

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Article, Published Version

Gebhardt, Michael; Kemnitz, Bernhard

Hydraulische Bemessung von Schlauchwehren

Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/102595>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Gebhardt, Michael; Kemnitz, Bernhard (2007): Hydraulische Bemessung von Schlauchwehren. In: Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau 91. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 47-56.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Hydraulische Bemessung von Schlauchwehren

DR.-ING. MICHAEL GEBHARDT, DIPL.-ING. BERNHARD KEMNITZ, BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU, KARLSRUHE

1 Konzeption und Vorgehensweise bei der Untersuchung von Schlauchwehren im physikalischen Modell

1.1 Allgemeines

Schlauchwehre gehören zu den beweglichen Wehren und kontrollieren den Abfluss durch Höhenvariation des überströmten Verschlusskörpers. Bei der Berechnung des Abflusses mittels vereinfachten Ansatzes (Poleni-Formel) wird ein Verlustbeiwert μ verwendet, welcher die Veränderung des Stromlinienbildes berücksichtigt. Er ist eine Funktion der Strömungsberandung und bei Ablösungserscheinungen eine Funktion der Randstromlinie. Daneben hängt er aber auch von der Froude-Zahl Fr der Anströmung ab. Reynolds- und Weberkennzahl, Re und We , sind hier nur bei kleinskaligen Modellen zu berücksichtigen und können für die vorliegende Fragestellung vernachlässigt werden. In zwei Punkten unterscheiden sich die Untersuchungen an Schlauchmodellen von denen an Stahlwasserbauverschlüssen: Zum einen gibt es keine eindeutige geometrische Stellgröße, wie die Öffnungsweite eines Schützes oder der Drehwinkel einer Klappe. Daher ist es naheliegend, den Innendruck als physikalische Stellgröße heranzuziehen und den Zusammenhang von Innendruck und Schlauchform zu beschreiben. Zum anderen verändert sich die Geometrie des Schlauchkörpers in Abhängigkeit von der inneren und äußeren Druckverteilung in Umfangsrichtung, was ein ähnliches Elastizitätsverhalten von Modell und Natur voraussetzt. In Bild 1 sind alle geometrischen Pa-

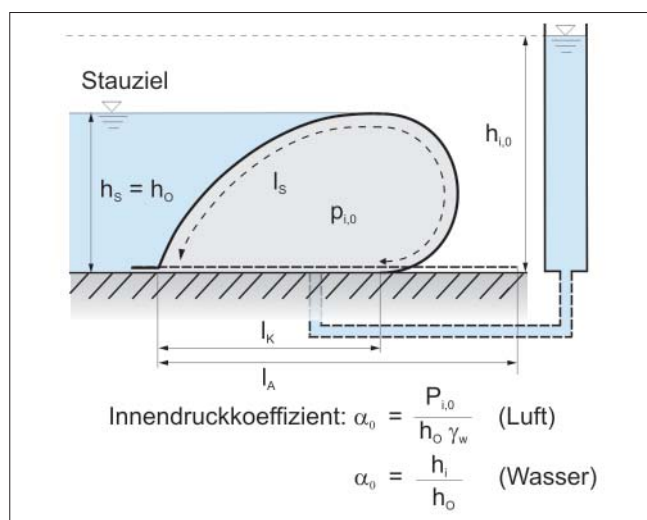


Bild 1: Definitionsskizze der geometrischen Parameter bei einem Schlauchwehr

rameter zur Beschreibung der Schlauchform dargestellt, die im Folgenden verwendet werden: l_k bezeichnet die Länge der (teil-)gefüllten Schlauchmembran in Hauptströmungsrichtung, die eben auf der Wehrsohle liegt und l_s die verbleibende Umfangslänge in Hauptströmungsrichtung. (Bei zweireihiger Verankerung bezeichnet l_b den Abstand der beiden Befestigungsschienen. In Abhängigkeit vom Innendruck ist die Bodenkontaktlänge l_k größer oder gleich dem Befestigungsabstand l_b .) Der Quotient $(l_s + l_k)/h_s$ ist das Verhältnis von Schlauchumfang und Schlauchhöhe und kann damit als Kennzahl zur Beschreibung der Schlauchform interpretiert werden.

1.2 Untersuchungen in Modell und Natur

Die Modelluntersuchungen in der BAW erfolgten an zwei Schlauchmodellen: In einem Vollmodell (s. Bild 2) wurde die Geometrie eines vollständigen Wehrfeldes mit einer Wehrfeldbreite von 1,71 m und einer Schlauchhöhe von ca. 0,18 m abgebildet. Der Schlauchkörper war demontierbar, sodass verschiedene Arten von Schlauchverschlüssen mit unterschiedlichen Füllmedien untersucht werden konnten. Der Modellschlauch wurde dabei über eine Rohrleitung betrieben, welche an einen Regulierschacht mit Überlauf bzw. an eine Wasserleitung oder an eine Druckluftleitung angeschlossen werden konnte. Zusätzlich wurde eine Entlüftungs- und eine Messleitung angeordnet, die in den Innenraum des Schlauchs führten. Der Versuchsstand war mit einer magnetisch-induktiven Zuflussmessung und einer Wasserspiegelmesseinrichtung ausgestattet. Außerdem konnten die Drücke im Schlauch und auf der Wehrschwelle erfasst werden. Der Modellmaßstab betrug je nach Schlauchtyp zwischen 1:12 bis 1:15.

Um Randeinflüsse zu minimieren und das Elastizitätsverhalten der Schlauchmembran in einem möglichst großen Modellmaßstab untersuchen zu können, wurde ein zweites, 0,80 m breites Schlauchmodell in einer Versuchsrinne aufgebaut (s. Bild 3). Dieses Modell war als Ausschnittmodell im Maßstab 1:5 konzipiert ohne seitliche Befestigung des ca. 0,60 m hohen Schlauchkörpers. Die Auswahl der Modellmembrane für die beiden physikalischen Modelle erfolgte nach dem Cauchy-Kriterium. Die Cauchy-Zahl, als Verhältnis von Trägheitskraft und Elastizität der Membran, wurde mit Hilfe einer Dimensionsanalyse in folgender Form hergeleitet:



Bild 2: Vollmodell im Maßstab ca. 1:13: oben links) Blick vom Unterwasser, oben Mitte) wassergefülltes Modell mit Fin, oben rechts) induktiver Wegaufnehmer für Geometriemessungen, unten links) Triangulationslaser zur Messung der Vertikalamplituden, unten Mitte) verschiedene Schlauchverschlüsse, unten rechts) Videodokumentation

$$\text{Cauchy-Zahl } Ca = \frac{v^2}{EI / (\rho_w \cdot h_s^3)}$$

mit:

- v Fließgeschwindigkeit im Oberwasser [m/s]
- EI Biegesteifigkeit der Membran [Nm²] mit
I = 1/12 b · ds³ bzw.
1/12 ds³ in der ebenen Betrachtung
- ρ_w Dichte Wasser [kg/m³]
- h_s Schlauchhöhe [m]

Für die Untersuchungen zum Schwingungsverhalten wurden die vertikalen Amplituden des Schlauchkörpers im Scheitelpunkt gemessen und die Messreihe über Videoaufzeichnungen dokumentiert. Hierfür wurde ein Laserdistanzmessgerät verwendet, welches nach dem Triangulationsprinzip arbeitet und den Vorteil hat, dass Distanzen zu Oberflächen berührungslos und mit einer sehr hohen Genauigkeit (je nach Abstand 10 µm bis 50 µm) gemessen werden können. Da der Lasersensor üblicherweise für Messungen in der Luft eingesetzt wird und einen Mindestabstand von 5 cm benötigt, wurde der Sensor am Messkopf mit einem 8 cm



Bild 3: Ausschnittsmodell im Maßstab 1:5 in der Versuchsrinne: links) Blick vom Unterwasser, Mitte) Regulierungsschacht, rechts) seitliche Dichtungsflächen



Bild 4: In-situ Messungen am Zollhauserwehr an der Saalach: links) Messgestell im linken Wehrfeld, oben Mitte) Seilzugaufnahme, oben rechts) Montage der Störkörper, unten rechts) Störkörper im Abstand von 2,0 m

langen Plexiglaskörper ummantelt, damit er bei allen Messungen ins Wasser eingetaucht werden konnte. Da die schwarzen Membrane der Schlauchwehmodelle den Laserstrahl stark absorbieren und die Leistung des Lasers für einen Empfang nicht mehr ausreicht, wurden sie im Bereich der Messachsen mit gelben Signalstreifen versehen [1]. Der Aufzeichnungszeitraum einer Messung betrug mindestens 30 s, sodass mit der Abtastrate der Laserdiode von 10 ms mehr als 3000 Messwerte zur Verfügung standen. Die weitere Auswertung erfolgte schließlich mit Hilfe einer Fast Fourier Transformation (FFT), mit der beurteilt werden kann, ob das Ausgangssignal aus wenigen Frequenzen, wie z. B. den Eigenfrequenzen, besteht oder ob es sich um einen mehr oder weniger regellosen Vorgang (Rauschen) handelt, bei dem alle Frequenzen mit Amplituden ähnlicher Größenordnung vertreten sind.

Zur Optimierung einer Störkörperreihe, die erstmalig systematisch im Modell untersucht wurde, erfolgten im Juli 2006 Messungen in-situ an einer bestehenden Schlauchwehranlage an der Saalach. Der private Betreiber, die Kraftwerk Ainring GmbH & Co, stellte das wassergefüllte Schlauchwehr mit zwei Wehrfeldern à 24,58 m Breite und 0,94 m Höhe für den gemeinsamen Naturversuch von BAW und Floecksmühle Energietechnik GmbH zur Verfügung (s. Bild 4). Für die Untersuchungen wurde eigens eine mobile Messeinrichtung angefertigt, die aus einem Aluminiumgestell mit mechanischen Seilzugaufnehmern bestand, die am Schlauchkörper befestigt wurden. Über das Kraftwerk konnte der Abfluss über die Wehranlage für die Messungen gesteuert werden ($MQ = 38,9 \text{ m}^3/\text{s}$).

2 Abfluss über Schlauchwehre

2.1 Einfluss des Füllmediums auf die Überströmungscharakteristik

Rein qualitativ unterscheiden sich überströmte Schlauchwehre in Abhängigkeit von dem verwendeten Füllmedium: In Bild 5 sind Momentaufnahmen des Schlauchmodells mit Luft- und mit Wasserfüllung unter denselben hydraulischen Randbedingungen zu sehen (Q_{\max} bezeichnet darin das Abfuhrvermögen bei Stauziel und vollkommen abgelegtem Schlauch, das in Natur etwa $120 \text{ m}^3/\text{s}$ entspricht). Während das wassergefüllte Schlauchwehr bis zur vollständigen Ablage gleichmäßig überströmt wird, knickt das luftgefüllte Schlauchwehr bereits bei geringen Überströmungshöhen im Bereich der Wehrwangen ein. Dabei bildet sich, je nach Biegesteifigkeit der Membran, eine unterschiedlich starke, V-förmige Einkerbung (engl. V-notch phenomenon) mit einer örtlichen Abflusskonzentration. Die Lage der Einkerbung ist partiell abhängig von den Anströmungsverhältnissen, kann aber auch andererseits in begrenztem Umfang beeinflusst werden, z. B. durch eine Verringerung des Schlauchumfangs an dieser Stelle oder durch eine Querneigung des Ablagetischs bzw. eine entsprechende Unterlage. Der Schlauch knickt ein, wenn die Überströmungshöhe h_0 etwa 10 bis 15 % der Oberwassertiefe h_0 überschritten hat. Die Ursache hierfür ist, dass die Druckdifferenz auf der Oberwasserseite, die nicht, wie beim wassergefüllten Schlauch, konstant ist, sondern sich über die Wassertiefe ändert: Während im Scheitelpunkt noch ein Überdruck vorliegt, kann dieser sich bis auf Höhe des Ablagetischs auf $\Delta p = 0$ reduzieren (für $\alpha_0 = 1,00$). In diesem Druckfeld bedeutet eine lokale vertikale Verformung der Schlauchmembran auch eine Veränderung der Belastung. Da Memb-

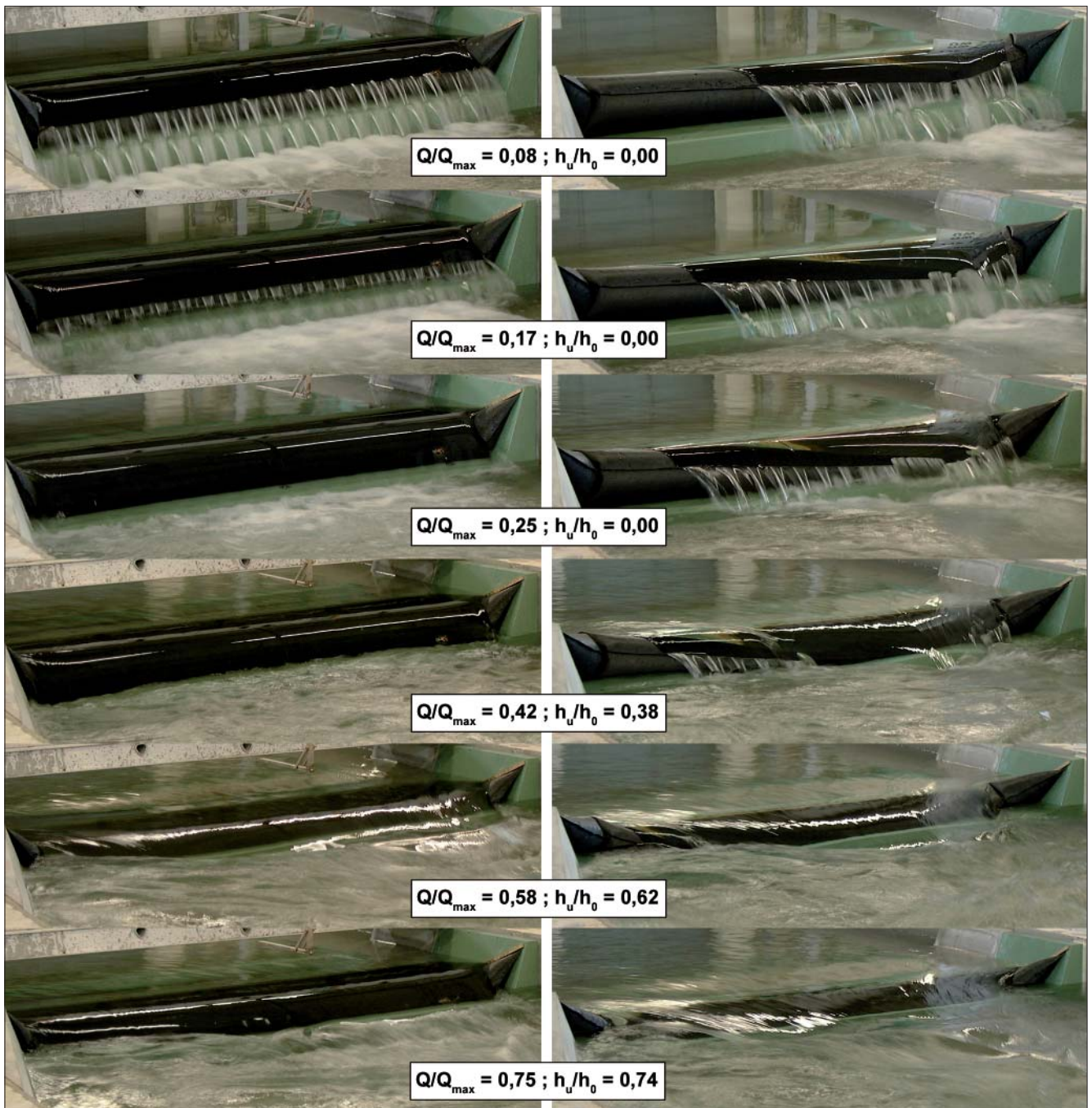


Bild 5: Überströmung eines Schlauchwehrrs mit Fin $h_f/b = 2,12/23,60$ m, $Q_{max} = 120$ m³/s (Abmessungen und Abflüsse in Natur) – Wasserfüllung (links) und Luftfüllung (rechts)

rane sehr dünne Flächentragwerke mit vergleichsweise geringer Biegesteifigkeit sind, kann eine Instabilität des Systems auftreten und die Membran wird gefaltet bzw. beult ein [2].

Diese charakteristische Schwäche luftgefüllter Schlauchwehre hat nur sehr geringe Auswirkungen auf die Genauigkeit der Wasserstandsregelung im Oberwasser, wie beispielsweise die Betriebserfahrungen in Kiebingen am Neckar zeigen [3]. Eine Abflussregelung ist aber auf Grund der ungleichmäßigen Überströmung kaum mehr möglich. Neben einer konzentrierten Beanspruchung der Gewässersohle im Unterwasser, die bei der Tosbeckendimensionierung berücksichtigt wer-

den muss, führt der Abfluss über die Einkerbung auch zur Bildung von großräumigen Wirbeln und Rückströmzonen, die schließlich die Uferbereiche erodieren können. Luftgefüllte Schlauchwehre sind außerdem nur sehr eingeschränkt bei hohen Unterwasserständen einsetzbar, da sich der eingestaute Schlauchkörper stärker verformt. Zwar wird, um das Aufschwimmen zu verhindern, häufig eine zweite Befestigungsschiene vorgesehen, allerdings verliert der Verschluss in den Zwischenstellungen die Abflusskontrolle und kann folglich nur noch entleert und vollständig abgelegt werden.

2.2 Vollkommener Überfall bei Wasserfüllung

Da Wehranlagen im Allgemeinen aus einer festen Wehrschwelle und einem oder mehreren beweglichen Verschlüssen bestehen, ergeben sich auf Grund der unterschiedlichen Geometrien verschiedene Überfallbeiwerte für den Verschluss und für die Wehrschwelle. Bis der Verschluss vollständig abgelegt ist, wird der Überfallbeiwert durch die Geometrie des Verschlusses in seinen Zwischenstellungen bestimmt: Der Oberwasserstand und damit die Summe $h_o = s + h_u$ aus Verschlusshöhe s und Überfallhöhe h_u bleibt dabei konstant. Die Geometrie des festen Wehrkörpers gleicht in den meisten Fällen der eines breitkronigen Wehrs, dessen Wehrrücken die Ablagefläche für die Schlauchmembran im vollkommen entleerten Zustand bildet. Der Ablagetisch hat eine Länge (je nach Füllmedium und Innendruck das etwa 2 bis 2,5-fache der Schlauchhöhe), die ausreicht, damit sich eine parallele Strömung mit einer hydrostatischen Druckverteilung einstellen kann und die Grenztiefe y_{gr} auftritt. Der Überfallbeiwert für ein breitkroniges Wehr beträgt $\mu = 0,577$ und kann direkt über eine verlustfreie Energiebetrachtung berechnet werden [2].

In Bild 6 ist der Überfallbeiwert in Abhängigkeit von der dimensionslosen Überströmungshöhe für ein wassergefülltes Schlauchwehr aufgetragen. Dabei ist zu erkennen, dass der Überfallbeiwert für kleine Überströmungshöhen am höchsten ist, was auf den COANDA-Effekt zurückzuführen ist. Der Überfallstrahl löst sich nicht ab, sondern „haftet“ quasi bis zum Fußpunkt des Schlauchkörpers an der Oberfläche. Mit steigender Überströmungshöhe löst sich die Strömung auf der Unterwasserseite ab, wobei der Ablösepunkt instabil ist und der Schlauchkörper durch die Druckschwankungen zu Schwingungen angeregt wird (vgl. Abschnitt 3.1). Bei $h_u/h_o = 0,30$ erreicht der Überfallbeiwert mit $\mu = 0,76$ ein Minimum. Der Überdruck ist bei dieser Überströmungshöhe weitestgehend abgebaut und die oberwasserseitige Membran nimmt mit zunehmender Überströmungshöhe eine S-Form an. Der Schlauchkörper, dessen Form nicht mehr dominant durch den Überdruck im Schlauchinneren bestimmt wird, kann auf den Strömungsdruck reagieren und eine strömungsgünstigere Form annehmen. In der Folge steigt der Überfallbeiwert wieder an. Mit weiter abnehmender Schlauchhöhe wird der Einfluss des festen Wehrkörpers größer und der Überfallbeiwert nähert sich dem der festen Wehrschwelle an. Die aufgebrachten Störkörper sind ohne Einfluss auf den Verlauf des Überfallbeiwerts, während der Überfallbeiwert für ein Schlauchwehr mit Fin bis

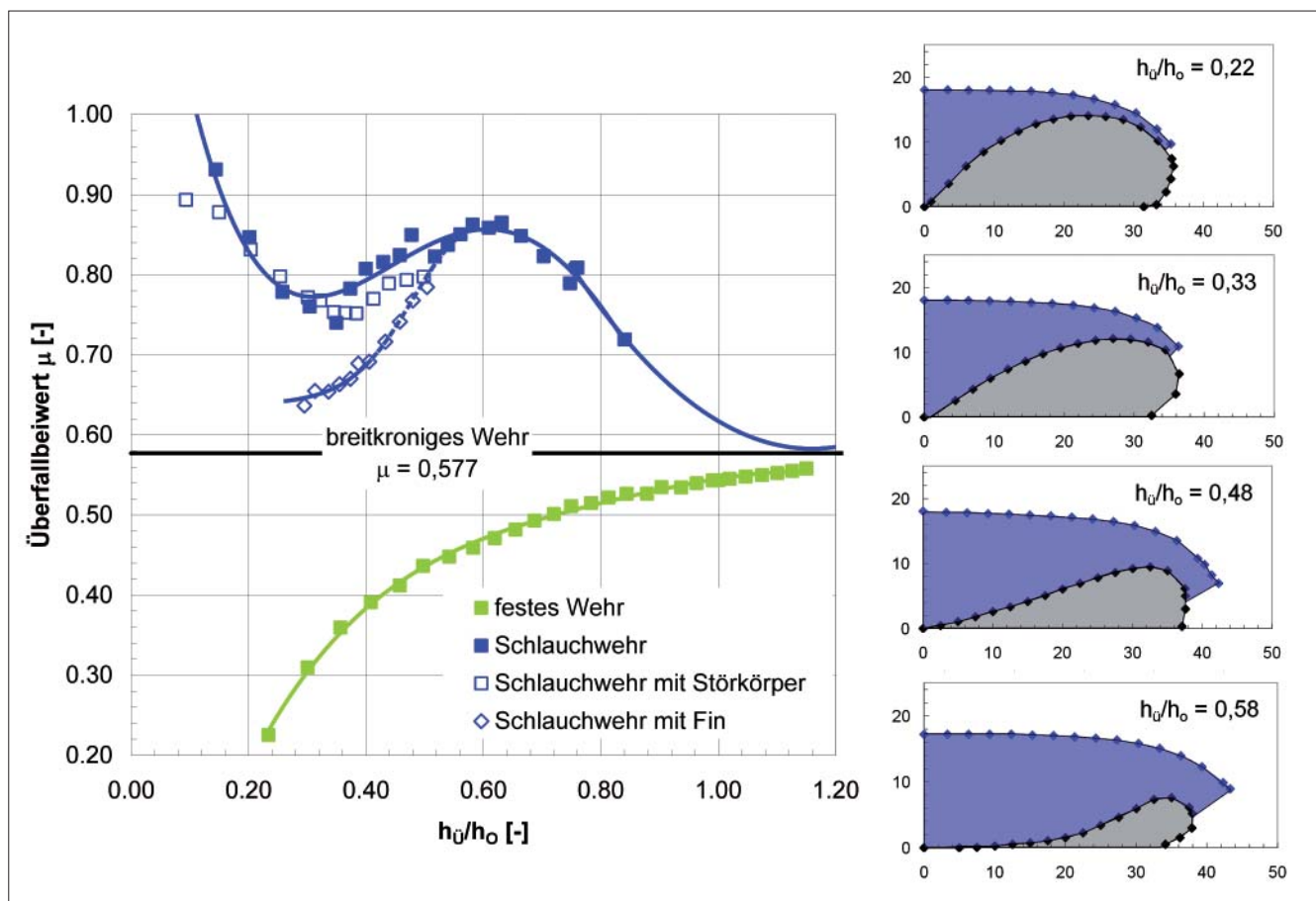


Bild 6: Überfallbeiwert für ein wassergefülltes Schlauchwehr ohne Abhilfemaßnahmen, mit Fin und mit Störkörperreihe bei vollkommenem Überfall ($\alpha_o = 1,60$; $(l_s + l_k)/h_{s,o} = 4,47$, $h_o = \text{const.}$)

$h_u/h_o = 0,60$ eine andere Charakteristik aufweist: Wegen der Ablösung des Überfallstrahls an der Fin ergeben sich insgesamt niedrigere Überfallbeiwerte [2].

2.3 Gestaltung der festen Wehrschwelle

Wenn die Oberwasserseite entsprechend den Radien einer JAMBOR-Schwelle ausgerundet wird, kann die Höhe der festen Wehrschwelle etwa 25 bis 30 % der Oberwassertiefe betragen, ohne dass sich ein merkbarer Aufstau nach Oberwasser ergibt. Dadurch kann die Verschlusshöhe erheblich reduziert werden. Das hat Vorteile im Betrieb, da die Schwelle in Abhängigkeit vom Unterwasserstand eine trockene Begehung und Unterhaltung ermöglicht. Gleichzeitig verringert sie den Einfluss vom Unterwasser in Bezug auf die Schlauchform und die Schwingungserregung. Bei vollkommen entleertem Schlauchkörper hat die JAMBOR-Schwelle den zusätzlichen Effekt, dass die Strömung beschleunigt wird und sich dadurch ein Überdruck auf der Schwelle ausbildet. Infolge dessen wird die abgelegte Membran auf den Ablagetisch gepresst und Schwingungen im abgelegten Zustand verhindert, wie sie von [4] beobachtet wurden.

Bei der JAMBOR-Schwelle wird ein Strömungseffekt nach dem Gesetz von Bernoulli ausgenutzt, bei dem durch die besondere Formgebung der Schwelle, die durch die Zentrifugalkraft bewirkte Minderung des inneren Wasserdrucks verlustfrei in Geschwindigkeitshöhe umgesetzt wird [5]. Die JAMBOR-Schwelle wird für verschiedenste Wehrtypen, wie z. B. die Sektorwehre an der Mosel, eingesetzt und funktioniert solange im Bemessungsfall kein Fließwechsel über der Wehrschwelle auftritt.

3 Ursache und Vermeidung von Schwingungen

3.1 Schwingungsarten

Schlauchwehre können auf Grund ihrer elastischen Struktur zu Schwingungen angeregt werden. Problematisch sind dabei dauerhafte, also periodisch auftretende Schwingungen, bei denen sich der Schlauchkörper infolge der großen Verformungen an der Betonoberfläche aufscheuern kann oder die Zugfestigkeit der Membran, der Gewebeeinlagen oder der Befestigungs-konstruktion durch die dynamische Belastung überschritten wird, wie Schadensfälle am Sunbury Dam [6] [7] oder am Mangla Dam [8] zeigen. Die Grenze h_u/h_o , ab der ein Schlauchwehr in Resonanzschwingungen gerät, hängt dabei maßgeblich vom Unterwasserstand und der Überströmungshöhe ab. Einen geringeren Einfluss haben der Innendruck, die Schlauchform und die Elastizität der Schlauchmembran [2]. Grundsätzlich kann zwischen zwei selbsterregten Schwingungsarten unterschieden werden (s. Bild 7): Die erste Schwingungsart, bei vergleichsweise niedrigen Unterwasser-

ständen, wird durch einen instabilen Ablösepunkt des Überfallstrahls und die dadurch resultierenden Druckschwankungen auf der Unterwasserseite des Schlauchkörpers induziert. Der Schlauchkörper verformt sich dabei zunächst in Fließrichtung, wobei das Verformungsbild am ehesten als ein „Pumpen“ beschrieben werden kann, bei dem der Schlauchkörper in vertikaler Richtung komprimiert und die Membranunterseite auf den Ablagetisch gedrückt wird. Bei der zweiten Schwingungsart wird der Fließquerschnitt bei der Umströmung des teilabgelegten Schlauchs eingeschnürt und es entsteht ein Unterdruckbereich auf der Membranoberseite. Die resultierende Querkraft, die senkrecht zur Anströmrichtung wirkt, lenkt den Schlauchkörper nach oben aus und bewirkt eine Veränderung des Strömungsfelds über dem Schlauch (stationärer Quertrieb). Die Auslenkung erfolgt dabei im Wesentlichen in vertikaler Richtung und mit niedrigerer Frequenz als bei der ersten Schwingungsart.

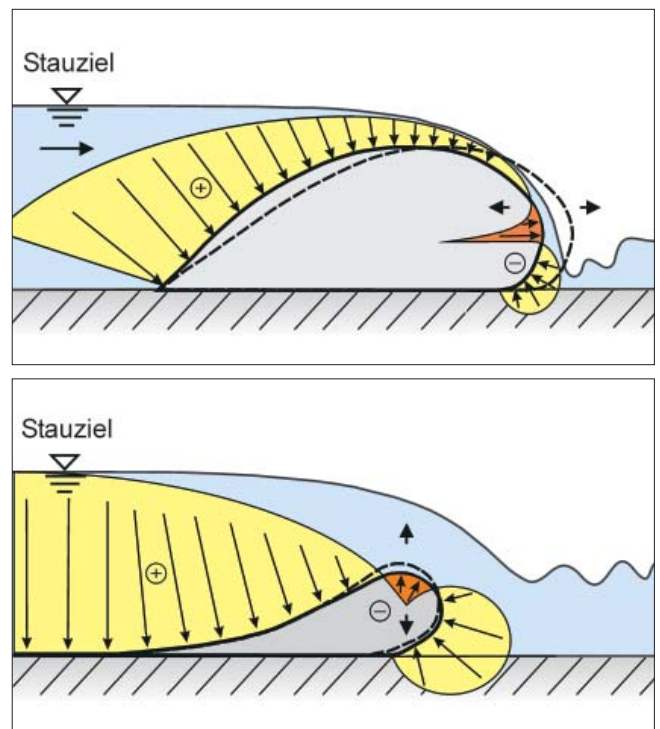


Bild 7: oben) Schwingungen infolge Druckschwankungen nach [6]; unten) Schwingungen infolge Quertrieb

3.2 Wirkungsweise von Deflektoren und Störkörpern auf das Schwingungsverhalten

Mit Hilfe eines 3D-Graphen lässt sich für die zwei dimensionslosen Einflussgrößen, Unterwasserstand h_u/h_o und Schlauchhöhe h_s/h_o , der Bereich abgrenzen, in dem die Resonanzschwingungen mit den maximalen Amplituden auftreten (s. Bild 8). Schwingungen sind danach erst bei relativ hohen Unterwasserständen ($h_u/h_o > 0,57$) und/oder Schlauchhöhen kleiner als $h_s/h_o = 0,64$ zu erwarten. Weiterhin ist festzustellen, dass der Schlauch bei einem höheren Unterwasserstand frü-

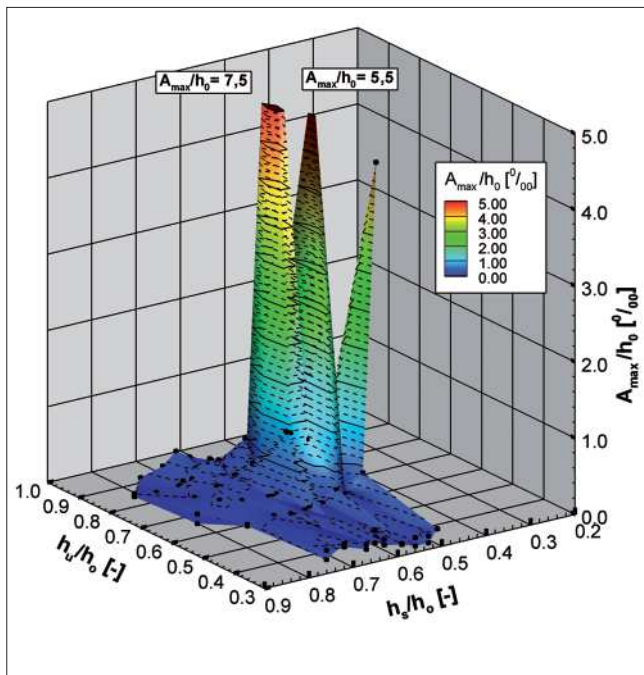


Bild 8a: Maximale Amplituden A_{\max}/h_0 in Abhängigkeit von Schlauchhöhe (h_s/h_0) und Unterwasserstand (h_u/h_0) für das Schlauchmodell; a) ohne Abhilfemaßnahmen

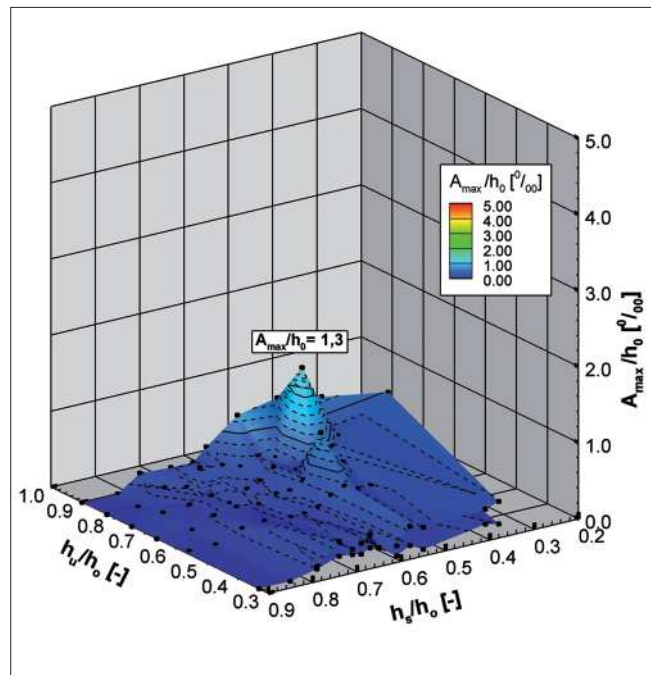


Bild 8c: c) mit einer Störkörperreihe

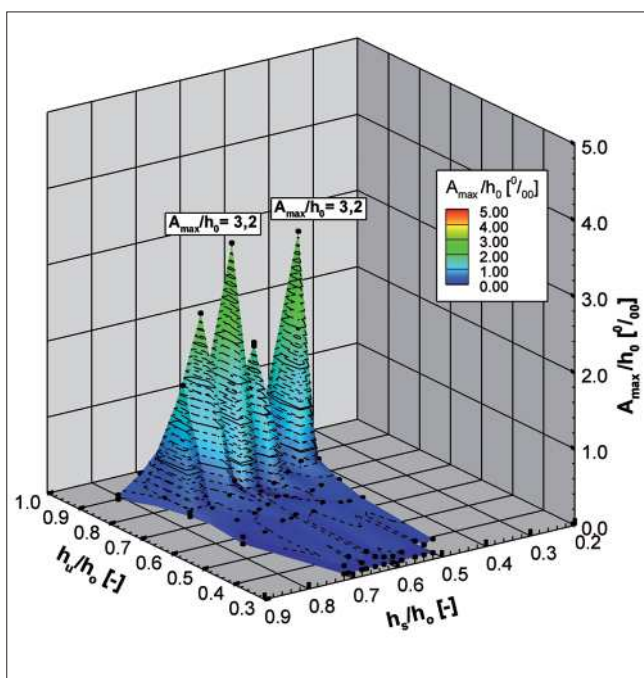


Bild 8b: b) mit einem Deflektor

her zu Schwingen beginnt. Bei den in-situ Messungen konnten diese Ergebnisse aus dem Labor im Wesentlichen bestätigt werden: Die kritischen Schlauchhöhen, bei denen Resonanzschwingungen auftreten, liegen im Bereich $0,60 \leq h_s/h_0 \leq 0,70$. Für Schlauchhöhen außerhalb dieses Bereichs konnten hingegen keine Anzeichen für Strömungsinstabilitäten und Schwingungen beobachtet werden (s. Bild 9).

$$\text{Resonanzschwingungen: } 0,60 \leq \frac{h_s}{h_0} \leq 0,70$$

Im Modell wurde unter denselben hydraulischen Randbedingungen die Wirksamkeit eines Deflektors am Beispiel der Fin untersucht. Die Lage der Fin in Umfangsrichtung ist durch die identischen Längen der oberen und unteren Membranteile vorgegeben, sodass der Schlauch im entleerten Zustand vollkommen eben auf der Sohle liegt. Die Länge der Fin im aufgestellten Zustand beträgt etwa $l_F/h_{s,0} = 0,04$. Im Vergleich zu dem Schlauchwehr ohne Abhilfemaßnahmen zeigt sich, dass die Fin eine stabile Ablösung des Überfallstrahls auf der Unterwasserseite bewirkt und dadurch die schwingungsinduzierenden Druckschwankungen verhindert. Gleichzeitig wird der Überfallstrahl belüftet. Diese Ergebnisse entsprechen im Wesentlichen den Untersuchungsergebnissen von [6] am luftgefüllten Schlauch. Erst bei Unterwasserständen größer als $h_u/h_0 > 0,66$ sind periodische Schwingungen zu beobachten, allerdings mit kleinerer Amplitude als bei dem Modell ohne Fin (Stationärer Quertrieb).

Als alternative Abhilfemaßnahme zur Vermeidung von Schwingungen wurde im nächsten Schritt eine Reihe von Störkörpern untersucht, deren Abstand und Form sich an den Strahlaufreißern für Klappenwehre orientierte. Dabei zeigte sich im Modell auf den ersten Blick ein etwas überraschendes Ergebnis: Die positive Wirkung der Störkörper beschränkt sich nicht nur, wie zu erwarten, auf kleinere Überströmungshöhen und niedrige Unterwasserstände (also in dem Bereich, für den Strahlaufreißer bei Klappen eigentlich vorgesehen sind), sondern auch auf die Schwingungen infolge der Druckschwankungen auf der Unterwasserseite. Die Ursache hierfür ist, dass durch die Ablösungen an den Störkörpern Wirbel entstehen, die zu einer starken Erhöhung der Turbulenz in der Strömung führen. Damit werden die Druckschwankungen, die im Wesentlichen

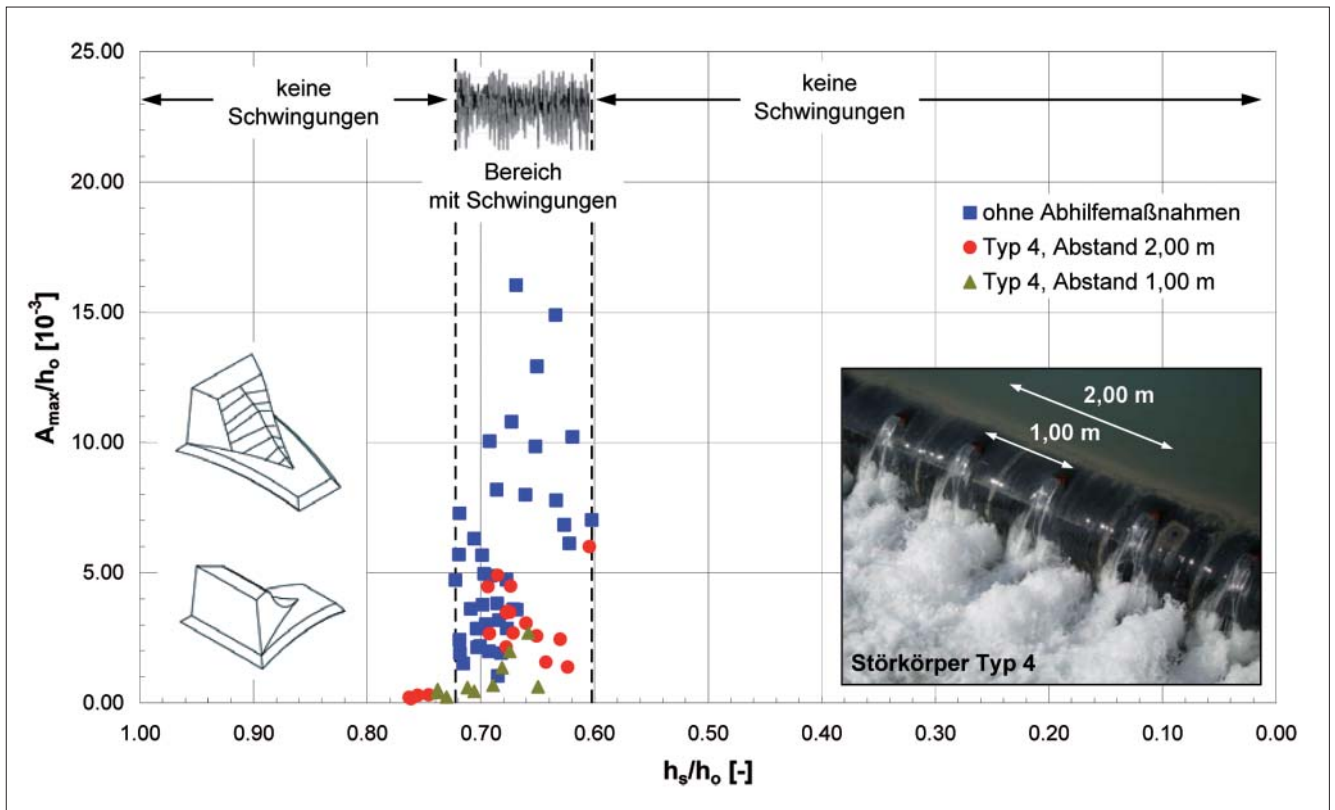


Bild 9: Maximale Amplituden der Fast-Fourier-Transformation (FFT) für den wassergefüllten Schlauchkörper ohne Abhilfemaßnahmen, mit Störkörper Typ 4 im Abstand von 2,0 m und mit Störkörper Typ 4 im Abstand von 1,0 m

aus der radialen Umströmung resultieren, durchmischt und Resonanzschwingungen verhindert.

Für die weitere Optimierung der Störkörper wurden in-situ Messungen am Zollhauserwehr an der Saalach durchgeführt und die Wirkung einer modifizierten Form (Typ 4) untersucht, die zunächst im Abstand von 2,00 m auf dem Schlauchkörper angebracht wurden. Die Formgebung wurde auf Grund der unterschiedlichen Materialien – Stahl und Polyurethan – so angepasst, dass sie mit einer Gussform hergestellt und auf den Schlauchkörper aufgebracht werden konnte. Im Vergleich zu dem Schlauchwehr ohne Abhilfemaßnahmen konnte – wie bereits im Modell – eine deutliche Reduzierung der Schwingungsamplituden festgestellt werden. Schließlich wurde in einer dritten Versuchsreihe der Abstand der Störkörper auf 1,00 m verdichtet, wodurch eine weitere Reduzierung der Schwingungsamplituden erreicht werden konnte (Bild 9). Die Störkörperreihe, die erstmalig im Modellversuch systematisch untersucht wurde, erwies sich hier als wirkungsvolle Alternative zu einem Deflektor.

3.3 Lage von Störkörpern und Deflektoren im Querschnitt

Bei der Fin nach dem System Bridgestone ist die Lage im Querschnitt geometrisch festgelegt. Bei der nachträglichen Montage von Deflektoren oder Störkörpern ist es hingegen möglich, die Lage in begrenztem Umfang zu beeinflussen. Die Position kann dabei entweder im aufgestellten Zustand durch den Winkel φ_{def} zum Scheitelpunkt angegeben werden, wenn der unterwasserseitige Teil des Schlauchkörpers durch einen Kreis mit $R = \frac{1}{2} h_s$ angenähert wird. Oder aber, die Lage l_{def} wird im Verhältnis zur Ablagelänge l_A des Schlauchs definiert. [9] gibt als optimale Position für einen Deflektor bei luftgefüllten Schlauchwehren den Bereich $30^\circ \leq \varphi_{\text{def}} \leq 60^\circ$ an. Diese Empfehlung stützt sich auf physikalische Modelluntersuchungen an einem festen Zylinderwehr, bei der allerdings die Verformung des Schlauchkörpers bei zunehmender Überströmungshöhe keine Berücksichtigung findet. Insbesondere bei Wasserfüllung ist dieser Einfluss aber nicht zu vernachlässigen, wie ein Vergleich der Schlauchgeometrien in Zwischenstellungen zeigt (s. in Bild 10). Die Position des Deflektors (oder auch einer Reihe von Störkörpern) liegt im Bereich $l_{\text{def}} = 0,72 \div 1,00 l_A$, wobei der erste Wert der Anordnung im Scheitelpunkt und der zweite der am unteren Ende der abgelegten Membran (also der Lage der Fin) entspricht. Im Vergleich wird deutlich, dass die Abhilfemaßnahmen nur für $l_{\text{def}} \geq 0,90 l_A$ über den gesamten Untersuchungsbereich unterhalb des Scheitels

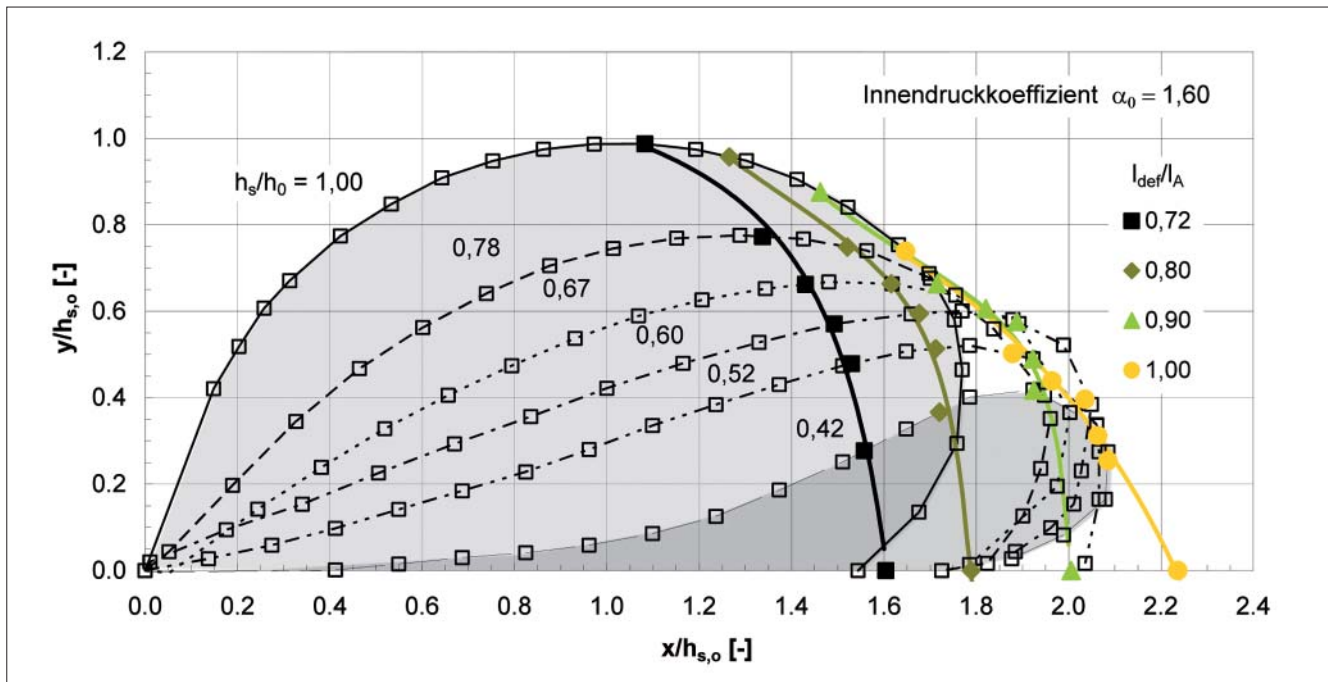


Bild 10: Lage eines Deflektors bei einem wassergefüllten Schlauchwehr in Abhängigkeit der Überströmungshöhe bei konstantem Oberwasserstand ($\alpha_0 = 1,60$, kein Unterwassereinfluss)

liegen und damit überhaupt erst hydraulisch wirksam sind.

4 Literatur

- [1] BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU: Bericht zu den im Zeitraum 2002 bis 2003 im Rahmen des FuE-Vorhabens „Einsatz von Schlauchwehren an Bundeswasserstraßen“ durchgeführten physikalischen Modelluntersuchungen, unveröffentlicht (2003).
- [2] GEBHARDT, M.: Hydraulische und Statische Bemessung von Schlauchwehren, Mitteilungen des Instituts für Wasser und Gewässerentwicklung – Bereich Wasserwirtschaft und Kulturtechnik – der Universität Karlsruhe (TH), 2006.
- [3] ITTEL, G.; HEIMERL, ST.: Innovative Sanierung der Wasserkraftanlage Kiebingen am Neckar, Wasserwirtschaft 91, Heft 9, 2001, S. 434-442.
- [4] CHERVET, A.: Model-prototype comparison of the defective behaviour of an inflatable dam, Symposium on Scale Effects in Modelling Hydraulic Structures, Sept. 3-6 (1984), S. 1.16-1 bis 1.16-6.
- [5] JAMBOR, F.: Mögliche Erhöhung und Entwicklung der festen Wehrschwelle sowie Gestaltung der damit verbundenen Wehrkonstruktionen, im besonderen des Sektorwehrs, Die Bautechnik, Heft 6 und 8 (1959).
- [6] OGIHARA, K.; MURAMATSU, T.: Rubber dam, causes of oscillations of rubber dams and countermeasures, 21st IAHR Congress, Melbourne, Australia (Aug.1985), S. 601-604.

- [7] U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS: Ice Engineering, Performance survey of inflatable dams in ice-affected waters, U.S. Army Research and Engineering Laboratory, Ice Engineering Information Exchange Bulletins, Hanover, New Hampshire (Oktober 2001), S. 1-5.
- [8] BINNIE, G. M. et al.: Inflatable weir used during construction of Mangla Dam, S. 625-639, Heft Nr. 7655 (1974), S. 625-639.
- [9] CHANSON, H.: Hydraulics of rubber dam overflow: A simple design approach, 13th, Australasian Fluid Mechanics Conference (Dezember 1998), S. 255-258.

Danksagung

Die vorliegende Veröffentlichung basiert in wesentlichen Teilen auf der Dissertation „Hydraulische und statische Bemessung von Schlauchwehren“ von Michael Gebhardt. Besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. hc. mult. Franz Nestmann und Herrn Prof. Dr.-Ing. Karl Schweizerhof für die wissenschaftliche und fachliche Betreuung dieser Arbeit.

