



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Energie BFE
Office fédéral de l'énergie OFEN
Ufficio federale dell'energia UFE
Uffizi federal d'energia UFE



(Foto: Ofima)

SCHWEMMHOLZ AN HOCHWASSERENTLASTUNGEN



INHALT

Ausgangslage

VAW-Studie (2022) zu Schwemmholtz an Talsperren

- physikalisches Modell
- Verklausungswahrscheinlichkeit
- Aufstau

VAW-Dissertation (Schalko 2018) zu Schwemmholtz in Fliessgewässern

- Aufstau
- Charakteristisches Volumen

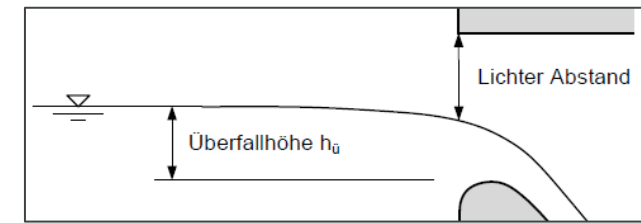


AUSGANGSLAGE - LITERATUR

- Godtland K, Tesaker E (1994): Clogging of spillways by trash. Proc. 18th ICOLD Congress, Durban: 543–557
 - Verklausungswahrscheinlichkeit von Einzelhölzern und SH-Gruppen
 - für $b/L > 0.8$ werden Einzelhölzer grösstenteils durchgeleitet
 - für $b/L_{\max} > 1.1$ werden SH-Gruppen grösstenteils durchgeleitet
- STK (2017): Schwemmgut an HWE von Talsperren
- Schalko I (2018): Modeling hazards related to large wood in rivers. VAW-Mitteilungen 249, ETH Zürich
 - Aufstau $\Delta H/H$ ($v \gg 0$)
 - Charakteristisches SH-Volumen V_c ($v \gg 0$)
- 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
 - SH-Gruppen am Standardüberfall
 - Aufstau $\Delta H/H$
 - bei Pfeilerauskrangung $p/H_o > 0.35$ kein Aufstau
- Pfister M, Bénet L, De Cesare G (2022): Force imposée sur un râtelier en amont d'un évacuateur de crue par des bois flottants. Wasser Energie Luft, 114(4)



RL TEIL C2



Breite

...der Entlastungsöffnung soll breiter sein als 80% der zu erwartenden Baumlänge (Godtland & Tesaker, 1994)

Staukote	$z \leq 600$ m ü. M.	600 m ü. M. $< z < 1800$ m ü. M.	$z \geq 1800$ m ü. M.
Minimale Breite der Entlastungsöffnung	15 m	Lineare Interpolation	4 m

Minimale Breite der Entlastungsöffnung abhängig von der Staukote (CFBR 2013)

Höhe

...der Entlastungsöffnung soll höher sein als 15% der zu erwartenden Baumlänge (für $b > 110\% \cdot L$)
...der Entlastungsöffnung soll höher sein als 20% der zu erwartenden Baumlänge (für $b = 80\% \dots 110\% \cdot L$)
(Godtland & Tesaker, 1994)

Überfallhöhe (vgl. Abbildung 6) in der aussergewöhnlichen Situation	$h_u \leq 2$ m	$h_u > 2$ m
Mindestmass des lichten Abstands (vgl. Abbildung 6) in der aussergewöhnlichen Situation	2 m	1.5 m

Minimaler lichter Abstand abhängig von der Überfallhöhe (CFBR 2013)



«Weiterführende Abklärungen sind dann vorzunehmen, um die tatsächliche Verklausungsgefahr zu beurteilen.»



VAW-SCHWEMMHOLZSTUDIE (2022)

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

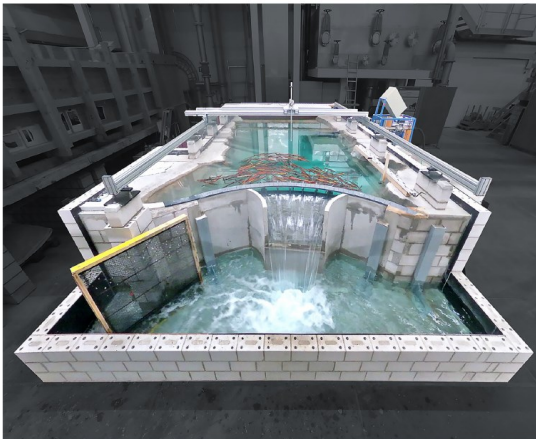


Foto: VAW 2020



Versionshistorie	Bemerkungen
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 Pfeilerauskrängung p_a 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

Beauftragte:
ETH Zürich
Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW)
Hönggerbergstrasse 26, CH-8093 Zürich
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.

2/117

- ≈120 Seiten
- Haupterkenntnisse auf 12 Seiten in Kap. 7 & 8 zusammengefasst

Die nachfolgenden Inhalte stammen (soweit nicht anders gekennzeichnet) aus dem VAW-Bericht oder aus Projektbesprechungen.

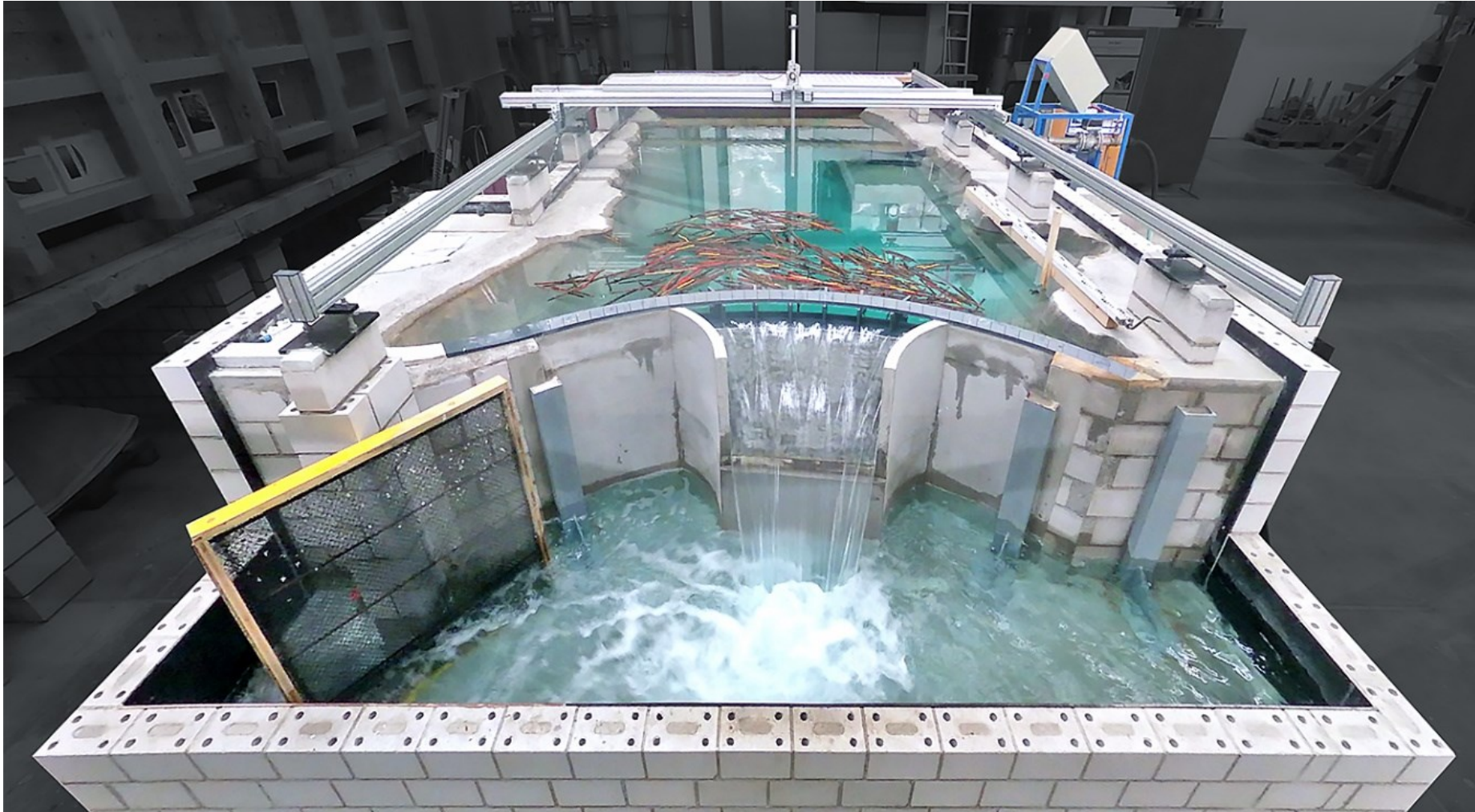


ZIELE DER VAW-SCHWEMMHOLZSTUDIE

- Bestätigung oder Widerlegung der Erkenntnisse früherer Studien
- Verklausungswahrscheinlichkeit P von Einzelhölzern und Rückhalteverhältnis RV von Schwemmholzgruppen
- Bestimmung des Wasserspiegelanstiegs ΔH bei kompletter Verklausung der HWE an Wehrpfeilern oder Schwemmholzrechen (Funktion der Pfeilerauskragung p , Feinmaterialanteil m , Porosität n)
- Charakteristisches Schwemmholzvolumen V_c an HWE von Talsperren
- Einfluss unterschiedlicher Überfallprofile auf Wasserspiegelanstieg ΔH infolge Verklausung

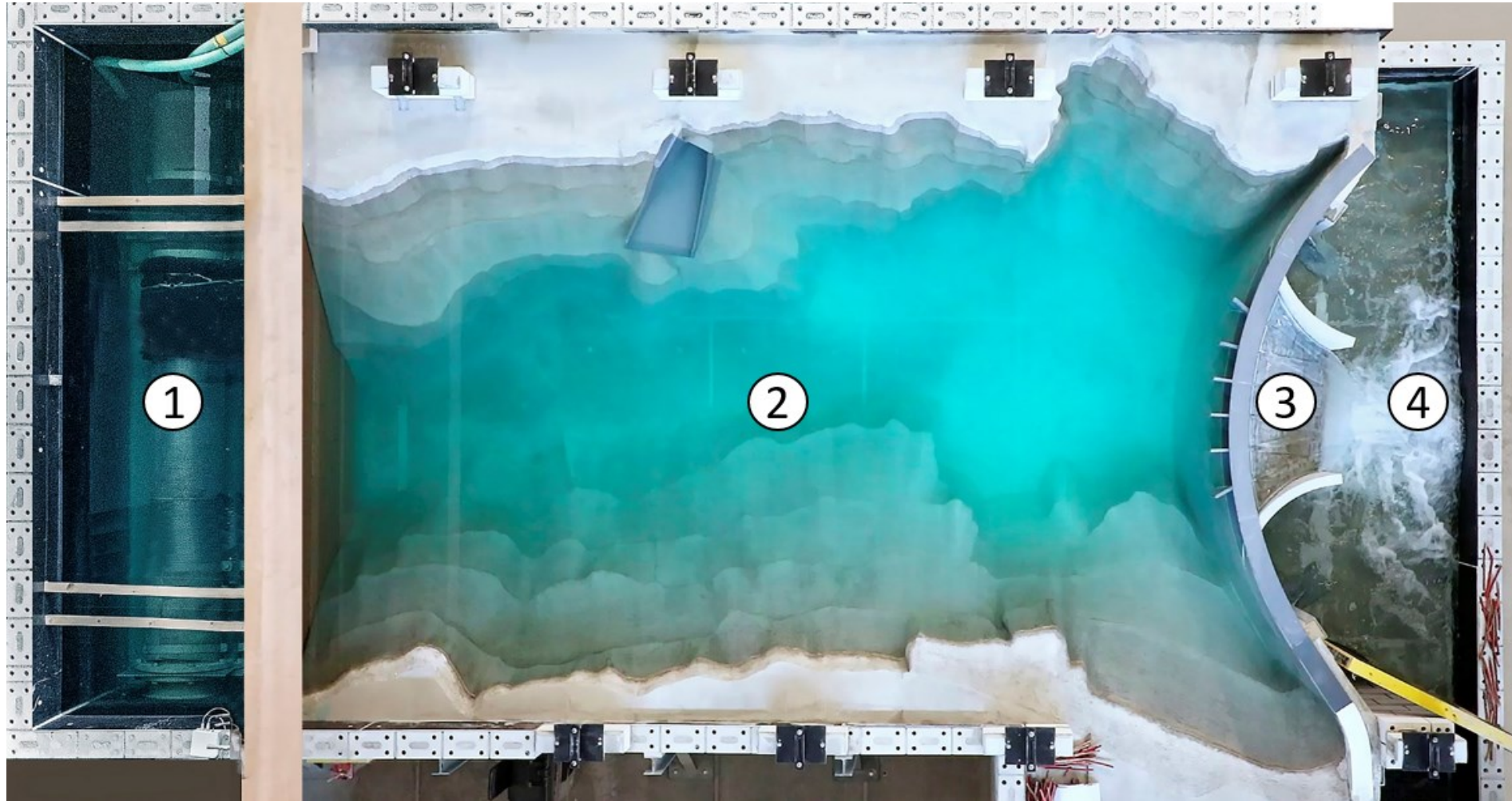


PHYSIKALISCHES MODELL OVA SPIN (1:30)



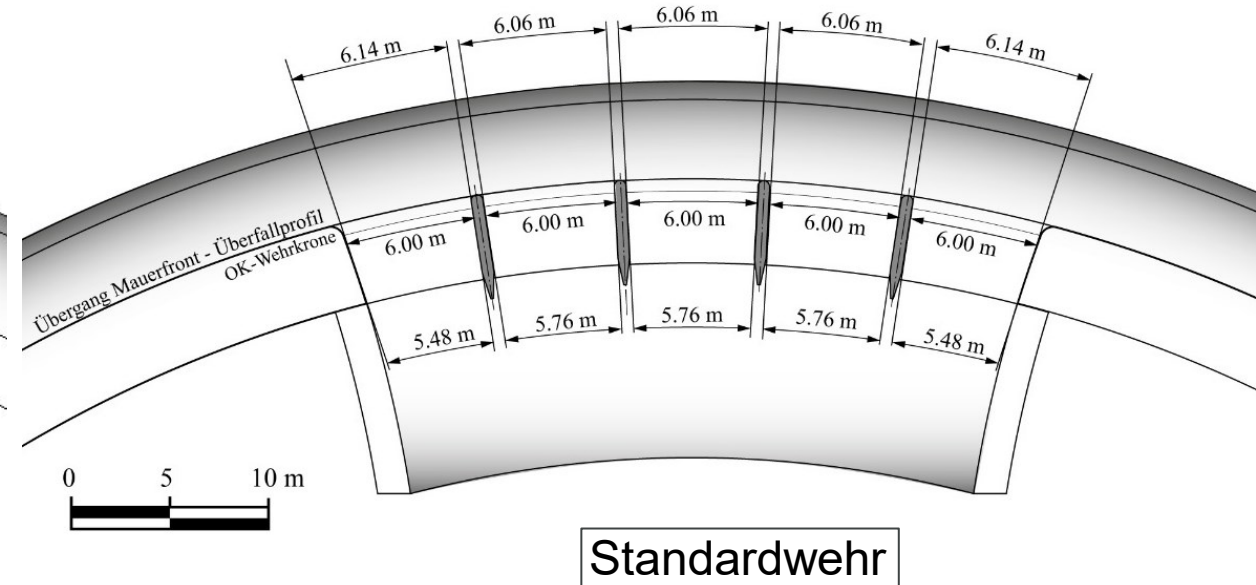
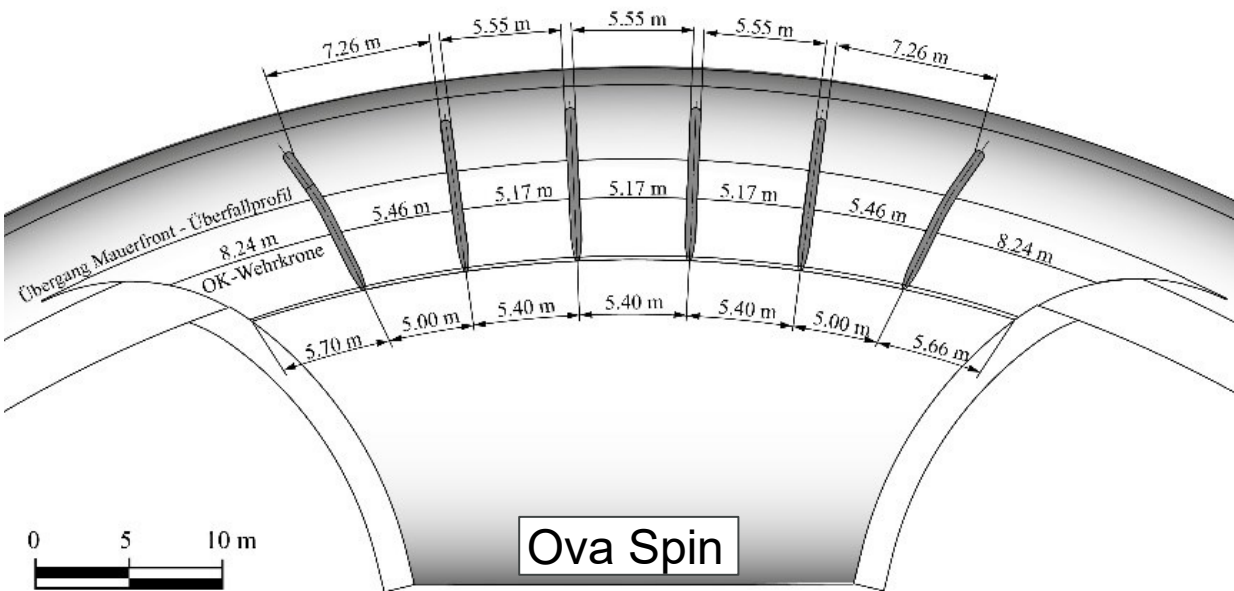


PHYSIKALISCHES MODELL OVA SPIN (1:30)





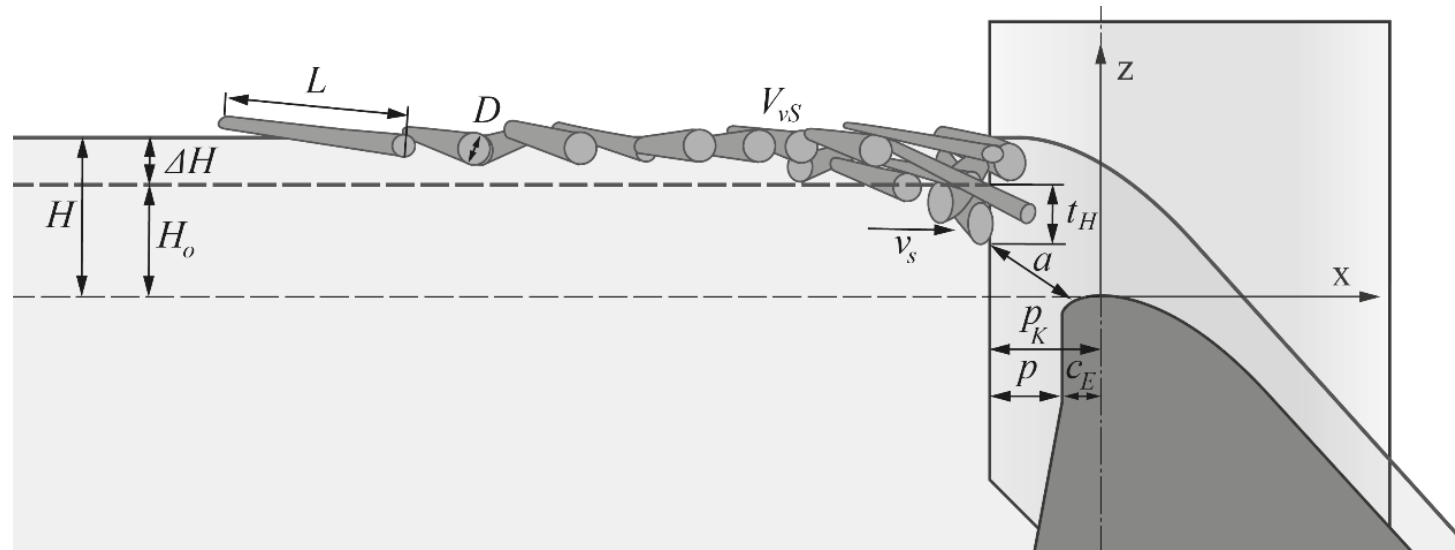
PHYSIKALISCHES MODELL (1:30)



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



DEFINITION

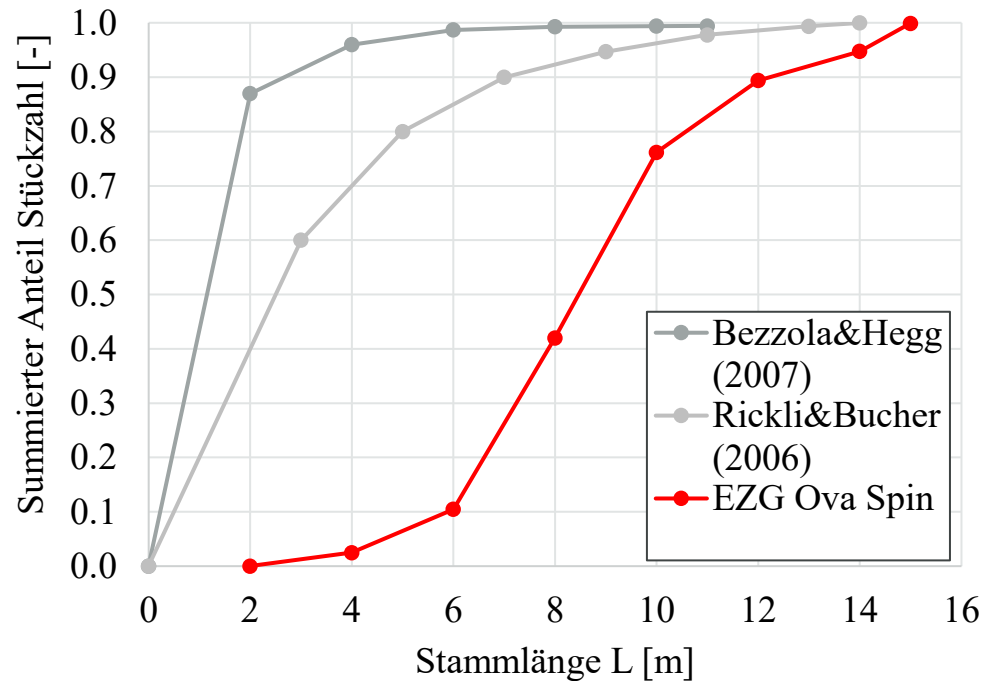


H_o Referenz-Überfallhöhe
 v_s Referenz-Geschwindigkeit an Pfeilernase
 p_K Pfeilerauskragung rel. zu Wehrkronenscheitel
 c_E horizontale Distanz
 L Holzlänge
 D Holzdurchmesser

V_{vS} verklaustes Schwemmholzvolumen
 t_H Eintauchtiefe des Verklausungskörpers
 a lichter Abstand zw. Verklausung und Wehr
 ΔH Wasserspiegelanstieg infolge Verklausung
 H Überfallhöhe infolge Verklausung



SH-EIGENSCHAFTEN (LÄNGE)



Bezzola & Hegg (2007): Daten von Ereignisanalyse HW 2005, im Mittelland ca. 90% des abgelagerten Schwemmholzes $L < 2$ m, $L/D \approx 20$

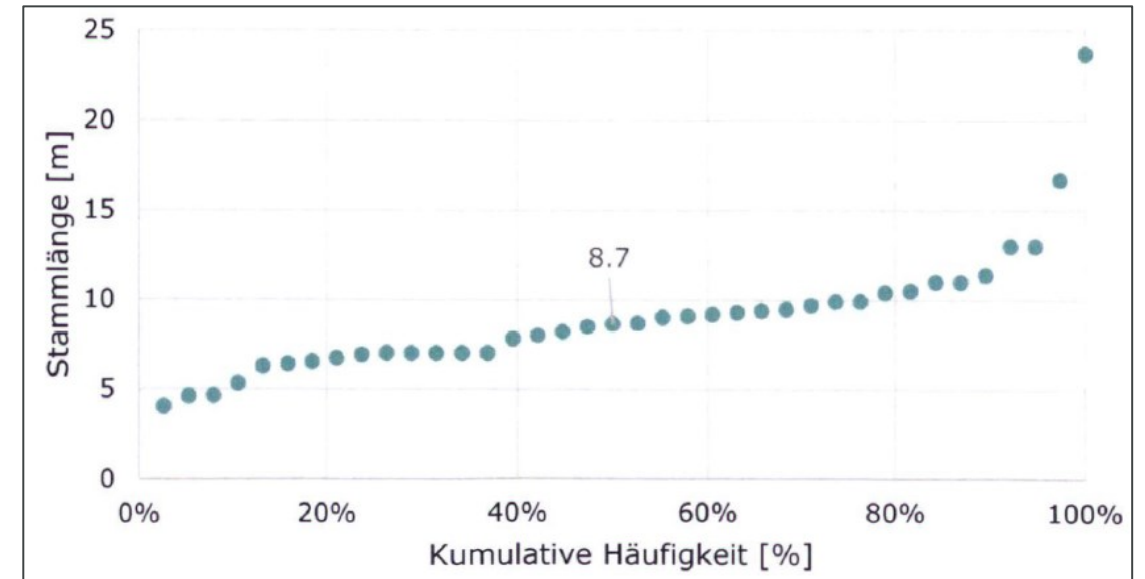
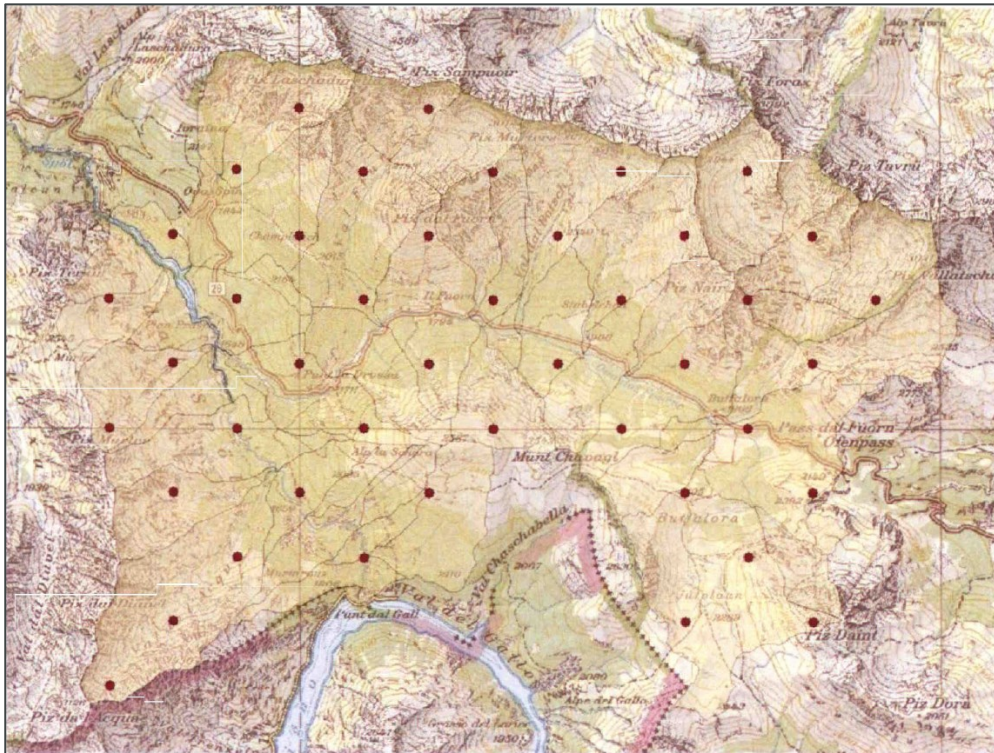
Rickli & Bucher (2006): liegendes Schwemmholz in Wildbächen vermessen, deutlich grössere Längen

EZG *Ova Spin* (1630 m ü. M.): im alpinen Raum Eintrag von Bäumen durch Hangrutschungen mit sehr kurzer Transportstrecke, unzerkleinertes SH an HWE



SH-EIGENSCHAFTEN (LÄNGE) – OVA SPIN

- Messdaten aus Landesforstinventar (LFI) der WSL
- 38 liegende tote Probebäume ab 12 cm Brusthöhendurchmesser



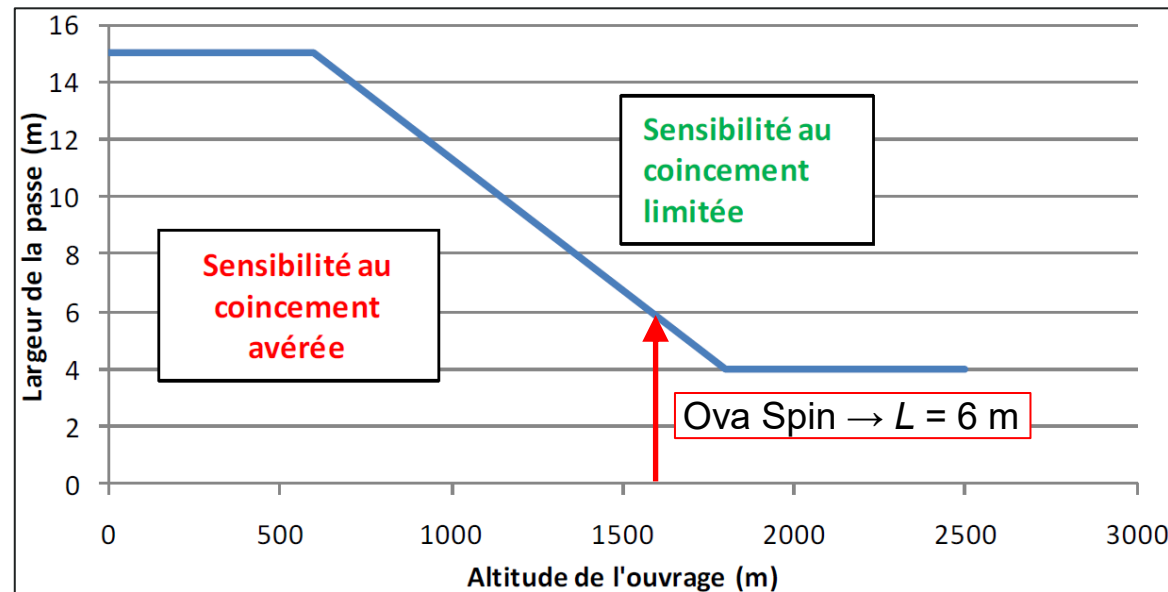
(Schwemmholzstudie Ova Spin, AF-Consult 2018)



SH-EIGENSCHAFTEN (LÄNGE)

Comité Français des Barrages et Réservoirs (CFBR 2013):

- Minimale Wehrbreite bei Neubauten 10...15 m
- Veränderung mit Klimawandel (1°C verschiebt Werte um 180 m)
- (Transportprozesse/Verkleinerung werden nicht berücksichtigt)

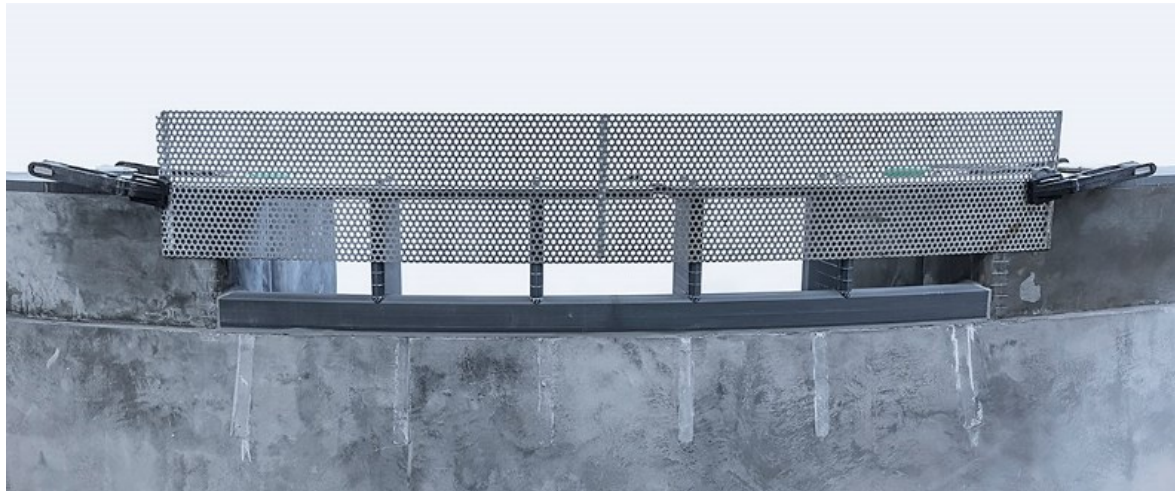




SH-EIGENSCHAFTEN (EINZELHÖLZER)

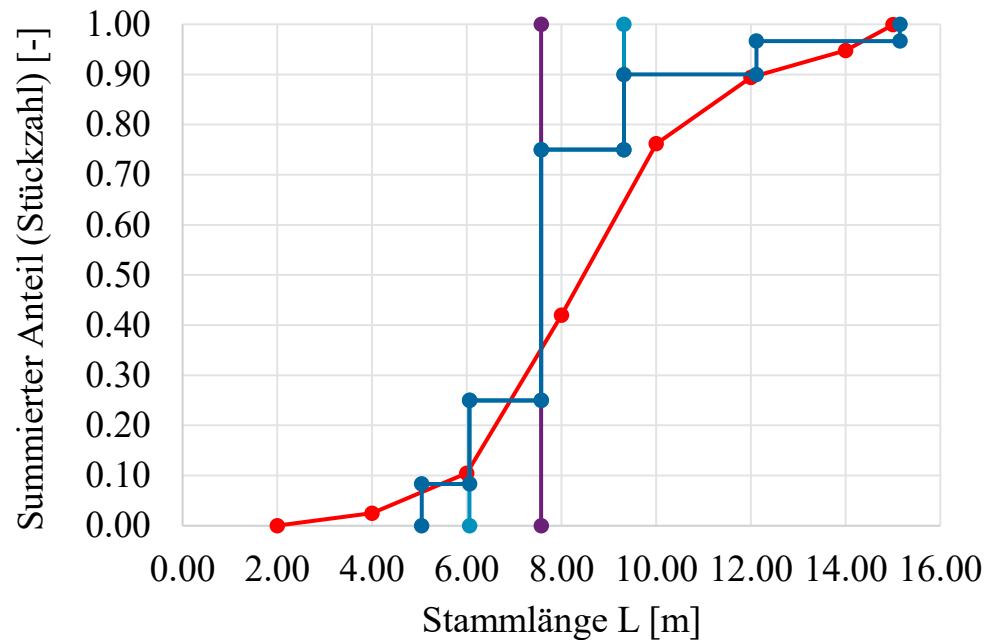
- Reproduzierbarkeit
- geometrisch skaliert
- entastetes Schnittholz (kein Verhaken von Hölzern → dichte Packung)
- Steifigkeit der Modellhölzer zu gross (bezogen auf Naturmassstab)
- $\rho \approx 800 \text{ kg/m}^3$
- $L = B$, $L = 1.25 \cdot B$ (G&T 1994), $L = 2 \cdot B$
- Keine Blätter, Feinmaterial als Lochblech mit Porosität n

	Dichte [kg/m ³]
Arve	580 – 720
Fichte	700 – 850
Föhre	750 – 850
Lärche	750 – 900





SH-EIGENSCHAFTEN (GRUPPEN)



	Gruppe (a) uniform	Gruppe (b) schmal verteilt	Gruppe (c) 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
σ	0.0 m	1.2 m	2.1 m



SH-EIGENSCHAFTEN (AUFSTAU)

- Stammlängen $L = 1.3 \dots 1.4 \cdot B$
- Verklaustes Volumen max. $V_{vS} = 415 \text{ m}^3$



		Klasse A	Klasse B	Klasse C
Durchmesser D	[m]	0.37 ± 0.05	0.20 ± 0.05	0.54 ± 0.07
Stammlänge L	[m]	7.91 ± 1.04	7.59 ± 0.45	7.80 ± 0.53
Dichte ρ	[kg/m ³]	843 ± 23	779 ± 10	817 ± 32



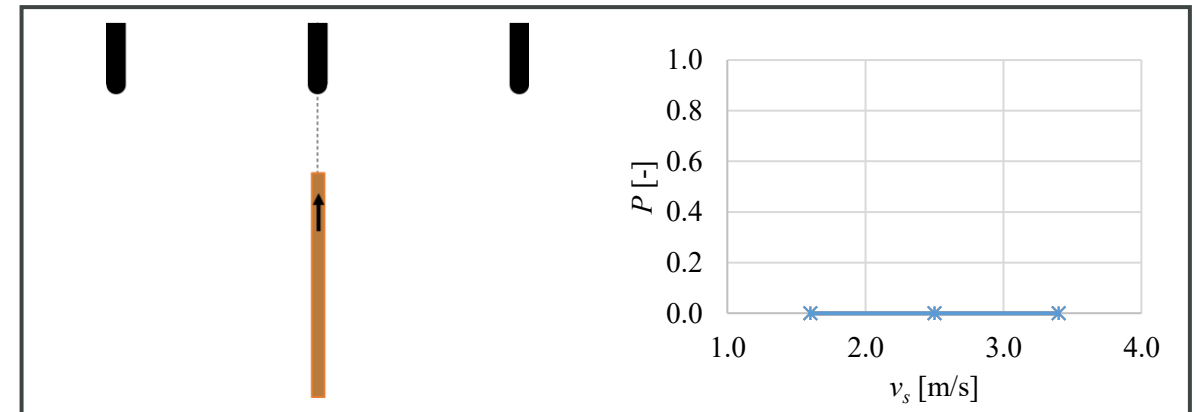
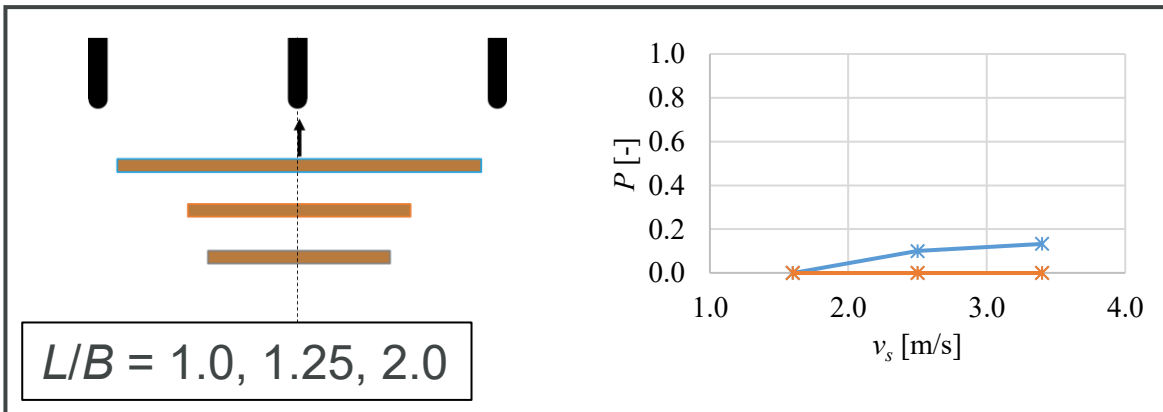
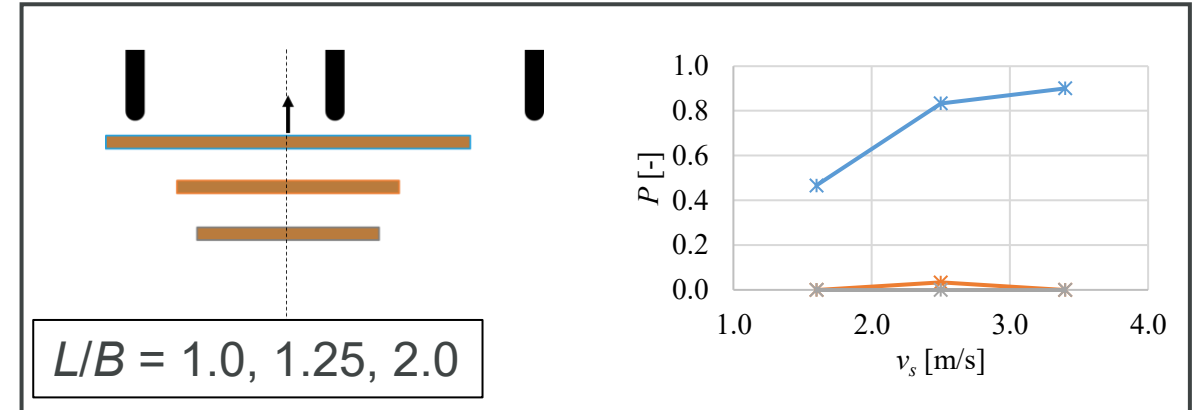
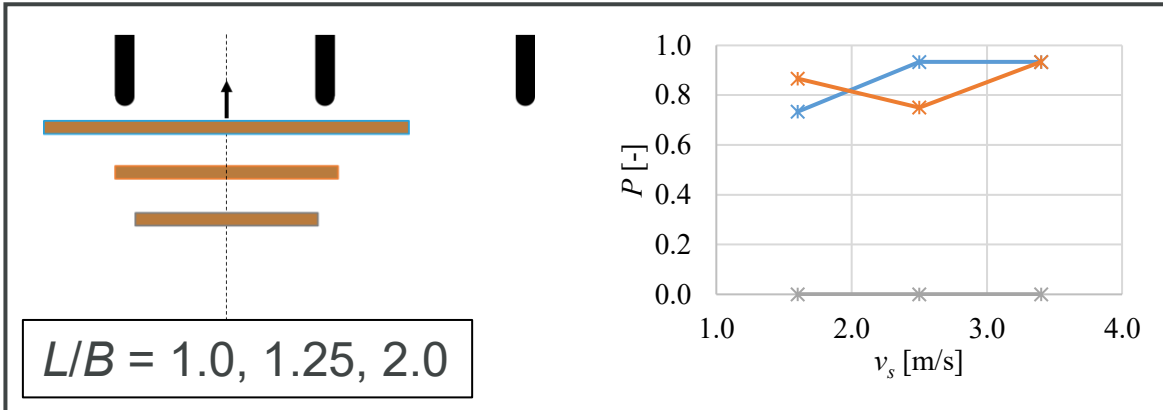
HOLZEIGENSCHAFTEN (POROSITÄT)

$$\text{Auflockerungsfaktor } AF = \frac{\text{Volumen lose angehäuftes Holz } V_L}{\text{Festvolumen verklaustes Holz } V_{vS}}$$

- Feldmessungen nach Überschwemmungsereignissen in der Schweiz (Lange & Bezzola, 2006):
 $AF = 2$ (sehr kompakt) bis 5 (lockere Akkumulation) → Porosität $n = 0.5...0.8$ (ohne Feinmaterial)
- Livers & Wohl (2021) haben 183 natürlich gebildete SH-Verkläusungen in Flüssen im Rocky Mountain National Park in Colorado (USA) vermessen:
Visuell abgeschätzte Porosität $n = 0.05...0.75$ (Median = 0.35)
- Spreitzer et al. (2020) untersuchten Schwemmholzansammlungen an Brückenpfeilern (zufällig ausgerichtetes Holz in Verkläusung): $n = 0.6...0.7$

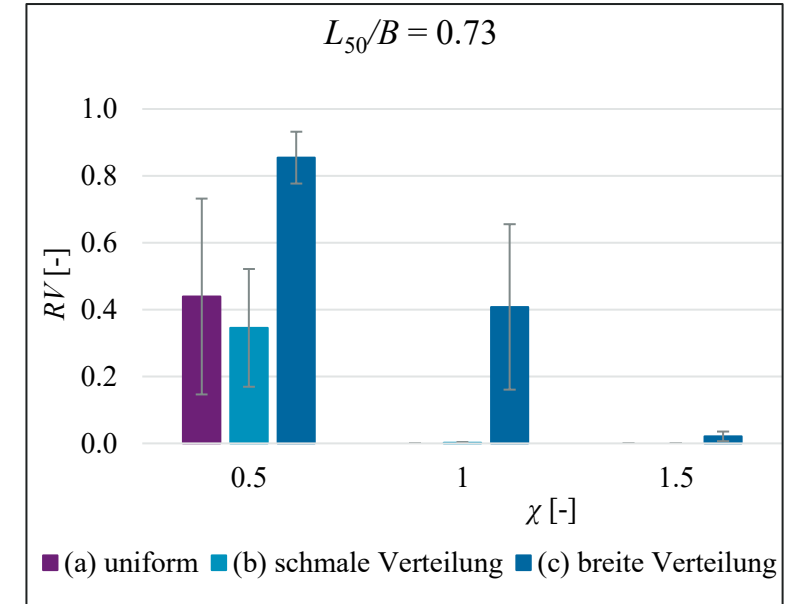
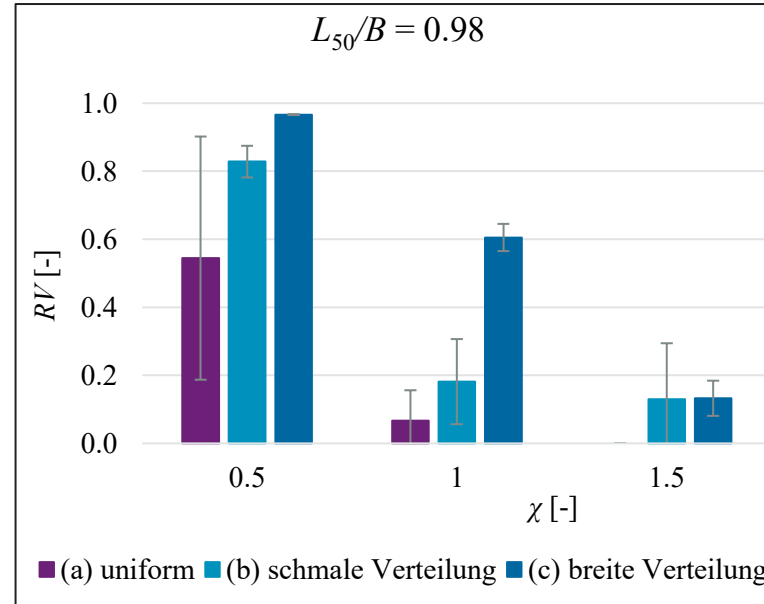
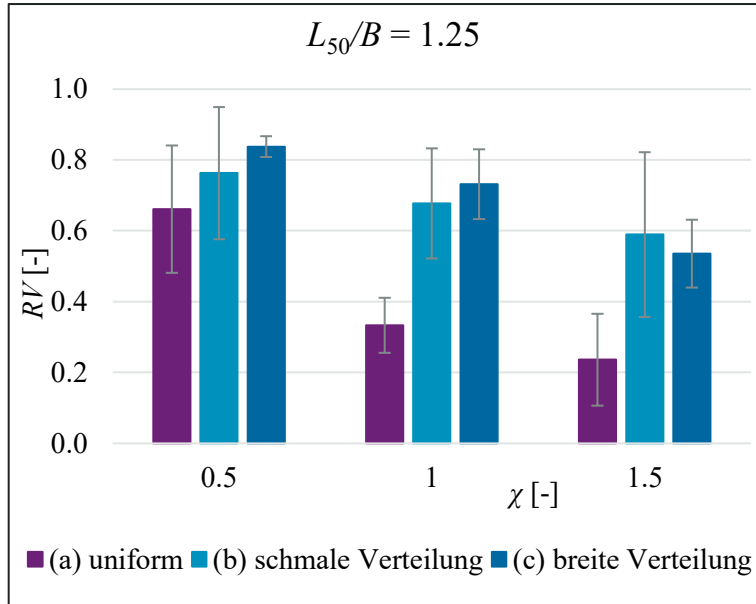


ERGEBNISSE WAHRSCHEINLICHKEIT VERKLAUSUNG EINZELHÖLZER





ERGEBNISSE WAHRSCHEINLICHKEIT VERKLAUSUNG VON SH-GRUPPEN



Rückhalteverhältnis RV steigt

- mit abnehmender relativer Überfallhöhe $\chi = H/H_d$
- mit zunehmender relativer Stammlänge L/B
- mit zunehmender Breite der Stammlängenverteilung des Schwemmholzteppichs



SH-EIGENSCHAFTEN – ZUGABEART AUFSTAU

Gruppen



Schwemmholzteppich

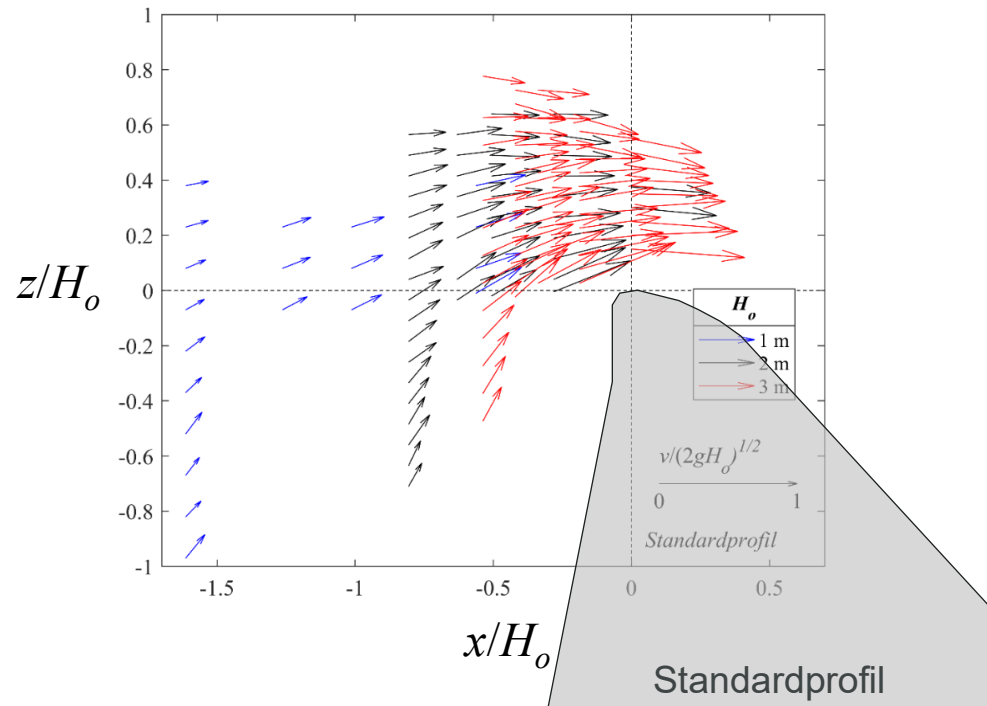


Systematische Einzelzugabe

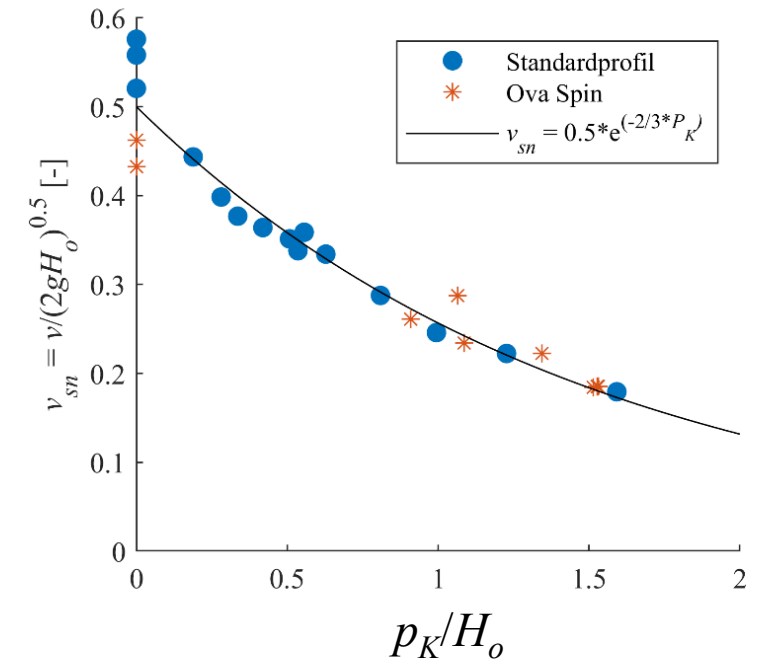




HYDRAULIK AM WEHRÜBERFALL



Geometrie (x, z) normiert mit Überfallhöhe H_o
→ Geschwindigkeitsfelder geometrisch ähnlich

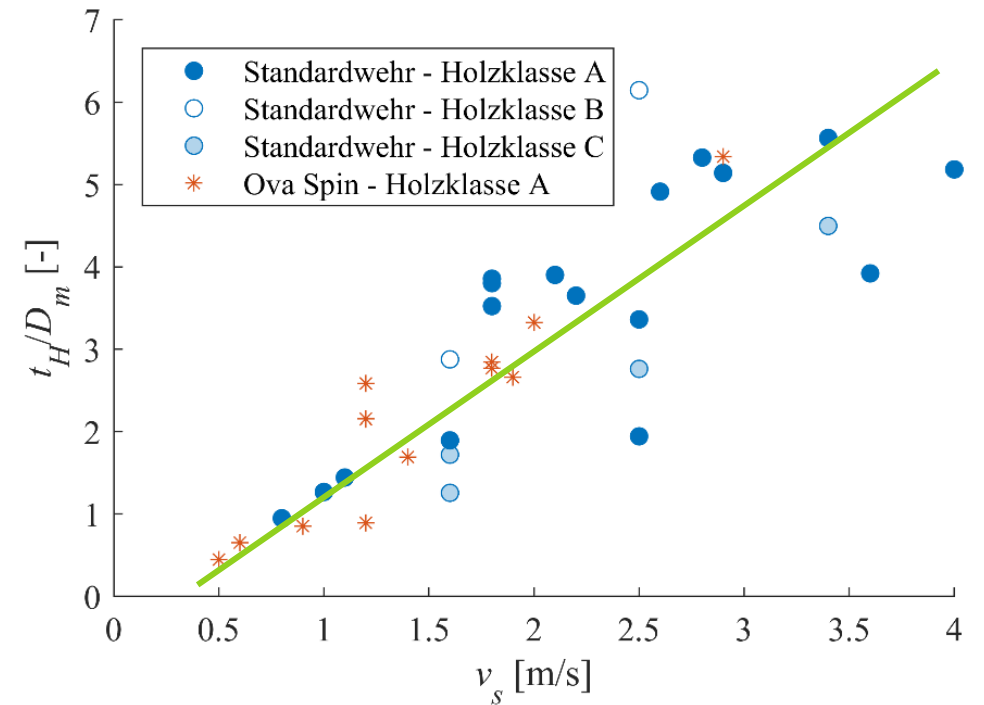
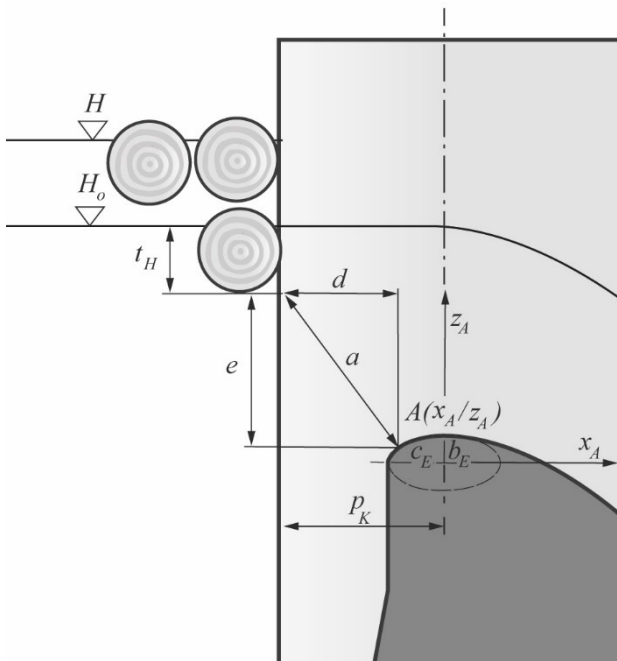


Normierte Oberflächengeschwindigkeit in
Funktion des Abstands zum Wehrkronenscheitel



SCHWEMMHOLZKÖRPER – EINTAUCHTIEFE t_H

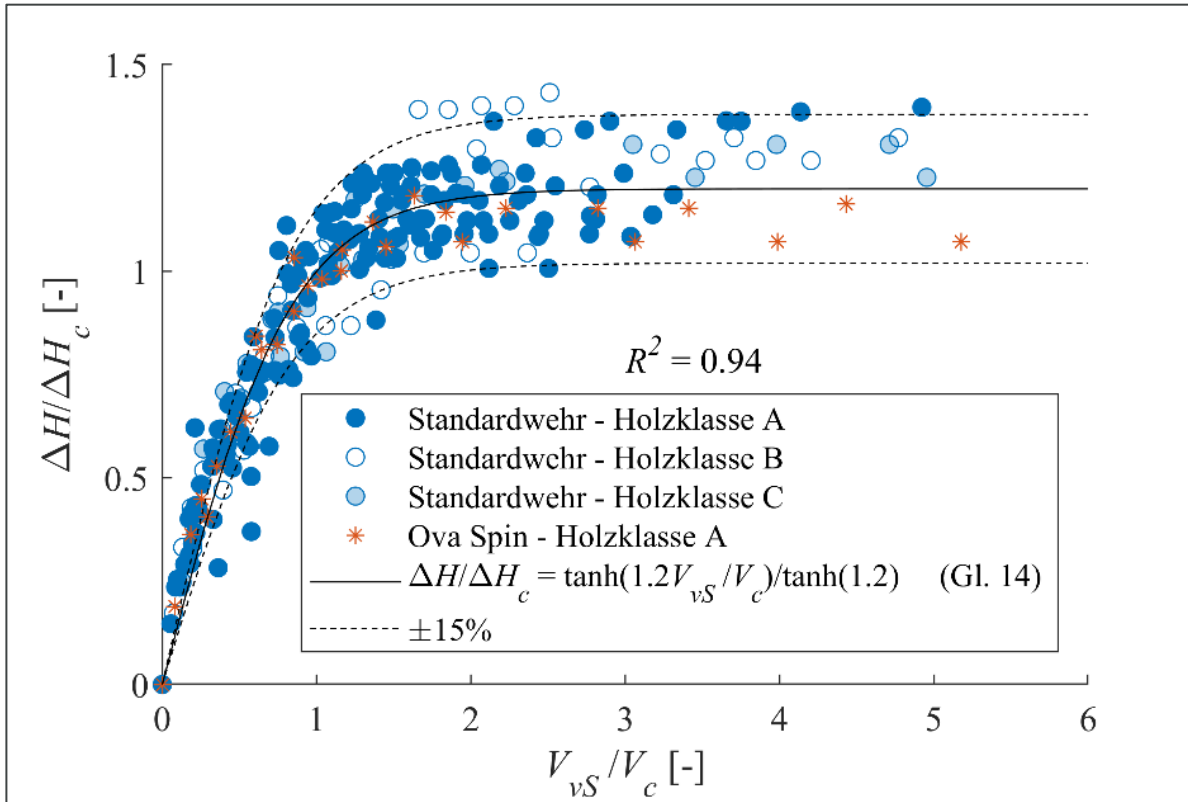
Funktion der Fließgeschwindigkeit (Dichte und Stammdurchmesser)



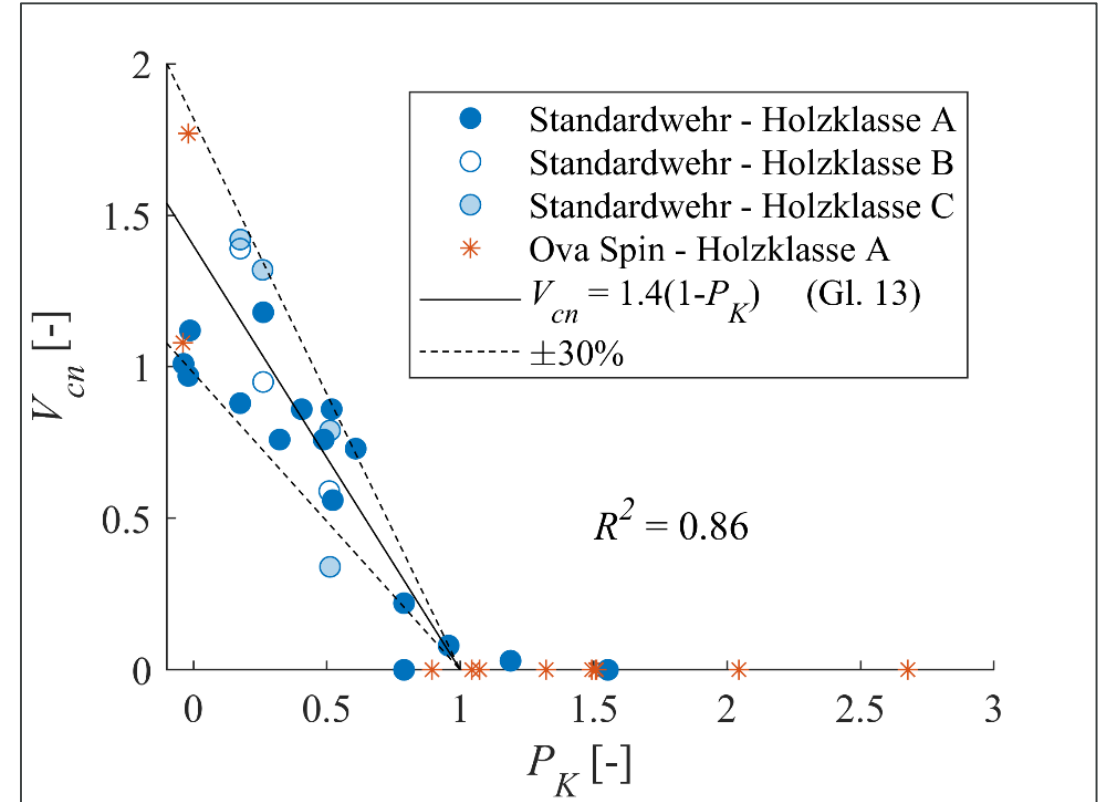
Bis $v_s = 1.0$ m/s → 1-lagiger SH-Teppich



CHARAKTERISTISCHES SH-VOLUMEN V_{cn}



$$\frac{\Delta H}{\Delta H_c} = \frac{\tanh\left(1.2 \cdot \frac{V_{vS}}{V_c}\right)}{\tanh(1.2)}$$

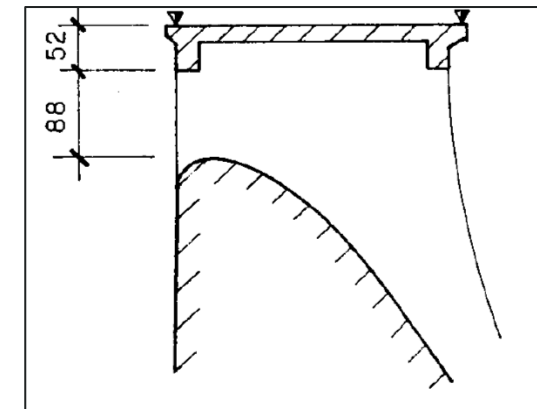
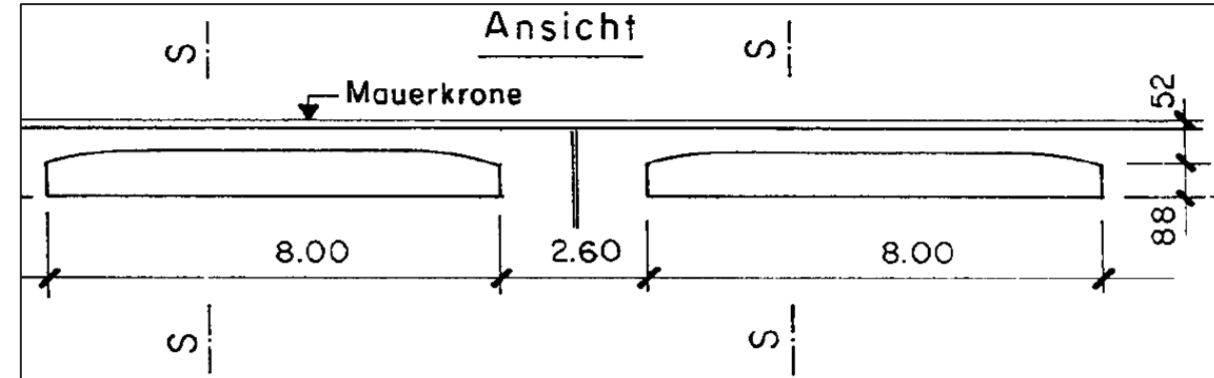


$$V_{cn} = \frac{V_c}{WH_o D_m} = \max[1.4 \cdot (1 - P_K), 0]$$



CHARAKTERISTISCHES SH-VOLUMEN V_{CN}

- Fiktives Beispiel





CHARAKTERISTISCHES SH-VOLUMEN V_{CN}

- Pfeilerauskrugung $p_k \approx 0.35$ m
- Hochwasserzufluss $Q_{in} = 35 \text{ m}^3/\text{s}$
- Ausfluss über HWE $Q_{out} = 32 \text{ m}^3/\text{s} \rightarrow H_o = 1.0$ m
- Relative Pfeilerauskrugung $P_K = p_K/H_o = 0.35/1.0 = 0.35$

- Wehrbreite $W = 2 \cdot 8.0$ m
- Holzdurchmesser $D = 0.3$ m

$$\begin{aligned} V_c &= (WH_o D_m) \cdot 1.4 \cdot (1 - P_K) \\ &= (2 \cdot 8 \text{ m} \cdot 1.0 \text{ m} \cdot 0.3 \text{ m}) \cdot 1.4 \cdot (1 - 0.35) \approx 4.4 \text{ m}^3 \end{aligned}$$



BERECHNUNGSSCHEMA

1. normierte Oberflächengeschwindigkeit v_{sn} an Pfeilernase
(für $P_K = p_K/H_o = 0 \dots 2.0$)

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

2. relative Eintauchtiefe der Verklausung $T_H = t_H/H_o$

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

3. lichter Abstand a zwischen Verklausung und Wehr

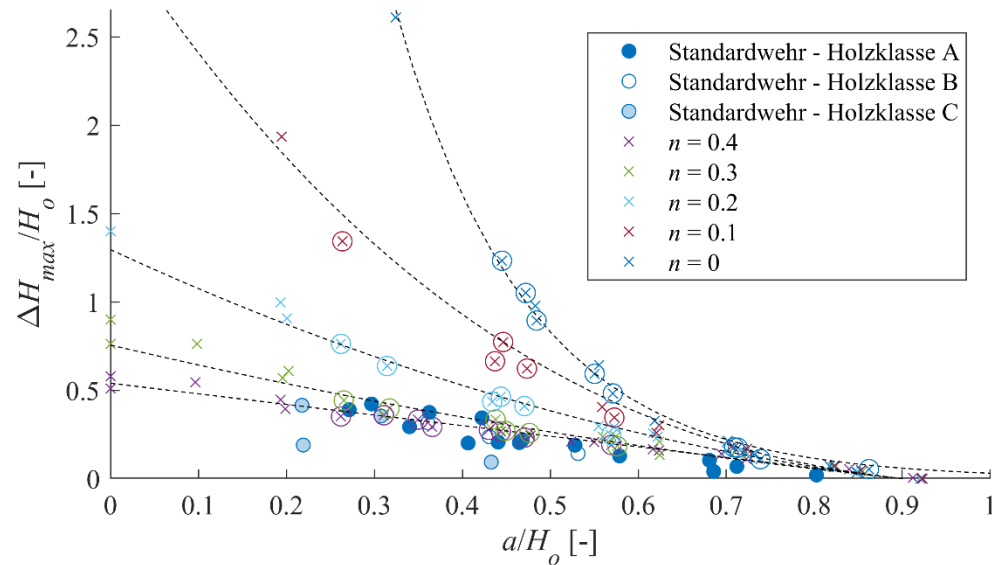
$$a = \sqrt{\left(p_K - \frac{2}{3} c_E\right)^2 + (H_o - t_H + 0.127 c_E)^2}$$

4. relativer maximaler Wasserspiegelaufstau $\Delta H_{max}/H_o$
(für $a/H_o > 0.3$)

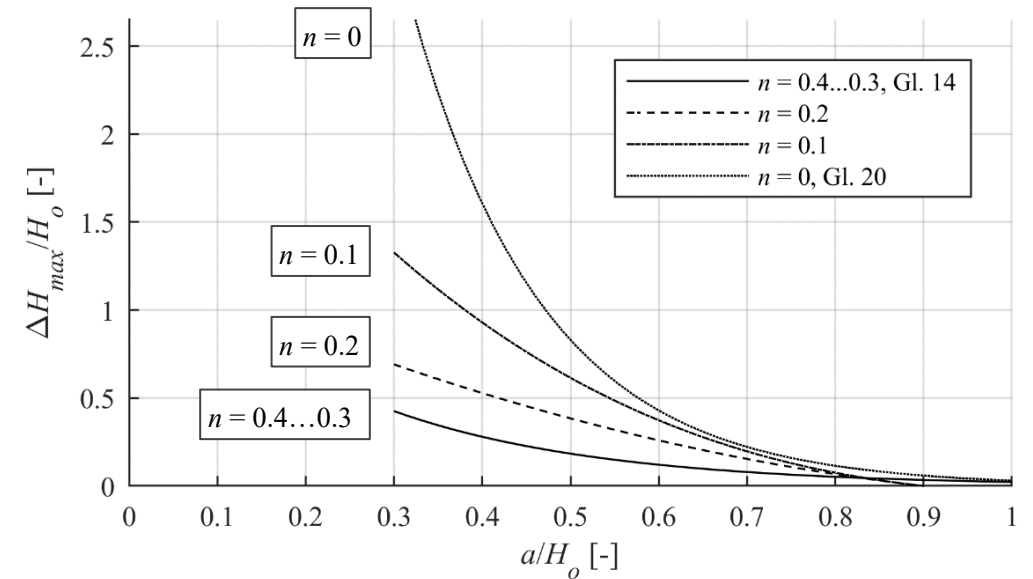
$$\frac{\Delta H_{max}}{H_o} = 1.5 e^{-4.2 \frac{a}{H_o}}$$



BERECHNUNG – POROSITÄT



Lochbleche mit 30% & 40% Porosität erzeugen ähnlichen Aufstau wie Holzversuche



Grafische Ermittlung für $a/H_o \geq 0.3$ und $n \leq 0.3$



SCHLUSSFOLGERUNGEN VAW SH-STUDIE

- Mittlere Holzlänge L_{50} nicht massgebend für Verklausungsprozess
- Schwemmholzteppiche, verastete Stämme und Wurzelstöcke können nicht ausgeschlossen werden



Godtland und Tesaker Kriterium für Verklausungswahrscheinlichkeit ($b/L > 0.8$)
nicht ausreichend für BFE-Richtlinie C2

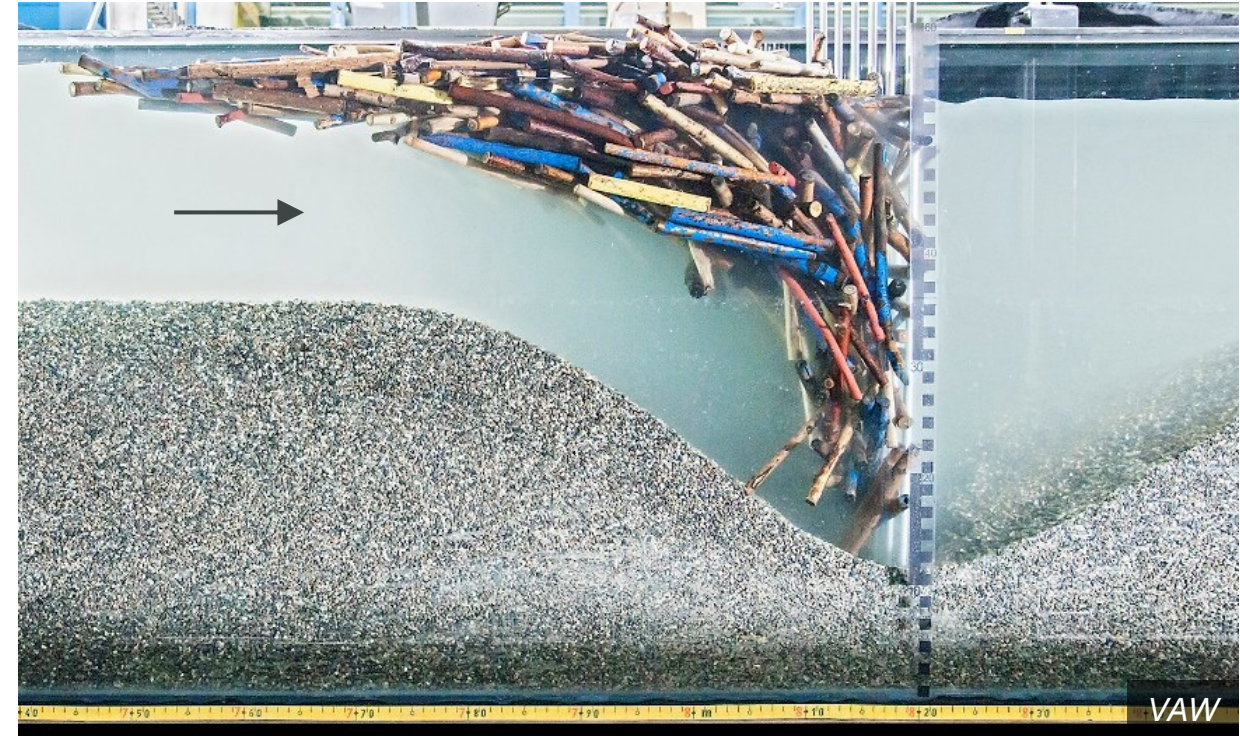
- Gleichungen nur anwendbar, wenn lichter Abstand $a/H_o \geq 0.3$
- Berechnung nicht für breitkroniges Wehr anwendbar
- kein signifikanter Aufstau, wenn Holz in Bereichen mit $v_s < 0.8-1.0$ m/s zurückgehalten wird
- Schwemmholzrechen um $p_K = H_o$ vorlagern (Aufstau $\leq 10\%$)
- In Berechnungsverfahren nicht berücksichtigt: Verklausung auf Wehrkrone ($D_{max}/H_o \geq 0.35$), Einfluss der Holzdichte, Einfluss der Durchmesser-Verteilung



SCHWEMMHOLZ IN FLIESSGEWÄSSERN



Amt für Wasser und Energie (Kanton St. Gallen)



→ je nach Geometrie ist Fließgeschwindigkeit im Zulauf nicht vernachlässigbar



SCHWEMMHOLZ IN FLIESSGEWÄSSERN



Versuchsanstalt für Wasserbau
Hydrologie und Glaziologie
der Eidgenössischen
Technischen Hochschule Zürich

Mitteilungen

249

Modeling hazards related to large wood in rivers

Isabella Schalko

Zürich, 2018

Herausgeber: Prof. Dr. Robert Boes

ETH zürich

Zitiervorschlag für VAW-Mitteilungen:

Schalko, I. (2018).
Modeling hazards related to large wood in rivers.

VAW-Mitteilungen 249, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW),
(R. M. Boes, ed.), ETH Zürich, Schweiz.

Im Eigenverlag der
Versuchsanstalt für Wasserbau,
Hydrologie und Glaziologie
ETH Zürich
CH-8093 Zürich

Tel.: +41 - 44 - 632 4091
Fax: +41 - 44 - 632 1192
e-mail: info@vaw.baug.ethz.ch

Zürich, 2018

ISSN 0374-0056

Die nachfolgenden Inhalte
stammen (soweit nicht
anders gekennzeichnet) aus
dem Dissertationsprojekt
von I. Schalko.

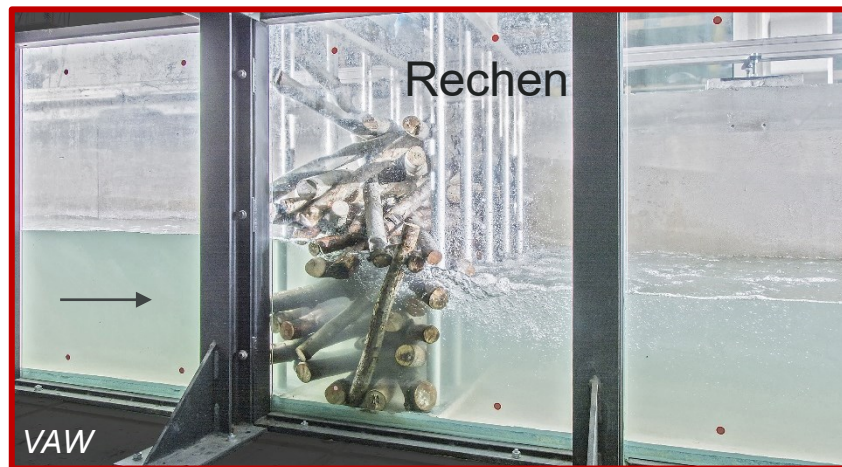


SCHWEMMHOLZ IN FLIESSGEWÄSSERN

Vordefinierte Verklausung (A)

Natürliche Verklausung (B)

Natürliche Verklausung (C)



Aufstau
Massstabeffekte



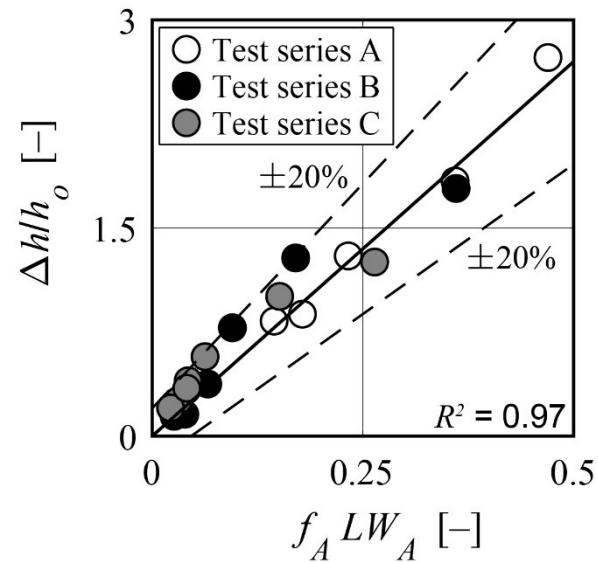
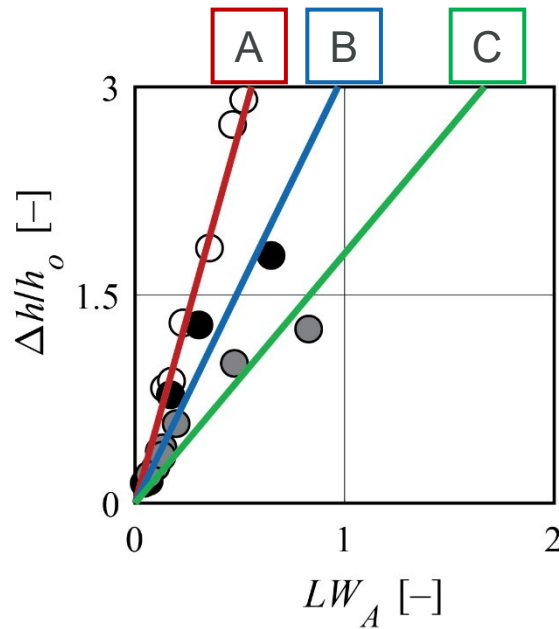
Aufstau
Verklausungsprozess



Aufstau
Kolkentiefe



SCHWEMMHOLZ IN FLIESSGEWÄSSERN



$$\frac{\Delta h}{h_o} = 5.4 f_A LW_A$$

$$LW_A = F_o \phi^{4/3} u^{1/3} (9FM + 1)$$

f_A = Verklausungsform (0.3 ... 1.0)

F_o = Froude-Zahl

ϕ = Holzverdichtung V_s/V_l (0.2 ... 0.5)

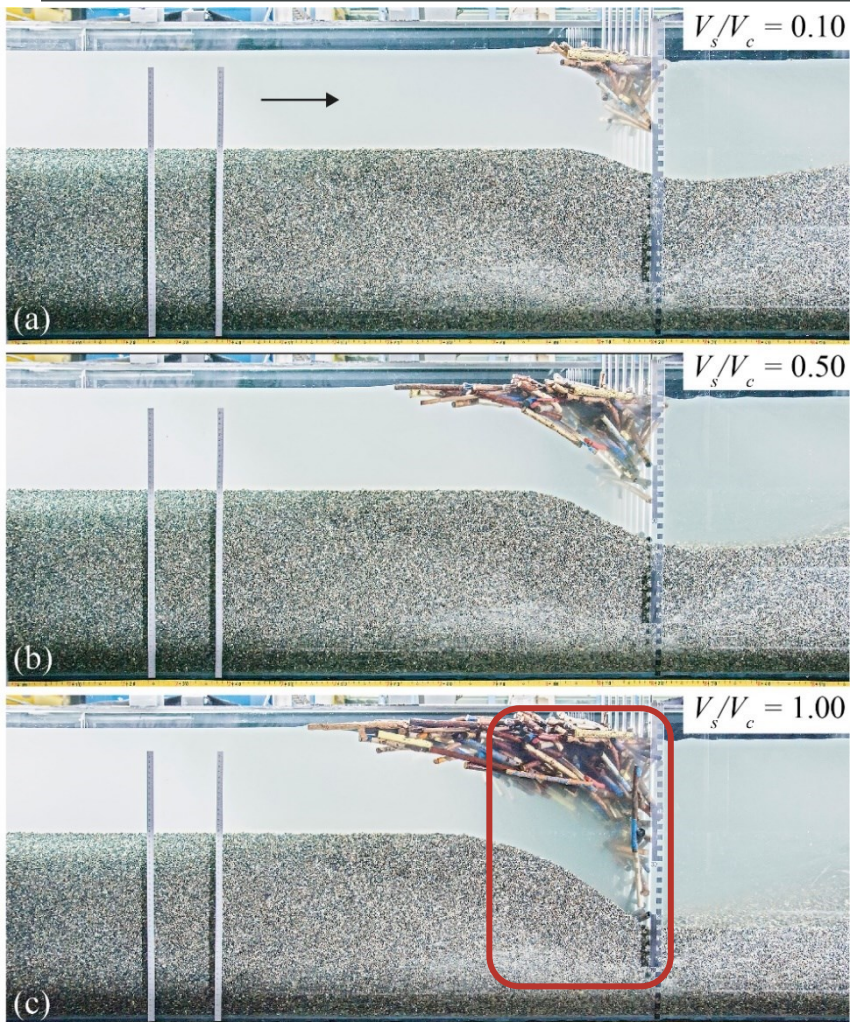
u = Strömungsumlenkung L_j/D

FM = Feinmaterialanteil (0.05 ... 0.15)

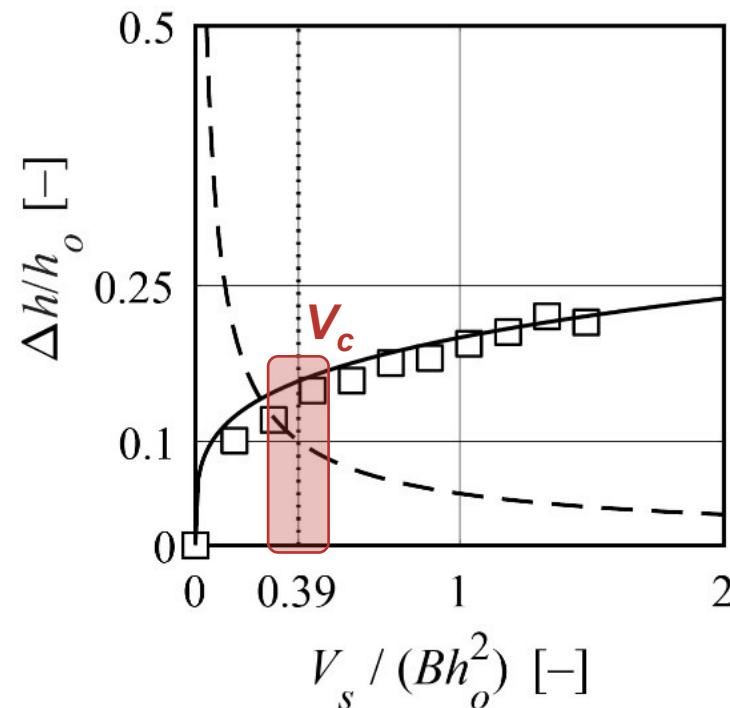




SCHWEMMHOLZ IN FLIESSGEWÄSSERN



V_c = Volumen, das massgebenden Aufstau Δh erzeugt (Holzvolumen am Rechen, bevor sich Schwemmholzteppich bildet)

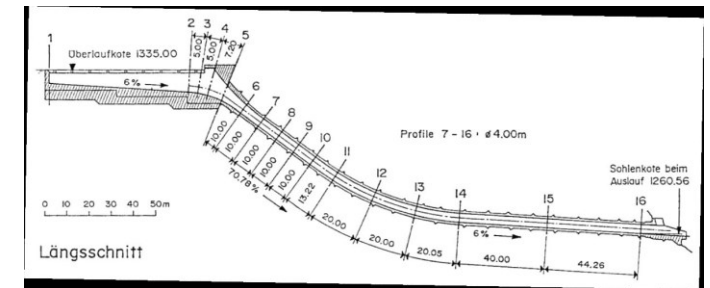


$$\frac{V_c}{Bh_o} = 3.1 F_o \left(\frac{h_o}{d_m} \right)^{-0.2}$$



ANWENDUNGSGRENZEN/FORSCHUNGSBEDARF

- Schwemmh Holzprozesse unterschiedlich für Talsperren ($v \approx 0$) und Fliessgewässer ($v \gg 0$)
- Auswirkungen von SH an (eingestauten) Schachtüberfällen unbekannt (Verklausungswahrscheinlichkeit und Aufstau)
- Verklausungswahrscheinlichkeit (statistisch signifikante Untersuchung relevant für Stauanlagen?)
- Schwemmholzeintrag und -transport (was sind Verkleinerungsprozesse, sind diese relevant für Stauanlagen?)
- Ereignisanalysen (lessons learnt)





Danke für die Aufmerksamkeit