

Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 83 (1991)
Heft: 3-4

Artikel: Neuartige Holzschwellen für die Töss
Autor: Krebs, Peter / Bieler, Franz
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-940994>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 10.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Neuartige Holzschwellen für die Töss

Peter Krebs und Franz Bieler

Zusammenfassung

Nach einem Abriss der Geschichte der Tösskorrektion Ende des letzten Jahrhunderts werden die durch neuere Hochwasser notwendig gewordenen Revisionen an Schwellen geschildert. Es wird eine Holzschwellenkonstruktion vorgestellt, die gleichzeitig Ansprüche der Funktion, des naturnahen Flussbaus und der Fischerei erfüllt. Modellversuche zur Abklärung der hydraulischen und geschiebetechnischen Vorgänge bei Hochwasser werden beschrieben. Schliesslich werden Angaben über die Kolkgrössen gemacht, die eine Dimensionierung von Schwellen- und Böschungssicherung erlauben.

Abstract: New timber sills for the river Töss

After an abstract of the history of the river Töss, which was corrected at the end of the last century, todays revision work at steps due to recent floods is described. A new timber sill is introduced, which meets the requirements of functionality, aesthetics and of fishing at the same time. Model tests were carried out to investigate the hydraulics and the varying shape of the river bed during flood. Finally the dimensions of the scour as a result of the experiments are given to protect the banks and the sill.

Résumé: Un nouveau type de seuil à l'aide de rondins pour la Töss

Après avoir brièvement retracé l'histoire de la correction de la Töss, réalisée à la fin du siècle passé, on décrit les travaux de révision des seuils devenus aujourd'hui nécessaires à la suite de récentes crues. Un nouveau type de seuil construit à l'aide de rondins est présenté. Celui-ci répond à la fois aux

exigences de fonctionnement, de protection de l'environnement et à celle de la pêche. Le comportement hydraulique de l'ouvrage et l'évolution du lit meuble en cas de crue ont été observés lors d'essais sur modèle rapportés ici. Finalement, des indications concernant les affouillements à attendre sont données. Elles permettent la prise de mesures de protection des seuils eux-mêmes et des berges adjacentes.

Geschichte der Töss

Die Töss entspringt im Gebiet des Tössstocks auf 1154 m ü. M., durchfliesst auf 60 km Länge das Tösstal und mündet auf 346 m ü. M. bei der Gemeindegrenze Eglisau/Teufen in den Rhein. Das heutige Flussgerinne hat die Töss nach einer Reihe von Hochwasserereignissen aufgrund eines Projektes des Kantonsingenieurs K. Wetli aus dem Jahre 1877 erhalten.

Die Sohle des Tösstales ist in der Regel schmal, kurvenreich und von steilen Hängen umgeben. Ohne eine näher begrenzte Stromrinne durchfloss das Gewässer, früher meist in verschiedene Arme geteilt, den ebenen Talgrund in sich verändernder Richtung. Die noch kleinen Dörfer waren entsprechend auf leichten Erhöhungen angesiedelt. Zu Beginn des 19. Jahrhunderts existierten insgesamt nur zwei befahrbare Brücken über die Töss; die eine in Rorbas, die andere in Winterthur-Töss. Die zahlreichen restlichen Verbindungen bestanden aus Furten und Fussstegen. Erst mit der Verbesserung der Verkehrswege, mit der Landsicherung und mit der Industrialisierung kam die Töss zu einem geregelten Flussbett. Im Zuge des Um- und Neubaus der Fahrstrassen von Winterthur aus ins obere und untere Tösstal entstanden in der ersten Hälfte des letzten Jahrhunderts einige neue Brücken. Parallel dazu wurden vorerst nur örtliche Ufersicherungen, später dann auch durchgehende Verbauungen mit Faschinenlagen und Flechtzäunen erstellt, die aber durch die Hochwasser von 1852, 1855 und 1859 grösstenteils wieder zerstört wurden.

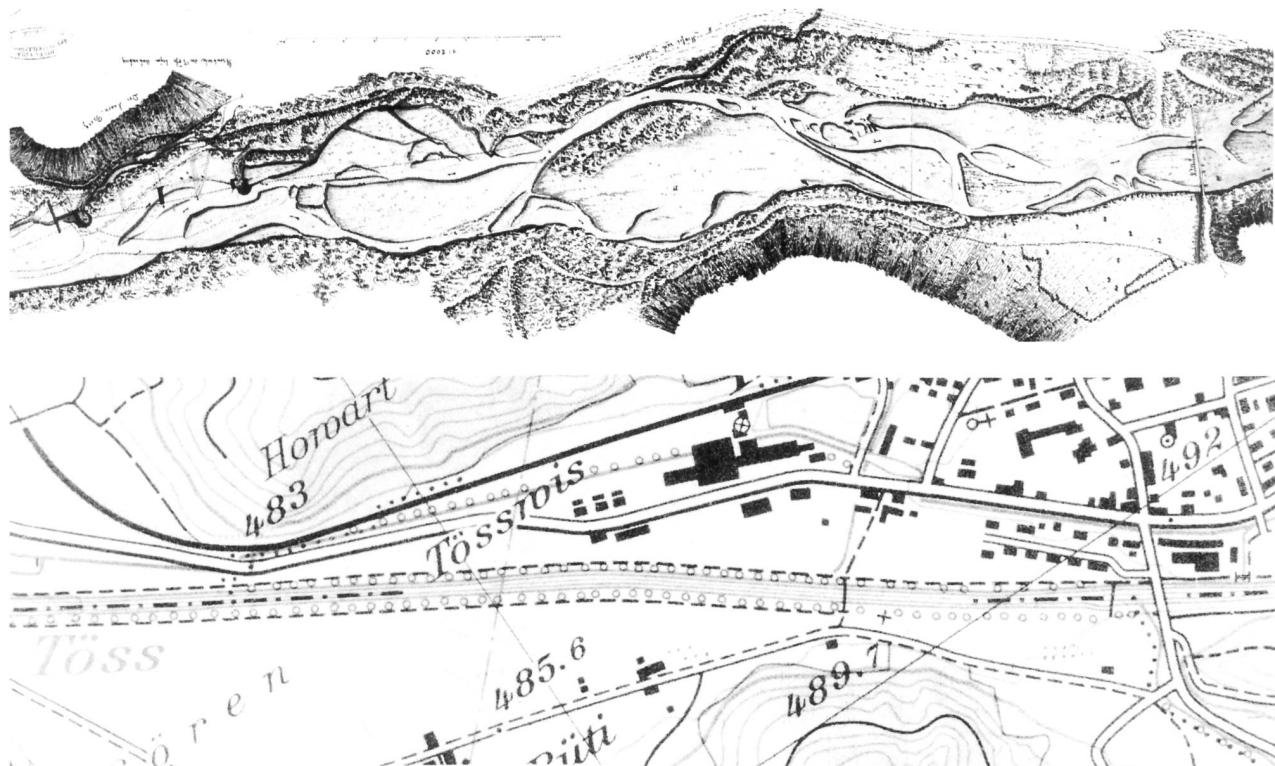


Bild 1. Ursprünglicher, mäandrierender Flusslauf (oben) im Vergleich zum heutigen Zustand (Landeskarte der Schweiz, Blatt 1072).

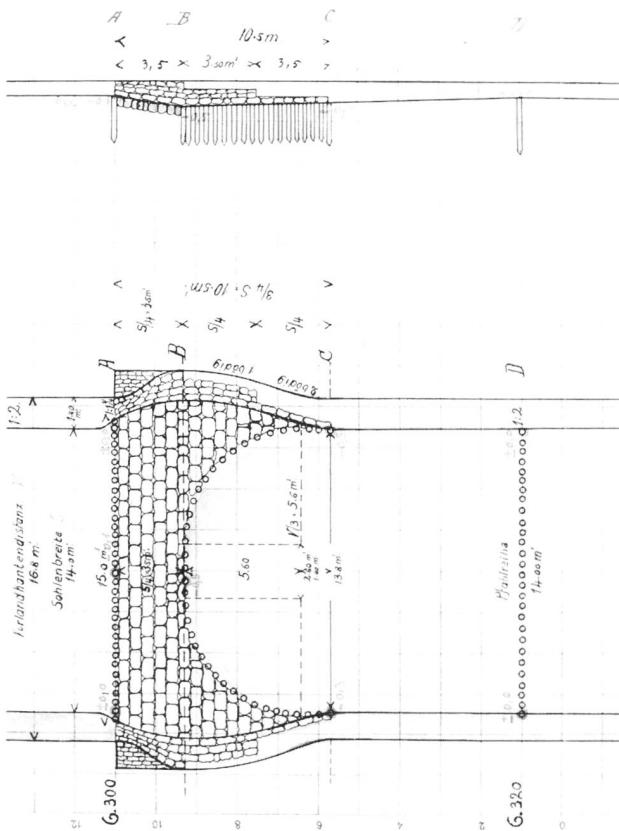


Bild 2. Plan mit Längsschnitt und Grundriss einer Steinmantelsperre aus dem Jahre 1903.

Nach einer Reihe verheerender Hochwasser brachten diejenigen vom März und Juni 1876 das Fass zum Überlaufen: An zahlreichen Stellen wurde das Ufer weggerissen und wertvolles Kulturland überflutet, Brücken und Fussgängerstege weggespült. Die Tösstalbahn wurde zwischen Kollbrunn und Bauma an 13 Stellen unterbrochen.

Ursachen dieser Katastrophen waren die ausserordentlichen Niederschläge, aber auch der gegenüber heute bedeutend geringere Waldbestand im Einzugsgebiet, der wenig zur Retention des Wassers beitrug und den Boden nur in ungenügendem Mass zu stabilisieren vermochte. So lag als Folge der Geschiebeablagerungen an einigen Stellen die Tössohle höher als das umliegende Kulturland.

Aufgrund des enormen Schadens wurden rasch möglichst die rechtlichen, finanziellen und technischen Voraussetzungen geschaffen, um eine durchgehende Korrektur im Bereich der bewohnten und genutzten Talsohle ausführen zu können. Durch eine Streckung der extremen Flusskrümmungen (Bild 1) wurde ein grösseres Gefälle erzielt, während ein Doppelprofil mit einem Mittelwassergerinne sowie beidseitigen Vorländern und Dämmen den Schutz des umliegenden Kulturlandes sichern sollte.

Es war nicht einfach, mit den damaligen Kenntnissen diejenigen Ausbaugrössen zu finden, die einen dauerhaften Bestand der Abflussprofile garantierten. War das Tösgerinne zu breit oder das Gefälle zu gering, so lagerte sich Kies ab und die Sohle erhöhte sich; war das Gerinne durch Verbauungen zu eng gewählt oder das Gefälle zu gross, wurde Geschiebe mitgerissen und die Sohle abgesenkt, was beispielsweise zur Unterspülung der Brückenfundamente geführt hätte.

Verschiedene Hochwasser der letzten Jahre – insbesondere das vom 31. Juli auf den 1. August 1977 – haben ge-

zeigt, dass trotz lokalen Schäden die zum Teil hundert Jahre alte Verbauung der Töss ihre Aufgaben grundsätzlich heute noch zu erfüllen vermag. Die hydraulische Konzeption des Projektes von K. Wetli hat sich also derart bewährt, dass auch in Zukunft darauf abgestellt werden kann.

Die heutige Situation

Der mittlere Abfluss im Abschnitt vor Winterthur beträgt 5 bis 7 m³/s, was einem mittleren spezifischen Abfluss von ca. 0,3 m³/sm entspricht. Das Gefälle der verbauten Töss beträgt im obersten Teil 9,5%, nimmt bis zum mittleren Bereich bei Winterthur auf 5,0% und bis zum Korrektionsende in der Tössegg auf 4,4% ab. Da periodisch trockengelegtes Holz austrocknet und von Fäulnis befallen wird, wurden im oberen Streckenabschnitt, in dem die Töss während niederschlagsfreien Zeitabschnitten praktisch kein Wasser führt, Steinmantelsperren (Bild 2) den Holzschwellen vorgezogen. Im unteren, flacheren Teil von der Weisslingerbrücke in Kollbrunn an flussabwärts sind nebst den Steinmantelsperren auch Holzschwellen zu finden. Beide Schwellentypen erlitten z.T. durch die Kraft der Hochwasser erhebliche Schäden und machten Reparaturen erforderlich. Im Sinne der Erhaltung des historischen Sperrentyps werden die Steinmantelsperren unter Verwendung grösserer Steine und tiefer fundierter Holzpfähle zum grössten Teil in der ursprünglichen Form neu aufgebaut. Die Instandstellung der alten, ca. 80jährigen Holzschwellen war ihrem abgenutzten Zustand entsprechend nicht mehr möglich. So stand man vor der Wahl, entweder jede zweite defekte Holzschwelle durch eine neue Steinmantelsperre zu ersetzen, oder aber eine neuartige Holzschwellen-Konstruktion vorzusehen.

Die neue Holzschwelle

Die Wahl wurde zugunsten von Holzschwellen getroffen, weil im Rahmen der jährlichen Durchforstungsarbeiten an der Töss das erforderliche Schwellenholz zu äusserst günstigen Bedingungen anfiel. So wurde für die neue Holzschwelle nach einer Lösung gesucht, die bevorzugte Fisch-

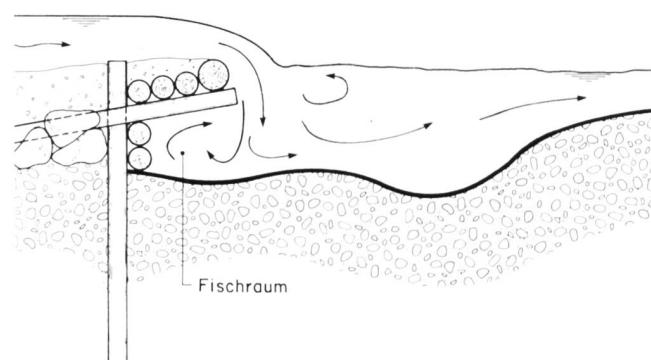


Bild 3. Holzschwelle mit Auswirkungen auf Strömung und Sohlenverlauf.

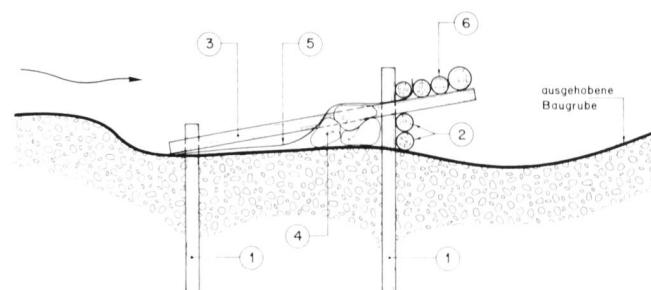


Bild 4. Längsschnitt durch eine Holzschwelle im Bauzustand. Das Vorgehen entspricht der Nummernfolge.

refugien im Bereich der alten defekten Holzschwellen ersetzt und unterschiedliche Tiefen und Strömungsverhältnisse bietet. Die konstruktive Umsetzung, die den gestellten Anforderungen gerecht werden soll, ist in Bild 3 dargestellt. In der Töss sind 12 Schwellen dieses Typs in Funktion. Sie zeichnen sich durch die tragende Rampe aus, die einen beschatteten und vor Fischreihern geschützten Raum schafft. Mit etlichen Elektroabfischaktionen konnte belegt werden, dass damit die Anforderungen an ein Fischrefugium erfüllt werden konnten. Eine vom Prinzip her ähnliche Anordnung für kleine Bäche wurde bereits beschrieben (*Göldi und Niederer, 1990*).

Hinweise zur Bauausführung der Töss-Holzschwellen

Der Bauvorgang wird im Längsschnitt gemäss der in Bild 4 angegebenen Nummernfolge ausgeführt. Nach dem Ausheben der Baugrube werden die senkrechten Pfähle (1) in einem seitlichen Abstand von gut 2 m gerammt. Zuerst können die Schürzenhölzer (2) und danach die Längshölzer daran befestigt werden. Steinblöcke (4), deren Spalten Kleinfische aufnehmen, werden oberwasserseitig der Schürze verlegt. Schliesslich werden die Rampenhölzer (6) und – zur Vermeidung von Sickerwasserströmen – eine Filtermatte (5) angebracht. Nach Inbetriebnahme wird die Sohle im Oberwasser bis auf die Kote des Überfallholzes angehoben und lässt meist nur noch das äusserste Rampenholz sichtbar (Bild 5).

Gebaut wird in zwei Etappen (linke Hälfte/rechte Hälfte). Die Wasserhaltung für die erste Etappe ist mit Abspunden oder Abdämmen einfach. Für die Wasserhaltung der zweiten Etappe ist ein Abspund parallel zur Flussrichtung wegen des Schwellenzusammenbaus in der Flussmitte nicht mehr möglich. Die Wasserdurchlässigkeit der bereits erstellten Etappe stellt ein zusätzliches Problem dar. Erfahrungen haben gezeigt, dass das Auftreten von Sickerwasserströmen im Bauzustand am zweckmässigsten vermieden wird durch die Abdeckung der halbseitig erstellten Holzschwelle mit einer wasserdichten Abdeckfolie (z.B. Plastikfolie 0,1 mm) und durch einen Erdwall in Längsrichtung, der die Baustelle vom eingeengten Abfluss trennt. Die Schwellenhölzer im Uferbereich sind möglichst tief einzubinden und gut zu verankern. Es empfiehlt sich, beim Eindecken der seitlichen Schwellenenden kiesiges Material zu verwenden, schichtweise einzubringen, zu verdichten und

mit Astmaterial zu armieren. Damit erreicht man einen optimalen Schutz gegen eine Umspülung der Schwellenenden bei Hochwasser und gegen eine Ausspülung durch Sickerströme.

Das Baumaterial für eine Holzschwelle besteht aus ca. 25 m³ Holz, 80 t Bruchsteinen (Stückgewicht ca. 800 kg), 130 m² Geotextil-Ge webematte und diversem Kleinmaterial wie Nägel, Schrauben, Pfahlschuhe, ausschlagfähiges Astmaterial (Weiden). Die Planung für den Holzschwellenbau sollte möglichst in den Wintermonaten während der Holzschlagzeit erfolgen, damit das erforderliche Material bei den lokalen Holzkorporationen bestellt werden kann. Für die Aushub-, Ramm- und Verbauungsarbeiten hat sich ein 16-t-Bagger als geeignete Maschine erwiesen.

Unterhalt der Töss-Holzschwellen

In den letzten 8 Jahren konnten an den Schwellen selbst weder Beschädigungen noch Verformungen festgestellt werden. Die Holzkonstruktion wurde bewusst so gewählt, dass das Rundholz des Überfalls (Durchmesser ca. 50 cm) im Falle von Holzfäulnis oder Abrieb infolge starken Geschiebetriebes ausgewechselt werden könnte. Der Unterhalt an den Holzschwellen hat sich bis heute auf die Reparatur der Uferpartien im Bereich des Kolkes beschränkt. Es galt jeweils, die abgesackte Uferverbauung mit zusätzlichen Steinen und durch Einlegen von ausschlagfähigen Weidenästen wiederherzustellen. Diese Unterhaltsarbeiten wurden in der Regel nötig wegen ungenügend tiefer Fundierung der Uferverbauung oder in einzelnen Fällen infolge der Bauausführung im Herbst, die ein Anwachsen der Weidenäste und der Grünsaat nicht mehr ermöglichten. Aus den heutigen Erkenntnissen kann gesagt werden, dass Holzschwellen im Vergleich zu massiveren, härteren Flussverbauungen keinen vermehrten Unterhalt erfordern. Es empfiehlt sich aber generell, sie öfters zu kontrollieren, um allfällige Beschädigungen möglichst schnell reparieren zu können.

Unterhaltsgruppen des Amtes für Gewässerschutz und Wasserbau des Kantons Zürich und regionale Bauunternehmungen konnten aufgrund ihrer Erfahrungen mit dem bisherigen Holzschwellenbau diverse Verbesserungen realisieren und eine ausgereifte Konstruktion entwickeln. Mit Modellversuchen an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich galt es nun zusätzlich Klarheit in hydraulischen Belangen zu schaffen. Das Abflussbild und die Geschiebeumlagerungen bei Hochwasser sollten beschrieben sowie die resultierende Kolkbildung abgeschätzt werden.

Modellversuche

Die Modellierung erfolgte im Hinblick auf die sich während eines Hochwassers abspielenden hydraulischen und geschiebetechnischen Vorgänge. Die Modellanordnung, die Versuchsdurchführung und die Datenauswertung werden in *Krebs (1990)* ausführlich beschrieben.

In einer 6 m langen Rinne wurden zwei aufeinanderfolgende Sohlenfixpunkte modelliert, wobei der obere durch eine Modell-Holzschwelle im Massstab 1:20 gebildet wurde. Der untere diente lediglich zur Regelung des Unterwasserspiegels. Da der Abfluss beim Überqueren der Schwelle die kritische Tiefe durchläuft, bleibt eine Beeinflussung der Strecke zwischen den Fixpunkten durch allfällige Störungen im Ein- und Auslaufbereich des Modells aus. Die Untersuchungen konzentrierten sich folglich auf den Bereich des Unterwassers der Modellschwelle, wo die während eines Hochwassers auftretenden Sohlenformen dokumentiert wurden.

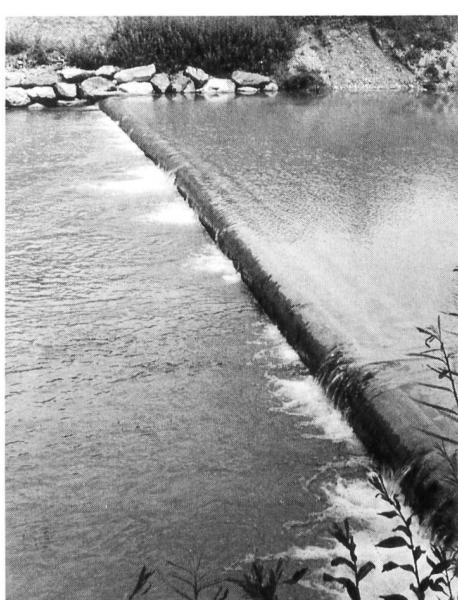


Bild 5. Nach Abschluss der Bautätigkeit sind im Fluss nur noch die Rampenhölzer sichtbar.

Ziel der Untersuchungen war es, Aussagen über die zum Einkiesen der Schwelle führenden Bedingungen machen zu können. Neben der Beobachtung, bei welchem Abfluss Q_1 die Einkiesung erfolgt, musste der Einfluss verschiedener Parameter auf hydraulische und geschiebetechnische Vorgänge beachtet werden. So wurden die Höhendifferenz Δh zwischen zwei aufeinanderfolgenden Schwellen, die Geschiebebeschickung q_s , die Länge l_s des Schwellenvorbaus und schliesslich die Zusammensetzung des Sohlenmaterials (d_{90}) als Parameter eingeführt.

Vorgänge bei Hochwasser: Einkiesen...

Anhand der Fotos in Bild 6 werden die entscheidenden Vorkommnisse von Abfluss und Sohlenveränderung besprochen. Es wird stellvertretend ein Versuch mit $\Delta h = 0,5$ m dargestellt.

Bei kleinem Abfluss kann ein nahezu senkrecht eintauchender Überfallstrahl beobachtet werden (Bild 6a), der in Schwellennähe liegendes Material verwirbelt. Entsprechend bildet eine kurze und tiefe Kolkform einen geschiebefreien Fischraum unter der Rampe. Dies entspricht dem

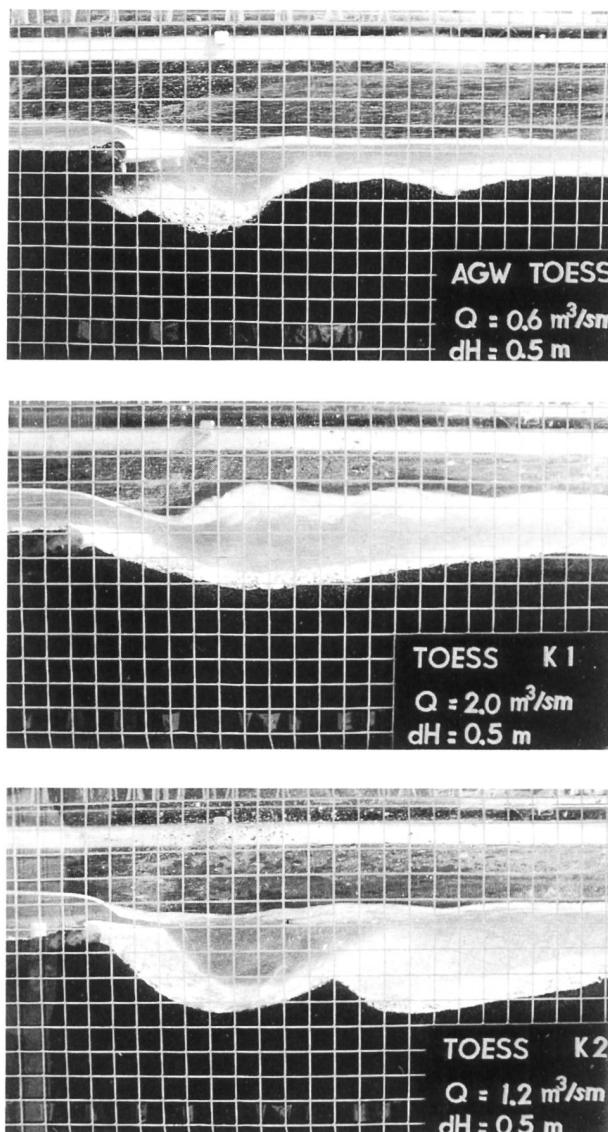


Bild 6. Abflusszustände bei Hochwasser: (a, oben) Bei eintauchendem Strahl wird das Fischrefugium offen gehalten, (b, Mitte) durch einen gewissen Hochwasserabfluss wird das Fischrefugium vom Flusswasser getrennt (Einkiesen), (c, unten) bei abschwellem Hochwasser führt erst ein steiler Eintauchwinkel zur Öffnung des Fischrefugiums.

meistens vorhandenen Sohnenzustand. Das Strömungs- und Sohlenbild bleibt bei mässiger Abflusssteigerung bis auf geringfügige Änderungen erhalten, der Eintauchwinkel des Überfallstrahles weicht allenfalls etwas stärker von der Vertikalen ab.

Erst bei einem bestimmten, für gleichbleibende Randbedingungen reproduzierbaren Q_1 verändert sich das Strömungsbild grundsätzlich: Der «Überfallstrahl» wird nach der Schwelle zu einem wellenförmigen Oberflächenabfluss (Bild 6b) und induziert eine langgezogene Walze mit Rückströmung an der Sohle. Ihrer Stärke entsprechend wird vorerst nur feines, bei weiter zunehmendem Abfluss dann auch gröberes Material in Richtung Schwelle bewegt. Die dadurch entstehende Düne lagert stetig rückwärts transportiertes Material auf ihrer schwelleseitig und damit im Strömungsschatten gelegenen Böschung ab (Bild 7). Dieser Einkiesungsvorgang ist abgeschlossen, wenn die Dünen spitze das Überfallholz erreicht und dadurch die Ablagerung auf ihrer Oberwasserveite verunmöglich. Das rücktransportierte Material wird nun an der Schwelle von der vorwärts gerichteten Hauptströmung erfasst und flussabwärts getragen oder in die Walzenbewegung integriert. Wird der Abfluss darüber hinaus gesteigert, zieht sich die Walze weiter in die Länge und formt dabei einen länglichen, weniger tiefen Kolk. Schliesslich verändert sich das Strömungsbild bei sehr hohem Q , indem nun die gesamte Wassertiefe von der Vorwärtsströmung erfasst wird. In diesem Zustand stellt die Schwelle im Vergleich zur Abflusstiefe und wegen dem erwähnten Abnehmen der Kolttiefe bloss noch eine Sohlenunebenheit dar. Für das Phänomen der Einkiesung spielt aber der extrem hohe Abfluss keine Rolle. Ist die Verbindung von Düne und Schwelle erst einmal hergestellt, verändert sich am Zustand unter der Rampe nichts mehr. Es bleibt also ein geschiebefreier Raum bestehen, der durch Schürze, Rampenunterseite und Dünenrückseite begrenzt wird (Bild 7). Die Grösse der Hochwasserspitze ist dabei unerheblich. Farbversuche lassen ferner während des Einkiesens und erst recht nach der Trennung von Fischraum und Flusswasser unter der Rampe nur geringe Turbulenzen erkennen.

... und Wiederöffnen des Fischraumes

Nach der Hochwasserspitze, bei kleiner werdendem Q , spielt sich vorerst die Umkehrung des bei ansteigendem Abfluss beobachteten Vorganges ab. Nach der Ausbildung der Sohlen-Rückströmung werden Walze und Kolkform wieder kürzer und tiefer. Der Mechanismus des Einkiesens selber kann allerdings nicht genau umgekehrt vor sich gehen, da es allein schon unmöglich ist, das auf der schwelleseitigen Dünenböschung gelagerte Material zu mobilisieren. Es erstaunt deshalb nicht weiter, dass der beim Anschwellen des Hochwassers zum Einkiesen des Fischraumes führende Abfluss Q_1 für den Kolk beim Hochwasser rückgang ohne Bedeutung ist. Der Übergang vom gewellten Oberflächenabfluss zur Tauchströmung setzt bei einem deutlich unter Q_1 liegenden Abfluss ein. Dieses Umschlagen der Strömungscharakteristik bedeutet allerdings noch nicht die Öffnung des Fischraumes, solange der eintauchende Strahl flacher verläuft als der stabile Neigungswinkel des Sohlenmaterials (Bild 6c). Erst bei steilere Eintauchwinkel wird der Böschungsfuss der Düne angegraben und somit ein Nachrutschen des oberen, den Fischraum vom Flusswasser trennenden Materials ausgelöst (Bild 8). Der Fischraum wird also bei diesem hier mit Q_2 bezeichneten Abfluss selbsttätig wieder geöffnet. Bei weiterhin abnehmendem Abfluss und sich der Vertikalen näherndem Eintauchwinkel verlagert sich der Kolk rückwärts unter die

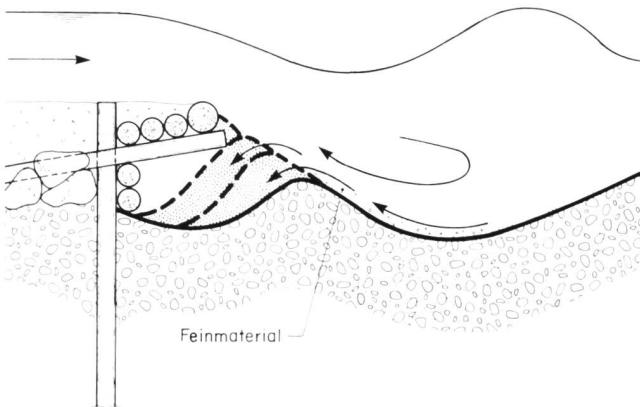


Bild 7. Einkiesung der Schwelle durch eine rückwärts wandernde Düne.

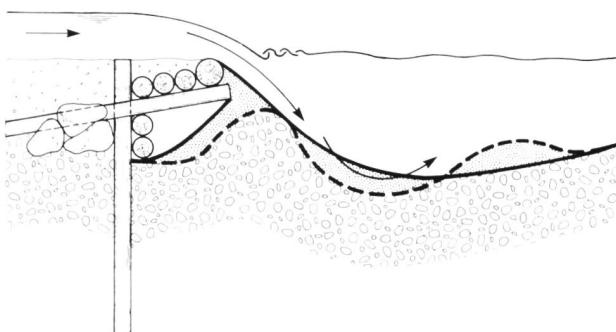


Bild 8. Öffnung des Fischrefugiums infolge eines genügend steilen Tauchstrahls.

Rampe. Schliesslich entsteht unabhängig von der vorhergehenden Hochwasserspitze wieder ein Sohlenverlauf, der mit dem Ausgangszustand bei Versuchsbeginn und mit den in der Natur beobachteten Kolkformen gut übereinstimmt.

Punkt des Umschlagens

Zwischen den beiden grundsätzlich unterschiedlichen Abflusszuständen nach der Schwelle – dem eintauchenden Überfallstrahl bei kleinem Q und dem wellenförmigen Oberflächenabfluss bei grossem Q – konnten keine Zwischenzustände beobachtet werden, der Übergang vom einen in den anderen Zustand erfolgt unstetig. Bei welchem Q dieses Umschlagen stattfindet, wird im wesentlichen durch die Bewegungsrichtung bestimmt. Bei kleinem Abfluss ist die Hauptkomponente der Bewegung vertikal gerichtet und führt zum Tauchen des Überfallstrahls. Wird mit zunehmendem Abfluss die horizontale Bewegungskomponente dominanter, kann der Strahl nicht mehr tauchen. Durch eine Erhöhung der Schwelle kann die Tendenz zum Eintauchen des Strahls gefördert und damit der Punkt des Umschlagens auf grössere Abflüsse verlagert werden. Die Modellversuche zeigten auch, dass sich ein höheres Δh bei abnehmendem Q ebenso positiv auswirkt, den die Öffnung des Fischraumes bewirkenden Abfluss Q_2 erhöht und damit seltener Geschiebeumlagerungen an der Schwelle verursacht. Einflüsse anderer Randbedingungen auf den Punkt des Umschlagens sind eher von geringerer Bedeutung. Das Sohlengefälle J_s zwischen den Schwellen wird durch den Fluss selber bestimmt. Wie Längenprofil-Aufnahmen zeigen (VAW-Bericht 847/4, 1988), kann die Sohle sehr wohl auf dem ganzen Abschnitt zwischen zwei Schwellen ansteigen, also ein negatives Gefälle aufweisen. Da sich folglich nicht Normalabfluss einstellen kann, müssen Wasserspiegel- und Energieliniengefälle (J_w und J_e) bei bekanntem Sohlenverlauf mit Staukurvenrechnungen bestimmt (VAW-Bericht 847/4, 1988) und als Funktion des spezifischen Abflusses q

dargestellt werden (Bild 9a). Die Bestimmungsgleichung für die Wasserspiegeldifferenz ΔH_w an der Schwelle,

$$\Delta H_w = \Delta h - L J_w \quad (1)$$

(mit Höhendifferenz zwischen zwei Schwellen Δh und Schwellenabstand L), liefert in der Folge den Zusammenhang von ΔH_w und dem spezifischen Abfluss q (Q/B , B = mittlere Abflussbreite), der gewissermassen die Betriebslinie einer bestimmten Schwelle darstellt (Bild 9b).

Um die Bedeutung des Geschiebetriebs für das Umschlagen des Sohlzustandes abzuklären, kann der spezifische Einkiesungsabfluss q_1 mit dem den Geschiebetrieb auslösenden Abfluss q_0 verglichen werden. Bei einem typischen q_1 stellt sich für die Töss ein Energieliniengefälle J_e von 2% ein (Bild 9a). Nach Meyer-Peter und Müller (1949) setzt der Geschiebetrieb bei einem q_0 ein, das für den in Bild 6 dokumentierten Fall höher liegt als q_1 und erst recht als q_2 . Geschiebetrieb wird also bei interessierenden Größenordnungen von Δh und q_1 ausbleiben oder allenfalls örtlich schwach ausgebildet sein. Bei grösseren Δh kann er infolge des erhöhten q_1 etwas wichtiger werden, ohne allerdings einen bedeutenden Einfluss auf den Einkiesungsvorgang auszuüben. Auch die Öffnung des Fischraumes kann durch Geschiebetrieb allenfalls leicht erschwert werden, am grundsätzlichen Vorgang und an q_2 , bei dem dies geschieht, verändert sich aber nichts.

Der durch die Versuche abgedeckte Bereich umfasste $J_u = 3,5$ bis 10% für das Gefälle über die Schwellen und $d_{90} = 1,5$ bis 14 cm für den Korndurchmesser bei 90% Siebdurchgang. Die im folgenden vorgestellten Formeln wurden empirisch ermittelt und weisen daher dimensionsbehaftete Konstanten c_i auf (Krebs, 1990).

Die Auswertung der Versuchsfotografien ergab annähernd lineare Zusammenhänge zwischen ΔH_w und den zum Um-

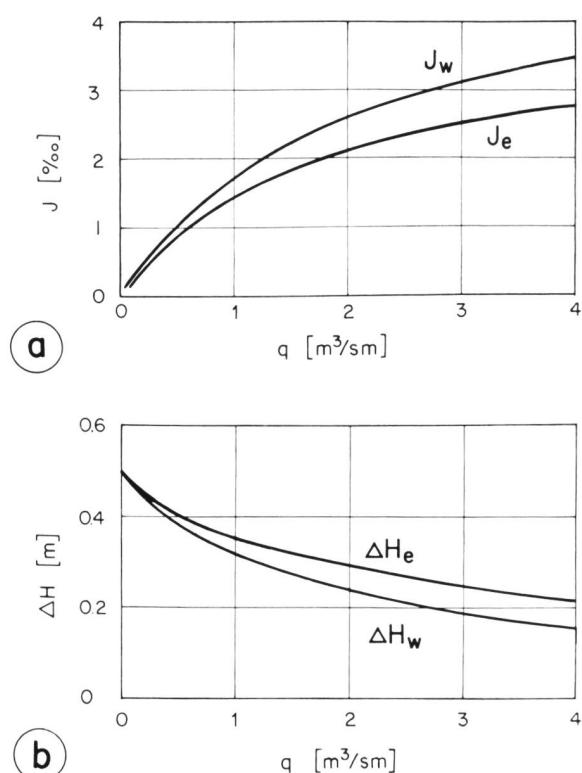


Bild 9. Staukurvenrechnungen mit der gegebenen Topographie führen zu den Darstellungen von Wasserspiegel- und Energieliniengefälle (J_w und J_e) (a) sowie der Wasserspiegeldifferenz ΔH_w an der Schwelle (b) als Funktion des spezifischen Abflusses q .

schlagen führenden Abflüssen q_1 und q_2 (Bild 10), die durch die Formeln

$$\Delta H_{w1} = c_1 q_1^{0.8}, \text{ mit } c_1 = 0,18 [\text{m}^{0.6} \text{s}^{0.8}] \quad (2)$$

$$\Delta H_{w2} = c_2 q_2^{0.8}, \text{ mit } c_2 = 0,38 [\text{m}^{0.6} \text{s}^{0.8}] \quad (3)$$

beschrieben werden können. Die für eine bestimmte Schwelle massgebenden Punkte auf den beiden Linien für q_1 und q_2 ergeben sich aus den Schnittpunkten mit der «Betriebslinie» aus Bild 9b für die gewünschte Schwelle. Bei der Projektierung einer Schwelle kann zum Beispiel ein gewünschtes q_1 vorgegeben werden. Gl. (2) liefert ΔH_{w1} , und eine Staukurvenberechnung bei q_1 ergibt J_w1 . Mit Gl. (1) und der sich aus dem Gefälle über die Schwellen ergebenden Funktion $\Delta h = L J_u$ lässt sich das gesuchte Wertepaar ($\Delta h/L$) angeben:

$$L = \Delta H_w / J_w + J_u \text{ und } \Delta h = L J_u \quad (4)$$

Das umgekehrte Vorgehen für Schwellen mit bekannten Randbedingungen beginnt mit den Staukurvenrechnungen, die $J_w = f(q)$ und die Betriebslinie $\Delta H = f(q)$ liefern (Bild 9). Die Schnittpunkte der Betriebslinie mit den Kurven aus Bild 10 bestimmen die Bedingungen für das Einkiesen ($\Delta H_{w1}, q_1$) bzw. das Öffnen ($\Delta H_{w2}, q_2$) des Fischraumes. q_1 und q_2 haben sich also als unabhängig von der Geschlebmischung erwiesen. Massgebend sind in allen Fällen die Feinanteile. Abweichungen von q_1 wären daher höchstens bei grobem Material mit sehr geringem Feinanteil denkbar, wenn die rückwärts gerichtete Sohlenströmung bei q_1 eine zu geringe Schleppkraft aufweisen würde, um die Einkiesung einzuleiten. Für diesen Fall würde die Vorhersage von q_1 gemäß Gl. (2) zu pessimistisch ausfallen.

Eine Idee von der Größenordnung des Einkiesungsabflusses kann anhand des in Bild 6 gezeigten Töss-Versuches vermittelt werden. Mit einem vom AGW ins Auge gefassten Δh von 0,5 m und dem sich aus dem Gefälle über die Schwellen ergebenden L von ca. 100 m liegt q_1 bei $2 \text{ m}^3/\text{sm}$, was ungefähr dem einjährlichen Hochwasser (Eidg. Amt für Strassen- und Flussbau, 1974) entspricht.

Kolk

Für die Projektierung der Schwelle ist – neben dem Einkiesen und Öffnen des Fischraumes – im Hinblick auf die Ufer- und Schwellensicherung auch die Kolkgrösse von Bedeutung. Im Gegensatz zum Punkt des Umschlagens muss bei

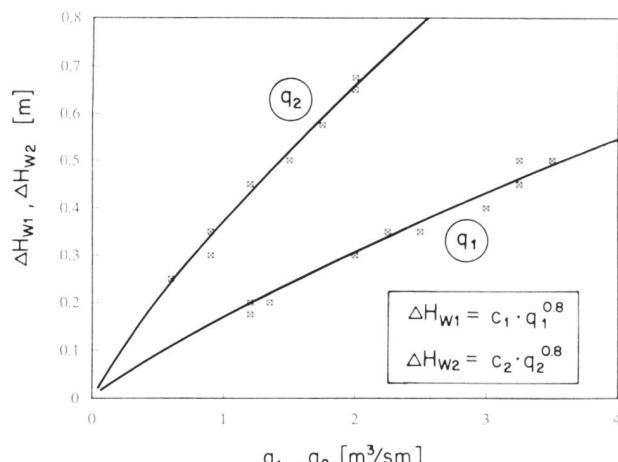


Bild 10. Zusammenhang zwischen Wasserspiegeldifferenz ΔH_w an der Schwelle und den spezifischen Abflüssen, die zum Einkiesen (q_1) bzw. zum Öffnen (q_2) des Fischrefugiums führen.

der Untersuchung der Kolkgrösse vermehrt die Zusammensetzung des Sohlenmaterials beachtet werden. Die Modellversuche haben gezeigt, dass die Koltiefe mit ansteigendem Δh zunimmt, der Zusammenhang mit q jedoch nicht so eindeutig ist. Bei Spitzenabflüssen entsteht ein langer, flacher Kolk. Erst bei rückläufigem Abfluss nach der Hochwasserspitze stellen sich die grössten Koltiefen bei kleinem q ein. Ein Vergleich mit bestehenden Koltformeln (Übersicht s. Whittaker und Schleiss, 1984) gestaltet sich schwierig, da diese jeweils ausschliesslich auf horizontale resp. auf vertikale Jets ausgelegt sind. Die Holzschwelle gibt dabei nicht nur durch ihr wechselndes Abflussbild Probleme auf, sondern auch durch ihre geometrische Anordnung, die dem Kolk eine Ausdehnung flussaufwärts des Überfallpunktes bis zur Schürze erlaubt.

Es wird hier ein vereinfachtes Verfahren aufgezeigt, das darauf abzielt, mit der Lage und der Tiefe des Maximalkolkes, mit der maximalen Tiefe bei der Schürze sowie mit der Kolkänge die Böschungs- und Schwellensicherung zu dimensionieren. Nach der Definition der maximalen Koltiefe T vom Überfallholz aus (Bild 11) konnte die sehr einfache Form

$$T = c_6 \Delta H_{wm}^{0.8}, \text{ mit } c_6 = 4,4 [\text{m}^{0.2}] \quad (5)$$

gefunden werden. Es bleibt die Frage zu klären, welche Wasserspiegeldifferenz ΔH_{wm} die maximale Koltiefe T verursacht und somit in Gl. (5) einzusetzen ist. Die in den Modellversuchen bestimmten, für die Abschätzung von T massgebenden Wertepaare ($q_m/\Delta H_{wm}$) wiesen den folgenden Zusammenhang auf:

$$\Delta H_{wm} = c_7 q_m^{1.2} / d_{90}^{0.3}, \text{ mit } c_7 = 0,22 [\text{s}^{1.2}/\text{m}^{1.1}] \quad (6)$$

Wird Gl. (6) durch eine Kurve dargestellt und mit der Betriebslinie geschnitten (Bild 12), ergibt sich daraus das in Gl. (5) einzusetzende ΔH_{wm} . Anhand von Bild 12 lässt sich auch der Einfluss der Korngrösse verdeutlichen. Bei grösserem d_{90} verschiebt sich die Kurve gemäß Gl. (6) nach rechts. Der massgebende Abfluss q_m wird damit grösser, ΔH_{wm} und folglich T (Gl. [5]) jedoch kleiner.

Die bisher vorgestellten Formeln gelten für die Koltiefen in Flussmitte und überschätzen daher die für die Böschungssicherung massgebenden Grössen. Schoklitsch (1951) gibt im Fall einer symmetrischen Strömung für den Randbereich des Flusses einen Reduktionsfaktor von 0,85 an.

Für die Böschungssicherung ist neben der Koltiefe der Abstand x_1 des tiefsten Kolkpunktes zum Überfallholz und die Kolkänge x_2 , wo sich der Verlauf des Kolkes der normalen Sohlenlage nähert, ebenfalls von Interesse. x_1 konnte mit

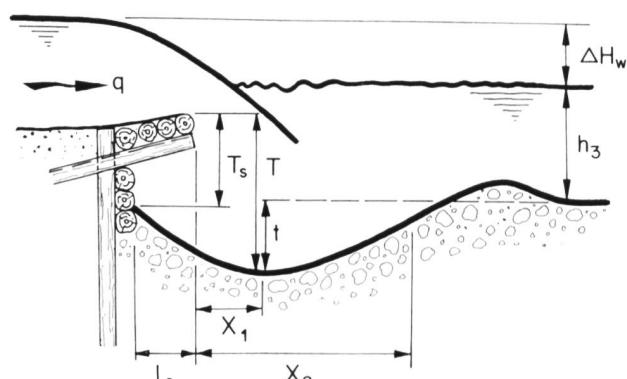


Bild 11. Definitionsskizze für die Kolkgeometrie.

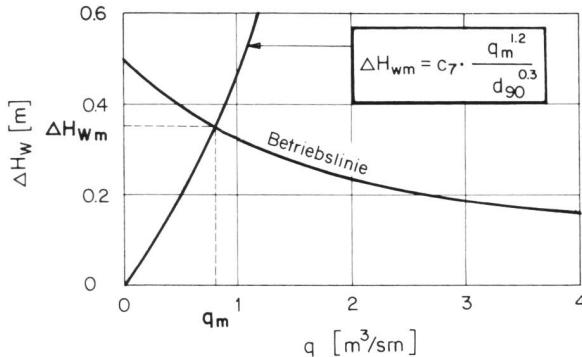


Bild 12. Betriebspunkt, der zur maximalen Kolktiefe T führt. Die entsprechende Wasserspiegeldifferenz ΔH_{wm} kann in Gl. (5) eingesetzt werden.

$$x_1 = c_8 q^{0.65}, \text{ mit } c_8 = [s^{0.65}/m^{0.3}] \quad (7)$$

gut angenähert werden, während die Kolkänge schwierig zu bestimmen ist. Im Bereich grosser Abflüsse, die ja im Hinblick auf die notwendige Länge der Kolksicherung vor allem interessieren, weist x_2 ungefähr den doppelten Betrag von x_1 auf.

Sicherheit

Die grösste Gefahr für das Funktionieren der Schwelle geht von einer Unterspülung der Schürze aus. Messungen bei einem Schürzenabstand l_s von 1,2 m zum Überfallholz haben für die Kolktiefe T_s (Bild 11) unmittelbar bei der Schürze

$$T_s = c_9 \Delta H_w / d_{90}^{0.1}, \text{ mit } c_9 = 2,5 [m^{0.1}] \quad (8)$$

ergeben. Für ΔH_w kann näherungsweise Δh eingesetzt werden, da sehr kleine q für T_s massgebend sind. Mit der Vergrösserung von l_s kann dem Kolkverlauf entsprechend T_s und damit die notwendige Schürzentiefe abgemindert werden.

Beispiele zur Berechnung aller wichtigen Grössen werden im Anhang von Krebs (1990) gegeben.

Folgerungen

Die vorgestellte Holzschwelle, von der bereits 12 Konstruktionen in der Töss realisiert wurden, wird bis heute den an sie gestellten Anforderungen gerecht. Mit Elektroabfischaktionen wurde im Refugium unter der Schwellenrampe eine hohe Fischdichte nachgewiesen. Die Unterhaltsarbeiten beschränken sich auf den für Schwellen allgemein üblichen Rahmen. Beschädigungen konnten bis heute lediglich an der Einbindung in die seitliche Böschung, nicht aber an der Holzkonstruktion selber festgestellt werden.

Die Modellversuche haben in der Folge Klarheit gebracht über den Einfluss der Holzschwelle auf Abfluss und Sohlenzustand im Verlauf eines Hochwassers. Die Trennung von Fischraum und Flusswasser lässt sich nicht vermeiden, sie erfolgt bei einem berechenbaren, eher selten auftretenden Abfluss. Nach der Hochwasserspitze, bei rückgängigem Abfluss, wird der Fischraum ohne äusseren Eingriff wieder geöffnet – ebenfalls bei einem aufgrund der Randbedingungen berechenbaren Abfluss. Zwischen dem Einkiesen und Öffnen bleibt im Fischrefugium ein gewisses Volumen geschiebefrei, das nie von bedeutenden Turbulenzen erfasst wird.

Neben den Bedingungen, die zum Umschlagen von Abfluss und Sohlenzustand führen, konnten auch die entstehenden Kolkiefen und -längen allgemein ermittelt werden. Diese Aussagen sind notwendig, um die Holzschwelle und die seitlichen Böschungen vor Unterspülung und Instabilität zu schützen. Von der hydraulischen und flussbaulichen Seite

her konnten damit die Funktionsweise der Schwelle und die zu ihrer Dimensionierung und Sicherung notwendigen Angaben gemacht werden. Die Voraussetzungen sind damit gegeben, den Einsatz dieser Holzschwelle auch in andern Flüssen als der Töss in Betracht zu ziehen. Es bleibt offen, wie die Fische auf die beschriebenen Vorgänge reagieren.

Symbole

B	mittlere Abflussbreite	[m]
c_i	dimensionsbehaftete Konstanten in empirisch ermittelten Gleichungen	
d_{90}	Korndurchmesser bei 90 % Siebdurchgang	[m]
J_e	Längsgefälle der Energielinie	[--]
J_s	Längsgefälle der Sohle	[--]
J_u	Gefälle über die Schwellen	[--]
J_w	Längsgefälle des Wasserspiegels	[--]
L	horizontaler Schwellenabstand	[m]
l_s	Distanz Schürze–Überfallholz	[m]
Q	Abfluss	[m³/s]
Q_1	Abfluss, der zur Einkiesung führt	[m³/s]
Q_2	Abfluss, der zur Öffnung des Fischraumes führt	[m³/s]
q	spezifischer Abfluss pro m Flussbreite	[m³/sm]
q_0	spez. Abfluss, bei dem Geschiebetrieb einsetzt	[m³/sm]
q_1	spez. Abfluss, der zur Einkiesung führt	[m³/sm]
q_2	spez. Abfluss, der den Fischraum öffnet	[m³/sm]
q_m	spez. Abfluss bei maximaler Kolktiefe	[m³/sm]
q_s	Geschiebebeschickung	[kg/s]
T	maximale Kolktiefe vom Überfallholz aus	[m]
T_s	maximale Kolktiefe bei der Schürze	[m]
x_1	horizontale Entfernung des tiefsten Kolkpunktes zum Überfallholz	[m]
x_2	Kolkänge: Distanz vom Überfallholz bis zur Näherung des Kolkverlaufs an die ungestörte Sohlenlage	[m]
ΔH_w	Wasserspiegeldifferenz an der Schwelle	[m]
ΔH_{wm}	Wasserspiegeldifferenz, bei der die Kolktiefe maximal wird	[m]
Δh	Höhendifferenz zwischen zwei Schwellen	[m]

Literatur

- Eidg. Amt für Strassen- und Flussbau (1974): «Die grössten bis zum Jahre 1969 beobachteten Abflussmengen von Schweizerischen Gewässern.»
 Göldi, C., und Niederer, H. (1990): «Naturnaher Ausbau kleiner Bäche.» Schw. Ingenieur und Architekt, Vol. 108, Nr. 10, 258–260.
 Krebs, P. (1990): «Fischgerechte Holzschwellen in Flüssen.» Mitteilung Nr. 104 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich.
 Meyer-Peter, E., und Müller, R. (1949): «Eine Formel zur Berechnung des Geschiebetriebes.» Mitteilung Nr. 16 der Versuchsanstalt für Wasserbau und Erdbau, ETH Zürich.
 Schoklitsch, A. (1951): «Berechnung der Kolkiefen flussabwärts eines Stauwerkes.» Wasser- und Energiewirtschaft, Nr. 2.
 VAW-Bericht 847/4 (1988): «Wassermessstation Bauma an der Töss.» Bericht zuhanden des Amtes für Gewässerschutz und Wasserbau des Kantons Zürich, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich (nicht veröffentlicht).
 Whittaker, J. G., und Schleiss, A. (1984): «Scour Related to Energy Dissipators for High Head Structures.» Mitteilung Nr. 73 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich.

 Adressen der Verfasser: Peter Krebs, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zentrum, CH-8092 Zürich, und Franz Bieler, Amt für Gewässerschutz und Wasserbau des Kantons Zürich (AGW), Kantonale Verwaltung, Walchetur, CH-8090 Zürich.