn. 6.4.2). Um den Einfluss sowohl der Dichte als auch des Durchmessers auf das Übereinandertürmen und Verdichten einer Verklauung zu beschreiben und eine dichte- und durchmesserabhängige Abschätzung der Eintauchtiefe zu ermöglichen, ist weiterführende Grundlagenforschung notwendig.

### 6.3.4 Wasserspiegelaufstau

Abb. 6-11 zeigt den Ergebnisparameter  $\Delta H_{max}$  in Funktion des Eingangsparameters  $p_K$ , beide normiert mit dem Eingangsparameter  $H_o$ . Je grösser die relative Pfeilerauskrägung  $P_K$ , desto geringer der Wasserspiegelanstieg infolge der Verklauung an den Wehrpfeilern. Für relative Pfeilerauskrägungen  $P_K > 1$  ist  $\Delta H_{max}/H_o < 0.03$  mit der Ausnahme von zwei Ausreissern mit  $\Delta H_{max}/H_o \approx 0.06$  am Wehr *Ova Spin*.

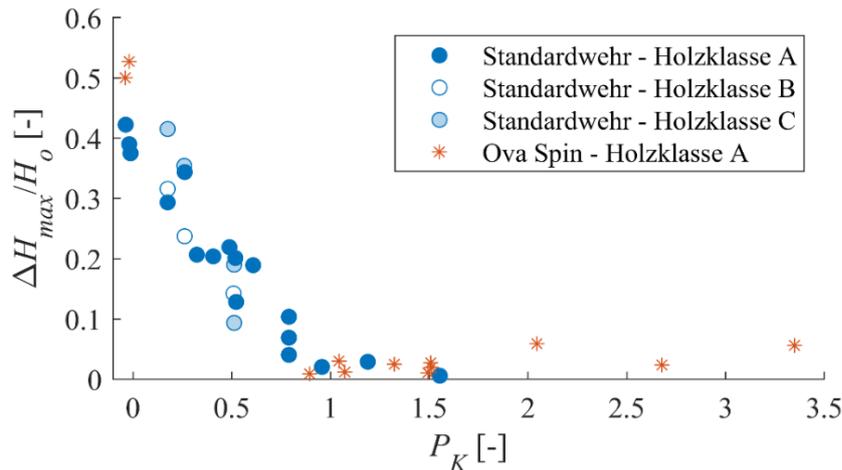


Abb. 6-11 Relativer maximaler Aufstau  $\Delta H_{max}/H_0$  in Funktion der normierten Pfeilerauskrümmung  $P_K$  am Standardwehr und am Wehr Ova Spin mit Schwemmholz der Klassen A, B und C

In Abb. 6-12 ist der relative maximale Wasserspiegelaufstau  $\Delta H_{max}/H_0$  gegen den relativen lichten Abstand  $a/H_0$  aufgetragen. Für Werte  $a/H_0 \geq 0.3$  lässt sich  $\Delta H_{max}/H_0$  in Funktion von  $a/H_0$  mit folgender Gl. (16) annähern. Damit liegen sämtliche Parameter und Gleichungen vor, um  $\Delta H_{max}$  rechnerisch zu ermitteln (Kap. 7).

$$\frac{\Delta H_{max}}{H_0} = 1.5e^{-4.2 \frac{a}{H_0}} \quad \text{für } a/H_0 \geq 0.3 \quad (16)$$

$$R^2 = 0.88$$

Für Werte  $a/H_0 < 0.3$  wird der Aufstau mit der vorliegenden Gleichung deutlich überschätzt resp. fehlt der Datensatz für eine verlässliche Abschätzung des Aufstaus.

Abgesehen von der Holzklasse C (dickes Holz mit Stammdurchmesser  $D = 0.54 \pm 0.07$  m; Tab. 3-5) und den Ova Spin-Versuchen, bei denen sich die Pfeilernasen auf der Höhe des Wehrkronenscheitels befinden ( $p_k = -0.04$  m), liegen quasi alle Datenpunkte innerhalb des Fehlerbereichs von  $\pm 20\%$ . Der bei zwei von vier Versuchen gemessene Aufstau mit der Schwemmholzklasse C liegt deutlich unter dem Aufstau mit den Schwemmholzklassen A und B, was möglicherweise durch grössere Spaltweiten der Stapelung von Stämmen mit grossem Durchmesser auf Höhe der Pfeiler bedingt ist (höhere Porosität  $n$  des Verkläusungskörpers, Abschn. 6.3.6).

Der relative lichte Abstand  $a/H_0$  ist ein Mass dafür, wie stark die für die Strömung freibleibende Fläche  $a \cdot W$  durch die Verkläusung an den Wehrpfeilern reduziert wird.  $a/H_0$ -Werte grösser als 0.8 bewirken einen nur moderaten Wasserspiegelanstieg  $\Delta H_{max}/H_0$  von weniger als 0.06, bei  $a/H_0 > 0.7$  von weniger als 0.1.

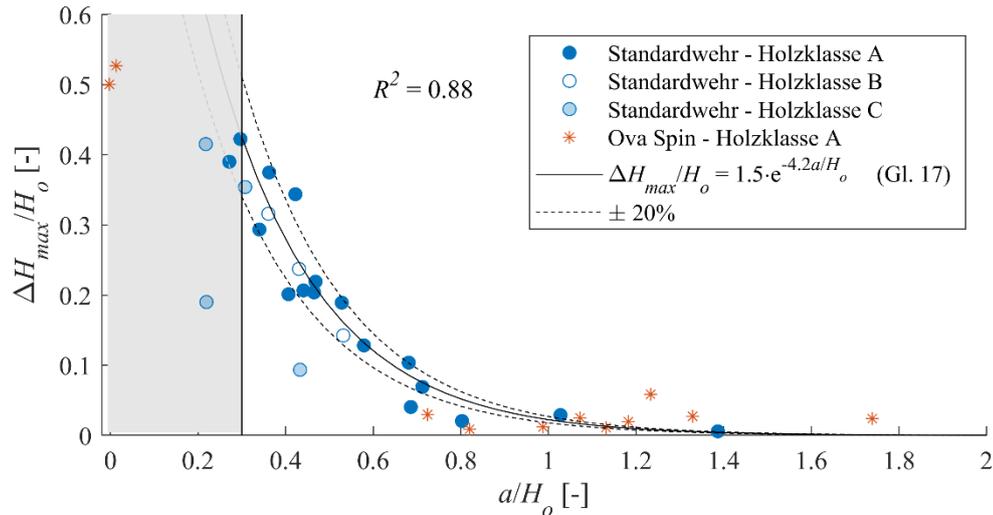


Abb. 6-12 Maximaler relativer Wasserspiegelaufstau  $\Delta H_{max}/H_o$  in Funktion des mit  $H_o$  normierten, lichten Abstandes  $a$ . Die Gl. (16) erreicht für  $a/H_o \geq 0.3$  ein Bestimmtheitsmass von  $R^2 = 0.88$ . Der grau hinterlegte Bereich markiert Daten ausserhalb des Gültigkeitsbereichs von Gl. (16).

### 6.3.5 Reduzierte Abflusskapazität

Infolge Verklausung von Hölzern an den Wehrpfeilern verringert sich die verfügbare Durchflussfläche, so dass es zu einem Rückstauereffekt, d.h. zu einer Erhöhung des Wasserspiegels um ein Mass  $\Delta H$  kommt (Abschn. 6.3.4). Der reduzierte Abflussbeiwert  $C_{dH}$  ist in Beziehung zur maximalen Überfallhöhe  $H_{max} = H_o + \Delta H_{max}$  gesetzt, die sich infolge der Verklausung von Schwemmholz an den Wehrpfeilern eines Mauerüberfalls bei  $V_{v,s}/V_c \geq 2.5$  bei konstantem Abfluss  $Q$  einstellt (Abschn. 6.3.2).

$C_{dH}$  wird wie folgt berechnet:

$$C_{dH} = \frac{Q}{W_w \sqrt{2g \cdot (H_o + \Delta H_{max})^3}} \quad (17)$$

Die ermittelten  $C_{dH}$ -Werte sind der Tab. C- 1 zu entnehmen.

Der Abflussreduktionsfaktor  $\eta$  beschreibt das Verhältnis zwischen dem Abflussflussbeiwert  $C_{dH}$  bei maximalem Wasserspiegelaufstieg  $\Delta H_{max}$  infolge Verklausung und dem nach Gl. (6) berechneten Referenzabflussbeiwert  $C_d$ , der in Abschn. 4.1 für die initiale Überfallhöhe  $H_o$  angegeben ist.

$$\eta = \frac{C_{dH}}{C_d} \quad (18)$$

In Abb. 6-13 ist der Faktor  $\eta$  in Analogie zu Bénét et al. (2021) gegen die normierte Pfeilerauskrägung  $P_K$  aufgetragen, wobei  $P_K$  in der vorliegenden Studie in Abweichung zu Bénét et al. (2021) definiert ist (Abschn. 3.3.2). Es zeigt sich, dass der Reduktionsfaktor  $\eta$  mit zunehmendem

$P_K$  gegen 1 strebt, d.h. der Abflussbeiwert durch zurückgehaltenes Schwemmholz so gut wie gar nicht verändert wird. Ab einer Pfeilerauskrägung von  $p_K \geq H_o$  ( $P_K \geq 1$ ) führt eine Schwemmholzverklausung zu einem vernachlässigbaren Reduktionsfaktor  $\eta > 0.95$ , da die Verklausung nur noch einen marginalen Wasserspiegelanstieg  $\Delta H_{max}$  von  $< 0.035 \cdot H_o$  verursacht ( $0.95^{-2/3} - 1 = 0.035$ ).

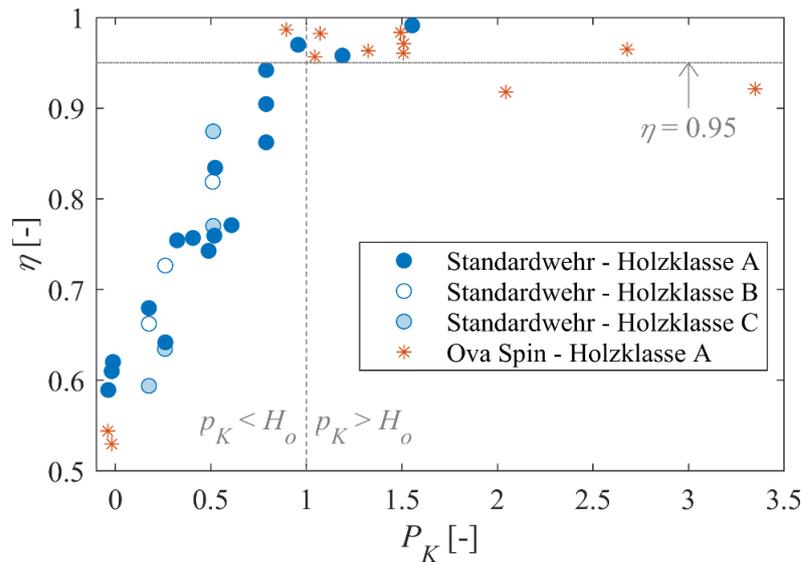


Abb. 6-13 Abflussreduktionsfaktor  $\eta$  in Funktion der normierten Pfeilerauskrägung  $P_K$ . Für  $P_K \geq 1$  beträgt  $\eta > 0.95$ , der Wasserspiegelanstieg  $\Delta H_{max}$  infolge Verklausung ist demnach geringer als  $0.035 \cdot H_o$ .

### 6.3.6 Einfluss der Porosität des Verklausungskörpers auf den Wasserspiegelanstieg

In Abschn. 2.3 sind gemessene Porositäten  $n$  von natürlich gebildeten Schwemmholzverklausungen in Flüssen und physikalischen Modellversuchen angegeben. Auf die Beeinflussung von  $n$  durch den Feinmaterialanteil  $m$  und die abstrakte Modellierung wird im Abschn. 3.4.2 eingegangen, der Versuchsaufbau ist in Abschn. 6.1.2 dargestellt.

Der gemessene Wasserspiegelanstieg  $\Delta H_{max}$  der Versuche mit den Lochblechen und der Tauchwand ist der Tab. C-2 zu entnehmen.

Abb. 6-14 zeigt den relativen Wasserspiegelanstieg  $\Delta H_{max}/H_o$  der Versuche mit dem Lochblech der Porosität  $n = 0.4$  im Vergleich zu den Stammholzversuchen (Abb. 6-12). Die violetten, umkreisten Datenpunkte sind dabei jene Datenpunkte der Lochblechversuche, bei welchen die Eintauchtiefe des Lochblechs  $t_L$  dem Ergebnisparameter  $t_H$  der Schwemmholzversuche bei gleichen Eingangsparametern  $P_K$  und  $H_o$  entsprach ( $t_L = t_H$ , fett markiert in Tab. C-2). Die violetten Kreuze ohne Umkreisung stellen diejenigen Versuche dar, bei denen die Eintauchtiefe  $t_L$  des Lochblechs über die gesamte Überfallhöhe  $H_o$  variiert wurde ( $t_L \neq t_H$ ). Folgendes wird beim Vergleich der Lochblech- und Stammholzversuche beobachtet:

- Ein Lochblech mit  $n = 0.4$  erzeugt einen vergleichbaren Wasserspiegelaufstau wie die Stammholzversuche.
- Für  $a/H_o < \text{ca. } 0.3$  verursachen die Stammholzversuche einen leicht grösseren und für  $a/H_o > \text{ca. } 0.5$  einen leicht kleineren Wasserspiegelaufstau als das Lochblech.
- $a/H_o$ -Werte grösser als 0.8 bewirken mit Lochblech einen sehr kleinen Wasserspiegelanstieg  $\Delta H_{max}/H_o$  von weniger als 0.07, bei  $a/H_o = 0.9$  liegt der Wasserspiegelaufstau innerhalb der Genauigkeit der Stechpegelmessung.

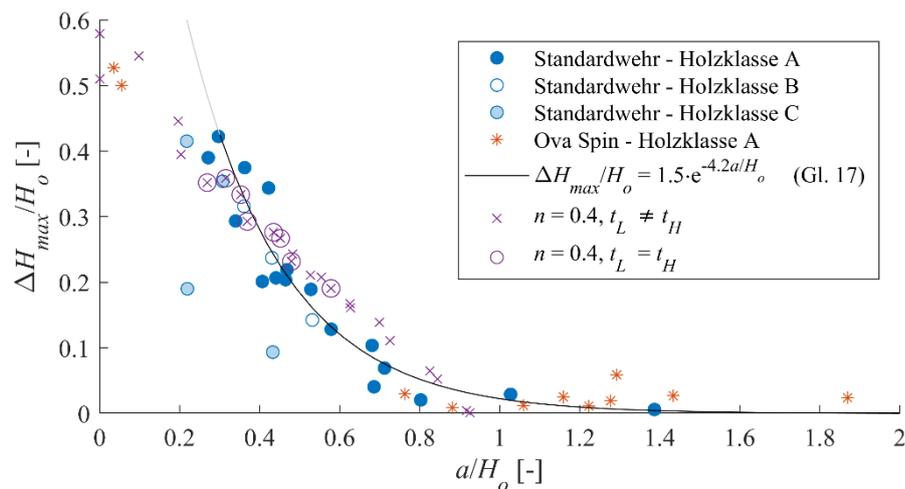


Abb. 6-14 Maximaler relativer Wasserspiegelaufstau  $\Delta H_{max}/H_o$  in Funktion des mit  $H_o$  normierten, lichten Abstandes  $a$  für ein Lochblech mit einer Porosität  $n = 0.4$  und Stammholzversuche;  $t_L$ : Eintauchtiefe Lochblech,  $t_H$ : gemessene Eintauchtiefe Verklausungskörper

In Abb. 6-15 ist der relative Wasserspiegelanstieg  $\Delta H_{max}/H_o$  sämtlicher Versuche mit den Lochblechen (Porositäten  $n = 0.1, 0.2, 0.3$  und  $0.4$ ) und der Tauchwand ( $n = 0$ ) dargestellt. Die Beobachtungen sind:

- Mit der Reduktion der Porosität  $n$  nimmt der Wasserspiegelaufstau  $\Delta H_{max}$  bei gleichem  $a/H_o$  zu. Den grössten Aufstau verursacht die (undurchlässige) Tauchwand (s. Gl. (19)).
- Die Zunahme des Aufstaus hängt nicht nur von  $n$ , sondern auch vom normierten lichten Abstand  $a/H_o$  ab. Je kleiner  $a/H_o$ , desto stärker steigt  $\Delta H_{max}/H_o$  an. Je grösser  $a/H_o$ , desto kleiner wird der Einfluss der Porosität  $n$  auf  $\Delta H_{max}/H_o$ . Für  $a/H_o > 0.8$  gilt  $\Delta H_{max}/H_o < 0.1$ , unabhängig von  $n$ .

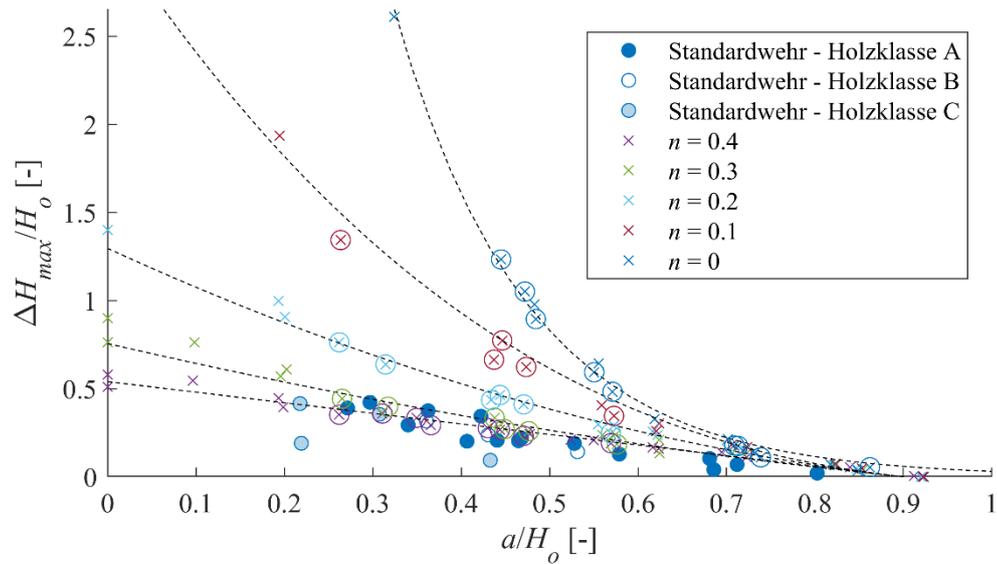


Abb. 6-15 Maximaler relativer Wasserspiegelaufstau  $\Delta H_{max}/H_o$  in Funktion des mit  $H_o$  normierten, lichten Abstandes  $a$ , für Lochblech- und Tauchwandversuche mit  $n = 0, 0.1, 0.2, 0.3$  und  $0.4$  sowie Stammholzversuche. Für die eingekreisten Datenpunkte gilt  $t_L = t_H$  bei gleichem  $P_K$  und  $\chi$ .

Im Folgenden wird ein Vergleich zwischen den Stammholz- und Lochblechversuchen gezogen:

- Im Bereich  $0.25 < a/H_o < 0.6$ , in welchem die eingestellte Eintauchtiefe  $t_L$  des Lochblechs dem Ergebnisparameter  $t_H$  entsprach, weisen die Versuche mit dem Lochblech der Porosität  $n = 0.3$  und  $0.4$  einen ähnlichen relativen Wasserspiegelaufstau  $\Delta H_{max}/H_o$  auf, wie sie die Stammholzversuche bei gleichen  $a/H_o$  ergeben. Lochbleche mit  $n = 0.1$  und  $0.2$  resp. die undurchlässige Tauchwand erzeugen einen deutlich höheren Wasserspiegelaufstau.
- Für  $a/H_o > 0.5$  verursachen die Lochblechversuche einen grösseren, relativen Wasserspiegelaufstau  $\Delta H_{max}/H_o$ .
- Zwei von vier Datenpunkte der Stammholzversuche mit der Holzklasse C liegen deckungsgleich auf der Kurve des Lochblechs  $n = 0.4$ . Hingegen verursachen zwei Versuche einen deutlich kleineren relativen Aufstau, als sie die Lochblechversuche der Porosität  $n = 0.4$  bewirken.

Der Vergleich zwischen den Stammholz- und Lochblechversuchen beruht auf der Annahme, dass der einlagige Verklausungskörper der Stammholzversuche und das Lochblech einen identischen relativen Wasserspiegelaufstau  $\Delta H_{max}/H_o$  bei gleichen Wertepaaren von Porosität  $n$  und relativem lichten Abstand  $a/H_o$  bewirken. Diese Annahme blendet Effekte des hydraulischen Widerstands, der Strahleinschnürung und des Strahlzerfalls aus, welche die effektive Abflussgrösse des Volumenstroms durch den Verklausungskörper resp. das Lochblech beeinflussen. Der Vergleich lässt nun folgende Erkenntnisse ableiten: Anhand der Daten und der getroffenen Annahme kann dem Verklausungskörper der Stammholzversuche im Bereich  $0.25 < a/H_o < 0.5$  eine Porosität  $n = 0.3 \dots 0.4$  zugewiesen werden, da die Messpunkte insbesondere mit den Holzklassen A und B

annähernd deckungsgleich auf den Kurven des Wasserspiegelanstiegs der Lochblechversuche mit  $n = 0.3$  und  $0.4$  liegen. Eine visuelle Abschätzung der Porosität  $n$  der einlagigen Stapelung der Stämme an der Wehrpfeilern ergibt ähnliche Werte. Damit liegt die Porosität des Verkläusungskörpers der Versuche mit systematischer Zugabe von ausgerichteten Stämmen der Holzklassen A und B deutlich tiefer, als sie z.B. Spreitzer et al. (2020) für eine komplexe Schwemmholzansammlung an Brückenpfeilern im Modellversuch mit  $n = 0.6 \dots 0.7$  angeben (Abschn. 2.3). Der Verkläusungskörper der Stammholzversuche weist demnach die Porosität einer dichteren Packung auf (Abschn. 2.3). D.h. der mit der systematischen Zugabe von ausgerichteten Hölzern herbeigeführte Verkläusungskörper bildet eine Porosität nach, wie sie bei einer komplexen Schwemmholzansammlung in Natur eher durch die zusätzliche Verlegung der Hohlräume durch Feinmaterial zu erwarten ist (Livers & Wohl, 2021). Die selbe Folgerung ergibt sich mit folgender Betrachtung: Der Auflockerungsfaktor  $AF = V_L/V_{VS} = 1/(1-n)$  der modellierten Verkläusungskörper beträgt 1.67 bei  $n = 0.4$ , was gemäss den Analysen von Überschwemmungsereignissen in der Schweiz selbst den unteren Wert von  $AF = 2$  einer sehr kompakten Akkumulation unterschreitet (Abschn. 2.3).

Der erzeugte Aufstau zweier Versuche mit der Holzklasse C, dessen Stämme den grössten untersuchten Stammdurchmesser  $D$  aufwiesen (Tab. 3-5), liegt deutlich unter jenen der Lochblechversuche mit  $n = 0.4$  (Abb. 6-15) resp. der Stammholzversuche mit den Holzklassen A und B. Es ist demnach anzunehmen, dass die Verkläusungskörper dieser beiden Versuche durchlässiger sind resp. einen geringen Strömungswiderstand erzeugen. Damit scheint der Stammdurchmesser  $D$  nicht nur die Eintauchtiefe  $t_H$  (Abschn. 6.3.3), sondern möglicherweise auch die Porosität  $n$  resp. die Packungsdichte zu beeinflussen.

Ein maximaler Wasserspiegelanstieg  $\Delta H_{max}/H_o$  bei komplett dicht verlegter Verkläusung kann bei Anwendung einer Analogie zur dichten Tauchwand anhand folgender Gleichung ermittelt werden.

$$\frac{\Delta H_{max}}{H_o} = 22.5e^{-6.6\frac{a}{H_o}} \quad \text{für } a/H_o > 0.33 \quad (19)$$

$$R^2 = 0.996$$

Wie in Abschn. 3.4.2 dargestellt, wurde, anstatt den Modellversuchen Feinmaterial mit dem Anteil  $m$  am Volumen der Feststoffe  $V_S$  beizugeben, die Porosität  $n$  der die Verkläusungskörper abstrahierenden Lochbleche reduziert. Im Abschn. 7.2 ist das Vorgehen dargestellt, wie sich der Feinmaterialanteil  $m$  zur Berechnung des Wasserspiegelaufstaus  $\Delta H_{max}$  berücksichtigen lässt.

#### 6.4 Validierung der Gleichungen zur Abschätzung von $\Delta H_{max}$

Die in Abschn. 6.3 hergeleiteten Beziehungen für die Bestimmung des Wasserspiegelaufstaus wurden anhand der im physikalischen Modellversuch gemessenen Ergebnisparameter hergeleitet. Im Kapitel 7 wird das Vorgehen zur Berechnung des Wasserspiegelaufstaus  $\Delta H_{max}$  mit diesen

Beziehungen erläutert. Folgend werden die mit dem vorgestellten Verfahren berechneten Werte mit Messdaten aus der vorliegenden Untersuchung sowie aus Hartlieb (2015), Schmocker (2017) und Bénet et al. (2021) validiert.

#### 6.4.1 Validierung anhand der Messdaten der vorliegenden Studie

In Abb. 6-16 ist der in den Versuchen der VAW gemessene gegen den berechneten Wasserspiegelaufstau aufgetragen. Bei geringem relativem Aufstau  $\Delta H_{max}/H_o \leq 0.2$  wird der berechnete Aufstau sowohl leicht über- als auch unterschätzt. Die meisten berechneten Werte liegen innerhalb eines Fehlerbereichs von  $\pm 30\%$ . In diesem Bereich des geringen Wasserspiegelanstiegs ist der lichte Abstand  $a/H_o$  relativ gross und die in der Berechnung verwendete Exponentialfunktion (Gl. (16)) konvergiert gegen Null.

Für  $\Delta H_{max}/H_o > 0.2$  überschätzt die Berechnung den effektiv im Modell beobachteten Wasserspiegelanstieg. Für kleine lichte Abstände  $a/H_o < 0.3$  wird ein grosser relativer Aufstau  $\Delta H_{max}/H_o > 0.43$  berechnet. Dabei liegen die meisten berechneten Werte ausserhalb des Fehlerbereichs von  $\pm 30\%$ . Der Aufstau wird somit deutlich überschätzt, was aber daran liegt, dass dieser Bereich ausserhalb des angegebenen Gültigkeitsbereichs der Gl. (16) liegt.

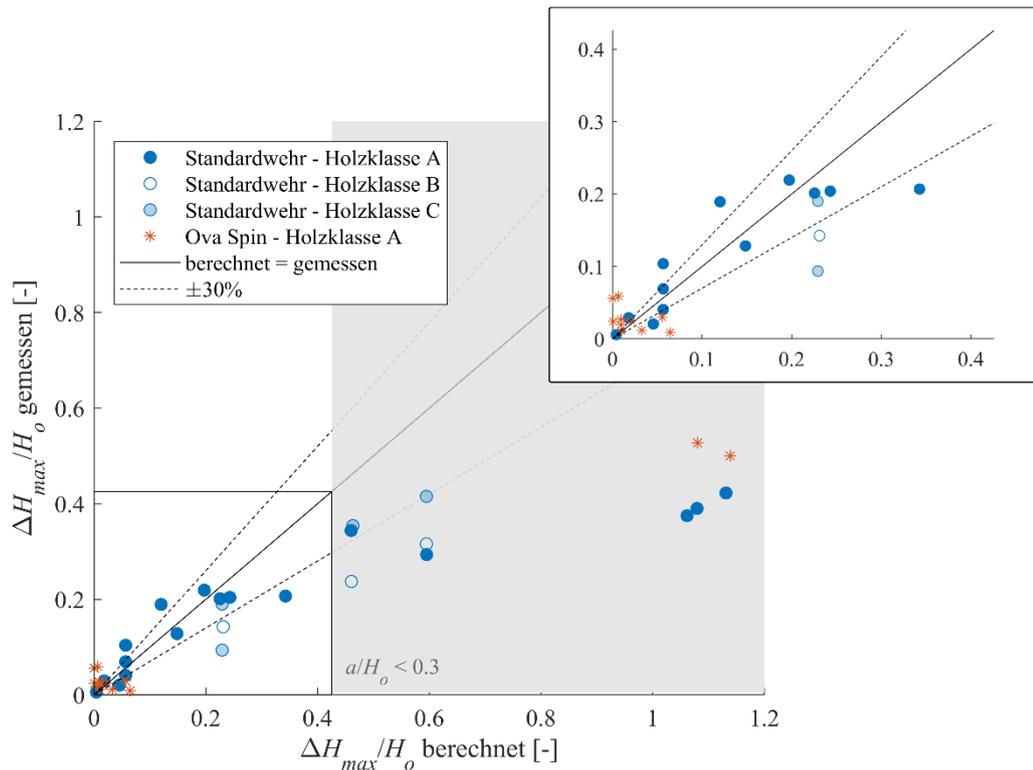


Abb. 6-16 Berechneter versus gemessener Aufstau  $\Delta H_{max}/H_o$ . Der grau hinterlegte Bereich markiert Daten ausserhalb des Gültigkeitsbereichs von Gl. (16). Die rechte, obere Grafik zoomt den Datensatz im Gültigkeitsbereich der Gl. (17) heran.

#### 6.4.2 Validierung anhand von Literaturdaten

Der Abb. 6-17 sind die gemessenen Werte des relativen Wasserspiegelaufstaus  $\Delta H_{max}/H_o$  in Abhängigkeit der normierten Pfeilerauskrugung  $P_K$  für die Messdaten aus der vorliegenden Untersuchung sowie aus Hartlieb (2015), Schmocker (2017) und Bénét et al. (2021) zu entnehmen. In Abb. 6-18 werden die gemessenen mit den berechneten Werten verglichen, wobei das Verfahren zur Berechnung des Wasserspiegelaufstaus infolge einer Verklausung von Schwemmholz an den Wehrpfeilern eines Mauerüberfalls, wie in Abschn. 7.2 beschrieben, auf den Eingangsparameterersatz der Versuchsaufbauten von Hartlieb (2015), Schmocker (2017) und Bénét et al. (2021) angewendet wurde. Die Abb. 6-19 stellt den Vergleich des Abflussreduktionsfaktors infolge Verklausung  $\eta = C_{dH}/C_d$  dar.

Es zeigt sich in Abb. 6-17, dass die Daten aus allen vier Studien grundsätzlich sehr gut zueinander passen. Der Wasserspiegelaufstau streut sowohl bei Hartlieb (2015) als auch bei Bénét et al. (2021) für ein gegebenes  $P_K$  in einem relativ grossen Bereich. Die in der vorliegenden Untersuchung gewonnenen Daten liegen dabei grundsätzlich am oberen Rand dieses Streubereichs. Dies kann u.a. durch die Zugabeart des Schwemmholzes erklärt werden (Abschn. 6.3.1). In Hartlieb (2015; Zugabe in kleinen Gruppen von 5 Hölzern) und in Bénét et al. (2021; Zugabe eines Schwemmholzteppichs) wurde das Schwemmholz zufällig ausgerichtet zugegeben. Dies verursacht einerseits eine komplexe Schwemmholzansammlung an den Wehrpfeilern, bei denen die Stämme im Verklausungsmuster zufällig ausgerichtet sind und andererseits eine grosse Zufallsabhängigkeit bei der Verklausungsbildung, die sich in einer grossen Streuung der Messwerte in den Versuchswiederholungen und in einem reduzierten maximalen Wasserspiegelanstieg äussert. In der vorliegenden Untersuchung wurden ausgerichtete Schwemmhölzer zugegeben. Diese Art der Schwemmholzzugabe kann als auf der sicheren Seite liegend betrachtet werden (Abschn. 6.3.1). Die grosse Streuung sowie der geringere Aufstau  $\Delta H_{max}/H_o$  in Hartlieb (2015) und in Bénét et al. (2021) können insbesondere für  $P_K \leq 1.5$  einerseits mit der nicht konservativen Zugabemethode erklärt werden. Andererseits konnte sich bei beiden Studien der Schwemmholzteppich auf die Modellberandung ihrer Versuchsanlage abstützen, so dass sich der Schwemmholzteppich weniger stark infolge des Strömungsdrucks komprimierte und damit eine höhere Porosität aufwies (Abschn. 2.2). Im Modell *Ova Spin* interagierte das Schwemmholz nicht mit dem Seitenrand des Modells.

Der höhere, relative Aufstau  $\Delta H_{max}/H_o$  für  $P_K > 1.5$  der Daten von Bénét et al. (2021) gegenüber den Daten am Standardprofil der vorliegenden Studie ist hingegen darin begründet, dass das Schwemmholz bei den Versuchen von Bénét et al (2021) infolge der relativ geringen Überfallhöhe  $H_o$  nicht nur an den Wehrpfeilern verklauste, sondern auch auf der Wehrkrone auflag ( $D_{max}/H_o \geq 0.35$ , Abschn. 2.2).

Unter Berücksichtigung dieser verschiedenen Randbedingungen können die Daten von Hartlieb (2015), Schmocker (2017) und Bénét et al. (2021) sehr gut in den Kontext zur vorliegenden Studie gesetzt werden.

In Abb. 6-18 sind im Vergleich zur Abb. 6-16 zusätzlich die publizierten Datensätze von Hartlieb (2015), Schmocker (2017) und Bénét et al. (2021) aufgenommen. Die Erklärungen zu den Abweichungen der berechneten gegenüber den gemessenen Werten sind analog zu Abschnitt 6.4.1.

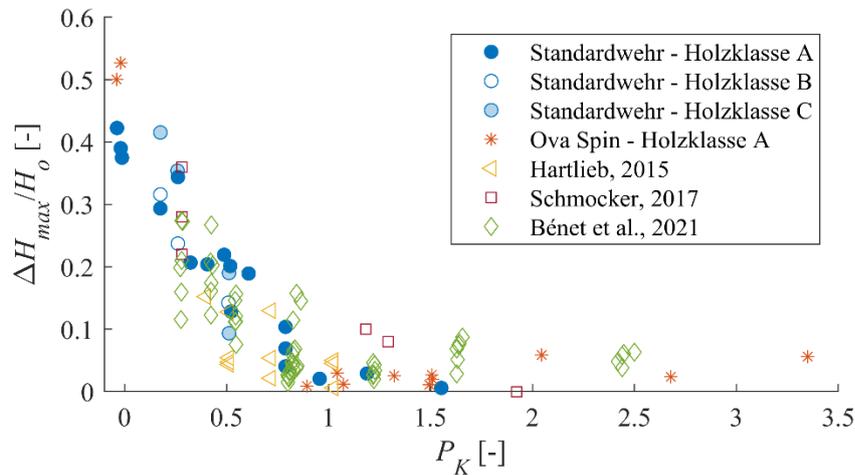


Abb. 6-17 Relativer Wasserspiegelanstieg  $\Delta H_{max}/H_o$  in Abhängigkeit der normierten Pfeilerauskrugung  $P_K$ ; Daten der vorliegenden Untersuchung sowie Hartlieb (2015), Schmocker (2017) und Bénét et al. (2021)

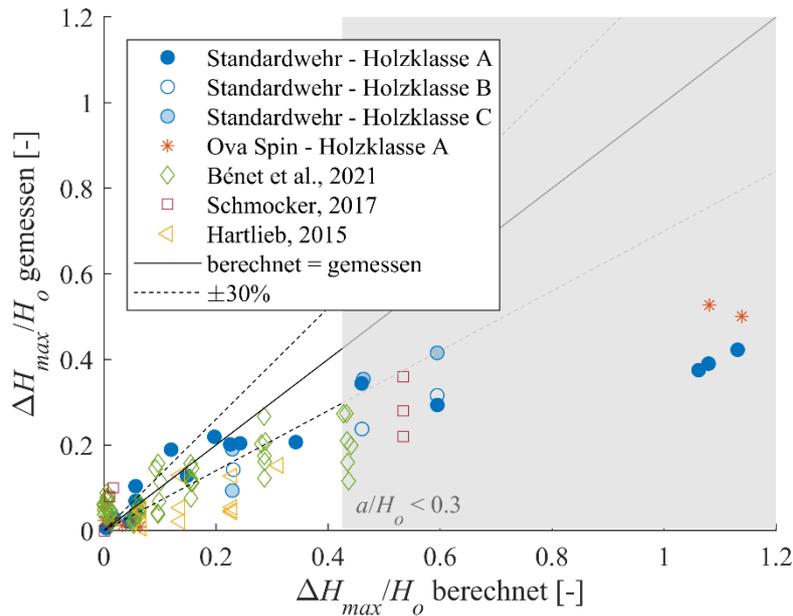


Abb. 6-18 Berechneter versus gemessener Wasserspiegelanstau  $\Delta H_{max}/H_o$ ; Daten der vorliegenden Untersuchung sowie Hartlieb (2015), Schmocker (2017) und Bénét et al. (2021). Der grau hinterlegte Bereich markiert Daten ausserhalb des Gültigkeitsbereichs von Gl. (16).

In Abb. 6-19 ist der Abflussreduktionsfaktor  $\eta$  dieses und der Datensätze von Hartlieb (2015), Schmocker (2017) und Bénét et al. (2021) dargestellt. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung der Abflussreduktionsfaktoren  $\eta$  aus den verschiedenen Studien. Ab einer Pfeilerauskrugung von  $p_K \geq H_o$  führt eine Schwemmholzverklauung an den Wehrpfeilern zu einem vernachlässigbaren

Abflussreduktionsfaktor  $\eta \geq 0.95$  und eine Verklausung hat quasi keinen Einfluss auf die Abflusskapazität eines Mauerüberfalls. Die geringeren Werte von Bénét et al. (2021) in diesem Bereich werden, wie oben erwähnt, durch die Blockierung des Durchflussquerschnitts infolge auf der Wehrkrone aufliegender Hölzer verursacht. Die Daten von Schmocker (2017) weisen in diesem Bereich eine grössere Abflussreduktion und somit einen grösseren Wasserspiegelanstieg aus. Die Messung des Wasserspiegels erfolgte jedoch mit 0.4 m Distanz zur Wehrkrone sehr nahe an der Wehröffnung und in einem Bereich, in dem sich der Schwemmholzteppich ansammelte. Es wurde mit dem Ultraschallsensor nicht die Wasserspiegeloberfläche, sondern die Schwemmholzteppichoberfläche erfasst, was leicht erhöhte Werte ergibt (respektive kleinere  $\eta$ -Werte). Würden die in einem Abstand von 1 m von der Wehröffnung publizierten, jedoch vom Autor nicht weiter ausgewerteten Messwerte verwendet, so ergäben sich  $\eta$ -Werte im Bereich von 0.97 anstelle von 0.87 und 0.89.

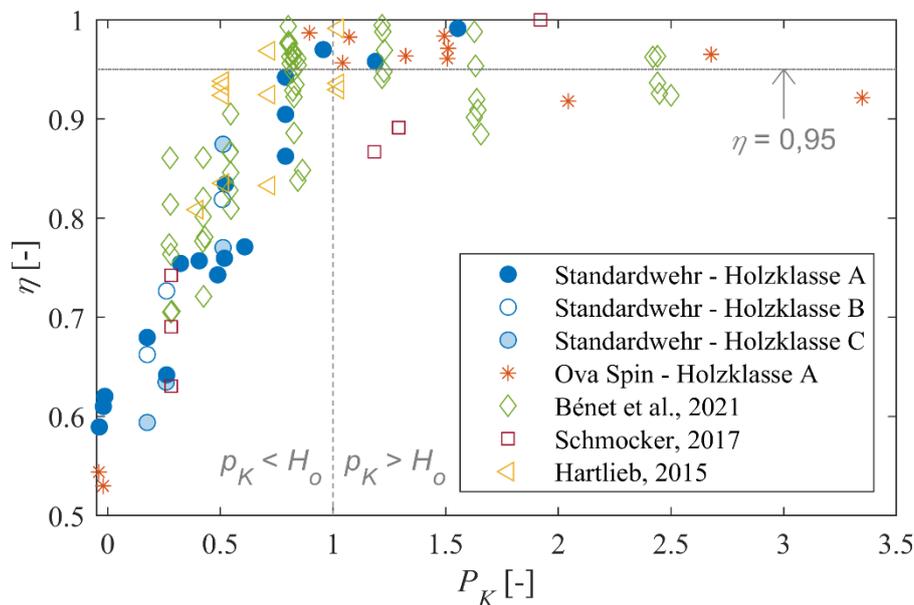


Abb. 6-19 Abflussreduktionsfaktor  $\eta = C_{dH}/C_d$  infolge Verklausung in Abhängigkeit der normierten Pfeilerauskrägung  $P_K$ . Für  $p_K \geq H_o$  ist der Abflussreduktionsfaktor mit  $\eta \geq 0.95$  für die meisten Versuche vernachlässigbar.

Die aus Abb. 6-9 (s. Abschn. 6.3.3) hergeleitete Aussage, dass angeschwemmtes Holz bei  $v < 0.8$  m/s weder am Hindernis in die Tiefe gezogen noch übereinander aufgetürmt wird, deckt sich mit anderen Studien (Rimböck, 2003; VAW Fallstudien in Lange & Bezzola, 2006; Schmocker, 2017), wonach bei Fließgeschwindigkeiten  $< 0.8 \dots 1$  m/s kein Auftürmen beobachtet wurde resp. angeschwemmtes Holz sich zu einen losen Schwemmholzteppich ansammelt.

## 6.5 Erkenntnisse und Anwendbarkeit

### 6.5.1 Charakteristisches Schwemmholzvolumen

Das charakteristische Schwemmholzvolumen  $V_c$  an einem Mauerüberfall wird in Gl. (12) in Funktion der initialen Überfallkote  $H_o$  und der Pfeilerauskragung  $p_K$  ausgedrückt, wohingegen es sich am Schwemmholzrechen nach Schalko et al. (2019) mit Gl. (4) auf die Zufluss-Froudezahl  $F_o$  und die Zufluss-Wassertiefe  $h_o$  bezieht. Da sich im Bereich der Wehrkrone Froudezahlen und Abflusstiefen ermitteln lassen, kann  $V_c$  nach Gl. (4) berechnet und eine Vergleichsbetrachtung angestellt werden. Diese Volumina  $V_c$  betragen ein Vielfaches von jenen, welche am Mauerüberfall nach Gl. (12) nötig sind, um den primären Wasserspiegelaufstau bei einer Verklauung der Wehrpfeiler zu erwirken. Dies zeigt sich auch deutlich in den Idealisierungen der Querschnittsfläche der Verklauungskörper (Abb. 6-4); an einem Schwemmholzrechen ist sie quadratisch ( $\sim h_o^2$ ), an den Wehrpfeilern hingegen rechteckig ( $\sim H_o \cdot D_m$ ). Das charakteristische Schwemmholzvolumen bei flussähnlichen Bedingungen an einem Schwemmholzrechen ist somit deutlich voluminöser als am Mauerüberfall, wo sich angeschwemmtes Holz in der ersten Phase an den Wehrpfeilern hochschichtet (Tiefe der Stapelung  $\approx D_m$ ) und sich der lose Schwemmholzteppich nach dieser Phase bei weiterer Schwemmholzzufuhr ansammelt. Diese Stapelung ergab sich insbesondere infolge der Zugabe von ausgerichteten Stämmen in den Versuchen der vorliegenden Studie. Bei komplexeren Verklauungsprozessen, wie sie in Natur zu erwarten sind, halten ins Oberwasser auskragende Stämme nachfolgende Stämme in Zonen geringer Fließgeschwindigkeit vom Verklauungskörper an den Wehrpfeilern fern, sodass mit Gl. (12) tendenziell ein oberer Grenzwert für  $V_c$  ermittelt wird. Grundsätzlich ergeben sich aber für den Mauerüberfall sehr kleine charakteristische Volumina, was bedeutet, dass der primäre Wasserspiegelaufstieg infolge der Verklauung bereits durch eine geringe Menge an verklaustem Schwemmholz ausgelöst wird. Im Umkehrschluss wird davon abgeraten, die Gl. (4) auf die Situation an einem Mauerüberfall einer Talsperre zur Ermittlung von  $V_c$  anzuwenden.

### 6.5.2 Wasserspiegelaufstau

Die in Kapitel 7 dargestellten Berechnungen des maximalen Wasserspiegelaufstaus  $\Delta H_{max}$ , aber auch der Oberflächengeschwindigkeit  $v_s$ , der Eintauchtiefe  $t_H$  des Verklauungskörpers und des lichten Abstandes  $a$  der Verklauung zum Wehr sind ein Hilfsmittel für den Nachweis des sicheren Schwemmholzrückhaltes in genügendem Abstand zu einem Mauerüberfall einer Talsperre und in Bereichen geringer Fließgeschwindigkeit. Ist dieser Nachweis zu führen, gilt es primär die Fallunterscheidung vorzunehmen, ob der Rückstau infolge der Verklauung von Schwemmholz auf der Wehrkrone oder an den Wehrpfeilern verursacht wird. Die vorliegende Studie geht ausschliesslich auf die Auswirkungen einer Verklauung an den Wehrpfeilern ein.

Die gute Übereinstimmung der vorliegenden Daten mit den Daten von Hartlieb (2015), Schmocker (2017) und Bénet et al. (2021) zeigt, dass das den Versuchen zugrunde liegende Konzept gerechtfertigt ist. Die infolge der systematischen Zugabe ordentlich an den Wehrpfeilern

ausgerichteten Stämme verursachen höhere Wasserspiegelanstiege  $\Delta H_{max}$  durch eine dichtere Packung (die Porosität  $n$  kann grob mit 0.3...0.4 abgeschätzt werden), als die komplexen, wahrscheinlich poröseren Schwemmholzansammlungen mit zufällig ausgerichteten Stämme der Untersuchungen von Hartlieb (2015) und Bénet et al. (2021). Weder Hartlieb (2015) noch Bénet et al. (2021) gehen auf die Porosität ein. In der vorliegenden Untersuchung wurde die Porosität in einer Analogiebetrachtung zu Lochblechen und visuell grob abgeschätzt. Werden publizierte Werte von komplexen Modell-Schwemmholzansammlungen an Brückenpfeilern mit Stammhölzern von Spreitzer et al. (2020) hinzugezogen – sie haben zur Ermittlung von  $V_L$  ein bildbasiertes, 2.5D digitalisiertes Oberflächenmodell des Verklauungskörpers eingesetzt – sind Porositäten  $n = 0.6...0.7$  für die Verklauungskörper der Versuche von Hartlieb (2015) und Bénet et al. (2021) durchaus denkbar und der geringere Wasserspiegelanstieg damit erklärbar. Im Sinne einer eher konservativen Gefahrenbetrachtung ist folglich das vorliegende Verfahren zur Berechnung von  $\Delta H_{max}$  zur Anwendung empfohlen.

Prozesse mit Schwemmholz weisen natürlicherweise eine grosse Zufallsabhängigkeit auf. Die systematische Zugabe des Schwemmholzes konnte diesen Anteil reduzieren. Ein Lastfall wurde denn auch im Experiment nur einmal durchgeführt und nicht wiederholt. Konsequenterweise müssten die Versuche für eine statistische Signifikanz diverse Male wiederholt werden, was nicht in den Rahmen der vorliegenden Untersuchung gepasst hat.

In der vorliegenden Untersuchung wurde die Schwemmholzdichte nicht variiert. Es können daher keine quantitativen Aussagen über den Einfluss der Dichte auf den Wasserspiegelanstieg getroffen werden. Je dichter ein Schwemmholz, desto grösser ist das Verhältnis der Schwer- zur Auftriebskraft und desto kleiner ist die von aussen auf den Stamm einwirkende benötigte Kraft, um den Stamm unter eine bereits bestehende Verklauung zu ziehen. In dieser Untersuchung wurde eine Schwemmholzdichte von rund 780 – 840 kg/m<sup>3</sup> verwendet, was einer hohen Dichte von nasen, waldfrischen Nadelbäumen entspricht.

Bei grossem Stammdurchmesser  $D$  nimmt der Abwärtssog zu, da der piezometrische Druck infolge der höheren Abflussgeschwindigkeiten entlang der Unterseite des an den Wehrpfeilern verklauten Stammes im Vergleich zu kleinerem  $D$  stärker abfällt. Diese hydrodynamischen Kräfte ziehen den Stamm unter die Wasseroberfläche. Sie sind jedoch sehr schwierig zu berücksichtigen, denn Strömungsablösungen können intermittierende Auf- und Abtriebskräfte generieren und Nachbarstämme das Strömungsfeld beeinflussen. Damit sind diese Strömungskräfte auch von Zufallsprozessen abhängig. In den Versuchen der VAW scheint die Porosität des aus Stammhölzern gebildeten Verklauungskörpers mit zunehmendem  $D$  grösser zu werden, was einen gegenteiligen Einfluss auf den Wasserspiegelanstieg im Vergleich zur Zunahme der Eintauchtiefe mit  $D$  hätte. Im Rahmen dieser Untersuchung resp. der Datenanalyse ist keine wesentliche Signifikanz des Stammdurchmessers auf den Wasserspiegelanstieg erkannt worden und  $D$  geht daher nicht in die Gleichungen zur Berechnung von  $\Delta H_{max}$  ein. Die Experimente wurden mit entasteten Schnitthölzern mit uniformem Stammdurchmesser  $D_m = 0.20, 0.37$  und  $0.54$  m durchgeführt.

Eine systematische Untersuchung zur Ausbildung der Eintauchtiefe  $t_H$  in Abhängigkeit der Schwemmholzdichte  $\rho$  und des Stammdurchmessers  $D$  ist ausstehend. Neue Erkenntnisse aus weiterführender Forschung in diesem Bereich könnten gut in das vorliegende, schrittweise Vorgehen zur Ermittlung des Wasserspiegelanstiegs integriert werden. Die Berechnung des lichten Abstandes  $a$  sowie des daraus resultierenden Wasserspiegelaufstaus  $\Delta H_{max}/H_o$  kann unabhängig von der verwendeten Eintauchtiefenabschätzung angewendet werden.

Der Schwemmholzrückhalt an einem vorgelagerten Schwemmholzrechen unterscheidet sich kaum vom Schwemmholzrückhalt an auskragenden Wehrpfeilern. Das ermittelte Vorgehen kann daher auch auf einen vorgelagerten Schwemmholzrechen anstelle von auskragenden Wehrpfeilern angewendet werden. Die gewonnenen Erkenntnisse zum Wasserspiegelaufstau in Abhängigkeit des lichten Abstandes  $a$  für komplett dichte Verklausungen sind ebenfalls nutzbar zur optimalen Platzierung einer Tauchwand, sowohl bezüglich Distanz zum Wehrkronenscheitel als auch bezüglich Eintauchtiefe. Hierbei ist die Gl. (19) für eine komplett dichte Verklausung anzuwenden. Es hat sich gezeigt, dass für  $a \geq 0.85 \cdot H_o$  lediglich ein moderater Aufstau generiert wird ( $\Delta H_{max}/H_o < 10\%$  bezogen auf Gl. (19)).

Oft ist es schwierig, den Feinmaterialanteil einer Verklausung abzuschätzen, speziell, wenn die Verklausung noch nicht aufgetreten ist. Anhand der vorliegenden Ergebnisse für verschiedene Porositäten kann jedoch relativ simpel eine Sensitivitätsanalyse für  $n \leq \text{ca. } 0.4$  erstellt und der Einfluss von möglicherweise vorhandenem Feinmaterial des Anteils  $m$  auf den Aufstau quantifiziert werden. Das Vorgehen ist in Abschnitt 7.2 dargestellt. Die in dieser Studie verwendete Abstraktion einer Schwemmholzverklausung mit Feinmaterialanteil durch ein Lochblech führt jedoch unweigerlich zu systematischen Fehlern, da sich die Hydraulik an einem 2-dimensionalen Blech mit regelmässig verteilten Löchern anders ausbildet als an einem 3-dimensionalen Verklausungskörper bestehend aus Rundhölzern. Die Geschwindigkeits- und Druckverteilung am Verklausungskörper wird mit einem Lochblech wohl nicht adäquat abgebildet, was zu Abweichungen im Wasserspiegelaufstau führen kann. Nichtsdestotrotz können aus den hier gewonnenen Resultaten wertvolle Erkenntnisse abgeleitet und angewendet werden.

Das in Kapitel 7 vorgeschlagene Verfahren zur Berechnung von  $\Delta H_{max}$  baut in einem ersten Schritt darauf auf, die Oberflächengeschwindigkeit  $v_s$  zu berechnen. Der Gültigkeitsbereich dieser Gleichung ist eingeschränkt, wenn der Wasserspiegelanstieg infolge Verklausung nicht an einem USACE-Standardwehr zu ermitteln ist. Insbesondere bei langgezogenen Wehrüberfällen – «langgezogen» impliziert dabei eine geringe Überfallhöhe  $H_o$  im Bemessungslastfall in Relation zur effektiven Bemessungsgrösse resp. zur Länge des oberwasserseitigen Quadranten des Überfallprofils – konvergieren die Stromlinien in der Zuströmung hin zum Wehrkronenscheitel nur moderat, weshalb sich kleinere Fließgeschwindigkeiten im Bereich des Wehrkronenscheitels im Vergleich zum Standardwehr einstellen. Dennoch kann das Verfahren angewendet werden. Es wird insbesondere in Situationen mit moderaten relativen Pfeilerauskragungen  $P_K$  ca.  $< 0.6$  den

Wasserspiegelanstieg konservativ abschätzen. Der lichte Abstand  $a$  ist dann grafisch anhand einer Skizze am Querschnitt der Wehrkrone zu ermitteln.

Folgende grundlegende Kenngrößen bezüglich Schwemmholzverklausung an Wehrpfeilern eines Mauerüberfalls können aus der vorliegenden Untersuchung abgeleitet werden:

- Bei einer Pfeilerauskrugung von  $p_K \geq H_o$  beträgt der Wasserspiegelanstieg auch bei komplett dicht verlegter Verklausung  $\Delta H_{max}/H_o < 0.1$ .
- Bei einem lichten Abstand von  $a > 0.7 \cdot H_o$  und Porositäten des Verklausungskörpers von ca.  $n = 0.3 \dots 0.4$  beträgt der Wasserspiegelanstieg  $\Delta H_{max}/H_o < 0.1$ , bei  $a > 0.85 \cdot H_o$  gilt unabhängig von  $n$   $\Delta H_{max}/H_o < 0.1$  (Abb. 6-15).
- Wird Schwemmholz in einem Bereich mit Fließgeschwindigkeiten kleiner als 1 m/s zurückgehalten, bildet sich ein loser Schwemmholzteppich (s. Abb. 6-9).
- Vom Schwemmholzurückhalt an Pfeilernasen, die auf dem Wehrkronenscheitel ohne Auskrugung liegen ( $p_K = 0$ ), ist strikt abzuraten. Der Rückhalt erfolgt dann in Zonen hoher Fließgeschwindigkeiten ohne genügenden Abstand zur Entlastungsöffnung. Dieser Fall trat beim Vorfall an der Staumauer Palagnedra ein (Abschn. 1.1). Ebenfalls kritisch und zu verhindern sind Situationen mit  $a/H_o < 0.3$ , da nur noch eine geringe freie Durchflussfläche für die sichere Ableitung des Hochwassers vorhanden ist.

## 7 Beurteilung der Schwemmholzsituation am Mauerüberfall

Um die Schwemmholzsituation am Mauerüberfall einer Talsperre zu beurteilen und einen sicheren Schwemmholzrückhalt in genügendem Abstand zum Mauerüberfall und in Bereichen geringer Fliessgeschwindigkeit nachzuweisen, müssen verschiedene Szenarien und Einflussfaktoren berücksichtigt werden. Ob das ankommende Schwemmholz am bestehenden Mauerüberfall verkleaut, ist nicht zuletzt stark vom Schwemmholz selbst abhängig. Oft sind die Eigenschaften des ankommenden Schwemmholzes jedoch nicht genau bekannt. Dazu zählen sowohl geometrische Eigenschaften wie Längenverteilung oder Verastungsgrad der Stämme, als auch die Transportart, respektive die Gruppengrösse des ankommenden Schwemmholzes oder die Schwemmholzmenge. Der Transport des ankommenden Schwemmholzes in einem zusammenhängenden Teppich oder das Vorhandensein einzelner langer Stämme kann meist nicht ausgeschlossen werden. Beides führt, wie in Kapitel 5 gezeigt, zu einer deutlichen Erhöhung der Verkleaungswahrscheinlichkeit. Konservativ muss daher davon ausgegangen werden, dass eine komplette Durchleitung des anfallenden Schwemmholzes nicht gewährleistet ist und ein Teil des ankommenden Schwemmholzes am Mauerüberfall verkleaut. Da bereits eine sehr kleine Menge an verkleautem Holz zum Hauptanteil des möglichen Wasserspiegelaufstaus führt (s. Abschn. 6.3.2), muss davon ausgegangen werden, dass genügend Schwemmholz verkleaut, um den maximalen Wasserspiegelaufstau (Abschn. 6.3.4) zu verursachen.

Im Folgenden ist das aus dieser Studie abgeleitete Berechnungsverfahren dargestellt, um den maximal zu erwartenden Wasserspiegelaufstau  $\Delta H_{max}$  infolge einer Verkleaung der Wehrpfeiler zu ermitteln und, im Falle eines unzulässigen Wasserspiegelaufstaus, die Abmessungen geeigneter Massnahmen festzulegen. Das Verfahren ist mit einem Berechnungsbeispiel veranschaulicht.

### 7.1 Voraussetzungen

Zuerst ist eine Fallunterscheidung vorzunehmen, ob Schwemmholz auf der Wehrkrone liegend verkleauten kann ( $D_{max}/H_o \geq 0.35$ ; s. Bénet et al (2020) in Abschn. 2.2), oder der Rückstau durch an den Wehrpfeilern verkleauten Schwemmholz bewirkt wird. Die vorliegende Studie geht ausschliesslich auf die Auswirkungen einer Verkleaung an den Wehrpfeilern ein. Kann eine Verkleaung auf der Wehrkrone nicht ausgeschlossen werden, so muss von einem zusätzlichen Wasserspiegelaufstau ausgegangen werden.

Eine grundlegende Voraussetzung zur Anwendung des beschriebenen Vorgehens zur Abschätzung des Wasserspiegelaufstaus ist die Lage des Mauerüberfalls auf einer Talsperre mit reservoirtypischen Zuströmgeschwindigkeiten. Es ist daher nicht geeignet für Wehre mit flussähnlichen Zuströmbedingungen.

Das in Abschn. 7.2.1 beschriebene Vorgehen ist am USACE-*Standardwehr* entwickelt worden und gut anwendbar auf Wehrtypen mit konvex gekrümmtem Überfallprofil. Die Abschätzung des Wasserspiegelaufstaus in vier Berechnungsschritten baut nämlich im ersten Schritt auf der Berech-

nung der Oberflächengeschwindigkeit auf. Die Gültigkeit der Gl. (9) zur Bestimmung der Oberflächenfliessgeschwindigkeit ist im Wehrkronenbereich eingeschränkt, wenn der oberwasserseitige Quadrant des Überfallprofils stark von jenem des USACE-Profiles abweicht. Insbesondere bei hydraulisch langezogenen Überfallprofilen stellen sich kleinere Fliessgeschwindigkeiten im Wehrkronenbereich ein, wohingegen die Oberflächengeschwindigkeiten im Fernbereich sehr gut mit der Berechnung nach Gl. (9) übereinstimmen. Das vorgestellte Verfahren ist demnach auch auf langezogene Überfälle anwendbar, solange die Resultate in den richtigen Kontext gestellt werden. In direkter Anwendung des Verfahrens wird tendenziell ein zu hoher Wasserspiegelaufstau ermittelt, wodurch die Berechnung als eher konservativ einzustufen ist. Ein langgezogener Wehrüberfall wird als Berechnungsbeispiel im Abschn. 7.3 behandelt. Bei Anwendung des Berechnungsverfahrens am scharfkantigen Wehr ist der Pseudo-Wehrkronenscheitel als Bezugspunkt an der Stelle der maximalen Sprunghöhe der unteren Strahltrajektorie zu definieren ( $c_E = 0.2818 \cdot H_o$ ). Ein ähnliches Vorgehen ist am Zylinderwehr empfohlen. Hingegen eignet sich das Verfahren zur Bestimmung des Wasserspiegelaufstaus weniger für breitkronige Wehre, da die Lage des Kontrollquerschnitts auf dem breitkronigen Wehr durchflussabhängig ist.

Die folgenden Angaben beschreiben die Eigenschaften des in dieser Studie verwendeten Holzes. Die Anwendung der ermittelten Gleichungen ist somit nur für die beschriebenen Parameterbereiche gültig. Die Experimente wurden mit entasteten Schnitthölzern mit uniformem Stammdurchmesser  $D$  durchgeführt. Es wurden drei Holzklassen mit den mittleren Durchmessern  $D_m = 0.20, 0.37$  und  $0.54$  m eingesetzt. Die Holzdichte  $\rho = 779, 843$  und  $817$  kg/m<sup>3</sup> wurde durch die vorgängige Wässerung der drei Holzklassen an jene der dichtesten Hölzer hochgelegener, alpiner Bergwälder angepasst. Durch die systematische Einzelzugabe von Hölzern wurden relativ dicht gepackte Verkläusungskörper beobachtet, die sich durch parallel zur Wehrkrone an den Wehrpfeilern ausgerichteten und übereinander aufgetürmten Hölzern ergaben. Die Porositäten dieser Verkläusungskörper wurden nicht exakt bestimmt, liegen aber tendenziell im Bereich von  $n = 0.3 \dots 0.4$  für die Holzklassen mit  $D_m = 0.20$  und  $0.37$  m. Damit wurden Porositäten im physikalischen Modellversuch mit Stammhölzern erreicht, die im Bereich des Medians von  $n = 0.35$  von natürlich gebildeten Schwemmholzansammlungen in Flüssen liegen (Livers & Wohl, 2021). Bei letzteren sind die Stämme im Verkläusungsmuster jedoch zufällig ausgerichtet. Solche Ansammlungen weisen im Experiment ohne die Zugabe von Feinmaterial eher Porositäten im Bereich von  $n \approx 0.6 \dots 0.7$  auf (Spreitzer et al., 2020). D.h. die Porosität  $n = 0.35$  wird in der Natur durch die Verlegung der Hohlräume durch Feinmaterial des Anteils  $m$  und in der vorliegenden Studie durch die systematische Holzzugabe erwirkt. Folglich wird der mit folgendem Ansatz berechnete Wasserspiegelaufstau repräsentativ für Verkläusungen der Porositäten  $n \approx 0.3 \dots 0.4$  und den oben genannten Holzeigenschaften erachtet. Es wird empfohlen, Schritt 5 im folgenden Vorgehen im Sinne einer Sensitivitätsanalyse anzuwenden, um den Einfluss von Porositäten  $n < ca. 0.3 \dots 0.4$  auf den Wasserspiegelanstieg zu beurteilen.

## 7.2 Berechnungsverfahren

In Abb. 7-1 sind die wesentlichen Parameter zur Berechnung des maximalen Wasserspiegelaufstaus  $\Delta H_{max}$  definiert.

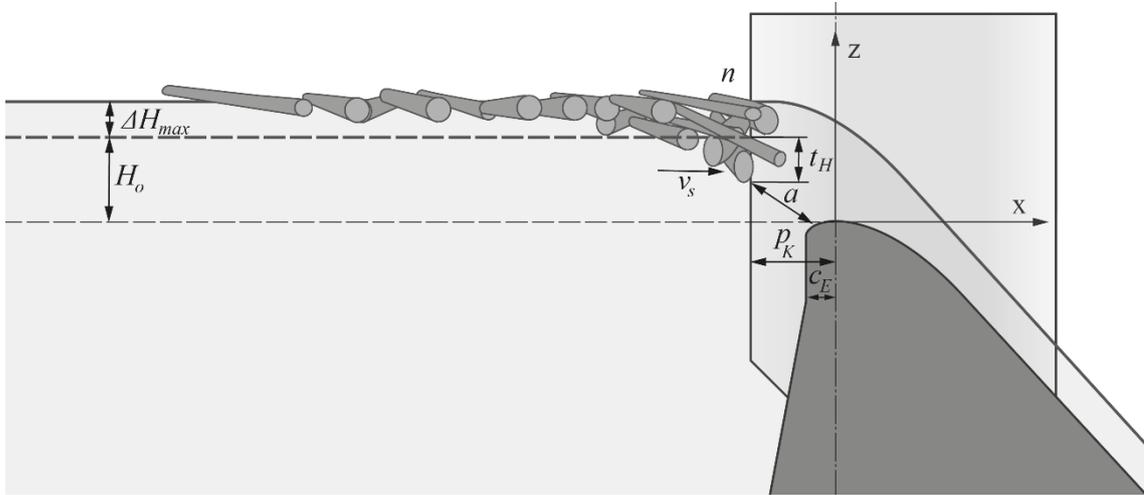


Abb. 7-1 Definitionsskizze der wesentlichen Parameter zur Berechnung des maximalen Wasserspiegelaufstaus  $\Delta H_{max}$  infolge der Verkläuerung von Schwemmholz an den Wehrpfeilern.  $H_o$ : Überfallhöhe im unverkläuten Zustand (Referenzzustand),  $\Delta H_{max}$ : maximaler Wasserspiegelaufstieg infolge Verkläuerung,  $v_s$ : Referenz-Oberflächengeschwindigkeit an der Pfeilernase,  $p_K$ : Pfeilerauskrägung bezogen auf den Wehrkronenscheitel,  $c_E$ : horizontale Distanz zw. Wehrkronenscheitel und Mauerfront (resp. grosse Halbachse des oberwasserseitigen Quadranten),  $t_H$ : Eintauchtiefe des Verkläuerungskörpers an der Pfeilernase bezogen auf die Referenzwasserspiegellage,  $a$ : lichter Abstand zw. UK Verkläuerungskörper und wasserseitigem Quadranten des Überfallprofils und  $n$ : Porosität des Verkläuerungskörpers

### 7.2.1 Ermittlung des maximalen Wasserspiegelaufstaus

Die in der vorliegenden Studie vorgeschlagene Berechnung des Wasserspiegelaufstaus  $\Delta H_{max}$  infolge der Verkläuerung von Schwemmholz an den Wehrpfeilern eines Mauerüberfalls erfolgt im Wesentlichen in vier Schritten. Dabei gehen als Eingangsparameter die grosse Halbachse der Ellipse des oberwasserseitigen Quadranten  $c_E$  (s. Anhang A1), die Pfeilerauskrägung  $p_K$  und die Überfallhöhe  $H_o$  im unverkläuten Zustand in die Berechnung ein.

In einem fünften Schritt wird das Vorgehen zur Ermittlung des Wasserspiegelaufstaus  $\Delta H_{max}$  für Verkläuerungskörper mit geringer Porosität  $n < 0.3$  aufgezeigt.

1. Berechnung der normierten Oberflächengeschwindigkeit  $v_{sn}$  auf Höhe der Pfeilernase unter Verwendung von  $P_K = p_K/H_o$  (Abb. B-4). Nach Gl. (9) gilt für  $0 \leq P_K \leq 2$  (s. Abschn. 4.2)

$$v_{sn} = \frac{v_s}{\sqrt{2gH_o}} = 0.5 \cdot e^{-\frac{2}{3}P_K}$$

2. Berechnung der relativen Eintauchtiefe der Verklausung  $T_H = t_H/H_o$  in Abhängigkeit von  $v_{sn}$  nach Gl. (14), siehe Abschnitt 6.3.3

$$T_H = 1.82 \cdot v_{sn} = 0.91 \cdot e^{-\frac{2}{3} p_K}$$

3. Berechnung des lichten Abstands  $a$  zwischen der Unterkante des Verklausungskörpers auf Höhe der Auskragung  $p_K$  und dem wasserseitigen Quadranten des Überfallprofils nach Gl. (5), siehe auch Anhang A1

$$a = \sqrt{\left(p_K - \frac{2}{3}k\right)^2 + \left(H_o - t_H + \frac{c_E - \sqrt{c_E^2 - \frac{4}{9}k^2}}{2}\right)^2} \quad \text{für } p_K \geq 0$$

mit  $k = p_K$  für  $0 \leq p_K \leq c_E$  oder  $k = c_E$  für  $p_K > c_E$

Für vom *Standardwehr* abweichende Überfallprofile empfiehlt sich die grafische Ermittlung von  $a$  anhand einer Skizze am Querschnitt der Wehrkrone.

Besteht der wasserseitige Quadrant des Überfallprofils aus einem Kreisbogen, so kann die Gl. (29) aus Anhang A1 verwendet werden.

4. Berechnung des relativen maximalen Wasserspiegelaufstaus  $\Delta H_{max}/H_o$  in Abhängigkeit von  $a/H_o$  nach Gl. (16), siehe auch Abschnitt 6.3.4

$$\frac{\Delta H_{max}}{H_o} = 1.5e^{-4.2\frac{a}{H_o}} \quad \text{für } a/H_o \geq 0.3$$

Beträgt  $a/H_o < 0.3$ , so wird  $\Delta H_{max}/H_o$  unter Verwendung dieser Gleichung deutlich überschätzt. Eine Situation mit  $a/H_o < 0.3$  ist jedoch grundsätzlich unerwünscht, da ein grosser Wasserspiegelaufstau droht (Abschn. 6.5.2).

Sensitivitätsanalyse:

5. Die Abschätzung des maximalen relativen Wasserspiegelaufstaus  $\Delta H_{max}/H_o$  für Porositäten  $n < 0.3$  erfolgt grafisch mit Abb. 7-2 oder für  $n = 0$  nach Gl. (19) (Abschn. 6.3.6). Dazu sind vorgängig die Schritte 1. bis 3. für die Berechnung des Wertes  $a/H_o$  durchzuführen, um einen von zwei notwendigen Eingangswerte für die Anwendung der Abb. 7-2

zu erhalten. Der berechnete Wert  $a/H_o$  gilt für einen sehr kompakten Verkläusungskörper mit einem Auflockerungsfaktor von  $AF = 1.67$ , der ohne Feinmaterial eine Porosität  $n = 0.4$  gemäss vorliegender Studie aufweist (Abschn. 6.3.6). Die sich ausbildende Porosität  $n$  bei Verlegung der Hohlräume durch Feinmaterial des Anteils  $m$  am Feststoffvolumen bei gleichbleibendem Stammholzvolumen  $V_{vS}$  resp. Auflockerungsfaktor  $AF$  kann anhand Gl. (3) aus Abschnitt 2.3 wie folgt berechnet werden:

$$n = 1 - \frac{V_{vS}}{V_L \cdot (1-m)} = 1 - \frac{1}{AF \cdot (1-m)} = 1 - \frac{1}{1.67 \cdot (1-m)}$$

Wird nun beispielsweise ein Feinmaterialanteil  $m = 0.25$  angenommen, so reduziert sich die Porosität  $n$  aufgrund des Festsetzens des Feinmaterials in den Hohlräumen zu  $n = 0.2$ . Der relative Wasserspiegelaufstau  $\Delta H_{max}/H_o$  eines Verkläusungskörpers mit  $AF = 1.67$  und Feinmaterialanteil  $m = 0.25$  kann nun mit Abb. 7-2 auf der Kurve für  $n = 0.2$  grafisch ermittelt werden.

Dieses Vorgehen zur groben Abschätzung von  $\Delta H_{max}/H_o$  ist im Bereich für  $a/H_o > 0.3$  und für  $n < 0.3$  zulässig.

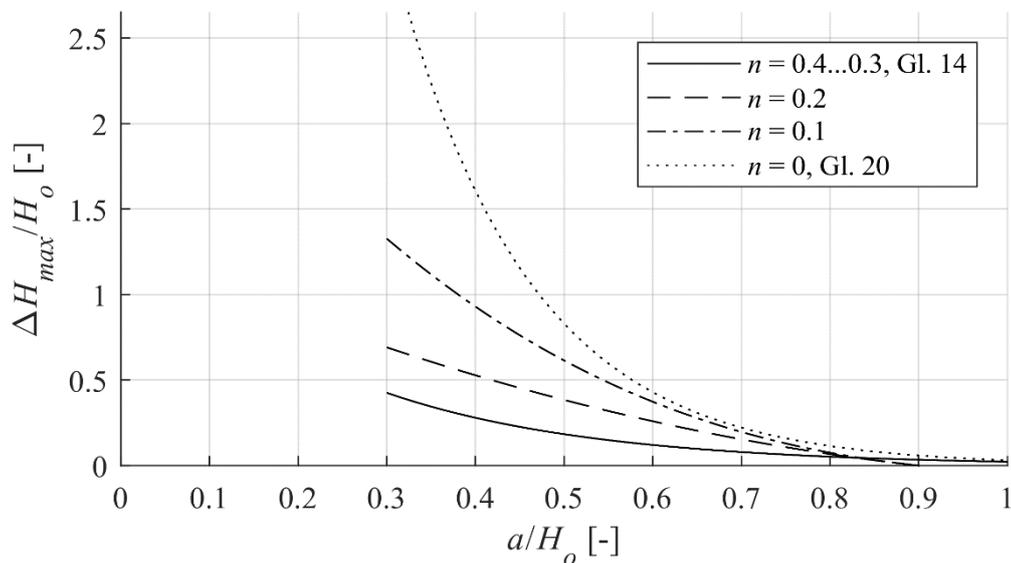


Abb. 7-2 Maximaler relativer Wasserspiegelaufstau  $\Delta H_{max}/H_o$  in Funktion des mit  $H_o$  normierten, lichten Abstandes  $a$ , für Porositäten  $n = 0, 0.1, 0.2$ , und  $0.3 \dots 0.4$ .

## 7.2.2 Bemessung von Schwemmholzrückhaltmassnahmen

Resultiert aus dem beschriebenen Verfahren in Abschn. 7.2.1 kein signifikanter Wasserspiegelaufstau, so ist der Schwemmholzrückhalt in einem Bereich geringer Fliessgeschwindigkeit und mit ausreichendem Abstand zur Entlastungsvorrichtung gewährleistet.

Fällt der Wasserspiegelaufstau jedoch zu gross aus oder beträgt  $a/H_o < 0.3$ , so kann der Sicherheitsnachweis bezüglich Schwemmholzverklausungen am Mauerüberfall möglicherweise nicht erbracht werden. In diesem Fall sind gemäss BFE-Richtlinie [2] vorbeugende Massnahmen zu treffen.

Wird als Massnahme ein Schwemmholzrechen oder das Anbringen auskragender Wehrpfeiler geplant, so kann zur hydraulischen Dimensionierung das in Abschn. 7.2.1 aufgezeigte Verfahren angewendet werden. Im Wesentlichen ist die Auskragung  $p_K$  so zu wählen, sodass sich bei einer Verklausung kein signifikanter Wasserspiegelaufstau einstellt. Dazu wird für eine frei wählbare Auskragung  $p_K$  der Wasserspiegelaufstau gemäss den Schritten 1. bis 4. berechnet und auf Sensitivität mit Schritt 5. überprüft. Konservativ kann auch lediglich mit dem ersten Berechnungsschritt jenes  $p_K$  bestimmt werden, so dass  $v_s \leq 0.8$  m/s.

Wird als Massnahme hingegen eine Tauchwand geplant, so weicht die Vorgehensweise leicht davon ab. Für die Berechnung des Wasserspiegelaufstaus aufgrund einer Tauchwand verändert sich das Vorgehen leicht aufgrund der Tatsache, dass sowohl die Schwemmholzverklausung als auch die Tauchwand selbst betrachtet werden müssen. Bei der Planung einer Tauchwand ist sowohl die Auskragung  $p_K$  (Distanz der Tauchwand zur Wehrkrone) als auch die Eintauchtiefe der Tauchwand  $t_L$  frei wählbar. Anhand der Schritte 1. und 2. soll sichergestellt werden, dass die gewählte Eintauchtiefe der Tauchwand  $t_L > t_H$  gilt und somit genügend gross ist, um ein durchtauchen der Stämme unter der Tauchwand zu verhindern. Im 3. Schritt kann unter Verwendung von  $t_L$  anstelle von  $t_H$  der lichte Abstand  $a$  der Tauchwand zum Wehrkörper bestimmt werden. Zur Berechnung des Wasserspiegelaufstaus aufgrund der Tauchwand kann nun direkt Schritt 5. unter Verwendung der Gl. (19) für  $n = 0$  angewendet werden. An der Tauchwand zurückgehaltenes Schwemmholz bildet einen Schwemmholzteppich, der keinen signifikanten Einfluss auf den Wasserspiegelaufstau hat.

### 7.3 Berechnungsbeispiel

Zur Erhöhung der Abflusskapazität eines *Standardwehrs* ist die Dimensionierungshöhe  $H_D$  üblicherweise kleiner als die Überfallhöhe  $H_o$  des BHQ angesetzt. Es resultiert folglich  $\chi_{BHQ} > 1$ . Je nach Gegebenheiten liegt die Priorisierung im Entwurf des Überfalls nicht in der Ausreizung einer möglichst hohen Abflusskapazität (sie geht zu Lasten einer Erhöhung des Risikos einsetzender Kavitation), sondern in einer optimalen baulichen Integration des Wehrs in den Mauerkörper. Z.B. werden die Hochwasserabflüsse an der Talsperre *Ova Spin* über das am Fusse der Mauer situierte Maschinenhaus geleitet (Abb. 2-2), was zu einem sehr langgezogenen Überfall in Bezug zur Überfallhöhe des Bemessungshochwassers führt (Abschn. 3.2). Die Situation am Mauerüberfall *Ova Spin* wird nachfolgend verwendet, um beispielhaft die Berechnung des relativen Wasserspiegelaufstaus  $\Delta H_{max}/H_o$  nach dem in Abschnitt 7.2.1 vorgestellten Berechnungsverfahren für ein Wehr mit langgezogener Wehrkrone aufzuzeigen.

Die Talsperre *Ova Spin* ist eine Bogenstaumauer und weist daher eine im Grundriss gekrümmte Wehrkrone auf. Der Radius  $R = 60$  m dieses Bogens geht als Eingangsparameter in die Berechnung der Pfeilerauskrugung  $p_K = 4.37$  m ein, die sich aus dem arithmetischen Mittel von  $p_{K,Pf} = 4.40$  m (Abb. 2-3a) und  $p_{K,WA} = 4.34$  m ergibt (Abb. 3-4). Die Reduktion der freien Durchflussfläche unter dem Verkläusungskörper infolge der moderat gekrümmten Wehrkrone ist damit berücksichtigt (Abschn. 3.3.2). Dieser Berechnungsschritt erübrigt sich bei geradlinigen Wehren und könnte aufgrund der geringen Krümmung auch im Beispiel *Ova Spin* vernachlässigt werden.

Das Profil des wasserseitigen Quadranten des Wehrs *Ova Spin* ist ein Kreisbogen. Im vorliegenden Beispiel gehen damit der Radius  $r = 1.91$  m und der Zentriwinkel des Sektors  $\alpha = 79^\circ$  als Eingangsparameter in die Berechnung des lichten Abstandes  $a$  unter Verwendung der Gl. (29) ein (Abb. 3-2a).

Das Berechnungsbeispiel wird für den Nachweis des Bemessungshochwassers durchgeführt, bei dem  $204 \text{ m}^3/\text{s}$  über den Mauerüberfall bei einer Überfallhöhe  $H_o = 2.04$  m im unverklausten Zustand abzuführen sind.

1. Berechnung der normierten Oberflächengeschwindigkeit  $v_{sn}$  auf Höhe der Pfeilernase mit relativer Auskrugung  $P_K = p_K/H_o$ . Die Form der Stromlinien im Zulauf zur Wehrkrone wird beim Wehr *Ova Spin* durch die Form des langezogenen oberwasserseitigen Quadranten des Wehrkörpers vorgegeben. Die Gleichung zur Bestimmung der normierten Oberflächengeschwindigkeit ist beim Wehr *Ova Spin* nur für  $0.6 \leq P_K \leq 2$  gültig. Damit ist der Gültigkeitsbereich der Gleichung im Vergleich zum *Standardwehr* eingeschränkt.

$$v_{sn} = \frac{v_s}{\sqrt{2gH_o}} = 0.5 \cdot e^{-\frac{2}{3}P_K} \quad \text{für } 0.6 \leq P_K \leq 2$$

#### Berechnungsbeispiel *Ova Spin*:

$$P_K = p_K/H_o = 4.37 \text{ m}/2.04 \text{ m} = 2.14, \quad v_{sn} = 0.12, \quad v_s = \mathbf{0.76 \text{ m/s}}$$

*Bemerkung:* Bei einer Oberflächengeschwindigkeit von  $0.76 \text{ m/s}$  auf Höhe der Pfeilernasen türmt sich angeschwemmtes Schwemmholz an den Wehrpfeilern nicht auf, da  $v_s < 0.8 \dots 1.0 \text{ m/s}$  (Abschn. 6.3.3 und 6.4). Es bildet sich ein loser Schwemmholzteppich. Es ist ein sehr geringer Wasserspiegelanstieg  $\Delta H_{max}$  zu erwarten.

2. Berechnung der relativen Eintauchtiefe der Verkläusung  $T_H = t_H/H_o$  in Abhängigkeit von  $v_{sn}$

$$T_H = 1.82 \cdot v_{sn}$$

Berechnungsbeispiel Ova Spin:  $T_H = 1.82 \cdot 0.12 = 0.22$ ,  $t_H = \mathbf{0.45}$  m

*Bemerkung:* Die Mächtigkeit des Verklauungskörpers an den Pfeilern misst ca. 1...2-mal den Stammdurchmesser. Es werden folglich keine Schwemmhölzer mehrlagig übereinander an den Wehrpfeilern aufgetürmt (Abb. 6-9).

3. Berechnung des lichten Abstands  $a$  zwischen der Unterkante des Verklauungskörpers auf Höhe der Auskragung  $p_K$  und dem wasserseitigen Quadranten des Überfallprofils gemäss Gl. (29), siehe auch Anhang A1:

$$a = \sqrt{\left(p_K - \frac{2}{3}r \sin \alpha\right)^2 + \left(H_o - t_H + r \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4}{9}(\sin \alpha)^2}\right)\right)^2}$$

Berechnungsbeispiel Ova Spin: für  $p_K = 4.37$  m,  $r = 1.91$  m,  $\alpha = 79^\circ$ ,  $H_o = 2.04$  m und  $t_H = 0.45$  m resultiert  $a = 3.74$  m und  $a/H_o = \mathbf{1.83}$

*Bemerkung:* Mit einem relativen lichten Abstand von  $a/H_o = 1.83$  steht genügend Durchflussfläche zur Verfügung und das Wasser fliesst unbehindert unter dem Schwemmholzteppich auf die freien Wehröffnungen zu (Abschn. 6.5.2).

4. Berechnung des relativen maximalen Wasserspiegelaufstaus  $\Delta H_{max}/H_o$  in Abhängigkeit von  $a/H_o$

$$\frac{\Delta H_{max}}{H_o} = 1.5e^{-4.2\frac{a}{H_o}} \quad \text{für } a/H_o \geq 0.3$$

Berechnungsbeispiel Ova Spin: für  $a/H_o = 1.83$  resultiert  $\Delta H_{max}/H_o = \mathbf{0.0}$ ,  $\Delta H_{max} = 1.4$  mm

*Bemerkung:* Im Modellversuch konnte kein Aufstau ermittelt werden, da die Messwerte innerhalb der Messgenauigkeit lagen. Der berechnete relative Wasserspiegelaufstieg wird minimal, da die Exponentialfunktion mit zunehmendem  $a/H_o$  rasch gegen Null konvergiert.

Analyse *Ova Spin*

Die lichte Breite der Hochwasserentlastungsöffnungen auf Höhe der Pfeilernasen des Mauerüberfalls *Ova Spin* genügt den Anforderungen zum sicheren Durchleiten von Schwemmholz nicht. Damit ist von einer erhöhten Verklausungsgefahr auszugehen. Es muss nachgewiesen werden, dass trotz verklauster Hochwasserentlastung das Bemessungshochwasser sowie das Sicherheitshochwasser unter Einhaltung der maximal zulässigen Seestandskoten abgeführt werden kann. Dieser Nachweis ist an der Talsperre *Ova Spin* erbracht, da die weit ins Oberwasser auskragenden Brückenpfeiler das Schwemmholz in Bereichen geringer Geschwindigkeiten von der Wehrkrone fernhalten. Selbst kürzere auskragende Wehrpfeiler, bei denen die Pfeilernasen auf Höhe der Mauerfront zu liegen kämen ( $p_K = 2.08$  m, Tab. 3-1), würden lediglich einen rechnerischen zusätzlichen Aufstau von 7.4 cm bei  $H_o = 2$  m bewirken (Messwert 6 cm, Tab. C- 1). Die Oberflächengeschwindigkeit auf Höhe der Pfeilernasen wäre dabei zwar 1.6 m/s und die Strömungskräfte würden ein Auftürmen der Schwemmhölzer an den Wehrpfeilern bewirken ( $t_H = 0.91$  m). Die zur Verfügung stehende, freie Durchflussfläche zwischen dem Verklausungskörper und dem Wehr  $a/H_o = 0.9$  wäre jedoch nach wie vor genügend gross, um den Wasserspiegelanstieg gering zu halten.

## 8 Schlussfolgerungen

### *Hydraulik*

- Die Geschwindigkeitsverteilungen im Bereich auf und vor der Wehrkrone eines Mauerüberfalls können annähernd auf ein gemeinsames Grundprofil transformiert werden und sind demnach annähernd selbstähnlich abgebildet (Anhang B1). Die Oberflächenfließgeschwindigkeit  $v_s$  auf Höhe der Pfeilernasen lässt sich somit einfach in Beziehung zur Überfallhöhe  $H_o$  und Pfeilerauskrägung  $p_K$  mit Gl. (9) setzen.
- Unterschiedliche Überfallprofile beeinflussen das Geschwindigkeits-Grundprofil unmittelbar im Kronen-, hingegen kaum im Fernbereich. In der vorliegenden Fallstudie eines langgezogenen Überfalls, der Mauerüberfall der Talsperre *Ova Spin* der EKW, beginnen die normierten Geschwindigkeitsprofile am Wehr *Ova Spin* von jenen am *USACE-Standardwehr* ab einer relativen Distanz von  $x/H_o > -0.6$  abzuweichen (Anhang B1). Damit weichen in diesem Fallbeispiel die normierten Geschwindigkeitsprofile lediglich in einer Zone voneinander ab, die per se eher ungeeignet für einen Schwemmholzurückhalt mit moderatem Wasserspiegelaufstau infolge Verklausung ist. D.h. das in diesem Bericht vorgestellte Verfahren zur Ermittlung des maximalen Wasserspiegelanstiegs  $\Delta H_{max}$  ist gut auch auf vom *USACE-Standardwehr* abweichende Profilformen anzuwenden, solange die Überfallprofile scharfkantig oder konvex gekrümmt sind und kein breitkroniges Wehr vorliegt (Lage des Kontrollquerschnitts auf dem Kronenscheitel).

### *Verklausungswahrscheinlichkeit von Einzelhölzern an den Wehrpfeilern*

- Einzelhölzer richten sich im Nahbereich der Wehrkrone aufgrund der Geschwindigkeitszunahme in Fließrichtung aus und werden somit durch die Entlastungsöffnung durchgeleitet. Eine Verklausung eines Einzelholzes ist daher höchst selten, wenn das Kriterium  $B/L \geq 0.8$  nach Godtland und Tesaker (1994) eingehalten ist (Abschn. 5.1.3).

### *Durchleitung grosser Schwemmholzgruppen, Rückhalt des Schwemmholzes an den Wehrpfeilern*

- Bei einem Schwemmholzteppich ist die Ausrichtung der Stämme im Bereich der Entlastungsöffnung eingeschränkt, was die Verklausungswahrscheinlichkeit  $P$  (Wahrscheinlichkeit, dass ein Stamm des Teppichs verklaust) bei der Durchleitung im Vergleich zu Einzelhölzern erhöht.
- Mit abnehmender relativer Wehrfeldbreite  $B/L$ , abnehmender relativer Überfallhöhe  $\chi$  sowie zunehmender Breite der Stammlängenverteilung des Schwemmholzteppichs steigt das Rückhalteverhältnis  $RV$  des verklausten  $V_{vs}$  gegenüber dem zugegebenen Schwemmholz  $V_S$  (Abschn. 5.2.2).
- Die Erkenntnis von Godtland & Tesaker (1994), wonach die notwendige Breite der Wehrfeldöffnung mindestens  $B \geq 1.1 \cdot L_{max}$  zur Verhinderung eines  $RV > 0.2$  zu betragen hat, konnte im Rahmen dieser Studie bestätigt werden (Abschn. 5.2.3). Für die Beurteilung des Rückhalteverhältnisses  $RV$  eines Schwemmholzteppichs empfiehlt sich auf der Basis der

Erkenntnisse dieser Studie allerdings eine Stammlänge mit Perzentil in der Grössenordnung von 90% der heterogenen Verteilung. Es gilt zu beachten, dass bereits der Rückhalt eines sehr kleinen Volumens einen grossen Wasserspiegelaufstau infolge Verklausung auslösen kann.

- Das Auftreten von Verklausungen auf der Wehrkrone (nicht an den Wehrpfeilern) für relative maximale Holzdurchmesser  $D_{max}/H_o = 0.45 \dots 0.55$  bestätigen die Erkenntnisse von Bénét et al. (2021) und Pfister et al. (2013), wurden jedoch nicht weiter untersucht (Abschn. 5.2.2).
- Für eine ganzheitliche Beurteilung des Verklausungspotentials an einem Mauerüberfall müssen alle relevanten Prozesse mitberücksichtigt werden. Die vorliegende Studie geht auf den Rückhalt von starrem Stammholz an den Wehrpfeilern bei der Durchleitung eines Schwemmholzteppichs ein. Andere Studien beschreiben Verklausungen auf der Wehrkrone oder an Wehrbrücken, berücksichtigen den Wurzelstock, unterschiedliche Holzdichten und biegsames, natürliches Astholz (Abschn. 5.2.3).

### *Wasserspiegelaufstau infolge Schwemmholzverklausung*

In der vorliegenden Studie sind Gleichungen zur Berechnung des Wasserspiegelaufstaus infolge einer Verklausung an den Wehrpfeilern eines Mauerüberfalls entwickelt worden (Abschn. 6.3). Das Vorgehen zur Berechnung dieses Aufstaus ist in Abschn. 7 dargestellt, in Abschn. 6.4 sind die berechneten Werte mit Messdaten validiert und die Erkenntnisse sind in Abschn. 6.5 wiedergegeben. Es zeigt sich, dass auskragende Wehrpfeiler die Funktion eines Schwemmholzrechens übernehmen: Sie halten die Schwemmholzverklausung in Zonen geringer Fliessgeschwindigkeiten zurück und verhindern somit einen Wasserspiegelaufstau. Die wesentlichen Schlussfolgerungen sind:

- Das in dieser Studie angewandte Konzept der Zugabe von ausgerichteten Stammhölzern verringert die Zufallsabhängigkeit des Verklausungsprozesses und verursacht dicht gepackte, dennoch mit Hohlräumen durchsetzte, räumliche Verklausungskörper an den Wehrpfeilern aus entlang des Wehrs ausgerichteten Stämmen. Ein Literaturstudium (Abschn. 2.3) und die Analyse der Ergebnisse legen nahe (Abschn. 6.5.2), dass die in der vorliegenden Studie beobachteten Verklausungskörper Porositäten im Bereich des Medians von  $n = 0.35$  resp. des Auflockerungsfaktors 2 (kompakt,  $n = 0.5$  ohne Berücksichtigung des Feinmaterialanteils  $m$ ) von natürlich gebildeten Schwemmholzansammlungen in Flüssen aufweisen. Für die Gefahrenbetrachtung wird deswegen vorliegendes Verfahren zur Berechnung von  $\Delta H_{max}$  zur Anwendung empfohlen.
- Die vorliegende Studie bietet Hilfsmittel zur Abschätzung des Einflusses unterschiedlicher Porositäten auf den Wasserspiegelaufstieg (Abschn. 7.2).
- Wie auch in anderen Studien festgehalten (Rimböck, 2003; VAW Fallstudien in Lange & Bezzola, 2006; Schmocker, 2017), verhindern Fliessgeschwindigkeiten  $< 0.8 \dots 1$  m/s das

Auftürmen von Schwemmholz an Hindernissen und damit den Wasserspiegelanstieg infolge Verklauung an Wehrpfeilern (Abschn. 6.3.3). Die Ermittlung von  $v_s$  nach Gl. (9) bietet demnach ein einfaches Hilfsmittel, eine erste einfache Beurteilung des Gefährdungspotentials durch Schwemmholzverklauung an Wehrpfeilern vorzunehmen.

- Das charakteristische Schwemmholzvolumen  $V_c$  ist für den primären Wasserspiegelanstieg verantwortlich und kann anhand Gl. (12) ermittelt werden (Abschn. 6.3.2). Diese Volumina sind generell sehr klein und liegen deutlich unter jenen, die den primären Wasserspiegelanstieg an Schwemmholzrechen in Flüssen verursachen. D.h. ein kleines, an den Wehrpfeilern verklautes Volumen bewirkt bereits den massgeblichen Wasserspiegelaufstau.
- Die sich ausbildende Eintauchtiefe  $t_H$  des Verklauungskörpers ist anhand der Gl. (14) und unter Verwendung der Gl. (9) für die schwersten Nadelhölzer im waldfrischen Zustand ermittelbar. Die Holzdichte wurde nicht systematisch untersucht, weshalb es ihren Einfluss auf die Eintauchtiefe in weiteren Untersuchungen zu quantifizieren gilt (Abschn. 6.3.3). Aus der Eintauchtiefe  $t_H$  und der Pfeilerauskrugung  $p_K$  lässt sich die dem Abfluss unter der Verklauung freistehende Durchflussfläche ermitteln. Steht dem Abfluss ein lichter Abstand  $a > 0.7 \cdot H_o$  unter der Verklauung zur Verfügung, fällt der Anstieg des Wasserspiegels mit  $\Delta H_{max}/H_o < 0.1$  moderat aus.
- Beträgt die relative Pfeilerauskrugung  $P_K > 1$ , ist die Abflussreduktion infolge Verklauung selbst bei komplett verlegtem, dichtem Verklauungskörper vernachlässigbar.

Die in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse können vielseitig angewendet werden. Die durchgeführten Modellversuche an zwei unterschiedlichen Wehrprofilen ermöglichen die Anwendung der Berechnung auf eine Vielzahl bestehender Hochwasserentlastungen von Talsperren, solange die Hydraulik im Bereich der Wehrkrone nicht signifikant abweicht. Anhand der vorgeschlagenen Gleichungen kann die Gefährdung bestehender Hochwasserentlastungsanlagen durch Schwemmholzverklauung besser beurteilt und der zu erwartende Wasserspiegelaufstau im Falle einer Verklauung ermittelt werden. Ebenfalls helfen die Erkenntnisse, um Massnahmen an HWE zu dimensionieren, sowohl für eine sichere Durchleitung des Schwemmholzes als auch zur optimalen Positionierung eines Schwemmholzrückhaltes in Form eines Schwemmholzrechens oder auskragender Wehrpfeiler. Es bestehen jedoch nach wie vor Forschungslücken für eine ganzheitliche Beurteilung der Schwemmholzsituation an einem Mauerüberfall, nicht zuletzt der Einfluss der Schwemmholzdichte auf den sich ausbildenden Verklauungskörper.

## Quellenangaben

- [1] Arbeitsgruppe Schwemmgut an HWE, Schweizerisches Talsperrenkomitee (2017). *Schwemmgut an Hochwasserentlastungsanlagen von Talsperren*. Bericht des Schweizerischen Talsperrenkomitees (STK) über den Stand der Schwemmgutproblematik an Talsperren. Herunterzuladen unter <http://www.swissdams.ch/de/publications/publications-csb>
- [2] Bundesamt für Energie (BFE) (2017). *Richtlinie über die Sicherheit der Stauanlagen – Teil C2: Hochwassersicherheit und Stauseeabsenkung*. Herunterzuladen unter <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/versorgung/aufsicht-und-sicherheit/talsperren/richtlinien-und-hilfsmittel.html>
- [3] VAW (2020). *Talsperre Ova Spin, Modellierung der Schwemmholzsituation am Mauerüberfall*. Bericht der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, Nr. 4386 (nicht veröffentlicht)
- [4] AF-Consult Switzerland AG (2018). *Machbarkeitsstudie zur Vermeidung der Verklausung des Hochwasserüberfalls bei der Staumauer Ova Spin*. Abschlussbericht (nicht veröffentlicht)

## Literaturverzeichnis

- Bénet, L., De Cesare, G., & Pfister, M. (2021). Reservoir level rise under extreme driftwood blockage at ogee crest. *Journal of Hydraulic Engineering*, 147(1), 04020086.
- Bezzola, G. R., & Hegg, C. (Ed.) (2007): *Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 1 – Prozesse, Schäden und erste Einordnung*. Bundesamt für Umwelt BAFU, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL. Umwelt-Wissen Nr. 0707. 215 S.
- Fritz, H. M., & Hager, W. H. (1998). Hydraulics of embankment weirs. *J. Hydraul. Eng.*, 124(9), 963–971.
- Furlan, P. (2019). *Blocking probability of large wood and resulting head increase at ogee crest spillways* (Ph.D. thesis No. 9040). Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
- Furlan, P., Pfister, M., Matos, J., Amado, C., & Schleiss, A. J. (2019). Experimental repetitions and blockage of large stems at ogee crested spillways with piers. *Journal of Hydraulic Research*, 57(2), 250-262.
- Godtland, K., & Tesaker, E. (1994). Clogging of spillways by trash. In *Proceedings of 18<sup>th</sup> ICOLD Congress*, Durban, 543–557.
- Hager, W. H. (1991). Experiments on standard spillway. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 91(3), 399-416.
- Hartlieb, A. (2015). *Schwemmholz in Fließgewässern–Gefahren und Lösungsmöglichkeiten*. Habilitationsschrift (P. Rutschmann, Hrsg.), Technische Universität München
- Lange, D., & Bezzola, G. R. (2006). *Schwemmholz, Probleme und Lösungsansätze*. VAW-Mitt. Nr. 249 (H.-E. Minor, Hrsg.), Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich.
- Livers, B., Lininger, K. B., Kramer, N., & Sendrowski, A. (2020). Porosity problems: Comparing and reviewing methods for estimating porosity and volume of wood jams in the field. *Earth Surface Processes and Landforms*, 45(13), 3336-3353.
- Livers, B., & Wohl, E. (2021). All Logjams Are Not Created Equal. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 126(8), e2021JF006076.
- Manners, R. B., Doyle, M., & Small, M. J. (2007). Structure and hydraulics of natural woody debris jams. *Water Resources Research*, 43(6).
- Pfister, M., Capobianco, D., Tullis, B., & Schleiss, A. J. (2013). Debris-blocking sensitivity of piano key weirs under reservoir-type approach flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 139(11), 1134-1141.
- Rickenmann, D. (1997). Schwemmholz und Hochwasser. *Wasser Energie Luft*, 89(5/6), 115-119.

- Rickli, C., & Bucher, H.U. (2006): *Einfluss ufernaher Bestockungen auf das Schwemmholzvorkommen in Wildbächen*. Projektbericht zuhanden des Bundesamtes für Umwelt BAFU. Eidg. Forschungsanstalt WSL. 94 S.
- Rickli, C., & Hess, J. (2009). *Aspects de la formation des bois flottants*. Cours de formation continue KHOS : Protection contre les crues, Fribourg
- Rimböck, A. (2003). *Schwemmholzrückhalt in Wildbächen. Grundlagen zu Planung und Berechnung von Seilnetzsperrren*. Dissertation (T. Strobl, Hrsg.), Technische Universität München.
- Schalko, I. (2018). *Modeling hazards related to large wood in rivers*. VAW-Mitt. Nr. 249 (R. Boes, Hrsg.), Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich.
- Schalko, I., Lageder, C., Schmocker, L., Weitbrecht, V., and Boes, R. (2019). Laboratory flume experiments on the formation of spanwise large wood accumulations: I. Effect on backwater rise. *Water Resources Research*, 55(6), 4854–4870.
- Schmocker, L. (2017). Floating debris retention racks at dam spillways. In *Proc. 37<sup>th</sup> IAHR World Congress*, Panama City, Panama.
- Schmocker, L.; Boes, R. (2018). Schwemmgut an Hochwasserentlastungsanlagen (HWE) von Talsperren. *Wasser, Energie, Luft* 110(2): 91-98.
- Schmocker, L., & Hager, W. H. (2011). Probability of drift blockage at bridge decks. *Journal of Hydraulic Engineering*, 137(4), 470-479.
- Spreitzer G, Tunnicliffe J, Friedrich H. (2019). Using structure from motion photogrammetry to assess large wood (LW) accumulations in the field. *Geomorphology*, 346, 106851
- Spreitzer G, Tunnicliffe J, Friedrich H. (2020). Porosity and volume assessments of large wood (LW) accumulations. *Geomorphology*, 358, 107122
- Uchiogi, T., Shima, J., Tajima, H., & Ishikawa, Y. (1996). Design methods for wood-debris entrapment. *Proceedings of INTERPRAEVENT, International Research Society Interpraevent*, 279-288.
- USACE (1987). *Hydraulic Design Criteria*. United States Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg, MI
- Wagenführ, R., & Scheiber, C. (1974). *Holzatlas*. Leipzig: Fachbuchverlag. 690 S.

**Symbol- und Abkürzungsverzeichnisse**

|                  |                     |  |
|------------------|---------------------|--|
| $a$              | [m]                 | lichter Abstand  |
| $AF$             | [-]                 | $= \frac{V_L}{V_{vS}} = \frac{1}{1-n}$ , Auflockerungsfaktor                                 |
| $b$              | [m]                 | Zuströmbreite  |
| $b_E$            | [m]                 | kleine Halbachse der Ellipse   |
| $b_f$            | [-]                 | Faktor der Tangenshyperbolikus-Funktion  |
| $B$              | [m]                 | lichte Wehrfeldbreite  |
| $c_E$            | [m]                 | horizontale Distanz zwischen Wehrkronenscheitel und Mauerfront, grosse Halbachse der Ellipse |
| $C_d$            | [-]                 | Abflussbeiwert   |
| $C_{dH}$         | [-]                 | Abflussbeiwert bei Schwemmholzverklausung  |
| $D$              | [m]                 | Stammdurchmesser   |
| $D_m$            | [m]                 | mittlerer Stammdurchmesser   |
| $D_{max}$        | [m]                 | maximaler Stammdurchmesser   |
| $D_W$            | [m]                 | Wurzeldurchmesser  |
| $F_o$            | [-]                 | Zufluss-Froudezahl   |
| $g$              | [m/s <sup>2</sup> ] | Erdbeschleunigung, 9.81 m/s <sup>2</sup>   |
| $h_o$            | [m]                 | Abflusstiefe   |
| $H$              | [m]                 | Überfallhöhe   |
| $H_D$            | [m]                 | Dimensionierungsüberfallhöhe   |
| $H_{max}$        | [m]                 | Maximale Überfallhöhe bei Schwemmholzverklausung   |
| $H_o$            | [m]                 | initiale Überfallhöhe  |
| $\Delta H$       | [m]                 | $= H - H_o$ , Wasserspiegelanstieg   |
| $\Delta H_c$     | [m]                 | $= H_c - H_o$ , charakteristischer Wasserspiegelanstieg                                      |
| $\Delta H_{max}$ | [m]                 | $= H_{max} - H_o$ , maximaler Wasserspiegelanstieg   |
| $k$              | [m]                 | geometrische Variable, $k = p_K$ für $0 \leq p_K \leq c_E$ ; $k = c_E$ für $p_K > c_E$       |
| $L$              | [m]                 | Stammlänge   |
| $L_m$            | [m]                 | mittlere Stammlänge  |
| $L_{max}$        | [m]                 | maximale Stammlänge  |
| $L_{min}$        | [m]                 | minimale Stammlänge  |
| $L_{50}$         | [m]                 | Medianstammlänge   |
| $L_{90}$         | [m]                 | 90%-Perzentil der Stammlänge   |

|           |                     |   |
|-----------|---------------------|---|
| $m$       | [-]                 | $= \frac{V_s - V_{vS}}{V_s}$ , Feinmaterialanteil   |
| $n$       | [-]                 | $= \frac{V_{HR}}{V_L} = 1 - \frac{1}{AF}$ , Porosität                                     |
| $p$       | [m]                 | Pfeilerauskrugung ab Mauerfront   |
| $P$       | [-]                 | Verkläusungswahrscheinlichkeit  |
| $p_K$     | [m]                 | Pfeilerauskrugung ab Wehrkronenscheitel   |
| $P_K$     | [-]                 | $= \frac{p_K}{H_o}$ , relative Pfeilerauskrugung ab Wehrkronenscheitel                    |
| $Q$       | [m <sup>3</sup> /s] | Durchfluss  |
| $R^2$     | [-]                 | Bestimmtheitsmass   |
| $RV$      | [-]                 | $= \frac{V_{vS}}{V_s}$ , Rückhalteverhältnis  |
| $s$       | [m]                 | Wasserspiegellage im Absenkbereich  |
| $S$       | [-]                 | $= \frac{s}{H_o}$ , normierte Wasserspiegellage im Absenkbereich                          |
| $t_H$     | [m]                 | Eintauchtiefe Verkläusungskörper  |
| $t_L$     | [m]                 | Eintauchtiefe Lochblech   |
| $v$       | [m/s]               | Fliessgeschwindigkeit   |
| $v_K$     | [m/s]               | Fliessgeschwindigkeit auf dem Wehrkronenscheitel  |
| $v_{Kn}$  | [-]                 | $= \frac{v_K}{\sqrt{2gH_o}}$ , normierte Fliessgeschwindigkeit auf dem Wehrkronenscheitel |
| $v_n$     | [-]                 | $= \frac{v}{\sqrt{2gH_o}}$ , normierte Fliessgeschwindigkeit                              |
| $v_s$     | [m/s]               | Oberflächenfliessgeschwindigkeit  |
| $v_{sn}$  | [-]                 | $= \frac{v_s}{\sqrt{2gH_o}}$ , normierte Oberflächenfliessgeschwindigkeit                 |
| $V_c$     | [m <sup>3</sup> ]   | charakteristisches Schwemmholzfestvolumen   |
| $V_{HR}$  | [m <sup>3</sup> ]   | Hohlraumvolumen im Verkläusungskörper   |
| $V_L$     | [m <sup>3</sup> ]   | Lockervolumen, Volumen des Verkläusungskörpers  |
| $V_S$     | [m <sup>3</sup> ]   | Feststoffvolumen, zugegebenes Schwemmholzfestvolumen                                      |
| $V_{vS}$  | [m <sup>3</sup> ]   | verkläustes Grossholzfestvolumen  |
| $V_{vSn}$ | [-]                 | $= \frac{V_{vS}}{WH_oD_m}$ , normiertes verkläustes Grossholzfestvolumen                  |
| $w$       | [m]                 | Wehrhöhe  |
| $W$       | [m]                 | lichte Wehrbreite   |
| $W_{tot}$ | [m]                 | totale Wehrbreite inkl. Wehrpfeiler   |
| $W_w$     | [m]                 | wirksame Wehrbreite   |
| $x$       | [m]                 | Koordinate in Fliessrichtung  |

|          |                      |   |
|----------|----------------------|---|
| $X$      | [-]                  | $= \frac{x}{H_o}$ , normierte Koordinate in Fließrichtung |
| $z$      | [m]                  | Höhenkoordinate   |
| $Z$      | [-]                  | $= \frac{z}{H_o}$ , normierte Höhenkoordinate             |
| $\eta$   | [-]                  | $= \frac{C_{dH}}{C_d}$ , Abflussreduktionsfaktor          |
| $\rho$   | [kg/m <sup>3</sup> ] | Holzdicke   |
| $\sigma$ | [-]                  | Standardabweichung  |
| $\chi$   | [-]                  | $= \frac{H_o}{H_D}$ , relative Überfallhöhe               |

|       |   |
|-------|---|
| BFE   | Bundesamt für Energie   |
| BHQ   | Bemessungshochwasser  |
| EKW   | Engadiner Kraftwerke AG   |
| EZG   | Einzugsgebiet   |
| HWE   | Hochwasserentlastungsanlage   |
| LFI   | Landesforstinventar   |
| LW    | Large wood  |
| STK   | Schweizerisches Talsperrenkomitee                                     |
| USACE | United States Army Corps of Engineers                                 |
| VAW   | Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich |
| WSL   | Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft      |

## Anhang A      Lichter Abstand $a$

### A1      Herleitung der Gleichung zur Bestimmung des lichten Abstandes $a$

#### USACE Standardüberfallprofil

In Abb. A-1 ist die Definitionsskizze zur Abschätzung des lichten Abstandes  $a$  dargestellt. Der oberwasserseitige Quadrant ist in sehr guter Näherung für ein USACE Standardüberfallprofil als Ellipse mit den Halbachsen  $b_E$  und  $c_E$  beschrieben, wobei  $b_E = c_E/2$  gilt. Die Beziehungen sind hergeleitet im Koordinatensystem  $x_A/z_A$  mit seinem Ursprung im Ellipsenmittelpunkt.

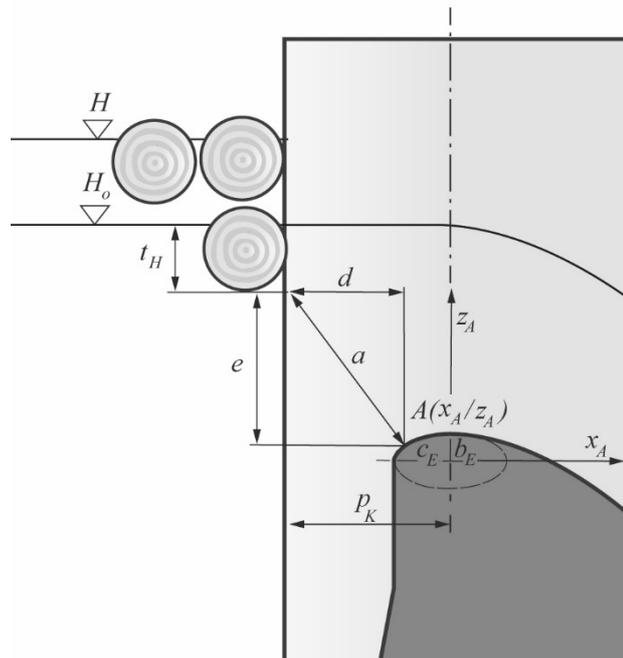


Abb. A-1      Schema zur Herleitung des lichten Abstandes  $a$ .  $a$  ist definiert als die Distanz zwischen der Projektion der Verkläusungsunterkante auf die Pfeilernase und dem auf dem oberen Quadranten nächsten Punkt A mit den Koordinaten  $x_A/z_A$

Wie aus der Abb. A-1 ersichtlich ist, gilt nach dem Satz von Pythagoras für  $p_K > c_E$

$$a = \sqrt{d^2 + e^2} \quad (20)$$

mit

$$d = p_K + x_A \quad (21)$$

$$e = H_o - t_H + b_E - z_A \quad (22)$$

wobei der Punkt A mit den Koordinaten  $x_A/z_A$  mit negativen  $x_A$ -Werten die Stelle auf dem Quadranten ausweist, die sich am nächsten zur auf die Pfeilernase projizierten Unterkante des Verkläusungskörpers befindet.

Eingesetzt ergibt dies:

$$a = \sqrt{(p_K + x_A)^2 + (H_o - t_H + b_E - z_A)^2} \quad (23)$$

Die Ellipsengleichung mit  $c_E$  und  $b_E = c_E/2$  lautet:

$$\frac{x_A^2}{c_E^2} + \frac{z_A^2}{\left(\frac{c_E}{2}\right)^2} = 1 \quad (24)$$

Der vertikale Abstand des Punktes  $x_A/z_A$  vom Ellipsenursprung ergibt sich nach Umformung von Gl. (24) zu

$$z_A = \frac{\sqrt{c_E^2 - x_A^2}}{2} \quad (25)$$

Die Untersuchung zeigte, dass sich  $x_A$  gut mit  $-2/3k$  annähern lässt, wobei die geometrische Variable  $k$  entweder  $k = p_K$  für  $0 \leq p_K \leq c_E$  oder  $k = c_E$  für  $p_K > c_E$  entspricht. Daraus ergibt sich aus Gleichung (25)  $z_A = \frac{\sqrt{c_E^2 - \frac{4}{9}k^2}}{2}$ . Eingesetzt in Gleichung (23) resultiert für  $a$

$$a = \sqrt{\left(p_K - \frac{2}{3}k\right)^2 + \left(H_o - t_H + \frac{c_E - \sqrt{c_E^2 - \frac{4}{9}k^2}}{2}\right)^2} \quad (26)$$

Für  $p_K = 0$  reduziert sich Gl. (26) zu:

$$a = H_o - t_H \quad (27)$$

### Überfallprofil des Wehrs Ova Spin

Der wasserseitige Quadrant des *Ova Spin*-Profils ist ein Kreisbogen (Abb. 3-2). Anstelle der Gleichung (24) tritt die Gleichung für einen Kreis:

$$x_A^2 + z_A^2 = r^2 \quad (28)$$

Für *Ova Spin* ergibt sich für  $a$  mit der Annäherung  $x_A = -\frac{2}{3} \cdot r \cdot \sin(\alpha)$ , mit  $\alpha = 79^\circ$  und  $r = 1.91$  m (Abb. 3-6)

$$a = \sqrt{\left(p_K - \frac{2}{3}r \sin \alpha\right)^2 + \left(H_o - t_H + r \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4}{9}(\sin \alpha)^2}\right)\right)^2} \quad (29)$$

**A2 Validierung der Gleichung zur Bestimmung des lichten Abstandes  $a$** 

Abb. A-2 zeigt die anhand der genannten Gleichungen berechneten lichten Abstände  $a$  im Vergleich zu den gemessenen Werten. Letztere sind in Kenntnis der Eintauchtiefen  $t_H$  grafisch ermittelt worden. Liegen die Punkte auf der Linie  $y = x$ , so stimmen die berechneten Werte exakt mit den gemessenen überein. Das hohe Bestimmtheitsmass  $R^2$  von 0.997 zeigt, dass die angewendeten Näherungen zur Berechnung von  $a$  für die Bestimmung des Wasserspiegelaufstaus infolge der Verkläusung an den Wehrpfeilern eines Mauerüberfalls genügen.

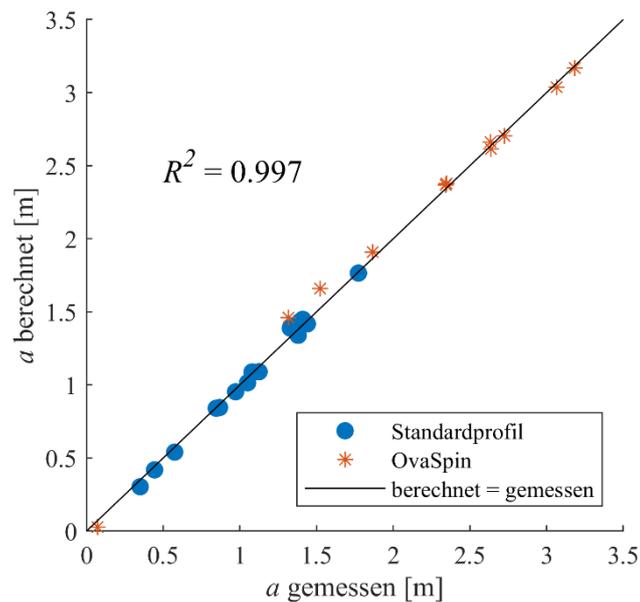


Abb. A-2 Berechneter und graphisch ermittelter lichter Abstand  $a$ . Das Bestimmtheitsmass  $R^2$  beträgt 0.997.

## Anhang B Geschwindigkeitsverteilungen und Selbstähnlichkeit

### B1 Normiertes, vertikales Geschwindigkeitsfeld

Auf der Wehrkrone sowie im Bereich vor dem Mauerüberfall wurden die Fliessgeschwindigkeiten mittels ADV-Messsonde in einem engen Messraster messtechnisch erfasst (Abschn. 3.6.1). Die Messergebnisse zeigen, dass die Verteilungen der vertikalen Geschwindigkeiten für unterschiedliche Durchflüsse  $Q$  resp. Überfallhöhen  $H_o$  annähernd selbstähnlich abgebildet sind (Abb. B-1, Abb. B-2). Die Selbstähnlichkeit der Geschwindigkeitsprofile ist dadurch gekennzeichnet, dass sie durch Transformationen auf ein gemeinsames Grundprofil zur Deckung gebracht werden. Als Normierungsgrössen dazu dienen die Überfallhöhe  $H_o$  für die  $x$ - und die  $z$ -Koordinaten ( $X = x/H_o$  und  $Z = z/H_o$ ) sowie  $\sqrt{2gH_o}$  für den Skalar  $v$  des Geschwindigkeitsvektors.

Abb. B-1 zeigt die normierten Geschwindigkeitsfelder vor dem Mauerüberfall für a) das *Ova Spin*- und b) das *Standardwehr* für die drei Überfallhöhen  $H_o = 1, 2$  und  $3$  m. Vor dem Mauerüberfall ist eine Geschwindigkeitszunahme in horizontaler sowie in vertikaler Richtung jeweils in positiver Koordinatenrichtung zu beobachten. Im Bereich der Wehrkrone vergrössern sich die Fliessgeschwindigkeiten infolge der starken Umlenkung resp. der gekrümmten Stromlinien von der Wasseroberfläche hin zur Krone. Tatsächlich zeigt sich in Abb. B-1b) am *Standardwehr*, aber auch in Abb. B-1a) am Mauerüberfall der Talsperre *Ova Spin* eine gute Übereinstimmung der normierten Geschwindigkeiten für verschiedene  $H_o$  respektive  $\chi$ . Die Überfallhöhe  $H_o$  bietet sich demnach als Normierungsgrösse an. Folgende Analysen zeigen, dass jedoch die absolute Selbstähnlichkeit nicht gegeben ist. Dazu müsste nämlich auch die Lage des Wasserspiegels  $s$  selbstähnlich abgebildet sein, um der Kontinuitätsbedingung zu genügen.

Gemäss Hager (1991) ist die Wasserspiegellage  $s$  am Standardüberfallbauwerk abhängig von  $\chi$  und kann für  $-2 < x/H_D < 2$  beschrieben werden als

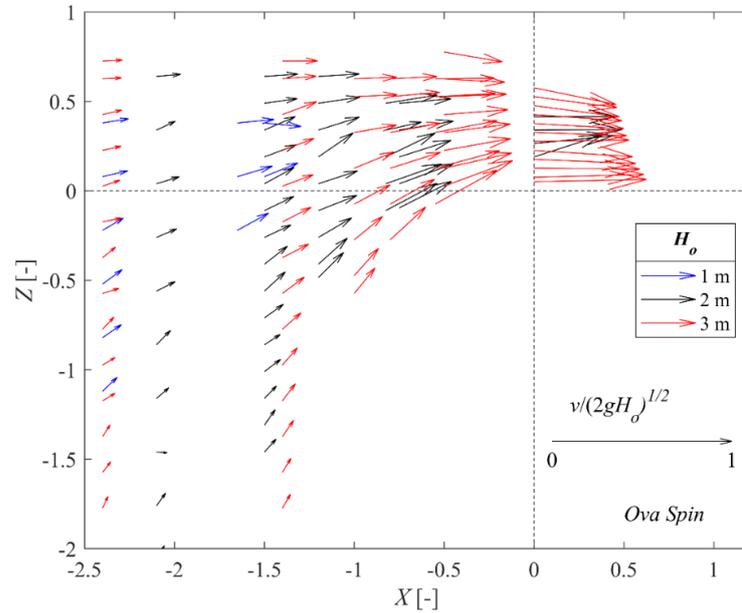
$$\frac{s}{H_D} = 0.75 \left( \chi^{1.1} - \frac{x}{6H_D} \right) \quad (30)$$

wobei sich  $s$  für  $x < 0$  auf den Wehrkronenscheitel und für  $x > 0$  auf das Profil des luftseitigen Quadranten bezieht. Nach Transformation in das vorliegend definierte Koordinatennetz mit  $X = x/H_o$  und  $Z = z/H_o$  unter Verwendung von  $\chi = H_o/H_D$  ergibt sich daraus

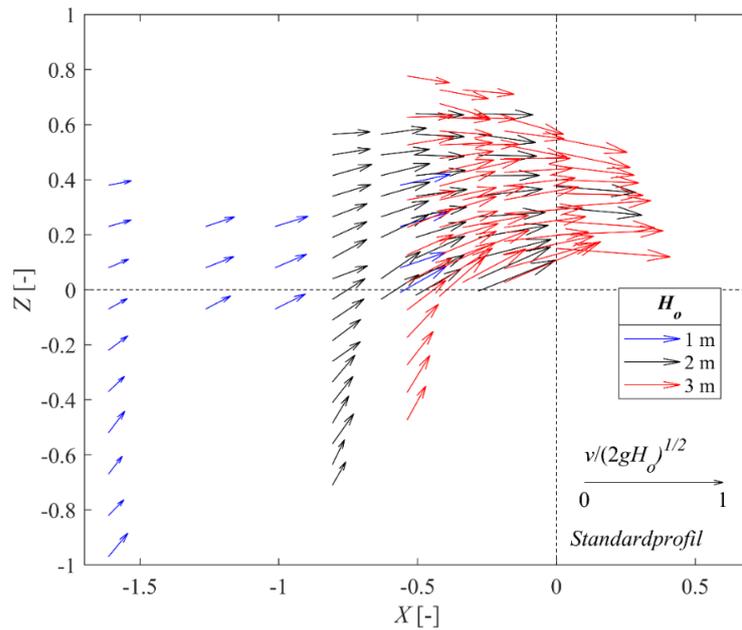
$$\frac{s}{H_o} = S = 0.75 \left( \chi^{0.1} - \frac{X}{6} \right) \quad (31)$$

Die normierten Wasserspiegellagen  $S = s/H_o$  sind somit annähernd deckungsgleich und lediglich mit der Potenz 0.1 von  $\chi$  abhängig. Daraus ergibt sich für  $0.5 \leq \chi \leq 1.5$  ein vertikaler Versatz des normierten Wasserspiegels  $S$  von lediglich -7% bis +4% gegenüber  $S$  bei  $\chi = 1$ . Diese moderate Abweichung impliziert, dass auch die Geschwindigkeitsverteilungen in sehr guter Annäherung selbstähnlich abgebildet sind, die Geschwindigkeit im Koordinatenpunkt  $X/Z$  also nur von der

Variablen  $H_o$  abhängig. D.h. die Geschwindigkeitsverteilungen im Vertikalschnitt können damit in sehr guter Näherung durch die Skalierungsfaktoren zur Deckung gebracht werden.



a)

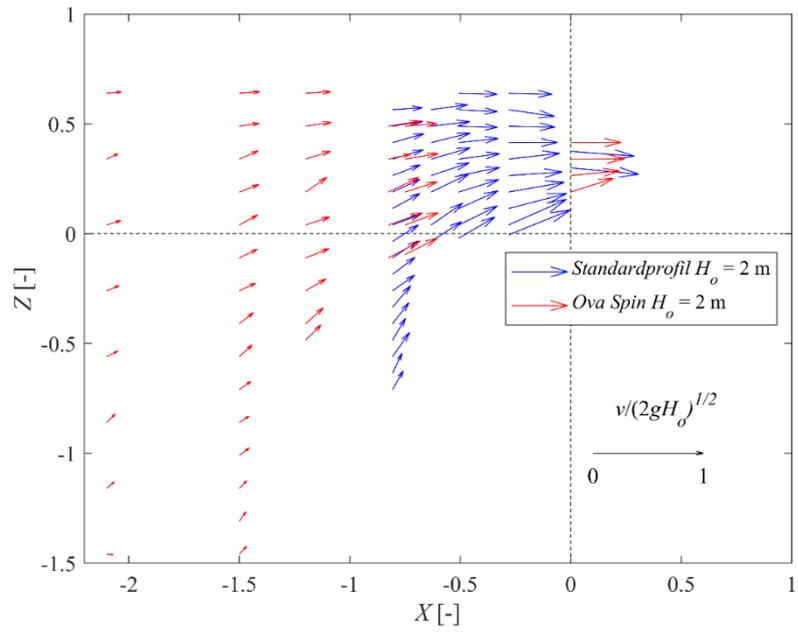


b)

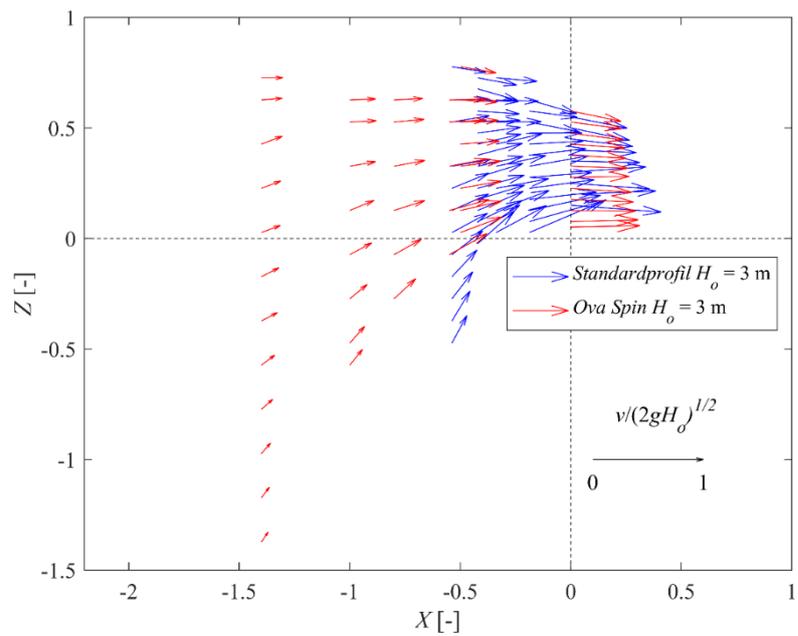
Abb. B-1 Normierte Geschwindigkeitsfelder vor dem Mauerüberfall für die drei Überfallhöhen  $H_o = 1, 2$  und  $3$  m mit  $X = x/H_o$  und  $Z = z/H_o$  für a) das Ova Spin-Profil und b) das Standardprofil.

In Abb. B-2 sind nun die normierten Geschwindigkeiten für beide Wehre in einer Graphik bei a)  $H_o = 2$  m und b)  $H_o = 3$  m übereinander gelegt. Aufgrund einer unterschiedlichen Rasterung der Messpunkte können nur wenige Messpunkte direkt miteinander verglichen werden. Es zeigt sich jedoch in a) bei  $X = -0.8$  und in b) bei  $X = -0.56$ , dass die normierten Vektoren in diesen Profilen in guter Näherung übereinstimmen. Die auf die Strömung einwirkende Beschleunigung im Zulauf zum Wehr wird für  $X < \text{ca. } -0.6$  somit noch nicht resp. werden umgekehrt die konvergierenden Stromlinien demnach erst für  $X > -0.6$  massgeblich durch den oberwasserseitigen Quadranten des Wehrüberfalls beeinflusst. Die normierten Geschwindigkeitsfelder sind demnach für  $X < \text{ca. } -0.6$  unabhängig von den beiden Wehrformen selbstähnlich abgebildet.

Hingegen stellen sich beim Überfallwehr *Ova Spin* auf dem Wehrkronenscheitel deutlich kleinere Geschwindigkeiten im Vergleich zum *Standardwehr* ein, was den in Abschnitt 4.1 dargestellten kleineren Abflussbeiwert erklärt. Es liegt demnach im Bereich der Wehrkrone keine Selbstähnlichkeit der normierten Geschwindigkeitsfelder des *Ova Spin*- und *Standardwehrs* vor.



a)



b)

Abb. B-2 Normierte Geschwindigkeitsfelder vor dem Mauerüberfall beider Überfallprofile für a)  $H_o = 2$  m und b)  $H_o = 3$  m.

## B2 Geschwindigkeitsprofil auf dem Wehrkronenscheitel

Hager (1991) hat gezeigt, dass sich das Geschwindigkeitsprofil  $v_K$  auf dem Wehrkronenscheitel über die Tiefe  $z$  unabhängig von der relativen Überfallhöhe  $\chi$  mit folgender Gleichung am Standardüberfall ohne Wehrpfeiler beschreiben lässt,

$$v_{Kn} = \frac{v_K}{\sqrt{2gH_o}} = \frac{1}{2} \left( \frac{r + 0.75}{r + Z} \right) \quad (32)$$

wobei  $r$  der dimensionslose Kronenradius ist (im *Standardprofil* gilt  $r = 0.584$ ). Gemäss USACE (1987) beträgt die Wassertiefe auf dem Wehrkronenscheitel ohne Pfeiler  $0.75 \cdot H_o$  (vgl. auch mit Gl. (30)), gegenüber  $0.8 \cdot H_o$  mit Pfeiler. Laut Hager stellt sich ohne Pfeiler an der Oberfläche bei relativer Höhe  $Z = 0.75$  die normierte Oberflächengeschwindigkeit  $v_{sn} = v_{Kn} = 0.5$  ein, die zum Wehrkronenscheitel hin bis auf 1.14 steigt. Abb. B-3 zeigt die an den beiden Überfällen gemessenen normierten Wehrkronengeschwindigkeitsprofile im Vergleich zur Referenz von Hager ohne Brückenpfeiler. Das *Standardprofil* und das *Ova Spin*-Wehr wurden beide mit Brückenpfeilern untersucht. Dieser Einfluss der vorhandenen Pfeiler als auch der radiale Mauerüberfall führen dazu, dass die am *Standardprofil* gemessenen Geschwindigkeiten leicht unter dem Referenzprofil nach Hager (1991) gemessenen Geschwindigkeiten liegen (vgl.  $C_d$ -Werte, Abschn. 4.1). Die Geschwindigkeiten auf dem Wehrkronenscheitel des *Ova Spin* Wehrs sind hingegen deutlich kleiner, was auf die in Abschn. 4.1 beschriebenen Gründe zurückzuführen ist und eben kleinere  $C_d$ -Werte verursacht.

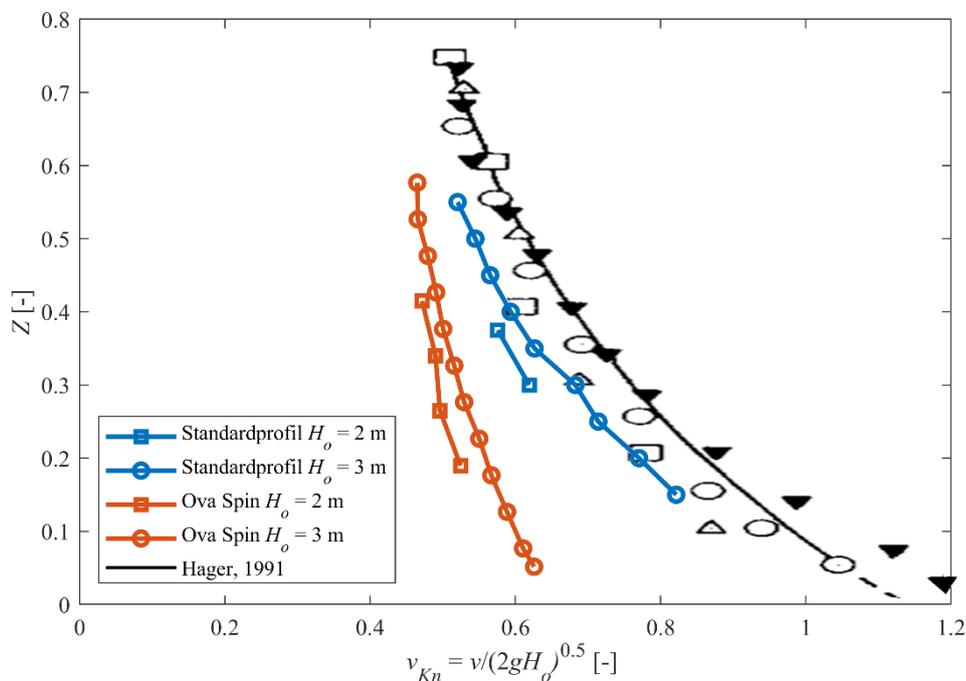


Abb. B-3 Geschwindigkeitsprofile über der Wehrkrone für Standardprofil ohne Pfeiler (Hager, 1991), Standardprofil mit Wehrpfeiler und Ova Spin Mauerüberfall.

### B3 Normierte Oberflächengeschwindigkeit $v_{sn}$

Wie im Abschn. B2 dargestellt, ist die normierte Oberflächengeschwindigkeit  $v_{sn}$  auf Höhe des Wehrkronenscheitels bei vorhandenen Pfeilern leicht kleiner als 0.5. Die Annäherung mit 0.5 wird dennoch als akzeptabel angesehen, vor allem im Vergleich mit nachfolgender Überlegung:

Als Oberflächengeschwindigkeit  $v_s$  wird jene ADV-Messung gewertet, die am nächsten zur Wasseroberfläche noch verwertbare Messdaten lieferte. Je höher die Geschwindigkeit, desto stärker bildet sich der intrusive Effekt der Messsonde auf das Geschwindigkeitsfeld und den Lufteintrag an der Sondenhalterung durch Wirbelbildung aus. Dies führte dazu, dass bei hohen Geschwindigkeiten, insbesondere auf dem Wehrkronenscheitel des *Standardprofils*, die Messsonde tiefer in den Abflussstrahl eingetaucht werden musste, um Lufteintrag an der Sonde zu verhindern und somit eine verwertbare Geschwindigkeitsmessung zu erhalten. Die hier ausgewiesenen Oberflächenfließgeschwindigkeiten sind daher nicht exakt an der Wasseroberfläche, sondern in leicht unterschiedlichen Tiefen gemessen worden. Die in der Abb. B-4 am *Standardprofil* ausgewiesene normierte Oberflächengeschwindigkeit auf dem Wehrkronenscheitel ( $P_K = 0$ ) fällt deswegen höher als 0.5 aus, da sie nicht an der Oberfläche, sondern näher an der Wehrkrone gemessen wurde. Im Gegensatz dazu betragen die am Profil *Ova Spin* gemessenen  $v_{sn}$  weniger als 0.5 aufgrund des bezogen zum Bemessungslastfalls sehr langgezogenen Wehrkrone und der nicht selbständig abgebildeten Geschwindigkeiten für  $X > -0.6$  resp.  $P_K < 0.6$  (Abb. B-4). Obwohl sich auf der Krone beider Profile unterschiedliche Geschwindigkeiten einstellen, ist im Oberwasser für  $X < -0.6$  kein wesentlicher Einfluss der beiden Überfallbauwerke auf  $v_{sn}$  erkennbar.

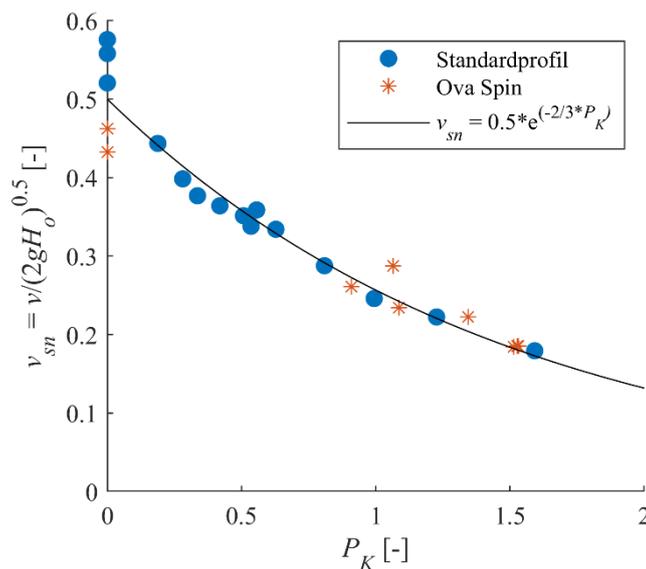


Abb. B-4 Normierte Oberflächenfließgeschwindigkeit  $v_{sn}$  in Funktion der normierten Distanz zum Wehrkronenscheitel  $P_K$

## Anhang C Ergebnisparameter

### C1 Ergebnisparameter der Stammholzversuche zum Wasserspiegelaufstau

Tab. C-1 Maximaler Aufstau  $\Delta H_{max}$ , Abflussbeiwert  $C_{dH}$ , lichter Abstand  $a$  und Eintauchtiefe  $t_H$  des Verklausungskörpers an den Brückenpfeilern der durchgeführten Stammholzversuche mit  $D_m$ : Holzdurchmesser,  $p_K$ : Pfeilerauskragung,  $Q$ : Durchfluss,  $H_o$ : (Referenz-) Überfallhöhe,  $P_K$ : normierte Auskragung

| Profil         | $D_m$ | $p_K$  | $Q$                 | $H_o$ | $P_K$ | $t_H$ | $a$  | $\Delta H_{max}$ | $C_{dH}$ |
|----------------|-------|--------|---------------------|-------|-------|-------|------|------------------|----------|
|                | [m]   | [m]    | [m <sup>3</sup> /s] | [m]   | [-]   | [m]   | [m]  | [m]              | [-]      |
| Standardprofil | 0.37  | -0.04  | 61.69               | 1.02  | -0.04 | 0.67  | 0.30 | 0.43             | 0.27     |
|                | 0.37  | -0.04  | 181.34              | 1.99  | -0.02 | 1.42  | 0.54 | 0.78             | 0.30     |
|                | 0.37  | -0.04  | 357.32              | 3.01  | -0.01 | 1.88  | 1.09 | 1.13             | 0.33     |
|                | 0.37  | 0.53   | 60.31               | 1.01  | 0.52  | 0.66  | 0.41 | 0.20             | 0.34     |
|                | 0.37  | 0.53   | 184.49              | 2.01  | 0.26  | 1.21  | 0.85 | 0.69             | 0.32     |
|                | 0.37  | 0.53   | 354.20              | 2.99  | 0.18  | 2.02  | 1.02 | 0.88             | 0.36     |
|                | 0.37  | 0.97   | 60.87               | 1.02  | 0.96  | 0.50  | 0.82 | 0.02             | 0.44     |
|                | 0.37  | 0.97   | 177.74              | 2.00  | 0.49  | 1.32  | 0.94 | 0.44             | 0.36     |
|                | 0.37  | 0.97   | 354.20              | 3.02  | 0.32  | 1.87  | 1.33 | 0.62             | 0.39     |
|                | 0.37  | 1.22   | 64.12               | 1.03  | 1.19  | 0.43  | 1.06 | 0.03             | 0.45     |
|                | 0.37  | 1.22   | 182.29              | 2.01  | 0.61  | 1.41  | 1.06 | 0.38             | 0.38     |
|                | 0.37  | 1.22   | 351.34              | 3.01  | 0.41  | 1.94  | 1.40 | 0.62             | 0.39     |
|                | 0.37  | 1.57   | 62.02               | 1.01  | 1.55  | 0.31  | 1.41 | 0.01             | 0.46     |
|                | 0.37  | 1.57   | 181.86              | 1.99  | 0.79  | 1.39  | 1.36 | 0.21             | 0.43     |
|                | 0.37  | 1.57   | 180.69              | 1.99  | 0.79  | 1.27  | 1.42 | 0.14             | 0.44     |
|                | 0.37  | 1.57   | 180.69              | 1.99  | 0.79  | 1.37  | 1.37 | 0.08             | 0.46     |
|                | 0.37  | 1.57   | 351.34              | 3.01  | 0.52  | 1.79  | 1.74 | 0.39             | 0.43     |
|                | 0.20  | 0.53   | 61.97               | 1.03  | 0.51  | 0.54  | 0.55 | 0.15             | 0.37     |
|                | 0.20  | 0.53   | 181.69              | 2.01  | 0.26  | 1.21  | 0.86 | 0.48             | 0.36     |
|                | 0.20  | 0.53   | 351.61              | 2.99  | 0.18  | 1.97  | 1.08 | 0.94             | 0.35     |
| 0.54           | 0.53  | 60.29  | 1.03                | 0.51  | 0.65  | 0.44  | 0.10 | 0.39             |          |
| 0.54           | 0.53  | 60.29  | 1.03                | 0.51  | 0.90  | 0.22  | 0.19 | 0.34             |          |
| 0.54           | 0.53  | 181.69 | 2.02                | 0.26  | 1.47  | 0.62  | 0.72 | 0.31             |          |
| 0.54           | 0.53  | 351.61 | 2.99                | 0.18  | 2.40  | 0.65  | 1.24 | 0.31             |          |
| Ova Spin       | 0.37  | -0.04  | 69.87               | 0.98  | -0.04 | 0.93  | 0.00 | 0.49             | 0.21     |
|                | 0.37  | -0.04  | 200.98              | 2.00  | -0.02 | 1.93  | 0.03 | 1.06             | 0.20     |
|                | 0.37  | 2.08   | 69.96               | 1.02  | 2.04  | 0.29  | 1.26 | 0.06             | 0.33     |
|                | 0.37  | 2.08   | 201.38              | 2.00  | 1.04  | 1.01  | 1.45 | 0.06             | 0.36     |
|                | 0.37  | 2.67   | 69.06               | 1.00  | 2.68  | 0.19  | 1.74 | 0.02             | 0.35     |
|                | 0.37  | 2.67   | 201.31              | 2.02  | 1.32  | 0.59  | 2.17 | 0.05             | 0.36     |
|                | 0.37  | 2.67   | 369.84              | 2.99  | 0.89  | 1.18  | 2.45 | 0.03             | 0.38     |
|                | 0.37  | 3.22   | 66.78               | 0.96  | 3.35  | 0.12  | 2.23 | 0.05             | 0.34     |
|                | 0.37  | 3.22   | 219.30              | 2.14  | 1.51  | 0.29  | 2.84 | 0.06             | 0.36     |
|                | 0.37  | 3.22   | 218.76              | 2.13  | 1.51  | 0.76  | 2.52 | 0.04             | 0.36     |
|                | 0.37  | 3.22   | 223.52              | 2.16  | 1.49  | 0.92  | 2.44 | 0.02             | 0.37     |
|                | 0.37  | 3.22   | 374.49              | 3.00  | 1.07  | 0.98  | 2.97 | 0.04             | 0.37     |

## C2 Resultate mit Lochblech

Tab. C- 2 *Maximaler Aufstau  $\Delta H_{\max}$  der Versuche mit Lochblech und Tauchwand am Standardwehr. Eingangsparameter sind Porosität  $n$ , Pfeilerauskrugung  $p_K$ , initiale Überfallhöhe  $H_o$ , normierte Auskrugung  $P_K$ , Eintauchtiefe  $t_L$  des Lochblechs resp. der Tauchwand und lichter Abstand  $a$ . Versuche, für welche  $t_L$  der gemessenen Eintauchtiefe  $t_H$  des Verkläusungskörpers der Versuche mit Stammhölzer der Klassen (A), (B) und (C) entspricht, sind **fett** markiert (die Schwemmholzklasse ist angegeben). Bei Überfallhöhen  $H > 3.50$  m wird die Mauerkrone überstaut. Teil 1/3*

| $n$        | $p_K$       | $H_o$       | $P_K$       | $t_L$             | $a$         | $\Delta H_{\max}$ |
|------------|-------------|-------------|-------------|-------------------|-------------|-------------------|
| [-]        | [m]         | [m]         | [-]         | [m]               | [m]         | [m]               |
| 0.4        | 0.56        | 1.02        | 0.55        | 1.32              | 0.00        | 0.52              |
| 0.4        | 0.56        | 1.02        | 0.55        | 1.02              | 0.20        | 0.46              |
| <b>0.4</b> | <b>0.56</b> | <b>1.02</b> | <b>0.55</b> | <b>0.89 (C)</b>   | <b>0.27</b> | <b>0.36</b>       |
| <b>0.4</b> | <b>0.56</b> | <b>1.02</b> | <b>0.55</b> | <b>0.67 (A)</b>   | <b>0.46</b> | <b>0.27</b>       |
| <b>0.4</b> | <b>0.56</b> | <b>1.02</b> | <b>0.55</b> | <b>0.64 (C)</b>   | <b>0.49</b> | <b>0.24</b>       |
| <b>0.4</b> | <b>0.56</b> | <b>1.02</b> | <b>0.55</b> | <b>0.53 (B)</b>   | <b>0.59</b> | <b>0.19</b>       |
| 0.4        | 0.56        | 1.02        | 0.55        | 0.48              | 0.64        | 0.17              |
| 0.4        | 0.56        | 2.05        | 0.27        | 2.35              | 0.00        | 1.19              |
| 0.4        | 0.56        | 2.05        | 0.27        | 2.05              | 0.20        | 1.12              |
| 0.4        | 0.56        | 2.05        | 0.27        | 1.75              | 0.42        | 0.81              |
| <b>0.4</b> | <b>0.56</b> | <b>2.06</b> | <b>0.27</b> | <b>1.51 (C)</b>   | <b>0.65</b> | <b>0.74</b>       |
| <b>0.4</b> | <b>0.56</b> | <b>2.05</b> | <b>0.27</b> | <b>1.25 (A,B)</b> | <b>0.89</b> | <b>0.57</b>       |
| 0.4        | 0.56        | 2.05        | 0.27        | 1.15              | 0.99        | 0.50              |
| 0.4        | 0.56        | 2.05        | 0.27        | 1.00              | 1.14        | 0.43              |
| 0.4        | 0.56        | 2.05        | 0.27        | 0.70              | 1.43        | 0.28              |
| 0.4        | 0.56        | 2.05        | 0.27        | 0.40              | 1.73        | 0.11              |
| 0.4        | 0.56        | 2.05        | 0.27        | 0.25              | 1.88        | 0.01              |
| <b>0.4</b> | <b>0.56</b> | <b>3.00</b> | <b>0.19</b> | <b>2.41 (C)</b>   | <b>0.69</b> | <b>Überstau</b>   |
| <b>0.4</b> | <b>0.56</b> | <b>3.00</b> | <b>0.19</b> | <b>2.03 (A)</b>   | <b>1.06</b> | <b>1.00</b>       |
| <b>0.4</b> | <b>0.56</b> | <b>3.00</b> | <b>0.19</b> | <b>1.98 (B)</b>   | <b>1.11</b> | <b>0.88</b>       |
| 0.4        | 0.56        | 3.00        | 0.19        | 1.50              | 1.58        | 0.63              |
| 0.4        | 0.56        | 3.00        | 0.19        | 1.20              | 1.88        | 0.48              |
| 0.4        | 0.56        | 3.00        | 0.19        | 0.90              | 2.18        | 0.33              |
| 0.4        | 0.56        | 3.00        | 0.19        | 0.60              | 2.48        | 0.19              |
| 0.4        | 0.56        | 3.00        | 0.19        | 0.30              | 2.78        | 0.00              |

Fortsetzung Tab. C-1, Teil 2/3

| $n$        | $p_K$       | $H_o$       | $P_K$       | $t_L$             | $a$         | $\Delta H_{max}$ |
|------------|-------------|-------------|-------------|-------------------|-------------|------------------|
| [-]        | [m]         | [m]         | [-]         | [m]               | [m]         | [m]              |
| 0.3        | 0.56        | 1.01        | 0.56        | 1.31              | 0.00        | 0.77             |
| 0.3        | 0.56        | 1.01        | 0.56        | 1.01              | 0.20        | 0.58             |
| <b>0.3</b> | <b>0.56</b> | <b>1.01</b> | <b>0.56</b> | <b>0.88 (C)</b>   | <b>0.27</b> | <b>0.45</b>      |
| <b>0.3</b> | <b>0.56</b> | <b>1.01</b> | <b>0.56</b> | <b>0.66 (A)</b>   | <b>0.46</b> | <b>0.27</b>      |
| <b>0.3</b> | <b>0.56</b> | <b>1.01</b> | <b>0.56</b> | <b>0.63 (C)</b>   | <b>0.49</b> | <b>0.26</b>      |
| <b>0.3</b> | <b>0.56</b> | <b>1.01</b> | <b>0.56</b> | <b>0.52 (B)</b>   | <b>0.59</b> | <b>0.19</b>      |
| 0.3        | 0.56        | 1.01        | 0.56        | 0.47              | 0.64        | 0.13             |
| 0.3        | 0.56        | 2.02        | 0.28        | 2.32              | 0.00        | 1.82             |
| 0.3        | 0.56        | 2.02        | 0.28        | 2.02              | 0.20        | 1.54             |
| 0.3        | 0.56        | 2.02        | 0.28        | 1.72              | 0.42        | 1.23             |
| <b>0.3</b> | <b>0.56</b> | <b>2.02</b> | <b>0.28</b> | <b>1.47 (C)</b>   | <b>0.65</b> | <b>0.80</b>      |
| <b>0.3</b> | <b>0.56</b> | <b>2.02</b> | <b>0.28</b> | <b>1.22 (A,B)</b> | <b>0.89</b> | <b>0.67</b>      |
| 0.3        | 0.56        | 2.02        | 0.28        | 0.97              | 1.14        | 0.48             |
| 0.3        | 0.56        | 2.02        | 0.28        | 0.67              | 1.43        | 0.27             |
| 0.3        | 0.56        | 2.02        | 0.28        | 0.37              | 1.73        | 0.08             |
| <b>0.3</b> | <b>0.56</b> | <b>3.00</b> | <b>0.19</b> | <b>1.98 (B)</b>   | <b>1.11</b> | <b>Überstau</b>  |
| 0.3        | 0.56        | 3.00        | 0.19        | 1.35              | 1.73        | 0.72             |
| 0.3        | 0.56        | 3.00        | 0.19        | 1.20              | 1.88        | 0.62             |
| 0.3        | 0.56        | 3.00        | 0.19        | 0.90              | 2.18        | 0.41             |
| 0.3        | 0.56        | 3.00        | 0.19        | 0.60              | 2.48        | 0.20             |
| 0.3        | 0.56        | 3.00        | 0.19        | 0.30              | 2.78        | 0.00             |
| 0.2        | 0.56        | 1.02        | 0.55        | 1.32              | 0.00        | 1.43             |
| 0.2        | 0.56        | 1.02        | 0.55        | 1.02              | 0.20        | 1.02             |
| <b>0.2</b> | <b>0.56</b> | <b>1.02</b> | <b>0.55</b> | <b>0.89 (C)</b>   | <b>0.27</b> | <b>0.78</b>      |
| <b>0.2</b> | <b>0.56</b> | <b>1.02</b> | <b>0.55</b> | <b>0.67 (A)</b>   | <b>0.46</b> | <b>0.47</b>      |
| <b>0.2</b> | <b>0.56</b> | <b>1.02</b> | <b>0.55</b> | <b>0.64 (C)</b>   | <b>0.49</b> | <b>0.42</b>      |
| <b>0.2</b> | <b>0.56</b> | <b>1.02</b> | <b>0.55</b> | <b>0.53 (B)</b>   | <b>0.59</b> | <b>0.25</b>      |
| 0.2        | 0.56        | 1.02        | 0.55        | 0.48              | 0.64        | 0.26             |
| 0.2        | 0.56        | 2.03        | 0.28        | 2.03              | 0.20        | Überstau         |
| 0.2        | 0.56        | 2.03        | 0.28        | 1.73              | 0.42        | 1.85             |
| <b>0.2</b> | <b>0.56</b> | <b>2.03</b> | <b>0.28</b> | <b>1.48 (C)</b>   | <b>0.65</b> | <b>1.30</b>      |
| <b>0.2</b> | <b>0.56</b> | <b>2.03</b> | <b>0.28</b> | <b>1.23 (A,B)</b> | <b>0.89</b> | <b>0.88</b>      |
| 0.2        | 0.56        | 2.03        | 0.28        | 0.98              | 1.14        | 0.60             |
| 0.2        | 0.56        | 2.03        | 0.28        | 0.68              | 1.43        | 0.32             |
| 0.2        | 0.56        | 2.03        | 0.28        | 0.38              | 1.73        | 0.10             |
| <b>0.2</b> | <b>0.56</b> | <b>3.01</b> | <b>0.19</b> | <b>1.99 (B)</b>   | <b>1.11</b> | <b>Überstau</b>  |
| 0.2        | 0.56        | 3.01        | 0.19        | 1.36              | 1.73        | 0.88             |
| 0.2        | 0.56        | 3.01        | 0.19        | 1.21              | 1.88        | 0.71             |
| 0.2        | 0.56        | 3.01        | 0.19        | 0.91              | 2.18        | 0.45             |
| 0.2        | 0.56        | 3.01        | 0.19        | 0.61              | 2.48        | 0.20             |
| 0.2        | 0.56        | 3.01        | 0.19        | 0.31              | 2.78        | 0.00             |

Fortsetzung Tab. C-1, Teil 3/3

| $n$        | $p_K$       | $H_o$       | $P_K$       | $t_L$             | $a$         | $\Delta H_{max}$ |
|------------|-------------|-------------|-------------|-------------------|-------------|------------------|
| [-]        | [m]         | [m]         | [-]         | [m]               | [m]         | [m]              |
| 0.1        | 0.56        | 1.02        | 0.55        | 1.32              | 0.00        | Überstau         |
| 0.1        | 0.56        | 1.02        | 0.55        | 1.02              | 0.20        | 1.97             |
| <b>0.1</b> | <b>0.56</b> | <b>1.02</b> | <b>0.55</b> | <b>0.89 (C)</b>   | <b>0.27</b> | <b>1.37</b>      |
| <b>0.1</b> | <b>0.56</b> | <b>1.02</b> | <b>0.55</b> | <b>0.67 (A)</b>   | <b>0.46</b> | <b>0.79</b>      |
| <b>0.1</b> | <b>0.56</b> | <b>1.02</b> | <b>0.55</b> | <b>0.64 (C)</b>   | <b>0.49</b> | <b>0.63</b>      |
| <b>0.1</b> | <b>0.56</b> | <b>1.02</b> | <b>0.55</b> | <b>0.53 (B)</b>   | <b>0.59</b> | <b>0.35</b>      |
| 0.1        | 0.56        | 1.02        | 0.55        | 0.48              | 0.64        | 0.26             |
| <b>0.1</b> | <b>0.56</b> | <b>2.02</b> | <b>0.28</b> | <b>1.47 (C)</b>   | <b>0.65</b> | <b>Überstau</b>  |
| <b>0.1</b> | <b>0.56</b> | <b>2.02</b> | <b>0.28</b> | <b>1.22 (A,B)</b> | <b>0.89</b> | <b>1.34</b>      |
| 0.1        | 0.56        | 2.02        | 0.28        | 0.97              | 1.14        | 0.82             |
| 0.1        | 0.56        | 2.02        | 0.28        | 0.67              | 1.43        | 0.37             |
| 0.1        | 0.56        | 2.02        | 0.28        | 0.37              | 1.73        | 0.10             |
| 0.1        | 0.56        | 3.00        | 0.19        | 1.35              | 1.73        | Überstau         |
| 0.1        | 0.56        | 3.00        | 0.19        | 1.20              | 1.88        | 0.91             |
| 0.1        | 0.56        | 3.00        | 0.19        | 0.90              | 2.18        | 0.51             |
| 0.1        | 0.56        | 3.00        | 0.19        | 0.60              | 2.48        | 0.22             |
| 0.1        | 0.56        | 3.00        | 0.19        | 0.30              | 2.78        | 0.00             |
| <b>0</b>   | <b>0.56</b> | <b>1.02</b> | <b>0.55</b> | <b>0.89 (C)</b>   | <b>0.27</b> | <b>Überstau</b>  |
| 0          | 0.56        | 1.02        | 0.55        | 0.81              | 0.34        | 2.66             |
| <b>0</b>   | <b>0.56</b> | <b>1.02</b> | <b>0.55</b> | <b>0.67 (A)</b>   | <b>0.46</b> | <b>1.26</b>      |
| <b>0</b>   | <b>0.56</b> | <b>1.02</b> | <b>0.55</b> | <b>0.64 (C)</b>   | <b>0.49</b> | <b>1.07</b>      |
| <b>0</b>   | <b>0.56</b> | <b>1.02</b> | <b>0.55</b> | <b>0.53 (B)</b>   | <b>0.59</b> | <b>0.49</b>      |
| 0          | 0.56        | 1.02        | 0.55        | 0.48              | 0.64        | 0.33             |
| 0          | 0.56        | 1.02        | 0.55        | 0.36              | 0.76        | 0.14             |
| 0          | 0.56        | 1.02        | 0.55        | 0.27              | 0.84        | 0.07             |
| <b>0</b>   | <b>0.56</b> | <b>2.03</b> | <b>0.28</b> | <b>1.23 (A,B)</b> | <b>0.89</b> | <b>Überstau</b>  |
| 0          | 0.56        | 2.03        | 0.28        | 1.13              | 0.99        | 1.986            |
| 0          | 0.56        | 2.03        | 0.28        | 0.98              | 1.14        | 1.305            |
| 0          | 0.56        | 2.03        | 0.28        | 0.68              | 1.43        | 0.435            |
| 0          | 0.56        | 2.03        | 0.28        | 0.38              | 1.73        | 0.072            |
| <b>0</b>   | <b>0.56</b> | <b>1.00</b> | <b>0.56</b> | <b>0.65 (A)</b>   | <b>0.46</b> | <b>0.86</b>      |
| <b>0</b>   | <b>0.56</b> | <b>2.01</b> | <b>0.28</b> | <b>1.21 (A)</b>   | <b>0.89</b> | <b>Überstau</b>  |
| <b>0</b>   | <b>0.56</b> | <b>3.02</b> | <b>0.19</b> | <b>2.05 (A)</b>   | <b>1.06</b> | <b>Überstau</b>  |
| <b>0</b>   | <b>1.01</b> | <b>1.00</b> | <b>1.01</b> | <b>0.48 (A)</b>   | <b>0.87</b> | <b>0.05</b>      |
| <b>0</b>   | <b>1.01</b> | <b>2.01</b> | <b>0.50</b> | <b>1.34 (A)</b>   | <b>0.98</b> | <b>1.80</b>      |
| <b>0</b>   | <b>1.01</b> | <b>3.02</b> | <b>0.34</b> | <b>1.87 (A)</b>   | <b>1.38</b> | <b>Überstau</b>  |
| <b>0</b>   | <b>1.26</b> | <b>1.00</b> | <b>1.26</b> | <b>0.40 (A)</b>   | <b>1.11</b> | <b>0.04</b>      |
| <b>0</b>   | <b>1.26</b> | <b>2.01</b> | <b>0.63</b> | <b>1.41 (A)</b>   | <b>1.11</b> | <b>1.19</b>      |
| <b>0</b>   | <b>1.26</b> | <b>3.02</b> | <b>0.42</b> | <b>1.95 (A)</b>   | <b>1.45</b> | <b>Überstau</b>  |
| <b>0</b>   | <b>1.61</b> | <b>1.00</b> | <b>1.61</b> | <b>0.30 (A)</b>   | <b>1.46</b> | <b>0.04</b>      |
| <b>0</b>   | <b>1.61</b> | <b>1.99</b> | <b>0.81</b> | <b>1.38 (A)</b>   | <b>1.41</b> | <b>0.35</b>      |
| <b>0</b>   | <b>1.61</b> | <b>1.99</b> | <b>0.81</b> | <b>1.26 (A)</b>   | <b>1.47</b> | <b>0.22</b>      |
| <b>0</b>   | <b>1.61</b> | <b>1.99</b> | <b>0.81</b> | <b>1.36 (A)</b>   | <b>1.42</b> | <b>0.35</b>      |
| <b>0</b>   | <b>1.61</b> | <b>3.02</b> | <b>0.53</b> | <b>1.80 (A)</b>   | <b>1.79</b> | <b>Überstau</b>  |