

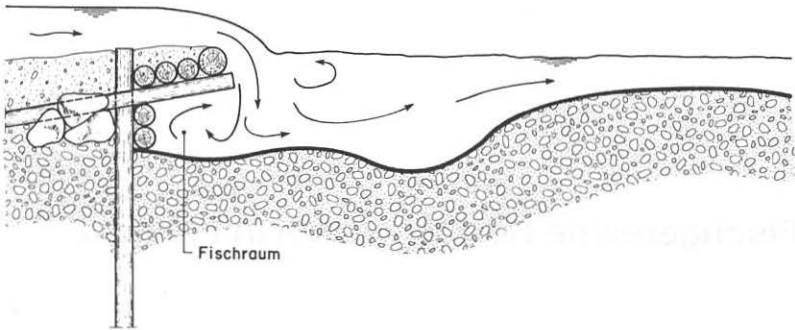


Fischgerechte Holzschwelen in Flüssen

Peter Krebs

Zürich, 1990

Herausgeber: Prof. Dr. D. Vischer



Holzschwelle und Unterwasser im Längsschnitt

Vorwort

In vielen Wildbächen der Alpen und Voralpen lässt sich eine natürliche und bemerkenswert stabile Folge von Stufen und Becken -- im englischen Fachjargon als Step-Pool-System bezeichnet -- beobachten. Dabei zeigt sich, dass die Stufen aus ineinander verkeilten Steinblöcken und Treibholzverklausungen gebildet werden, über die das Wasser hinunterschiesst oder -stürzt. Das anschliessende Kolkloch wirkt dann als Becken, in welchem die Fallenergie soweit verwirbelt wird, dass sich das Wasser beruhigt. Es folgt die nächste Stufe, wo sich das Spiel einer örtlichen Beschleunigung mit einer darauffolgenden, weiträumigen Verzögerung wiederholt.

Hatten die Wasserbauer früherer Zeiten dieses Spiel im Auge, als sie die sich eintiefenden Bäche und kleinen Flüsse des schweizerischen Mittellandes und vergleichbarer Regionen mit künstlichen Stufen zu stabilisieren suchten? Liessen sie sich bei deren Ausführung von den erwähnten Steinverkeilungen und Holzverklausungen inspirieren? -- Es wäre interessant, dieser Frage nachzugehen. Denn seit langem gehört der Einbau solcher Stufen in Form von Querwerken aus Stein und Holz zu den Standardmassnahmen, um der Tiefenerosion von Fliessgewässern Einhalt zu gebieten. Dabei werden diese Kunstbauten je nach Fallhöhe des Wassers als Sperren oder Schwellen bezeichnet.

In der vorliegenden Mitteilung widmet sich Peter Krebs, Dipl.Ing.ETH, dem hydraulischen und geschiebetechnischen Verhalten eines Schwellentyps, der kürzlich vom Amt für Gewässerschutz und Wasserbau des Kantons Zürich für die Töss entwickelt worden ist, sich aber ohne weiteres auch in andern vergleichbaren Flüssen einbauen lässt. Das Besondere dieser naturnahen Konstruktion in Holzbauweise besteht darin, dass sie neben einem wirksamen Erosionsschutz einen beschatteten und von Fischreihern nicht erreichbaren Fischunterstand gewährleistet.

Wir beglückwünschen das Amt für Gewässerschutz und Wasserbau zu dieser bemerkenswerten Entwicklung und danken ihm und seinen Vertretern, Christian Göldi und Franz Bieler, für die fruchtbare Zusammenarbeit. Dabei ist hervorzuheben, dass das Amt nicht nur unsere entsprechenden hydraulischen Modellversuche eng mitverfolgte, sondern auch die dazu notwendigen massstabsgerechten Modelle des Schwellentyps kunstgerecht anfertigte.

Prof. Dr. D. Vischer

INHALT

Zusammenfassung	7
Abstract	8
Résumé	9
1. EINLEITUNG	11
1.1 Ausgangslage	11
1.2 Die neue Schwelle	12
1.2.1 Konzept	12
1.2.2 Bauvorgang	13
1.2.3 Problematik	17
2. MODELL	17
2.1 Modellanordnung	17
2.2 Holzschwellen	19
2.3 Modellbetrieb	20
3. GESCHIEBE	22
3.1 Geschiebeanalyse	22
3.2 Geschiebetransport	25
4. MODELLVERSUCHE FUER DIE TOESS	27
4.1 Vorgehen	27
4.2 Vorgänge bei Hochwasser	28
4.3 Beschreibung typischer Zustände und Uebergänge	35
4.3.1 Strömungs- und Sohlenbilder	35
4.3.2 Einkiesen	37
4.3.3 Oeffnen des Fischaumes	39
4.4 Einflüsse auf das Umschlagen	40
4.4.1 Schwellenhöhe	40
4.4.2 Gefälle	40
4.4.3 Geschiebetrieb	44
4.5 Fischaum	46
4.5.1 Offenhalten	46
4.5.2 Verlängerung	47
4.5.3 Dünenlage	48
4.6 Kolk	50

5.	VERALLGEMEINERUNG	52
5.1	Gültigkeit	52
5.2	Umschlagen	53
5.3	Energiebetrachtung	56
5.4	Kolk	57
	5.4.1 Kolktiefe	57
	5.4.2 Kolklänge	63
5.5	Sicherheit der Konstruktion	65
6.	SCHLUSSFOLGERUNG	70
	Dank	73
	Symbole	74
	Literatur	76
	Anhang: Berechnungsbeispiele	79
	A1 Abtrennung und Oeffnung des Fischraumes	79
	A2 Kolkberechnungen	83

Zusammenfassung

Es wird eine neuartige, vom Amt für Gewässerschutz und Wasserbau des Kantons Zürich (AGW) entwickelte Holzschwellen-Konstruktion vorgestellt. Ihr eigentlicher Ueberfall besteht aus einer leicht gegen die Fließrichtung geneigten Rampe, die Fischen einen beschatteten und vor Fischreihern geschützten Raum bietet. In der Töss wurden bereits einige dieser Schwellen eingebaut und ihre Vorzüge nachgewiesen. In der vorliegenden Mitteilung werden hydraulische Modellversuche beschrieben, die verbleibende Zweifel über die Auswirkungen eines Hochwassers ausräumen sollten.

Die Fotoserie eines Modellversuches dokumentiert stellvertretend die Vorgänge im Verlauf einer Hochwasserwelle. Der Fischraum wird bei einem bestimmten Abfluss durch lokal rückwärts verfrachtetes Sohlenmaterial vom Flusswasser getrennt, bleibt selbst aber während des ganzen Hochwassers geschiefbefrei. Bei rückläufigem Abfluss nach der Hochwasserspitze wird der Fischraum ohne Eingriff geöffnet und damit der Ausgangspunkt wieder hergestellt.

Anhand von über die spezifischen Töss-Versuche hinausreichenden Untersuchungen werden allgemeine Dimensionierungsvorschläge gemacht. Für bestehende Schwellen mit bekannten Randbedingungen können damit die Abflüsse vorausgesagt werden, die zur Abtrennung resp. zur Oeffnung des Fischraumes führen. Umgekehrt lassen sich bei der Projektierung - ausgehend von einem gewünschten Einkiesungsabfluss - Schwellenhöhe und -abstand festlegen.

Ebenfalls im Hinblick auf die praktische Anwendung werden einfache Berechnungsverfahren zur Beschreibung des auftretenden Kolktes vorgestellt. Formeln für die Bestimmung von Kolkentiefe und -länge sowie Abstand des tiefsten Punktes vom Ueberfall bilden die Grundlage für eine zweckmässige Dimensionierung von Böschungs- und Schwellensicherung. Schliesslich werden am Beispiel der Töss die wichtigen Berechnungsgänge veranschaulicht.

Abstract

A new wooden sill is introduced, which was developed by the Departement of Water Pollution Control and Hydraulic Engineering of the Canton of Zurich (AGW). To provide shade and protection against the grey heron for the fishes, the overflow itself is formed by a ramp. Some of those wooden steps were already installed in the river Toess and proved to satisfy the above mentioned aims at low water conditions. However, an uncertainty about the processes during high water still remained.

Hydraulic model tests are described, which answer these questions. With a series of photographs the changes of flow and scour during a flood is documented. At a certain flow rate the fish space is separated from the river by backward transported bed material, but is never affected by strong turbulence. After the flood the fish space is opened just by the flow pattern itself at a certain discharge.

With other bed material than that of the Toess river, the results of the model tests were generalised. The flow rates which cause the changes of bedform can be calculated at known boundary conditions. On the other hand, planning a wooden sill is based on a desired flow rate to separate the fish space and the river for calculating the necessary step height.

Knowing the scour form is the other necessary condition to plan a wooden step. This is needed to design the protection of the bank and of the sill itself. Some formulae are introduced to calculate the scour depth as well as its length and the distance of the deepest point to the overflow. Finally, a short example is given on how to calculate the important parameters.

Résumé

Un nouveau type de seuil construit à l'aide de rondins a été développé par l'Office de la protection et du service des eaux (AGW) du Canton de Zurich. Ses caractéristiques sont présentées ici. Son déversoir consiste en une rampe placée en porte-à-faux et légèrement inclinée vers le haut en direction de l'écoulement. Celle-ci délimite une cavité offrant aux poissons une zone de refuge et une protection contre l'action des hérons. Plusieurs de ces seuils, déjà aménagés dans la Töss, ont prouvé la qualité de leur fonctionnement. Cette communication décrit les essais hydrauliques réalisés sur modèle dans le but de lever toute incertitude quant au comportement de l'ouvrage lors d'une crue.

La série de photographies prises pendant le déroulement d'un essai montre les effets successifs de la crue. A un débit déterminé, la zone de refuge des poissons se voit coupée du cours d'eau proprement dit par du matériau déposé localement à l'amont de la lame déversante. La zone arrière du refuge reste libre de sédiments pendant le passage de la crue. La diminution du débit qui suit l'apparition de la pointe de crue ouvre à nouveau cette zone sans intervention extérieure et la situation de départ se trouve alors rétablie.

Sur la base d'une étude plus générale partant des essais spécifiques réalisés dans le cas de la Töss, des critères de dimensionnement sont proposés. Pour les seuils existants dont les caractéristiques sont connues, il est ainsi possible de déterminer la valeur du débit pour lequel la zone de refuge des poissons va être séparée et respectivement réouverte. Inversement, lors de l'établissement du projet, la hauteur et l'espacement des seuils peuvent être fixés à partir du choix de ce débit.

En vue d'une application pratique, des procédés simples de calcul décrivant l'affouillement à attendre sont présentés. Des formules permettant de déterminer la profondeur et la longueur de cet affouillement ainsi que la distance du point inférieur de la fosse par rapport au déversoir constituent la base nécessaire à l'estimation correcte de la stabilité du seuil et des berges adjacentes. Finalement, les pas successifs importants du calcul sont montrés sur l'exemple de la Töss.

1. EINLEITUNG

1.1 Ausgangslage

Schwellen erfüllen in Mittellandflüssen der Schweiz seit geraumer Zeit ihre wichtige Funktion der Sohlenstabilisierung. Die Töss bietet ein lehrreiches Beispiel mit Schwellen und Rampen verschiedenster Bauweisen und Höhendifferenzen. Ohne auf die einzelnen Typen einzugehen, wird hier der allen gemeinsame Nachteil aus fischereilicher Hinsicht erwähnt, dass die in den letzten Jahren wiederangesiedelten Fischreier an den herkömmlichen Schwellen allzu leichte Beute machen können. Dies war für das Amt für Gewässerschutz und Wasserbau des Kantons Zürich (AGW) der Ausgangspunkt zur Entwicklung eines neuen Schwellentyps, dessen Auswirkungen auf Strömung und Sohlenverlauf an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich im hydraulischen Modellversuch analysiert wurden.

Im Tössabschnitt zwischen Weisslinger- und Kyburgerbrücke wurden bereits einige dieser Schwellen mit einer typischen Höhendifferenz von 0.38 m und einer Distanz von ca. 80 m versetzt. Das Zusammenspiel dieser Masse ergibt sich aus dem ursprünglichen Längsgefälle. Ebenso wurde über die Anwendung von im Längsschnitt ähnlichen Konstruktionen in weit kleineren Gerinnen bereits berichtet (Göldi und Niederer, 1990). Dort sind jedoch die Fragen nach den Geschiebeumlagerungen und den Kolkgrößen nicht mit den in dieser Mitteilung beschriebenen Problemstellungen vergleichbar.

1.2 Die neue Schwelle

1.2.1 Konzept

Das AGW möchte mit der Holzschwellen-Konstruktion (Bild 1) den Fischen einen Unterstand bieten. Die Idee besteht darin, unter der vorstehenden, freitragenden Rampe einen beschatteten und vor Fischreihern geschützten Raum zu erhalten. Im weiteren hat man sich von der Schwelle auch einen Hochwasserschutz für Fische erhofft.

Die leichte Neigung der Rampe gegen die Strömung führt dazu, dass im Fluss höchstens die Rampenhölzer sichtbar sind (Bild 2). In Fliessrichtung gesehen ist vor der Rampe eine Gewebematte angebracht, die Sickerströmungen und damit verbundene Destabilisierungen der Schwelle verhindert.

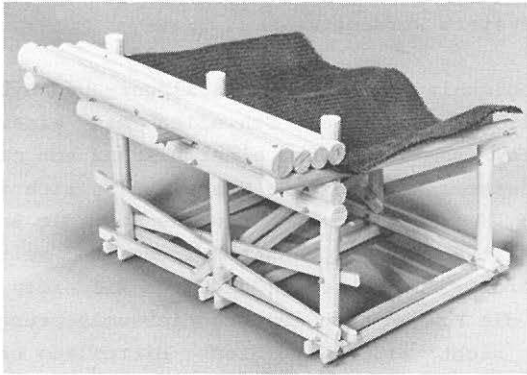


Bild 1 Vom AGW hergestellte Modellkonstruktion der Holzschwelle. Die unteren, an den senkrechten Pfählen angebrachten Verstreben dienen nur zur Stabilisierung des Modells, sie werden in Natur nicht montiert. 33/26/18



Bild 2

35/81/22

Nach Abschluss der Bautätigkeit sind von der Schwelle im Fluss nur noch die Rampenhölzer zu sehen.

1.2.2 Bauvorgang

Die Konstruktion in Natur ist nicht so aufwendig wie diejenige des in Bild 1 gezeigten Modells. Insbesondere fehlen die diversen Verstrebungen am unteren Ende der senkrechten Pfähle.

Die Elemente der Konstruktion und der Bauablauf sollen anhand der in Bild 3 gezeigten Prinzipskizze erläutert werden. Die Vorbereitung besteht im Ausheben einer nicht allzu tiefen Baugrube. Darin werden die senkrechten, ca. 4 bis 5 m langen Pfähle (1) soweit in die Flusssohle gerammt, dass sie die für die weitere Konstruktion notwendige lichte Höhe aufweisen. Es folgt als nächster Schritt die Befestigung der beiden horizontalen, ca. 30 cm starken Rundhölzer (2), die eine Art Schürze zur Begrenzung des Fischraumes bilden. Anschliessend werden die Längs-Stämme (3), die eigentlichen Träger der Rampe, in

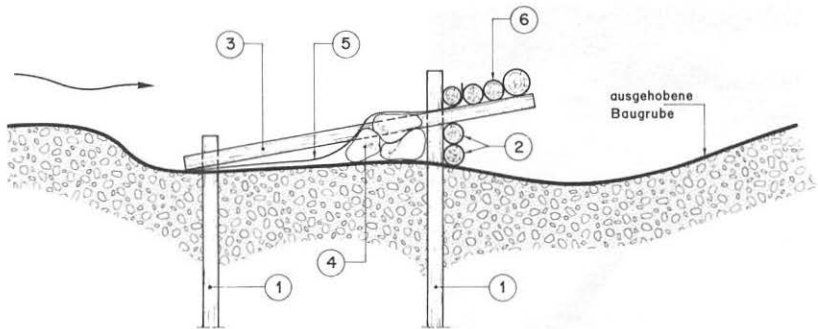
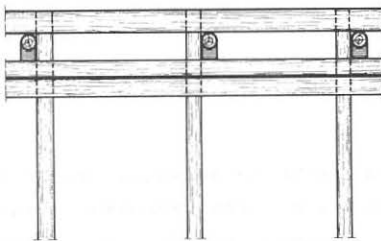


Bild 3



Skizze zum Bauvorgang. Die bezifferten Elemente werden in der angegebenen Reihenfolge eingebaut: (1) senkrechte, gerammte Pfähle, (2) Schürzenhölzer, (3) Längshölzer, (4) ca. 1 t schwere Steinblöcke mit dazwischen entstehenden Spalten für Kleinfische, (5) Geotextil als Filtermatte über den Steinblöcken, (6) Rampenhölzer.

Die untere Skizze verdeutlicht, dass die Schwelle von vorne gesehen keine geschlossene Konstruktion darstellt. Da die Längshölzer (3) in einem Abstand von mindestens 2m angebracht sind, entsteht in ihrem Zwischenraum jeweils ein Durchschlupf zu den Steinblöcken.

Fliessrichtung ansteigend montiert. Das tieferliegende Ende kann dabei auf die "Baugrubensohle" gelegt werden, das höherliegende auf die zuvor angebrachte Schürze (2). Der an die Schürze anschliessende Raum wird nun mit Steinblöcken, deren Gewicht durchschnittlich ca. 1 t beträgt, hinterfüllt (4). Die zwischen den Blöcken entstehenden Spalten werden nicht mit

Feinmaterial verfüllt; sie sollen einen gewissen Freiraum bieten für kleinere, aus dem Kolkraum verdrängte Fische. Von diesen Blöcken werden je Schwelle bei einer Flussbreite von gut 20 m gesamthaft ca. 80 Stück zweilagig verlegt. Darüber hinweg wird eine Filtermatte (5) gezogen, deren Zweck einerseits in der Verhinderung von Sickerströmungen und andererseits im Freihalten der Hohlräume zwischen den darunterliegenden Blöcken besteht. Die Matte wird bei den vorderen Pfählen durch ein Brett hochgehalten und zwischen den beiden nächstgelegenen Rampenhölzern verankert.

Schliesslich werden die Stämme, die zusammen die Rampe bilden, an den Längshölzern befestigt (6). Dieses wichtigste Element kam bei den bis anhin gebauten Schwellen in verschiedenen Varianten zur Ausführung; Vorbaulänge und Durchmesser der Rampebildenden Querstämme wurden variiert. Bei den jüngsten Schwellen wurde eine Konstruktion mit drei Stämmen gewählt: Die Durchmesser der Rundhölzer nahmen von den Pfählen gegen das eigentliche Schwellenholz hin zu, der erste, bei den senkrechten Pfählen angebrachte Stamm mass 30 cm im Durchmesser, der mittlere 40 cm und der äusserste 60 cm.



Bild 4

35/81/14

Im Unterwasser ist wegen dem zu erwartenden Kolk eine Sicherung der Böschung nötig.

Nach dem Anbringen einer Böschungssicherung im Unterwasser der Schwelle (Bild 4) wird die inzwischen fertiggestellte Konstruktion mit Lockermaterial oder durch Geschiebetrieb beim nächsten Hochwasser zugeschüttet. Im Normalfall bleiben danach im Fluss höchstens noch die Rampenhölzer sichtbar (Bild 2).

Der Bau erfolgt in zwei Etappen; der Abfluss der Töss wird jeweils auf die andere Flusshälfte eingeschnürt. Bild 5 gibt einen Ueberblick über die Baustelle. Im Hintergrund ist die umgeleitete Töss zu erkennen, die über die bereits fertiggestellte Hälfte der Schwelle hinwegfliesst. Im Vordergrund sieht man die praktisch beendete Konstruktion der zweiten Schwellenhälfte, es sind lediglich noch Arbeiten an der Böschung ausstehend.



Bild 5

35/81/10

Baustelle kurz vor Abschluss der Konstruktion: im Hintergrund der eingeengte Teil der Töss, vorne die Schwellenrampe.

1.2.3 Problematik

Im Betrieb haben sich bei Hochwasser gewisse Probleme ergeben. Es wurde vermutet, dass die Schwelle bei grossen Abflüssen im Unterwasser eingekiest wird und somit die Tauglichkeit des Bauwerkes als Fischschutz bei Hochwasser nicht gewährleistet werden kann. Da eine Ueberprüfung dieses Sachverhaltes in Natur aus verständlichen Gründen unmöglich ist, wurden die Vorgänge um die Schwelle bei Hochwasser in einem Modell an der VAW nachvollzogen. Das AGW wollte sich damit vor der weiteren Anwendung Gewissheit verschaffen über die Bedingungen, die zu einer Einkiesung der Schwelle führen und darüber, was in der Folge beim Abklingen des Hochwassers geschieht.

2. MODELL

2.1 Modellanordnung

Die Modellversuche im Massstab 1:20 wurden in einer 30 cm breiten Versuchsrinne durchgeführt. Von der Töss wurde demnach ein Längsstreifen aus der Flussmitte von 6 m Breite nachgebildet. Bild 6 gibt einen Ueberblick über die Modellanordnung. Die Rinne weist eine Länge von 6 m auf und ermöglicht somit den Einbau zweier aufeinanderfolgender Schwellen, deren Höhendifferenz im interessierenden Bereich variiert werden konnte. Da der Abfluss beim Ueberfallholz der Schwelle die kritische Tiefe durchläuft, bleibt die Strecke zwischen den beiden Fixpunkten durch die Abflussverhältnisse im Ein- und Auslaufbereich weitgehend unbeeinflusst. Die Untersuchungen konnten daher auf den Bereich des Unterwassers der Modellschwelle konzentriert werden.

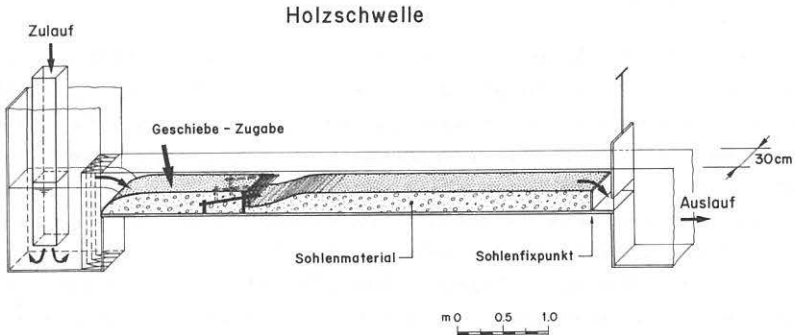


Bild 6 Modellanordnung im Massstab 1:20. Die Rinnenwände aus Glas ermöglichen die seitliche Beobachtung. Der Sohlenfixpunkt am Rinnenende wurde mit einem Ueberfall simuliert.

Der Zufluss wird mit einem Rechtecküberfall gemessen. Daran anschliessend sorgt eine Beruhigungseinrichtung für ausgeglichene Abflussbedingungen am Rinnenanfang, indem Turbulenzen und von der Einlaufkonstruktion herrührende ungleichmässige Geschwindigkeitsverteilungen abgebaut werden. Die Ausbildung des Abschnittes bis zur ersten Schwelle spielt im weiteren wie erwähnt keine wichtige Rolle: Für die Fliess- und Erosionszustände nach der Schwelle ist weitgehend der Abflusszustand beim Ueberfallholz massgebend, derjenige Abflussquerschnitt also, wo unabhängig von der oberwasserseitigen Strecke ein Fliesswechsel stattfindet.

Die als seitliche Rinnenwände verwendeten Glasscheiben erlauben eine ständige Beobachtung während des laufenden Versuches und eine fotografische Dokumentation jedes gewünschten Betriebszustandes. Ein an der Scheibe angebrachter Raster ermöglicht ferner die quantitative Auswertung der Fotos im Hinblick auf Kolkform und -tiefe.

Voraussetzungen für eine naturgetreue Simulation der Auskolkungs- und Einkiesungsvorgänge waren natürlich der Einbau

einer beweglichen Sohle und die Möglichkeit der Geschiebezugabe. Ueber den Geschiebetrieb und die Kornverteilung des Sohlenmaterials wird in Kapitel 3 ausführlich berichtet.

Die durchgeführten Modellversuche basieren auf dem verallgemeinerten Aehnlichkeitsgesetz nach Froude. Für dessen Gültigkeit werden sowohl in Natur als auch im Modell Abflusszustände vorausgesetzt, die einerseits im turbulenten Bereich liegende Reynoldszahlen und andererseits ein hydraulisch rauhes Gerinne aufweisen. Diese Voraussetzungen werden im Modell nur gerade bei kleinen Abflüssen nicht vollauf befriedigt. Die sich ergebenden Abweichungen im Abflussverhalten sind aber unbedeutend und treten nur bei Zuständen auf, die ja im Rahmen dieser Modellversuche ohnehin eine untergeordnete Rolle spielen.

In Zusammenhang mit der Frage nach der Sicherheit der Baukonstruktion sei noch erwähnt, dass nach dem angewandten Modellgesetz die statische Festigkeit der Bauteile nicht modellähnlich ist. Die Materialkennwerte liegen im Modell zu hoch, d.h. die Bauteile sind im Vergleich zur Natur zu stabil.

2.2 Holzschwellen

Die Modelle der Holzschwellen (Bild 1) wurden vom AGW hergestellt und der VAW für die Modellversuche zur Verfügung gestellt. Es wurden drei verschiedene Modell-Schwellen geliefert: eine Variante mit langer, aus 6 Rundhölzern gebildeter Rampe, sowie zwei Varianten mit unterschiedlich geneigten Rampen aus 4 Rundhölzern. Ansonsten waren die drei Konstruktionen identisch.

Die Konstruktion wurde in der Versuchsrinne von Lockermaterial umgeben und so plaziert, dass sie mit dem Rinnenboden nicht in Berührung kommt. Eine allfällige Unterspülung der Schwelle kann dadurch im Modell sichtbar gemacht werden.

Die prinzipiellen hydraulischen Abläufe wurden zu Beginn an der Konstruktion mit der längsten Rampe studiert. Um den Einfluss verschiedener Vorbaulängen auf die örtliche Sohlenformung abzuschätzen, kam in einer späteren Phase auch eine der kurzrampigen Versionen zum Einsatz. Der Einfluss des Rampenwinkels wurde schon bald als unwesentlich erkannt, so dass auf eine Untersuchung der dritten Schwellenvariante verzichtet werden konnte.

Zwecks besserer Einsicht in das Geschehen unmittelbar unter dem Vorbau, wurde das nahe der Beobachtungsscheibe liegende Längsholz bei den untersuchten Schwellen entfernt. Bei Hochwasser kann so der Einkiesungsvorgang besser verfolgt und die Situation zwischen den Steinblöcken besser eingeschätzt werden.

2.3 Modellbetrieb

In erster Linie wurde der unmittelbar an die erste Schwelle anschliessende Gerinneabschnitt beobachtet. Dort stellen sich in Funktion veränderter Randbedingungen (Abfluss Q , Niveaudifferenz zwischen zwei aufeinanderfolgenden Schwellen Δh , Geschiebetransport) wesentliche Unterschiede im Abflussverhalten und in der Sohlenform ein.

Eine Hochwasserwelle mit kontinuierlich änderndem Abfluss konnte in dieser Form nicht nachgebildet werden. Zu- und abnehmende Abflüsse wurden durch stufenweise Veränderung des Modellzuflusses simuliert (Bild 7). Die zeitliche Komponente konnte dabei weitgehend ausser acht gelassen werden. Es wurde auf jeder "Abfluss-Stufe" mindestens so lange gewartet, bis sich die Kolkform unterhalb der Schwelle in einem neuen, jeweils relativ schnell erreichten Gleichgewichtszustand befand. Werden die Differenzen zwischen aufeinanderfolgenden Abflussstufen nicht zu gross gewählt, können Modelleffekte aufgrund zu schneller Abflussänderungen weitgehend ausgeschlossen werden. Zudem sollte sich im Verlauf der Versuche zeigen, dass diese Methodik für das Verständnis der hydraulischen Vorgänge

und für die Beantwortung der gestellten Fragen keinen Nachteil darstellt.

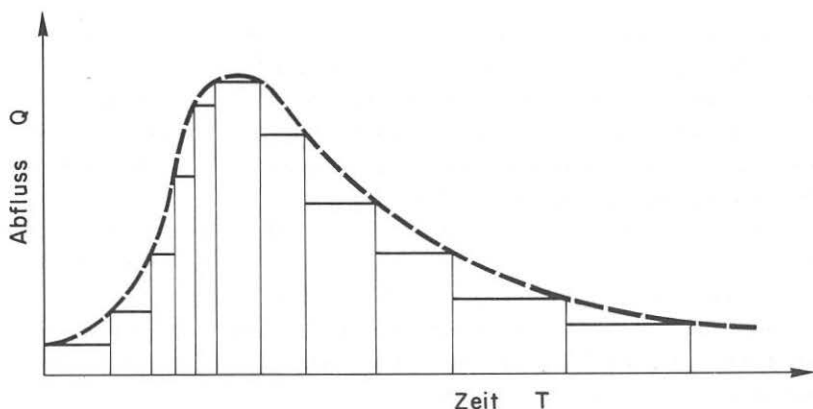


Bild 7 Hochwasserganglinie in Natur (gestrichelte Linie) und die stufenweise Nachbildung im Modell. Das Einhalten der zeitlichen Dimension ist von untergeordneter Bedeutung.

Der Einfluss anderer Parameter wurde abgeschätzt, indem vorerst Minimal- und Maximal-Varianten einander gegenübergestellt wurden. Dabei sollte sich herausstellen, ob die Untersuchung weiterer Betriebszustände überhaupt nötig sei. So wurden z.B. auf der einen Seite Versuche mit maximaler Geschiebezugabe (s. Kap. 3.1) durchgeführt, auf der anderen Seite bei sonst gleichen Bedingungen gänzlich auf die Geschiebezugabe verzichtet.

3. GESCHIEBE

3.1 Geschiebeanalyse

Der Geschiebetrieb kann auf die Funktion einer Schwelle und auf die Kolkbildung einen wichtigen Einfluss ausüben, der im Modell detailliert abgeklärt werden muss. Voraussetzung für die korrekte Modellierung beweglicher Sohlen ist die genaue Kenntnis ihrer Kornverteilung und eine massstäbliche Reduktion für die hydraulischen Versuche.

Um diesen Ansprüchen zu genügen, wurde mit Material des fraglichen Tössabschnittes eine Geschiebeanalyse durchgeführt. Es wurden vier sogenannte Volumenproben entnommen: bei km 2.890, bei km 3.800 im Anschluss an die erste Holzsperrre, bei km 4.135 (Steinschwelle) sowie aus einem Kieshaufen, dessen Material aus der Töss bei Bauma stammt. Zusätzlich wurden bei km 2.890 und 4.135 Linienproben im Feld durchgeführt, die in bezug auf die Grobanteile eine grössere Aussagekraft haben als Volumenproben. Die an der VAW durchgeführten Siebanalysen der zwischen 110 und 125 kg wiegenden Volumenproben geben über die feinen Anteile der Kornzusammensetzung Auskunft. Die Synthese der beiden Analyse-Formen erfolgte mit Hilfe des Auswerte-Verfahrens nach Fehr (1987).

Bild 8 zeigt die Siebkurven der Volumenproben. Probe Nr. 2 (km 3.800) schert als einzige aus: es fehlen im Vergleich zu den anderen Proben sowohl Fein- als auch Grobanteile. Aufgrund der Tatsache, dass sie einem an den Sperrenkolk anschliessenden Wall entnommen wurde, lässt sich ihre Abweichung erklären. Mit der im Kolkloch verwirbelten Energie wird Material ausgespült und unmittelbar flussabwärts infolge der hier geringeren Geschiebetransportkapazität abgelagert. Die Turbulenzen im Kolk selbst reichen aber nicht aus, um schwereres Geschiebe über die Gegensteigung hinweg zu transportieren, während Feinstanteile - einmal aufgewirbelt - über den Ablagerungsort des mittleren Geschiebes hinaus befördert werden. Im Unterwas-

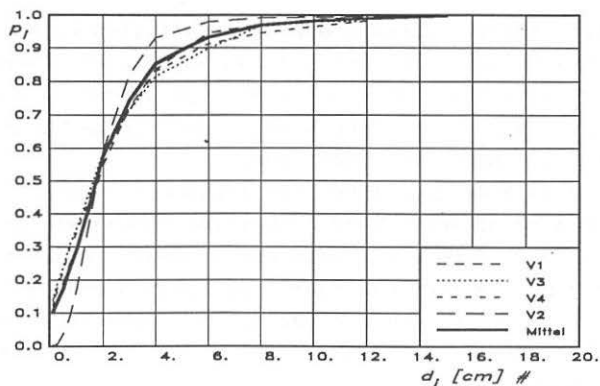


Bild 8 Siebkurven der 4 Volumenproben. Die Probe V2 wurde dem Wall nach dem Kolk im Unterwasser einer Schwelle entnommen; sie weicht als einzige etwas stärker vom Mittel ab.
Entnahmeorte: V1 km 2.890, V2 km 3.800, V3 km 4.135, V4 aus Kieshaufen (Bauma)

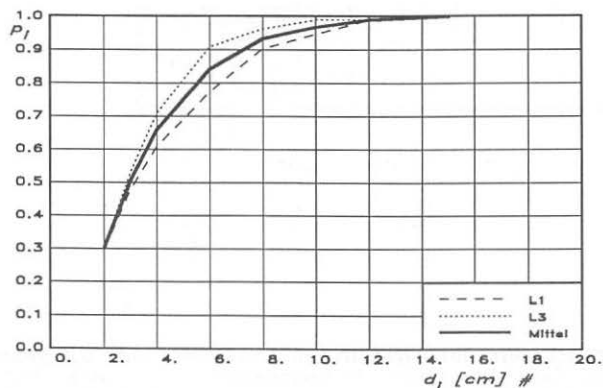


Bild 9 Darstellung der beiden Linienzahlanalysen und deren Mittelwert. Entnahmeorte: L1 km 2.890, L3 km 4.135

ser der Schwelle findet demnach ein recht effizienter Entmischungprozess statt, der sich auch im Modellversuch nachvollziehen liess. In die weiteren Betrachtungen wurden in der Folge nur die eine sehr gute Uebereinstimmung aufweisenden Volumenproben Nr. 1, 3 und 5 miteinbezogen.

Die beiden in Bild 9 dargestellten Linienproben zeigten - wenn auch nicht eine so weitgehende Uebereinstimmung wie die Volumenproben - so doch eine akzeptable Aehnlichkeit. Das Mittel der Linienproben wurde nun zuerst in eine Volumenprobe umgerechnet, um dann mit der gemittelten Volumenprobe nach dem Kriterium gleicher Steigungen der Kurven (s. Fehr, 1987) zusammgelegt zu werden (Bild 10).

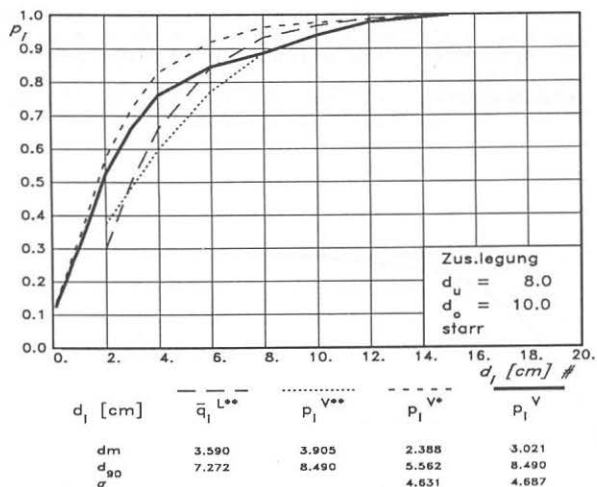


Bild 10 Synthese der durchgeführten Analysen. Das Diagramm zeigt das Mittel der Volumenproben ----, das Mittel der Linienproben-----, dessen Umrechnung in eine Volumenprobe und die Zusammenlegung ———.

Gemäss der aus diesem Verfahren resultierenden Kornverteilung wurde die Modell-Geschiebemischung massstäblich herge-

Durchmessern kleiner als 0.25 mm (Modellgrössen) wegen ihres nicht mehr massstabsgetreuen Verhaltens verzichtet: sie gehen in Schwebelage, tonige Bestandteile gar in Suspension. Dies ist eine Folge ihrer im Verhältnis zur Schwerkraft zu grossen Oberflächenkräfte, die mit den Bedingungen für die Gültigkeit des Modellgesetzes nach Froude nicht vereinbar sind.

Mit dieser sorgfältigen Modellierung des Sohlenmaterials wurde die Voraussetzung zur Abklärung des Einflusses bewegten Sohlenmaterials auf die Funktion der Schwelle geschaffen.

3.2 Geschiebetransport

Soll vom Geschiebetrieb her ein dynamisches Gleichgewicht erzielt werden, muss die aus dem Untersuchungsbereich ausgebrachte Fracht beim Einlauf in Funktion des Abflusses Q zudosiert werden. Im Fall der Holzschwellen-Untersuchung geht es aber weniger um langfristige Erosions- und Auflandungsprozesse, als vielmehr darum, den grundsätzlichen Einfluss von transportiertem Sohlenmaterial auf die lokalen Vorgänge unterhalb der Schwelle zu studieren.

Nachdem die Abflussfunktion nach Strickler (1923) mit dem Rauigkeitskoeffizienten $k = 21/d_0^{1/6}$ bestimmt wurde, konnten die Geschiebetransport-Funktionen nach Meyer-Peter und Müller (1949) für Gefälle J von 1 bis 3 ‰ abgeschätzt werden. Die so errechneten Geschiebetransport-Kapazitäten liegen im Vergleich zu anderen Formeln eher hoch, eignen sich aber zur Einsetzung als obere Grenzwerte.

Der Transport-Beginn für das vom AGW als obere Grenze vorausgesagte Gefälle von 3 ‰ kann damit bei einem spezifischen Abfluss q_0 von 1.3 m³/sm veranschlagt werden. Dieser Abfluss wird in der Töss durchschnittlich an 15 Tagen im Jahr erreicht oder überschritten. Bild 11 gibt einen Ueberblick über die möglichen Geschiebefrachten in Funktion des spezifischen Abflusses q und verdeutlicht den grossen Einfluss der Längsneigung auf die Transportkapazitäten.

möglichen Geschiebefrachten in Funktion des spezifischen Abflusses q und verdeutlicht den grossen Einfluss der Längsneigung auf die Transportkapazitäten.

Nach dem Eichen der Dosiermaschine konnte durch das Variieren der Geschiebezugabe als Funktion von q eine Hochwasser-ganglinie auch vom Feststofftransport her stufenweise nachvollzogen werden.

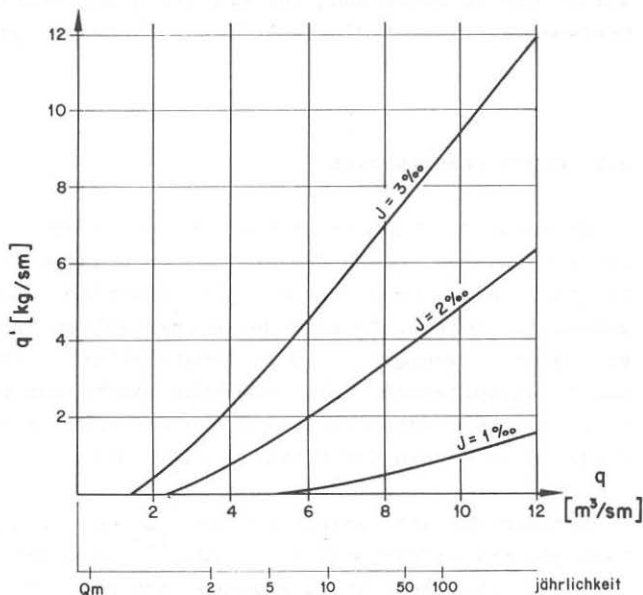


Bild 11 Spezifische Geschiebetransport-Kapazität q' in Funktion des spezifischen Abflusses q für die Töss im Bereich zwischen Neftenbach und "Hornsäge". Die Abhängigkeit vom Gefälle ist recht stark.

4. MODELLVERSUCHE FUER DIE TOESS

4.1 Vorgehen

Die zentrale Fragestellung betraf den Einkiesungsvorgang des Fischraumes unter der Schwellenrampe. Die Modellversuche sollten zeigen, ob dieser Fischschutz während eines Hochwassers vollumfänglich eingekiest wird und inwieweit die einzelnen Randbedingungen dafür verantwortlich sind.

Die hydraulischen Vorgänge bei der Schwelle wurden für jede Variante anhand zweier aufeinanderfolgender, stufenweise nachvollzogener Hochwasserwellen studiert (s. auch Kap. 2.4). Vor dem ersten Hochwasser wurde die Sohle jeweils planiert und durch einen länger andauernden Abfluss, der Feinmaterial der Oberfläche auswäscht, eine Deckschicht gebildet. Zwischen dem ersten und dem zweiten Hochwasser wurde hingegen auf jeden künstlichen Eingriff an der Sohle verzichtet.

Die Einfluss-Abschätzung erfolgte aufgrund der Gegenüberstellung zweier deutlich voneinander abweichender Varianten. Als wichtigste Kriterien dienten dabei - neben der aufmerksamen Beobachtung - die Abflüsse Q_1 und Q_2 , die das Einkiesen resp. das Wiederöffnen des Fischraumes auslösen. Variiert wurden im wesentlichen die Höhendifferenz Δh zwischen den beiden sich in der Modellrinne befindlichen Sohlenfixpunkten, die Geschiebe-Beschickung q_s , die Länge der Rampe sowie der Betrag der Hochwasserspitze Q_m . Auf eine Ueberprüfung sämtlicher Kombinationsmöglichkeiten wurde aber verzichtet. Nachdem eine der beiden gegenübergestellten Alternativen als vernünftiger erkannt worden war, wurde im Rahmen der weiteren Untersuchungen nur noch diese eine Variante berücksichtigt.

Die Situation rund um die Schwelle wurde im Verlauf einer Hochwasserwelle laufend fotografisch festgehalten. In bezug auf die Kolkformen konnten quantitative Vergleiche zwischen verschiedenen Varianten anhand des an der seitlichen Rinnen-

scheibe befestigten Rasters (auf den Fotos in Kap. 4.2 sichtbar) gemacht werden. Die Seitenlänge eines solchen quadratischen Rasterfeldes beträgt in Naturmass 0.5 m.

Der dem abgebildeten Zustand entsprechende Abfluss wird jeweils auf der kleinen schwarzen Informationstafel in der unteren rechten Ecke des Fotos in m^3/sm angegeben, d.h. es handelt sich um den spezifischen Abfluss q pro Meter Flussbreite in Naturgrösse. Die im Modell eingestellten Abflussstufen waren - in jener Einheit ausgedrückt - die folgenden: 0.3, 0.6, 0.9, 1.2, 1.5, 2.0, 3.0, 4.0, 6.0 und 8.0 m^3/sm bis zur Abflussspitze, anschliessend wurde dieselbe Abstufung zur Simulation des abklingenden Hochwassers zurückgefahren.

Um diese spezifischen Abflusswerte in ihrer Grösse einschätzen zu können, wird ihr Bezug zur Jährlichkeit aufgezeigt. Die folgende Tabelle in Bild 12 gibt einen Ueberblick. Es versteht sich von selbst, dass diese Angaben mit einer gewissen Unsicherheit behaftet sind; keine der beiden Messstationen befindet sich im zu untersuchenden Gebiet selbst. Die eine liegt oberhalb, die andere unterhalb des Tössabschnittes mit den Holzschwellen. In Anbetracht der ohnehin vorhandenen Unsicherheiten wurden zur Herstellung der Beziehungen zwischen spezifischem Abfluss und Jährlichkeit die Flussbreiten zu jeweils konstanten 18 resp. 23 m angenommen. Das nicht sehr genaue Verfahren ist vertretbar, da die Angabe der Jährlichkeit wie gesagt bloss als Hilfe zur Einschätzung der Abflüsse aufzufassen ist.

4.2 Vorgänge bei Hochwasser

Anhand der Fotos in den Bildern 13 bis 22 werden in diesem Kapitel die verschiedenen Phasen während eines Hochwassers beschrieben. Es werden nur Vorgänge besprochen, die für die Funktionsweise der Schwelle von Bedeutung sind. Die gezeigten Fotos wurden alle bei einer Niveaudifferenz von $\Delta h = 0.5 \text{ m}$

zwischen den beiden in der Rinne nachgebildeten Sohlenfixpunkten aufgenommen.

Abflussmessstation

Jährlichkeit [Jahre]	Töss Hornsäge		Töss Neftenbach	
	Q [m ³ /s]	q [m ³ /sm]	Q [m ³ /s]	q [m ³ /sm]
100	173	9.5	265	11.5
50	155	8.5	240	10.5
10	120	6.5	180	7.8
5	90	5.0	150	6.5
2	62	3.5	105	4.6
1	20	1.1	45	2.0
während x Tagen/Jahr				
9			29.9	1.3
18			23.1	1.0
Q _{mittel}			7.8	0.33

Bild 12 Zusammenhang zwischen spezifischem Abfluss und Wiederkehrhäufigkeit. Die Angaben der Jährlichkeiten wurden dem ASF Hochwasserordner (1974) entnommen, die übrigen dem hydrografischen Jahrbuch (1982).

Als Ausgangszustand für ein Hochwasserereignis weist die Sohle eine normale Kolkform auf, die bis unter die Rampe zurückreicht und damit einen Fischraum bildet. Dies entspricht einem typischen Zustand, wie er nach einem Hochwasser zu erwarten ist. Bild 13 zeigt einen Abflusszustand in der Grössenordnung des Mittelwassers. Abfluss und Wasserspiegel sind sehr ruhig und gleichmässig. Es kann ein abtauchender Ueberfallstrahl beobachtet werden, der für die Aufwirbelung feinsten Materials sorgt.

Bei leicht ansteigendem Abfluss lassen sich kaum bedeutende Abweichungen vom vorherigen Zustand beobachten. Bild 14 belegt, dass der kleine Wall im Anschluss an den Kolk abgetragen

wurde. Als Folge davon hat sich der Kolk als ganzes etwas verflacht und der tiefste Punkt infolge des weniger steilen Eintauchwinkels flussabwärts verschoben. Die Situation unter der Rampe bleibt jedoch die gleiche.

Der Abfluss kann ohne Veränderung des prinzipiellen Zustandes weiter gesteigert werden, bis bei ca. $2 \text{ m}^3/\text{sm}$ ein grundsätzlich anderes Abflussverhalten in Erscheinung tritt. Es findet ein Uebergang vom abtauchenden Strahl zu einem gewellten Abfluss an der Wasseroberfläche statt, der eine Walze mit sohlennaher Rückströmung auslöst (Bild 15). Damit verbunden ist der Transport von vorerst nur feinen Korngrößen gegen die Schwelle zurück. Steht genügend transportierbares Material zur Verfügung, so kann die Schwelle bei diesem Zustand bereits eingekiest resp. eingesandet werden.

Ist dies infolge schnellen Ansteigens des Abflusses oder Feinmaterialknappheit bei jenem Abflusszustand noch nicht der Fall, so wird der Vorgang bei weiter steigendem q wegen der nun stärker ausgeprägten Walze beschleunigt. Wie Bild 16 zeigt, wird im übrigen der Kolk in die Länge gezogen und der tiefste Punkt entsprechend weiter von der Schwelle weg verlagert. Die Einkiesung der Schwelle wird keinesfalls rückgängig gemacht, sie wird eher noch ausgeprägter.

Bei sehr grossem Abfluss - Bild 17 zeigt den maximalen im Modell simulierten spezifischen Abfluss von $8 \text{ m}^3/\text{sm}$ (20- bis 40-jährliches Hochwasser) - ist die Strömung bei hohem Geschiebetrieb über die gesamte Wassertiefe gleichgerichtet. Die Kolksohle wird dadurch angehoben. Diese Tendenz wird verstärkt durch die Tatsache, dass die Schwelle bei solch grossem Abfluss mehr als Sohlenunebenheit denn als "Ueberfall" wirkt und damit relativ zur Wasserhöhe an Bedeutung verliert. Entsprechend wird der Kolk bei einem derartigen Zustand nicht - wie befürchtet werden könnte - am tiefsten, sondern eher flacher und länglicher.

Bei wieder kleiner werdendem Abfluss bildet sich der Kolk allmählich erneut tiefer und kürzer aus (s. Bild 18). Ueber weite Bereiche verändern sich Abflussbild und Sohlenform stetig. Auch durch den spezifischen Abfluss von $2 \text{ m}^3/\text{sm}$, der beim

ansteigenden Hochwasser zur Einkiesung der Schwelle führte, wird keine Veränderung ausgelöst (Bild 19).

Erst Bild 20, aufgenommen bei $q = 1.2 \text{ m}^3/\text{sm}$, zeigt dann wieder den Abflusszustand, der schon zu Beginn des Versuches bei noch kleinen Abflüssen beobachtet wurde: der Ueberfallstrahl taucht nach der Schwelle! Der Eintauchwinkel ist allerdings derart flach, dass die dadurch gebildete Böschungsneigung noch stabil ist. Der eintauchende Strahl bringt den tiefsten Kolkpunkt wieder nahe zur Schwelle und bewirkt im Bereich des Angriffspunktes ein Aufwirbeln feinen Materials. Dieses aufgewirbelte Material kann an dem Punkt, wo die Geschiebetransportkapazität für seinen Weitertransport nicht mehr ausreicht, zu einer Wall-Bildung führen. Die Bedingungen für den Ablagerungsort sind einerseits durch das Abklingen der Turbulenz nach der Aufwirbelungszone und andererseits durch eine gegenüber dem Normalprofil immer noch erhöhte Abflusstiefe gegeben.

Wird nun, wie auf Bild 21 bei $q = 0.9 \text{ m}^3/\text{sm}$ der Fall, der Eintauchwinkel steiler, so kann der Fischraum wieder geöffnet werden. Es wird vermehrt feines Material aufgewirbelt und wenig flussabwärts abgelagert. Die bei der weiteren Zurückstufung des Abflusses entstehenden, aus Bild 22 ersichtlichen "Mehrfachhügel" kommen aufgrund des nicht kontinuierlichen Zurückfahrens des Abflusses zustande; sie stellen also einen Modelleffekt dar. Realistisch wäre das Entstehen eines einzigen Hügels, der etwa als "best fitting curve" der auf Hügel und in Tälern liegenden Punkte anzunähern wäre (Bild 23).

Nach Abklingen des Hochwassers beim Mittelwasser von $0.3 \text{ m}^3/\text{sm}$ angelangt (Bild 22), zeigt sich wieder eine bis zur Schürze zurückreichende und dem Anfangszustand ähnliche Kolkform. Der Fischraum wird also ohne künstliche Hilfe wieder geöffnet. Die Ausgangsbedingungen für das nächstfolgende Hochwasser sind damit dieselben wie vor der ersten Hochwasserwelle. Bild 24 zeigt schliesslich den vom Fluss selbst wieder hergestellten Kolk von der Unterwasserseite her aus "Fischperspektive".

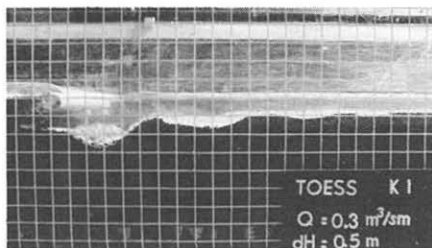


Bild 13

35/62/0A

Der Abfluss entspricht ungefähr dem Mittelwasser. Der Strahl aus dem Oberwasser taucht ab, der Fischraum ist geöffnet. Die Maschenweite des Rasters beträgt in Naturgrößen 0.5 m.

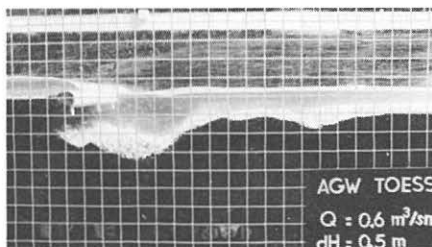


Bild 14

34/79/24

2-faches Mittelwasser. Im Vergleich zum Mittelwasser sind keine bedeutenden Abweichungen zu beobachten. Der Kolk verschiebt sich leicht flussabwärts.

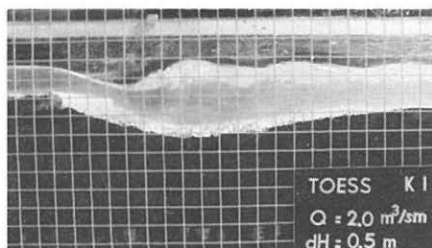


Bild 15

35/62/3A

Ca. 1-jährliches Hochwasser. Durch den jetzt wellenförmigen, oberflächennahen Abfluss wird eine Walze verursacht, deren Rückströmung an der Sohle für das Zumachen des Fischraumes verantwortlich ist.

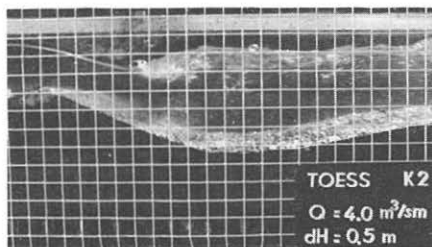


Bild 16

35/62/19A

Ca. 2-jährliches Hochwasser. Der Kolk wird in die Länge gezogen. Am eingekiesten Zustand der Schwelle ändert sich nichts.

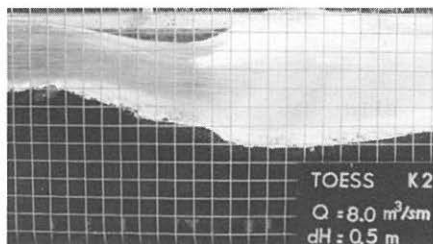


Bild 17 35/62/20A

20- bis 40-jährliches Hochwasser. Der Kolk wird flacher und länglicher. Weil an der Sohle keine Rückströmung mehr vorhanden ist, sind jetzt flussabwärts wandernde Dünen zu beobachten.

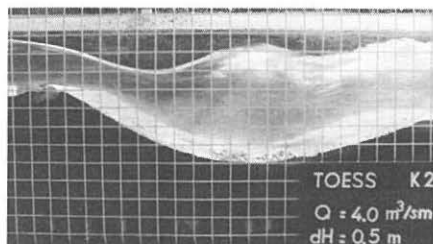


Bild 18 35/62/22A

Der Abfluss ist nach der Hochwasserspitze rückläufig. Der Kolk wird wieder bedeutend tiefer.

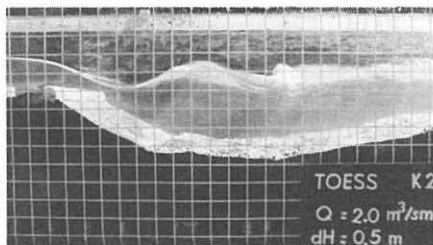


Bild 19 35/62/23A

Im Vergleich zu Bild 18 finden keine grossen Veränderungen statt. Das Umschlagen von Abfluss- und Sohlenzuständen geschieht also nicht bei demselben Abfluss wie beim Ansteigen des Hochwassers.

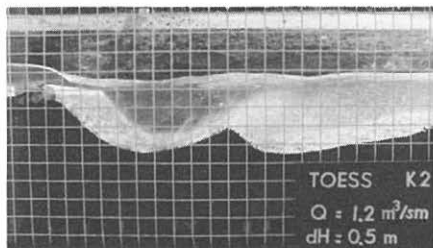


Bild 20 35/62/24A

Der Ueberfallstrahl taucht wieder ab. Der Eintauchwinkel ist allerdings noch nicht steil genug, um den Fischraum zu öffnen.

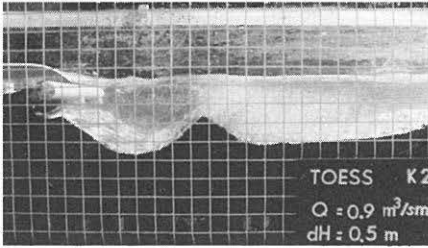


Bild 21

35/62/26A

Bei steilerem Eintauchwinkel werden die Längshölzer wieder sichtbar, der Fischraum wird geöffnet.

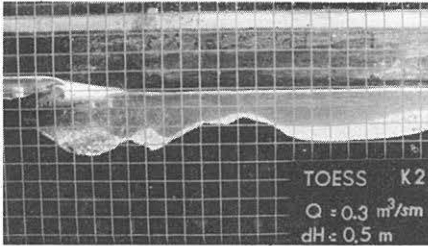
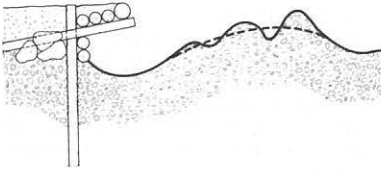


Bild 22

35/62/28A

Mittelwasser nach einem Hochwasser. Der Fischraum wurde ohne Eingriff von außen wieder vollumfänglich geöffnet.

Bild 23



Die Mehrfachhügel sind die Folge eines Modelleffektes, der aufgrund des stufenweisen Zurückfahrens mit dem Abfluss zustande kommt. Realistischer wäre eine zwischen den relativen Extrema gemittelte Form.

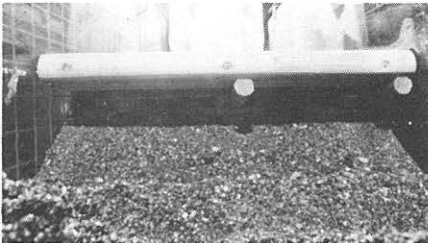


Bild 24

35/62/35A

Trockengelegter Kolk von der Unterwasserseite her.

4.3 Beschreibung typischer Zustände und Uebergänge

4.3.1 Strömungs- und Sohlenbilder

In Kapitel 4.2 wurden die beiden grundsätzlich unterschiedlichen Abflusszustände nach der Schwelle aufgezeigt: der eintauchende Ueberfallstrahl bei kleinem Q und der wellenförmige Oberflächenabfluss bei grossem Q . Der Uebergang vom einen zum andern Zustand erfolgt nicht stetig, es konnten keine Zwischenzustände beobachtet werden. Mit den beiden Strömungsbildern gehen ebenso unterschiedliche Sohlenformen einher, deren Uebergänge allerdings stetig verlaufen.

Die Bilder 25 und 26 zeigen schematisch diese zwei Zustände. Der abtauchende Strahl verursacht eine Verwirbelung von in Schwellennähe liegendem Material (Bild 25). Der Kolk reicht unter die Rampe zurück, seine Form weist im Verhältnis zur Länge eine grosse Tiefe auf. Im Gegensatz dazu steht der wellenförmige Oberflächenabfluss (Bild 26), der eine langgezogene Walze induziert. Entsprechend der Stärke der ausgebildeten Rückströmung an der Sohle kann nur feines oder auch etwas gröberes Material gegen die Schwelle hin transportiert werden. Wird bei steigendem Abfluss die Walze noch mehr in die Länge gezogen (Bild 27, gestrichelte Sohlenform), so wird die von der nun stärkeren Gegenströmung an der Sohle überstrichene Fläche und damit der rückwärts gerichtete Materialtransport ebenfalls grösser. Der Vorgang des Einkiesens wird also beschleunigt.

Es bleibt noch festzuhalten, dass gemäss Kapitel 4.2 die Vorgänge beim Verstopfen und beim Wiederöffnen grundlegend andere sind und somit die entsprechenden Abflüsse Q_1 und Q_2 nicht übereinstimmen.

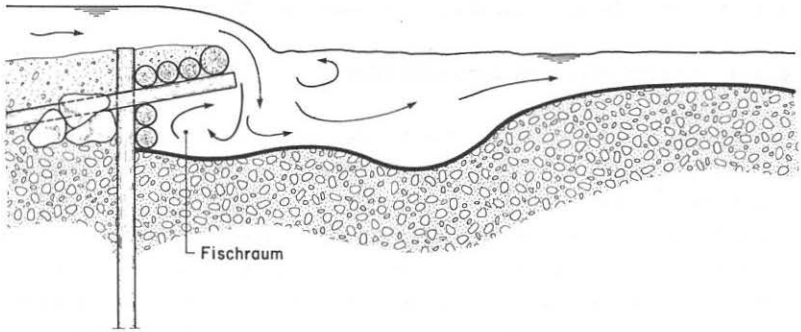


Bild 25 Abtauchender Strahl bei kleinen Abflüssen. Die Energie wird nahe bei der Schwelle verwirbelt, der Fischraum wird dadurch offen gehalten.

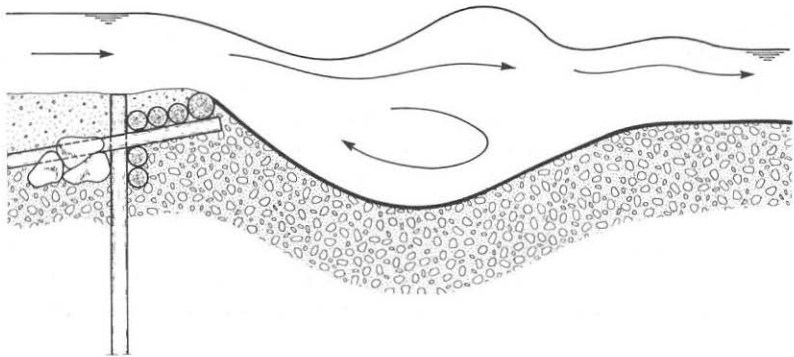


Bild 26 Oberflächennaher, gewellter Abfluss bei größerem Q . Die angefachte Walze mit ihrer Rückströmung an der Sohle transportiert vor allem Feinmaterial gegen die Schwelle zurück, bis der Fischraum keine Verbindung zum Flusswasser mehr aufweist.

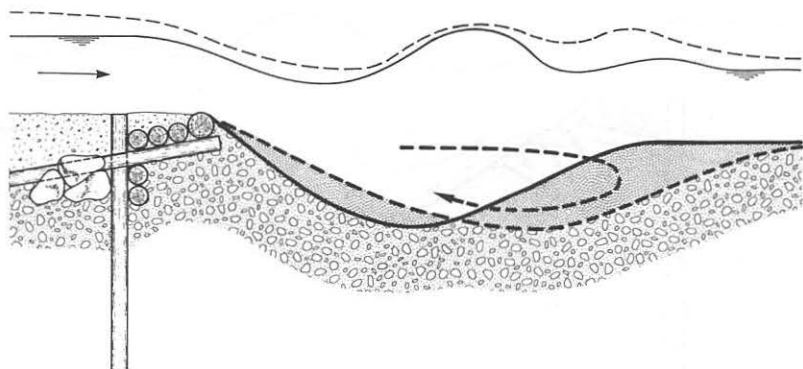


Bild 27 Bei (gegenüber dem in Bild 26 dargestellten Zustand) weiter erhöhtem Abfluss werden Walze und Kolkform in die Länge gezogen. Die von der Rückströmung erfasste Sohlenfläche wird grösser und damit auch der Rücktransport von Feinmaterial.

4.3.2 Einkieseln

In dieser detaillierten Betrachtung des Einkiesens ist vor allem die Frage wichtig, was sich während eines Hochwassers unter der Rampe abspielt. Dazu wird vorerst der Vorgang bis zur Abtrennung des Fischraumes genauer geschildert.

Die Walze verursacht gemäss Bild 28 eine Art rückwärts wandernde Düne. Auf deren Unterwasserseite wird das von der Rückströmung erfasste Material bis über den höchsten Punkt hinaus transportiert und dann - inzwischen nicht mehr in der Strömung - auf der schwellenseitigen Böschung abgelagert. Die derart entstehende oberwasserseitige Böschungsneigung entspricht dem natürlichen stabilen Grenzwinkel.

Die Spitze der Düne wandert im weiteren stetig dem Ueberfallholz der Rampe entgegen. Erreicht die Dünenspitze das Ueberfallholz, so wird die Belieferung ihrer oberwasserseitigen Böschung mit Geschiebe unterbunden. Das rückwärts transportierte Material wird nun von der schnellen, die Schwelle

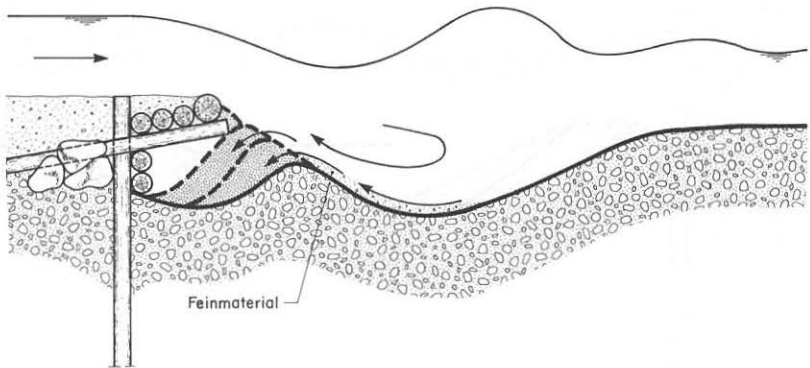


Bild 28 Nach der Ausbildung der Walze beginnt der Rücktransport von Feinmaterial. Die dadurch zustande kommende Düne nähert sich stetig dem Ueberfallholz. Das nach abgeschlossener Einkiesung unter der Rampe ausgesparte Dreieck bleibt während des Hochwassers geschleibefrei.

überstreichenden Vorwärtsströmung flussabwärts getragen oder macht die Walzenbewegung mit. Für den Fischraum bedeutet dies, dass ein gewisses Volumen, das durch Rampenunterseite, Schürze und oberwasserseitiger Böschung der Düne begrenzt wird, geschleibefrei bleibt. Daran wird während der Dauer des gesamten Hochwassers nichts geändert. Ebenso bleiben die Lücken zwischen den Steinblöcken auf der andern Seite der Schürze unter Voraussetzung dichter Filtermatten unbeeinträchtigt.

Zudem konnten mit Farbversuchen während des Einkiesungsvorgangs und erst recht nach der Trennung von Fischraum und Flusswasser unter der Rampe nur geringe Turbulenzen nachgewiesen werden. Es kann also davon ausgegangen werden, dass während eines Hochwassers unter der Rampe eine geschleibefreie, allerdings vom Flusswasser abgeschnittene Aussparung mit ruhigem Wasser bestehen bleibt.

4.3.3 Öffnen des Fischraumes

Die Öffnung des Fischraumes kann nicht in Umkehrung zum Mechanismus des Einkiesens vor sich gehen, da es allein schon unmöglich ist, das auf der Oberwasserseite der Düne gelegene Material zu mobilisieren. Daher erstaunt es auch nicht, dass der beim Anschwellen des Hochwassers zum Einkiesens führende Abfluss Q_1 für den Kolk beim Hochwasser-Rückgang ohne Bedeutung ist. Erst bei einem kleineren Abfluss Q_2 , wenn der Eintauchwinkel des Ueberfallstrahls steiler wird als die maximale stabile Neigung des Sohlenmaterials, wird der Böschungsfuss angegraben (Bild 29) und dadurch ein Nachrutschen des oberen, den Fischraum vom Fluss trennenden Materials ausgelöst. Mit weiterhin abnehmendem Abfluss und steiler werdendem Eintauchwinkel wird in der Sohle zunehmend rückwärts gegraben. Das dabei aufgewirbelte feine Material wird wenig flussabwärts abgelagert, da die Schleppkräfte bei diesen Abflüssen für einen Weitertransport nicht ausreichen. Das Auskolken dauert solange, bis sich wieder der Ausgangszustand vor dem Hochwasser mit einem bis unter die Rampe durchgehenden Kolk einstellt.

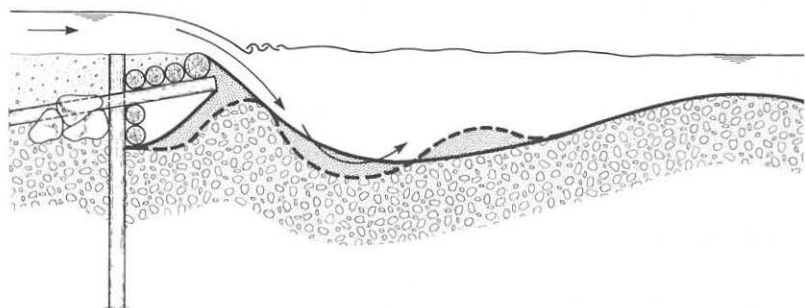


Bild 29 Öffnung des Fischraumes bei abklingendem Hochwasser. Der Eintauchstrahl gräbt im Kolk Material weg, der obere Teil der Düne rutscht nach. Das aufgewirbelte Material wird wenig flussabwärts wieder abgelagert.

4.4 Einflüsse auf das Umschlagen

4.4.1 Schwellenhöhe

Die beiden Abflusszustände können im wesentlichen auf das Spiel zwischen kinetischer Energie E_k in horizontaler Richtung und potentieller Energie E_p in vertikaler Richtung zurückgeführt werden. Bei kleinen Q ist E_p grösser und bestimmt folglich das Geschehen: die Hauptkomponente der Bewegung ist vertikal gerichtet und führt zum Tauchen des Ueberfallstrahls. Wird mit zunehmendem Q das zum Quadrat der Geschwindigkeit proportionale E_k und damit die horizontale Bewegungskomponente dominanter, so kann der Strahl nicht mehr tauchen. Das zur Verfügung stehende E_p wird durch die Wasserspiegeldifferenz ΔH_w an der Schwelle beeinflusst, E_k dagegen nur vom Abfluss. Durch das Erhöhen der Schwelle kann aber die Tendenz zum Eintauchen des Strahls gefördert und damit der Punkt des Umschlagens auf grössere Abflüsse verlagert werden. Diese Erkenntnis wurde durch die Modellversuche bestätigt. Es zeigte sich dabei auch, dass sich ein höheres Δh bei abnehmendem Q ebenso positiv auswirkt und den die Oeffnung des Fischraumes bewirkenden Abfluss Q_2 erhöht. Dies bedeutet, dass der Fischraum seltener von Geschiebeumlagerungen betroffen wird.

Für den Gültigkeitsbereich dieser Aussagen bestehen gewisse Grenzen. Bei einem zu geringen Δh erweist es sich als äusserst schwierig, den Fischraum überhaupt wieder zu öffnen, ganz abgesehen davon, dass er weniger tief und damit weniger voluminös wird.

4.4.2 Gefälle

Bei Flüssen, die durch Schwellen ausgebaut sind, ist stets eine klare Definition wichtig, von welchem Gefälle die Rede ist. Das Gefälle J_u über die Schwellen hinweg (Bild 30), das in etwa dem ursprünglichen Flussgefälle entspricht, bestimmt bei gleichmässigem Ausbau das Zusammenspiel von Schwellenhöhe

Δh und -abstand L . Sollen mehrere hohe Schwellen aneinandergereiht werden, müssen deren Abstände entsprechend gross sein. Natürlich kann der Ausbau auch unregelmässig erfolgen.

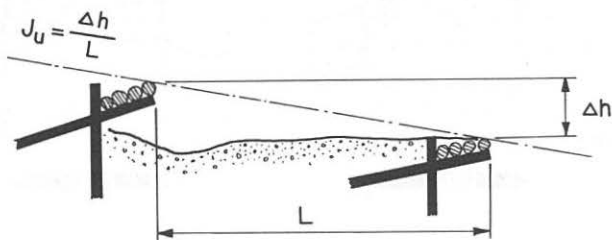


Bild 30 Zusammenhang zwischen dem Gefälle J_u über die Schwellen, der Schwellenhöhe Δh und dem Schwellenabstand L .

In der Folge werden Sohlengefälle J_s , Wasserspiegelgefälle J_w und Energieliniengefälle J_e im Abschnitt zwischen zwei Schwellen näher betrachtet. Sie werden im Prinzip durch den Fluss selber bestimmt und eröffnen kaum die Möglichkeit - wie der Parameter Δh - auf den Einkiesungsvorgang Einfluss zu nehmen. Im VAW-Bericht 847/4 (1988) wurden für einen vergleichbaren Tössabschnitt auf der Grundlage eines Sohlen-Längsprofils mit Staukurvenrechnungen die Verläufe von J_w und J_e (Bild 31) sowie eine Abflusskurve in einem typischen Querschnitt (Bild 32) bestimmt. Wasserspiegel und Energielinie weisen im Mittelteil, nach Abklingen der im Anschluss an die Schwelle angefachten Turbulenzen und vor Beginn der Senkungslinie zur folgenden Schwelle, einigermassen konstante Gefälle auf. Nach Bestimmung der Gerinnerauigkeit k mit der Formel nach Strickler (1923)

$$k = \frac{21}{d_{90}^{1/6}} \quad (1)$$

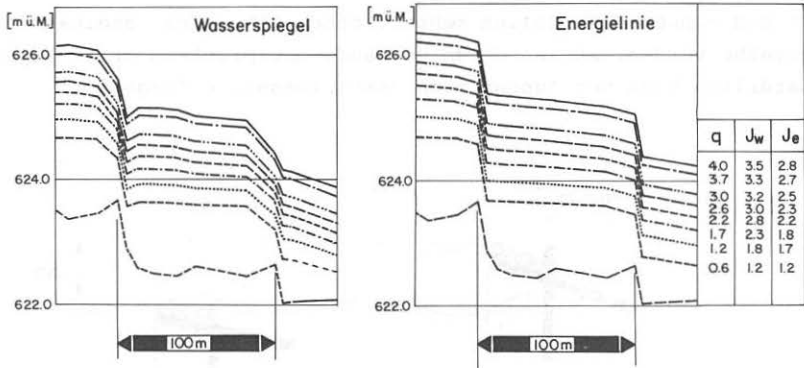


Bild 31 Verläufe von Wasserspiegel und Energielinie zwischen zwei Schwellen für verschiedene Abflüsse (VAW-Bericht 847/4, 1988).

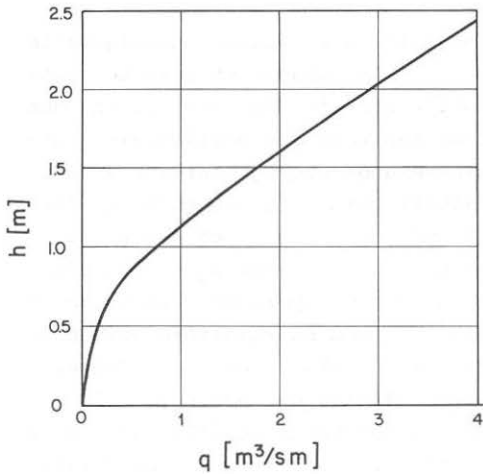


Bild 32

Abflusskurve in einem typischen Querschnitt für den in Bild 31 dokumentierten Fall.

lassen sich J_w und J_e dieses Mittelbereichs als Funktion von q darstellen (Bild 33a). Wasserspiegeldifferenz ΔH_w und Energielinienendifferenz ΔH_e (Bild 34) sind von der Schwellenhöhe Δh verschieden und stellen nicht konstante Größen dar. Sie las-

sen sich mit Δh , J_w resp. J_e und dem Schwellenabstand L näherungsweise berechnen:

$$\Delta H_w = \Delta h - L J_w \quad \text{und} \quad \Delta H_e = \Delta h - L J_e \quad (2)$$

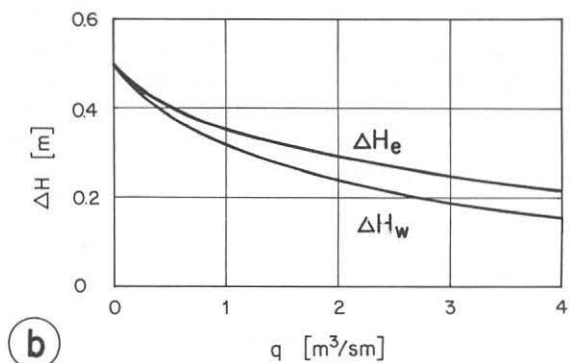
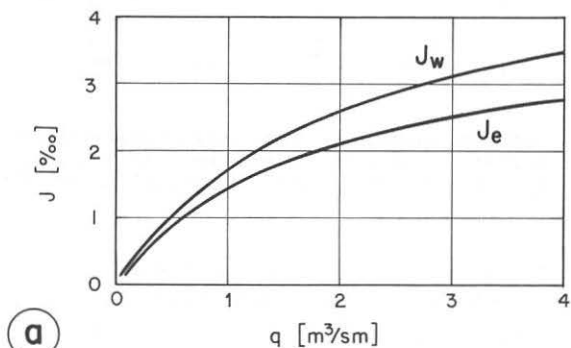


Bild 33 Darstellungen von Wasserspiegelgefälle J und Energieliniengefälle J_e als Funktion des Abflusses q (a) sowie als Folge davon die Betriebslinien für die Wasserspiegeldifferenz ΔH_w und für die Energielinienendifferenz ΔH_e (b), die bei vorgegebenem Schwellenabstand berechnet werden können.

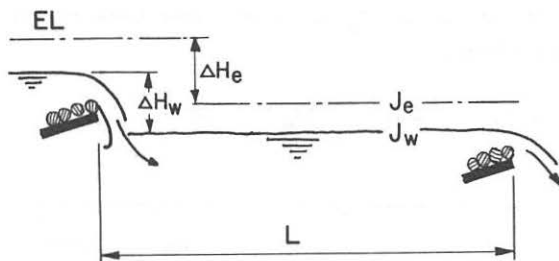


Bild 34 Definitionsskizze für die Größen Wasserspiegeldifferenz ΔH_w , Energielinienendifferenz ΔH_e , Wasserspiegelgefälle J_w und Energieliniengefälle J_e .

Gleichung (2) ist in Bild 33b als Funktion von q für eine Schwelle mit bekannten Rahmenbedingungen dargestellt. J_w und J_e sind auch vom Sohlenverlauf abhängig. Das Sohlengefälle J_s ist aber nicht ein Parameter, der in Natur frei gewählt und erzeugt werden kann, und - wie das Sohlenlängenprofil in Bild 31 zeigt - auch alles andere als eine konstante Grösse. Es kann wohl im Zuge des Schwellenbaus ein gewünschtes J_s gebaggert werden, bei Geschiebetrieb-verursachenden Abflüssen sucht sich dann der Fluss aber sein eigenes Gleichgewicht. Das flusseigene J wird sich mit der Zeit unabhängig vom anfangs gebaggerten Zustand einstellen.

4.4.3 Geschiebetrieb

Um die Bedeutung des Geschiebetriebes für das Umschlagen des Sohlenzustandes abzuklären, kann der Einkiesungsabfluss q_1 mit dem Geschiebetrieb auslösenden Abfluss q_0 verglichen werden. Für den Fall der Töss wird in Kapitel 4.2 gezeigt, dass bei einem Δh von 0.5 m q_1 ca. 2 m³/sm beträgt, q_2 knapp 1 m³/sm. Im Vergleich dazu ergibt die Berechnung nach Meyer-Peter und Müller (1949) für ein entsprechendes J_e von 2 ‰ (aus Bild 33) einen Geschiebetrieb-Beginn bei ca. 2.2 m³/sm. Der Geschiebetrieb setzt folglich für den in Bild 31 dokumentierten Fall bei einem Q_0 ein, das höher liegt als Q_1 und erst

recht als Q_2 . Geschiebetrieb wird also bei interessierenden Schwellenhöhen und Abflüssen im Bereich des Umschlagens ausbleiben oder allenfalls örtlich schwach ausgebildet sein. Bei kleineren Δh wird er noch unbedeutender, bei grösseren Δh kann er infolge des erhöhten Q_1 etwas wichtiger werden, der Einfluss auf den Einkiesungsvorgang bleibt aber unbedeutend. Es bleibt anzumerken, dass vor allem Feinmaterial für die Prozesse eine Rolle spielt. wird in der Phase nach dem Umschlagen des Abflusses durch einsetzenden Geschiebetrieb zusätzlich Material aus dem Oberwasser geliefert, das von der Walze gegen die Schwelle zurück transportiert werden kann, so beschleunigt dies den "Verstopfungsprozess". Gegen Ende der Hochwasserwelle wirbelt der Tauchstrahl wieder vor allem feines Material auf, das an dem Punkt abgelagert wird, wo die Schleppkraft infolge abklingender Turbulenz und immer noch erhöhter Wassertiefe nicht mehr zum Weitertransport ausreicht. Dies gilt sowohl für das an Ort und Stelle mobilisierte Material als auch für solches aus dem Oberwasser. Dieser Ablagerungsort liegt aber immerhin ausserhalb des Bereiches, der beim Einkiesungsvorgang von der Rückströmung an der Sohle erfasst wird (Bild 28). Geschiebetrieb kann also wegen der vergrösserten zu verwirbelnden Feinmaterialmenge die Oeffnung des Fischraumes leicht erschweren, verändert aber nichts am grundsätzlichen Vorgang und an Q_2 , bei dem dies geschieht.

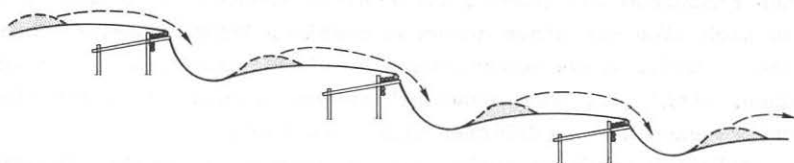


Bild 35 Fließgleichgewicht des Feinmaterials über eine Schwellentreppe. Das durch den eintauchenden Strahl aufgewirbelte und wenig flussabwärts wieder sedimentierte Material wird bei einem Hochwasser über die jeweils nächste Schwelle hinweg transportiert und trägt dort wieder zur Einkiesung bei.

Beim nächsten Hochwasser allerdings liegt es bereit für den Transport zur nächsten flussabwärts gelegenen Schwelle und trägt dort zu deren Einkiesung bei. Wird ein Flussabschnitt zu einer "Schwellentreppe" ausgebaut, wird demnach die nach der Schwelle abgelagerte Feinmaterialfracht bei einem nicht allzu grossen Hochwasser um jeweils eine Schwelle flussabwärts verschoben und so eine Art Fließgleichgewicht gebildet (Bild 35).

Die Folgerung, dass während eines Hochwassers immer mindestens das nach dem Kolk abgelagerte Feinmaterial für den Transport über die nächste Schwelle zur Verfügung steht, war auch für den Modellbetrieb wichtig. Im Interesse einer realistischen Simulation musste also die Geschiebebeschickung zugeschaltet werden, sobald Feinmaterial von seinem Ablagerungsort nach der betrachteten Schwelle bis über den Fixpunkt am Modellende transportiert wurde.

4.5 Fischraum

4.5.1 Offenhalten

Wie bereits erwähnt trägt ein grösseres Δh dazu bei, die Einkiesung der Schwelle hinauszuzögern. Darüber hinaus wurde nach Massnahmen gesucht, die gar die Einkiesung verhindern und den Fischraum bei jedem Q offenhalten könnten. Natürlich liesse sich dies mit einem genügend massiven Beton-Bauwerk erreichen. Damit würde jedoch dem Sinn der Holzschwelle widersprochen, stellt sie doch einen schonenden Eingriff dar, der Fluss und Fauna einem natürlichen Spiel überlässt.

Folglich wurde versucht, mit möglichst geringem Eingriff örtlich eine Einkiesung der Schwelle während des Hochwassers zu verhindern. Dies ist mit dem Einbau von "Hindernissen" und dadurch erzeugter starker Turbulenzen denn auch gelungen. Als völlig nutzlose Hindernisse erwiesen sich Steinblöcke im Unterwasser, sie wurden bei Hochwasser in die Sohle eingegraben.

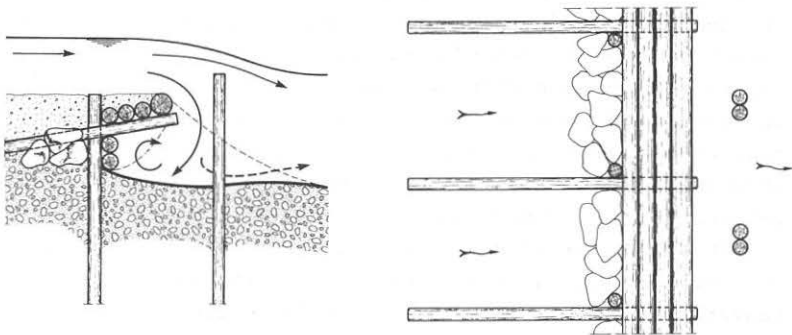


Bild 36 Effiziente Variante, um auch bei einem Hochwasser eine Verbindung zwischen Fischraum und Fluss offen zu halten. Die grosse Turbulenz vermag aber auch Steine umherzuwirbeln und stellt daher, gemessen am Zweck der Schwelle (Bildung eines Fischraumes), einen fundamentalen Nachteil dar.

Die effizienteste Turbulenzerzeugung wurde durch nebeneinander, kurz nach der Schwelle gerammte Pfosten gemäss Bild 36 erreicht. Der Abfluss und dessen Energieinhalt werden an diesen Pfosten unter die Rampe umgelenkt und halten den Fischraum im Bereich hinter den Pfosten offen.

Damit wurde eine Methode zur Offenhaltung des Fischraumes gefunden, die zwar hydraulisch funktioniert, die aber die Rechnung ohne die Hauptdarsteller - die Fische - macht. Die in diesen Turbulenzen steckende Energie vermag nämlich Steine zu erfassen und umherzuwirbeln, ganz zu schweigen von der entstehenden Trübung.

4.5.2 Verlängerung

Die Länge der Rampe hat auf die prinzipiellen Vorgänge rund um die Schwelle keinen Einfluss. Insbesondere ändert sich nichts an der Tatsache der Einkiesung und an den Abflüssen, die zu Verstopfung und Wiederöffnung des Fischraumes führen.

Wird diese Tatsache hingenommen, so kann immerhin die Grösse des Fischraumes durch die Rampenlänge beeinflusst werden. Gemäss der detaillierten Beschreibung des Einkiesungsvorgangs ist die oberwasserseitige Neigung der gegen die Schwelle zurückwandernden Düne unabhängig vom Bauwerk. Nach dem Zusammenschluss von Rampe und Düne werden im Fischraum keine Sohlenbewegungen mehr stattfinden; bei längerer Rampe wird damit auch der Fischraum entsprechend verlängert (Bild 37a).

Mit der Verlegung der Schürze hinter die senkrecht gerammten Pfähle (Bild 37b) kann derselbe Effekt wie mit einer Rampenverlängerung um 2 Rundhölzer erzielt werden.

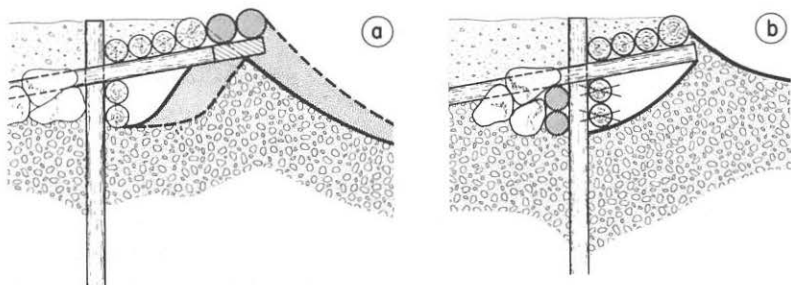


Bild 37 Vergrösserung des während eines Hochwassers geschiefbefrei bleibenden Fischraumes durch Rampenverlängerung (a) und durch Verlegung der Schürzenhölzer auf die andere Seite der senkrechten Pfähle (b).

4.5.3 Dünenlage

Die andere Möglichkeit zur Vergrösserung des geschiefbefrei bleibenden Raumes zielt auf eine Zunahme seiner Höhe ab. Dies könnte mit einem gemäss Bild 38 an der Rampenfront angebrachten Brett (oder mit zwei Rundhölzern) erreicht werden. Bei gleichbleibender Böschungsneigung unter Wasser würde die Düne schwellenseitig um die Brettbreite parallel nach unten verlegt.

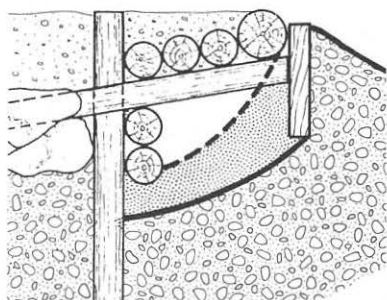


Bild 38

Vergrößerung des geschiebefreien Raumes während eines Hochwassers durch ein senkrechttes Brett an der Rampenfront.

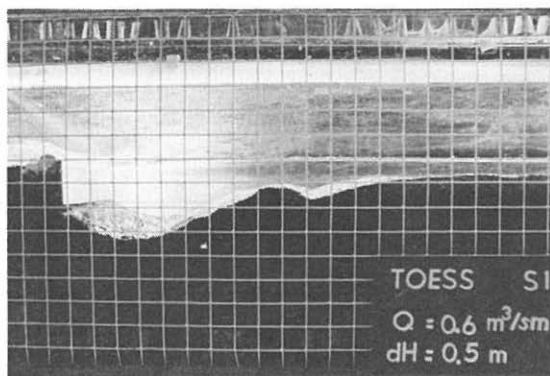


Bild 39 Das stirnseitige Brett kann den Oeffnungsvorgang des Fischraumes nach dem Hochwasser hinauszögern. 35/81/ 7

Diese Veränderung wirkt sich jedoch beim Oeffnungsvorgang nachteilig aus. Während sich im Normalfall unmittelbar unter dem Ueberfallholz zuerst ein Schlitz öffnet, wird durch das Brett die Entstehung dieser anfänglich kleinen Oeffnung verhindert (Bild 39). Eine Verbindung zum Flusswasser wird erst bei einem kleineren Abfluss zustande kommen, wenn sich die Düne unter die Unterkante des Brettes gesenkt hat.

4.6 Kolk

Die Ausmasse des Kolkes sind für die Dimensionierung der Böschungssicherung im Unterwasser von Bedeutung. Die Modellversuche haben gezeigt, dass die Kolkentiefe keineswegs mit zunehmendem Abfluss stetig steigt und für die Böschung immer gefährlicher wird. Bei sehr grossen Abflüssen wird der Kolk stark in die Länge gezogen, während seine Tiefe wieder abnimmt. Die maximalen Kolkstiefen stellen sich bei abnehmendem Abfluss und eintauchendem Ueberfallstrahl ein.

Bild 40 zeigt die Verbindungslinie der tiefsten Kolkpunkte. Die einer bestimmten Schwellenhöhe zugeordnete Linie ist dabei nicht mit der Kolkform bei einem einzigen Abfluss zu verwechseln. Geht man entlang der Linie nach rechts, so zeigt sie die "Koordinaten" des tiefsten Kolkpunktes für stets grössere Abflüsse, es ist also die Umhüllende der massgebenden Kolke.

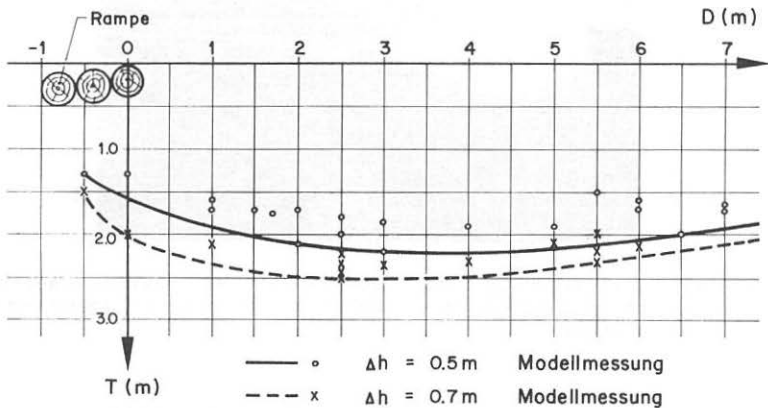


Bild 40 Grafik zur Lagebeschreibung der tiefsten Kolkpunkte aller im Modell untersuchter Abflüsse; die Linien sind dabei als Umhüllende zu verstehen. Der Ordinaten-Nullpunkt liegt bei OK Schwelle.

Zur Projektierung einer angemessenen Böschungssicherung sind zudem Angaben über die Kolklänge erforderlich. Es ist allerdings schwierig zu definieren, wo der Kolk in die "normale" Sohlenlage übergeht, da das Flussbett während eines Hochwassers ohnehin Niveauschwankungen unterliegt. Aufgrund der Modellversuche für die Töss kann ganz allgemein ausgesagt werden, dass die Kolk-tiefen in Abständen ab ca. 15 m flussabwärts der Schwelle für die Böschungsstabilität nicht mehr ins Gewicht fallen. Von hier an bewegen sie sich im Rahmen üblicher Sohlenkoten-Schwankungen als Folge des Geschiebetriebs.

Die Auswertung der Kurven in Bild 40 im negativen Abszissenbereich gibt Informationen über die notwendige Tiefe der Schürze. So wäre zum Beispiel die Schürze mit nur zwei Rundhölzern für die grösseren untersuchten Schwellenhöhen bereits unterspülungsgefährdet (Bild 51).

Es muss noch herausgestrichen werden, dass sich die im Modell eruierten Kolk-tiefen in Flussmitte befinden. Für die Böschungssicherung am Ufer liegen diese Aussagen auf der sicheren Seite. Einen Anhaltspunkt, wie stark die Kolk-tiefe am Böschungsfuss überschätzt wird, gibt die Kolkuntersuchung von Schoklitsch (1951), die für den Randbereich bei symmetrischer Strömung einen Reduktionsfaktor von 0.85 vorsieht.

Eine Ueberprüfung und Erweiterung der Aussagen anhand gebräuchlicher Kolkformeln wird in Kapitel 5.4 vorgestellt.

5. VERALLGEMEINERUNG

5.1 Gültigkeit

Die bis anhin beschriebenen Untersuchungen hatten meistens in bezug auf die spezifischen Bedingungen der Töss Gültigkeit. In diesem Kapitel soll der Bereich der Gültigkeit allgemein auf Fließgewässer mit vergleichbarem Charakter wie die Töss ausgeweitet werden. Zu diesem Zweck wurden weitere Modellversuche zur Quantifizierung der Einflüsse von Schwellenhöhe und Sohlenbeschaffenheit durchgeführt. Der insgesamt abgedeckte Bereich der Untersuchungen umfasste $J_u = 3.5 - 10$ ‰ für das Gefälle über die Fixpunkte und $d_{90} = 1.5 - 14$ cm für den Korndurchmesser bei 90 ‰ Siebdurchgang. Angestrebt wurden in erster Linie Aussagen, die zur konkreten Dimensionierung der Schwelle von Interesse sind. Es sind dies vor allem q_1 und q_2 , die zur Einkiesung resp. der Oeffnung des Fischraumes führenden Abflüsse sowie die Ausmasse des Kolkes zur Sicherung von Schwelle und Böschungen.

Alle Resultate und Formeln beruhen auf empirischem Vorgehen. Die sich daraus ergebenden Konstanten bedürfen häufig Einheiten, deren Realitätsbezug nicht unmittelbar eingesehen werden kann. Erst durch das Anschreiben der Konstanten mit ihren Einheiten erlangen die Gleichungen physikalische Gültigkeit.

Es wurde zusätzlich versucht, mit den sich aus der Anwendung des Π -Theorems ergebenden Grössen, die auch schon für ähnliche Fälle mit Erfolg verwendet wurden (z.B. Volkart, 1972), Regressionen durchzuführen. Die erreichbaren Korrelationen waren aber deutlich schlechter als diejenigen der in Kap. 5 angegebenen Gleichungen. Im Hinblick darauf, dass die erarbeiteten Formeln vor allem eine leichte Anwendung zur Vorhersage von Einkiesungs- und Kolkrisiko ermöglichen sollten, wurde auf eine Darstellung mit rein dimensionslosen Grössen verzichtet.

Zusätzlich zu den empirischen Herleitungen der Formeln für Umschlags-Abflüsse und Kolkgrößen werden im Anhang am Beispiel der Töss die wichtigen Berechnungsgänge veranschaulicht.

5.2 Umschlagen

Modellversuche wurden mit 10 verschiedenen Kombinationen von Schwellenhöhe und Sohlenmaterial durchgeführt, um nach einer Regelmässigkeit in den Bedingungen für das Einkiesen und Oeffnen des Fischraumes zu suchen. Als Referenzgrößen kamen dabei nur Parameter in Frage, die für die Situation an der Schwelle selbst relevant sind. Die Schwellenhöhe Δh kann dazu nicht direkt verwendet werden, da sie nur gekoppelt mit Schwellenabstand L und Wasserspiegelgefälle J_w für die Vorgänge an der Schwelle von Bedeutung ist. Die Wasserspiegeldifferenz ΔH_w ist dagegen eine Grösse, die sich direkt aus den Modellversuchen ablesen lässt. Der massgebende Oberwasserspiegel wird vor der Senkungslinie gegen die Schwelle hin, der Unterwasserspiegel nach dem unmittelbaren Einflussbereich des Kolkes abgelesen. Der Zusammenhang zu den Dimensionierungsgrößen ergibt sich durch Formel (2) nach der Bestimmung von J_w in Funktion von q mittels Staukurvenberechnungen (Bilder 32 und 33).

Die Auswertung der Versuchsfotografien ergab annähernd lineare Zusammenhänge zwischen ΔH_w und den Abflüssen q_1 und q_2 (Bild 41), die durch die Formeln

$$\Delta H_{w1} = c_1 q_1^{0.8}, \quad \text{mit } c_1 = 0.18 \quad [m^{-0.6} s^{0.8}] \quad (3)$$

$$\Delta H_{w2} = c_2 q_2^{0.8}, \quad \text{mit } c_2 = 0.38 \quad [m^{-0.6} s^{0.8}] \quad (4)$$

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 33b) für die gewünschte Schwelle (Bild 42a, qualitativ).

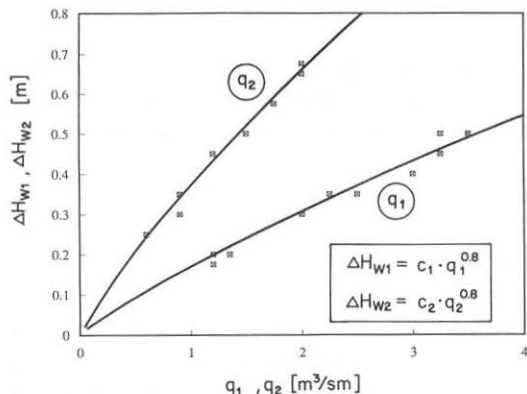


Bild 41 Zusammenhang zwischen den Abflüssen, die zur Einkiesung (q_1) resp. zur Oeffnung (q_2) des Fischraumes führen und der Wasserspiegeldifferenz ΔH_w an der Schwelle.

Möglicherweise ist diese den Zusammenhang zwischen ΔH_w und q zeigende Betriebslinie in Tat und Wahrheit eine Hystereseschleife. Für unsere Betrachtung und in Anbetracht der zur Verfügung stehenden Berechnungsmöglichkeiten spielt diese geringfügige Abweichung jedoch keine Rolle.

Mit Hilfe von Bild 42a lässt sich nun entweder für eine gegebene Schwellenkonstellation q_1 und damit die zu erwartende Häufigkeit der Einkiesung vorhersagen, oder umgekehrt bei Vorgabe des Gefälles J_u über die Schwellen und des gewünschten q_1 die Schwellenhöhe Δh projektieren. Notwendige Voraussetzung dazu ist die Berechnung von J_w bei q_1 und q_2 . Aus Gleichung (2), die in Bild 42b grafisch dargestellt ist, ergeben sich nun die Wertepaare $(L/\Delta h)$, die den Anforderungen gerecht werden. Dieses Vorgehen wird im Anhang anhand des konkreten Beispiels der Töss durchgerechnet und veranschaulicht.

Das vorgestellte Verfahren ist zum Aufzeigen der Zusammenhänge und der hauptsächlich die Vorgänge an der Schwelle beeinflussenden Parameter sehr nützlich. Es stellt gerade wegen der getroffenen Vereinfachungen zur Projektierung der Holzschwellen ein hilfreiches Instrument dar. Natürlich kann davon nicht eine Genauigkeit auf mm oder auf l/s erwartet werden. Dies muss jedoch zur Tatsache in Beziehung gesetzt

werden, dass die Projektierung auf einer mindestens ebenso unsicheren Hochwasservorhersage fusst.

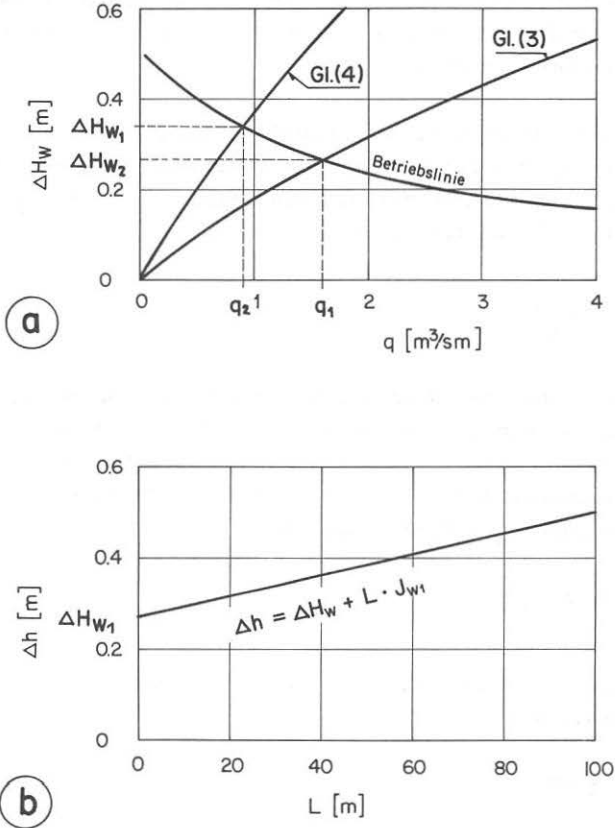


Bild 42 Bestimmung der Bedingungen, die zum Umschlagen des Sohlzustandes führen (a) und notwendige Schwellenhöhe Δh (b).

5.3 Energiebetrachtung

Wie bereits erwähnt, spielen für das Umschlagen von Strömung und Sohlenform die Energie-Verhältnisse an der Schwelle eine Rolle. Um die Verbindung zu den anschliessend in Kapitel 5.4 behandelten Kolkgrössen herzustellen, werden hier Energiegrössen eingeführt und deren Korrelation mit den interessierenden Parametern untersucht.

Mit den Bedingungen an der Schwelle lassen sich die kinetische Energie E_k und die potentielle Energie E_p angeben. Da der Abfluss über dem Ueberfallholz die kritische Tiefe h_k durchläuft, beträgt E_k an dieser Stelle

$$E_k = \frac{1}{2} \rho Q v_k^2, \quad (5)$$

wobei ρ die Dichte des Wassers, Q den Abfluss und v_k die kritische Geschwindigkeit bezeichnen. Mit der Flussbreite B , dem spezifischen Abfluss $q = Q/B$, $v_k = q/h_k$ sowie $h_k = (q^2/g)^{1/3}$ ($g =$ Erdbeschleunigung) lässt sich (5) in die spezifische kinetische Energie $e_k = E_k/B$ umwandeln:

$$e_k = \frac{1}{2} \rho g^{2/3} q^{5/3}. \quad (6)$$

Die spezifische potentielle Energie e_p an der Schwelle kann näherungsweise mit

$$e_p = \rho g q \Delta H_w \quad (7)$$

angegeben werden. e_k nimmt also mit steigendem q überproportional zu, e_p nur linear.

Die Datenanalyse ergab, dass sich q_1 und q_2 als Funktion von e_p - also eigentlich des Produktes aus ΔH_w und q - darstellen lassen (Bild 43). Die Regressionen wurden mit guter Näherung zu

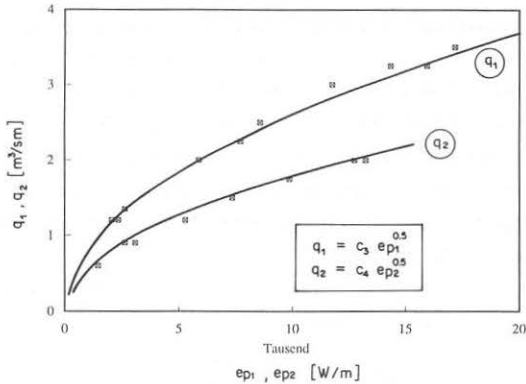


Bild 43 Die zum Umschlagen führenden Abflüsse q_1 und q_2 in Funktion der spezifischen potentiellen Energie e_p .

$$q_1 = c_3 e_{p1}^{0.5}, \quad \text{mit} \quad c_3 = 0.026 \left[\frac{\text{m}^{1.5} \text{s}^{0.5}}{\text{kg}^{0.5}} \right] \quad (8)$$

$$q_2 = c_4 e_{p2}^{0.5}, \quad \text{mit} \quad c_4 = 0.018 \left[\frac{\text{m}^{1.5} \text{s}^{0.5}}{\text{kg}^{0.5}} \right] \quad (9)$$

bestimmt. Der Einbezug von e_k in die Formel drängt sich nicht auf, insbesondere ergibt sich aus dem dimensionslosen Verhältnis e_p/e_k keine überzeugende Korrelation.

Ansätze über die Energie als Bezugsgrösse werden im auch folgenden Kapitel zur Vorhersage der Kolkentiefe untersucht.

5.4 Kolk

5.4.1 Kolkentiefe

Die aus den Modellversuchen erhaltenen Resultate wurden anhand gebräuchlicher Kolkformeln überprüft. Der Vergleich mit einschlägigen Formeln (Uebersicht s. Whittaker und Schleiss,

1984), die jeweils ausschliesslich entweder für horizontale Jets oder für Eintauchstrahlen entwickelt wurden, bietet Schwierigkeiten. Die Strömung der Holzschwelle weist demgegenüber gewisse Besonderheiten auf. Zum einen kann je nach Abfluss das Strömungsbild beide obgenannten Formen annehmen und somit nicht eindeutig zugeordnet werden. Zum anderen wird durch die spezielle Bauweise der Rampe eine Kolkentwicklung flussaufwärts der Ueberfallkante ermöglicht.

Die meisten Formeln zur Errechnung der Kolktiefe sind grundsätzlich nach dem Schema

$$t + h_3 = \text{const} \cdot q^{\beta^1} \cdot \Delta H_w^{\beta^2} \cdot d_{90}^{\beta^3} \quad (10)$$

aufgebaut, eine Definitionsskizze ist in Bild 44 gegeben. Zu

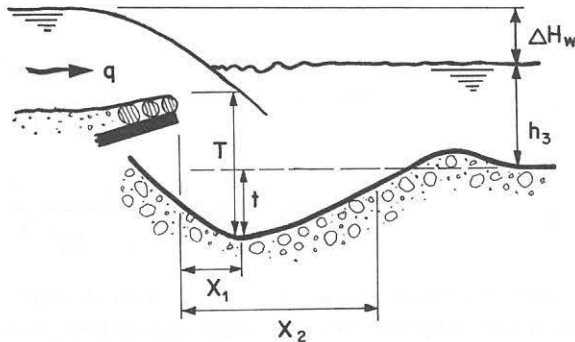


Bild 44 Definitionsskizze für die in den Kolkberechnungen verwendeten Grössen.

sätzlich werden zum Teil Einflüsse von Zeit und Geschiebetrieb berücksichtigt. Die Formel gibt also nicht direkt die eigentliche Kolktiefe t mit einer fiktiven, ungestörten Sohlenlage als Referenz an, sondern die Summe von t und der Abflusstiefe h_3 im Anschluss an den gestörten Bereich. Damit kann Gleichung (10) für unser Problem angewandt werden, obwohl sie mit steigendem q eine stetige Zunahme der Kolktiefe suggeriert. Vom Punkt an, wo h_3 mit q stärker zunimmt als die rechte Seite der

Gleichung (10), wird die effektive Kolktiefe t in Uebereinstimmung mit dem Holzschwellenkolk (Bild 40) wieder kleiner (Bild 45).

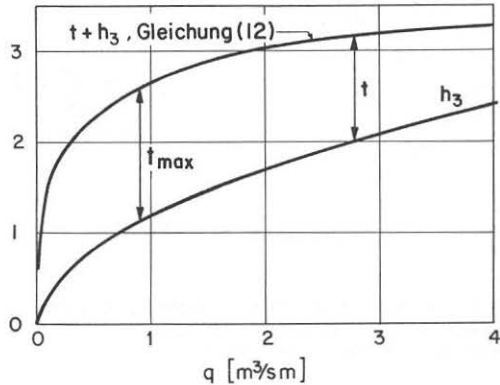


Bild 45 Verlauf der effektiven, von einer fiktiven, ungestörten Sohlenlage aus gemessenen Kolktiefe t in Funktion von q .

Die häufig angewandte Formel von Kotoulas (1967)

$$t + h_3 = 0.78 \frac{q^{0.7} \Delta H_w^{0.35}}{d_{90}^{0.4}} \quad (11)$$

liefert für die Holzschwelle unbefriedigende Resultate (Bild 46). In der Folge wurde mit den Daten aus den Modellversuchen eine Regression für den allgemeinen Ansatz (10) durchgeführt. Die Rechnung lieferte für die Exponenten die Werte $\beta_1 = 0.28$, $\beta_2 = 0.32$, und $\beta_3 = -0.014$. Erstaunlicherweise wird dadurch nur ein verschwindender Einfluss der Sohlenmaterial-Grösse aufgezeigt. Dies geschieht allerdings in Uebereinstimmung mit anderen Autoren, die für eine Endtiefe ohne Geschiebenachschub

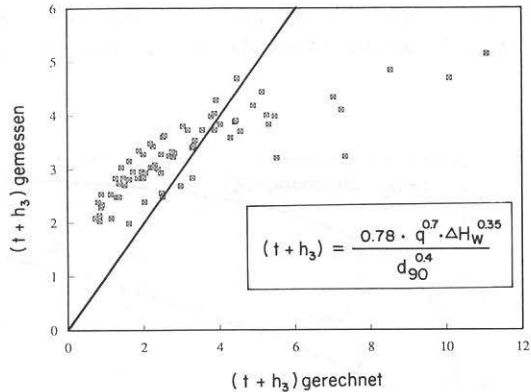


Bild 46 Die Anwendung der Formel von Kotoulas zur Bestimmung der Kolktiefe korreliert nicht mit den Daten aus den Modellversuchen.

ebenfalls eine von d_{90} unabhängige Maximaltiefe angeben (Machado, 1982; Veronese, 1937). Im weiteren fällt die Ähnlichkeit von β_1 und β_2 auf, die wie beim Umschlagen die Einführung von e_p als Bezugsgrösse erlaubt. Die vereinfachte Formel für die allgemeine Kolktiefe lautet somit

$$t + h_3 = c_5 e_p^{0.3}, \quad \text{mit} \quad c_5 = 0.24 \left[\frac{m^{0.7} s^{0.9}}{kg^{0.3}} \right]. \quad (12)$$

Ihre Korrelation mit den gemessenen Punkten wird in Bild 47 aufgezeigt. In situ Messungen in der Töss ergaben für zwei verschieden hohe Schwellen mit Wasserspiegeldifferenzen ΔH_w von 0.65 m und 0.35 m sehr gute Übereinstimmungen mit Gleichung (12). Die gemessenen Werte betragen 2.8 m und 2.05 m, die gerechneten 2.75 m resp. 2.06 m.

Formel (12) erlaubt für jede Kombination von q und ΔH_w die Berechnung der Kolktiefe. Im Hinblick auf die Böschungssicherheit interessiert jedoch in erster Linie die

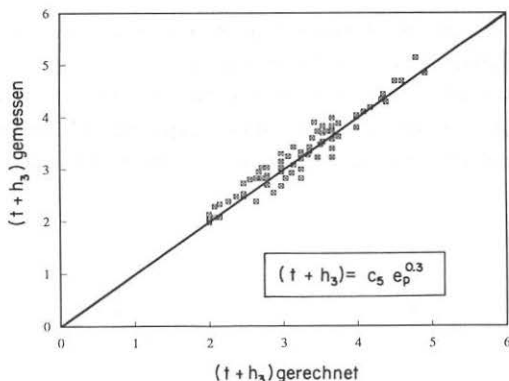


Bild 47 Darstellung der Kolkttiefe als Funktion der spezifischen potentiellen Energie e_p , Vergleich der gemessenen mit den gerechneten Werten.

absolut grösste Tiefe und deren horizontale Lage. Vom Resultat der Gleichung (12) müsste dazu die Abflusstiefe h_3 im Unterwasser subtrahiert und so das Maximum von t bestimmt werden. Da $t + h_3$ eine Funktion von e_p ist, h_3 hingegen nur von q , kann diese Subtraktion nur für jeweils einen Fall vernünftige Resultate liefern, nicht aber in einer allgemeingültigen Darstellung. Zudem stellt t für den Gebrauch in der Praxis wegen der Unsicherheit beim Ansetzen der Referenz-Sohlenlage eine schwierig anzuwendende Grösse dar. Deshalb wurde versucht, die für eine bestimmte Konstellation maximale Kolkttiefe T vom Ueberfallholz aus zu definieren. Ansonsten blieb das Vorgehen beim Suchen nach einer Funktion zur Bestimmung von T dasselbe wie für die allgemeine Kolkttiefe $t + h_3$. Die Exponenten in Gleichung (10) konnten zu $\beta_1 = 0.10$, $\beta_2 = 0.71$ und $\beta_3 = -0.04$ festgelegt werden. Sie verdeutlichen den dominierenden Einfluss von ΔH_W und damit der vertikalen Bewegungskomponente auf die maximale Kolkttiefe. Unter Vernachlässigung der schwachen Einflüsse von q und d_{90} wird mit der Formel

$$T = c_6 \cdot \Delta H_W^{0.8}, \quad \text{mit } c_6 = 4.4 \text{ [m}^{0.2}\text{]} \quad (13)$$

eine praktisch gleichwertige Korrelation erreicht (Bild 48a). Mit Gleichung (13) als Ausgangslage kann der tiefste auftretende Kolk sehr einfach abgeschätzt werden. Mit dem Einsetzen der maximal zu erwartenden Wasserspiegeldifferenz für ΔH_w würde eine auf der sicheren Seite liegende Annahme getroffen.

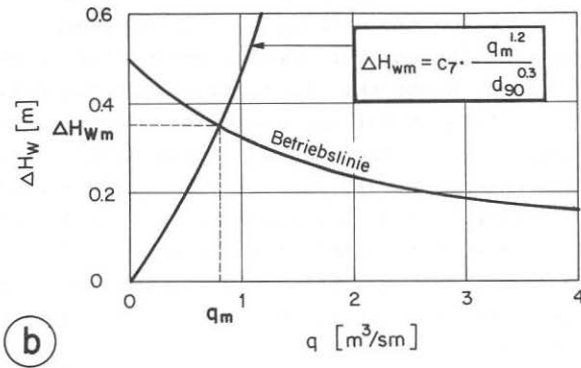
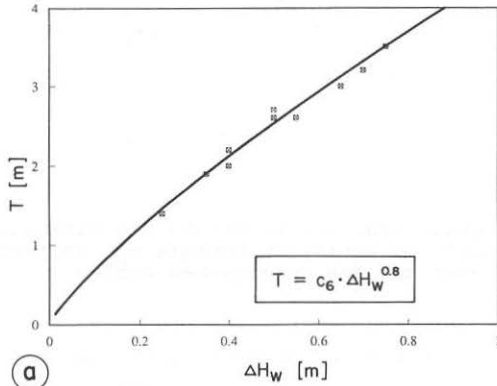


Bild 48 Verfahren zur Bestimmung der maximalen Kolk­tiefe vom Ueberfallholz aus. Mit dem aus dem Schnittpunkt in (b) erhaltenen ΔH_{wm} kann in (a) - oder mit Gleichung (13) - das gesuchte T bestimmt werden.

Soll hingegen versucht werden, eine Ueberschätzung von T zu vermeiden, muss das für die Entstehung der maximalen Kolkttiefe massgebende Datenpaar ($q_m/\Delta H_{wm}$) bestimmt werden. Eine Datenanalyse lieferte die Abhängigkeit

$$\Delta H_{wm} = c_7 \frac{q_m^{1.2}}{d_{90}^{0.3}}, \quad \text{mit } c_7 = 0.22 \left[\frac{s^{1.2}}{m^{1.1}} \right]. \quad (14)$$

Je gröber das Korn, desto grösser wird der den Maximalkolk verursachende Abfluss. Gleichung (14) kann nun für einen konkreten Fall dargestellt und mit der schon früher erwähnten Betriebslinie geschnitten werden (Bild 48b): der Schnittpunkt definiert ΔH_{wm} und q_m' , die den Maximalkolk bewirken.

Wie bei der Beschreibung der Kolkformen für die Modellversuche der Töss (Kap. 4.6) gelten auch die hier vorgestellten Formeln für die Kolkttiefen in Flussmitte. Die für die Böschungssicherung massgebenden Kolkttiefen ergeben sich durch eine Multiplikation mit dem Reduktionsfaktor 0.85 (Schoklitsch, 1951).

Es bleibt zu erwähnen, dass die Beschaffenheit des Sohlenmaterials - obwohl nicht explizit in den Gleichungen vorkommend - indirekt sehr wohl für die Kolkttiefen von Bedeutung sein kann. Ein gröberes Sohlenmaterial geht über eine erhöhte Rauigkeit in die Staukurvenberechnung ein und hat dort für einen bestimmten Abfluss ein höheres Wasserspiegelgefälle J_w zur Folge. Gemäss Gleichung (2) wirkt sich dies in einem verminderten ΔH_w und folglich mit (13) in einer geringeren maximalen Kolkttiefe aus.

5.4.2 Kolklänge

Für die Böschungssicherung ist neben der Tiefe des maximalen Kolkpunktes auch dessen Abstand x_1 zur Schwelle von Interesse. Mit der Gleichung

$$x_1 = c_8 q^{0.65}, \quad \text{mit} \quad c_8 = 2.2 \left[\frac{s^{0.65}}{m^{0.3}} \right] \quad (15)$$

konnten die in Bild 49 dargestellten Messpunkte angenähert werden. Formel (15) drückt aus, dass in erster Linie der Abfluss, also die Bewegung in horizontaler Richtung, für die Kolklänge verantwortlich ist. Damit ergibt sich die Möglichkeit, für eine bestimmte Schwelle die Koordinaten des tiefsten Kolkpunktes für jedes q anzugeben.

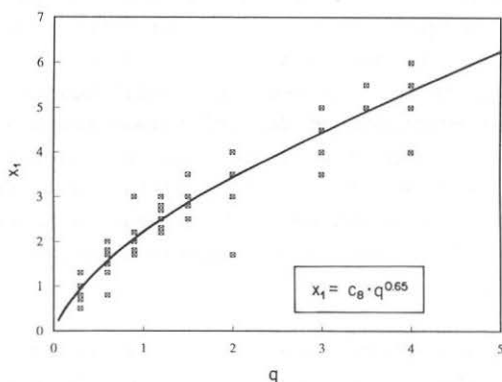


Bild 49 Abstand x_1 des tiefsten Kolkpunktes vom Ueberfallholz als Funktion des Abflusses q .

Etwas schwieriger gestaltet sich die Angabe der maximalen Kolklänge x_2 . Es ist schon schwierig, überhaupt den Endpunkt des Kolkes zu definieren. Zur Auswertung der Versuche wurde dieser Punkt etwas tiefer als die fiktive, ungestörte Sohlenlage angelegt. Es wurde davon ausgegangen, dass ohnehin auf der ganzen Strecke eine Sicherung des Böschungsfusses vorgesehen ist, die üblichen Schwankungen der Sohlenkote zu widerstehen vermag. Der Vergleich der Daten von x_1 und x_2 (Bild 50) ergab für die massgebenden langgezogenen Kolkformen für x_2 ungefähr den doppelten Betrag von x_1 .

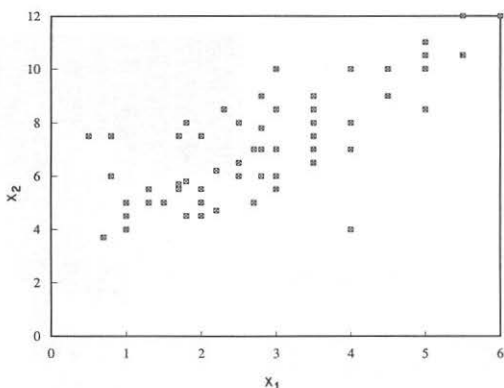


Bild 50 Zusammenhang der Messdaten von x_1 und der für die Böschungssicherung massgebenden Kolklänge x_2 .

5.5 Sicherheit der Schwellenkonstruktion

Im Verlauf der Untersuchungen haben sich für die Stabilität der Schwelle einige kritische Punkte herauskristallisiert, die bei der Konstruktion unbedingt berücksichtigt werden müssen. Ganz allgemein konnte mit der Zunahme von Schwellenhöhe und Kolkentiefe ein steigendes Gefährdungspotential ausgemacht werden. Wichtig erscheint vor allem, die Unterspülung der Schürze zu verhindern. Der in Bild 51 gezeigte Versuch deutet die Folgen einer Unterspülung an. Die oberwasserseitig der Schürze angeordneten groben Steinblöcke und im Anschluss daran die Filtermatte rutschen nach unten. Einmal in Bewegung geraten, kann dieser Vorgang nicht mehr gestoppt werden. Es stellt sich schliesslich eine ausgeprägte Sickerströmung ein, die die Stabilität des gesamten Bauwerks in Mitleidenschaft zu ziehen vermag.

Bild 51

38/92/36

Ende eines Modellveruches, bei dem es zur Unterspülung der Schürze kam.

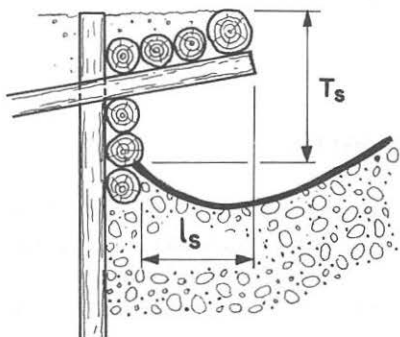


Bild 52

Definitionsskizze für den Schürzenabstand l_s vom Ueberfallholz und der Kolkentiefe T_s bei der Schürze.

Die notwendige Tiefe der Schürze, um eine derartige Unterspülung zu verhindern, kann aus den Modellversuchen bei einem Abstand $l_s = 1.2$ m zwischen Ueberfallholz und Schürze (Bild 52) angegeben werden. Die tiefste Sohlenlage bei der Schürze T_s (vom Ueberfallholz aus gemessen) lässt sich mit

$$T_s = c_9 \frac{\Delta H_w}{d_{90}^{0.1}}, \quad \text{mit } c_9 = 2.5 \text{ [m}^{0.1}\text{]} \quad (16)$$

annähern (Bild 53). Da hier ΔH_W bei sehr kleinem q massgebend wird, kann sicherheitshalber Δh eingesetzt werden (Bild 33b). Wird l_S grösser gewählt, kann T_S entsprechend abgemindert werden. Je kürzer die Rampe und je höher ΔH_W , desto kritischer wird die Situation in bezug auf die Unterspülung.

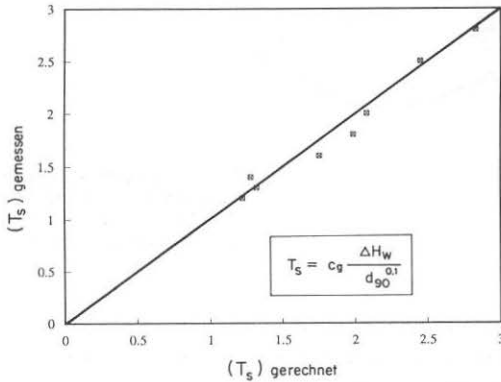


Bild 53 Die Kolktiefe T_S bei der Schürze als Funktion von ΔH_W und Sohlenbeschaffenheit (d_{90}).

Aus der beschriebenen hauptsächlichlichen Gefährdung lassen einige Empfehlungen ableiten, die zu einer erhöhten Sicherheit der Konstruktion beitragen:

- Eine lange Rampe erhöht die Distanz vom Ueberfallholz zu den für die Stabilität zentralen senkrechten Pfählen sowie zur Schürze und vermindert damit die Gefahr deren direkter Unterspülung. Bei üblichen Schwellenhöhen befindet sich die Rampe mindestens teilweise unter Wasser, so dass dadurch die statische Belastung dank des Auftriebes nicht enorm wächst.
- Die Schürze sollte auf der Oberwasserseite der senkrechten Pfähle angeordnet werden. Sie liegt damit an einer Stelle, wo der Kolk eine geringere Tiefe aufweist und eine entsprechend geringere Gefahr bedeutet, eine Unterspülung der

Schürze auszulösen (Bild 54). Zudem wird dort für die notwendige Schürzentiefe ca. 1 Rundholz weniger benötigt.

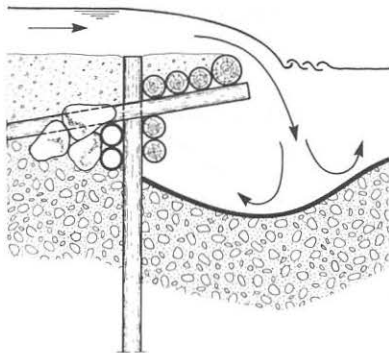


Bild 54

Die Schürze benötigt in der Position flussaufwärts der Pfähle weniger Rundhölzer, um nicht unterspült zu werden.

- Die Dichtheit nicht nur der Filtermatte selbst, sondern auch ihrer Verankerung zwischen den ersten beiden Rampenhölzern ist eine notwendige Voraussetzung für das einwandfreie Funktionieren der Holzschwelle. Dadurch muss verhindert werden, dass sich eine direkte Strömung oberwasserseitig der Rampe, durch die rundholzhohe Lücke zwischen Schürzen- und Rampenhölzern (Bild 3), zum Fischraum ausbilden kann, die wiederum die Stabilität der Steinblöcke beeinträchtigen und zudem den Fischraum mit Geschiebe füllen könnte.
- Aus dem oben Gesagten lässt sich ableiten, dass es ratsam wäre, zwischen den Blöcken und dem Sohlenmaterial eine Filterschicht anzuordnen, die die Sicherheit erhöht und die Spalten zwischen den Blöcken für die kleinen Fische freihalten würde.

Ein grundsätzlich anderes Szenarium für das Versagen einer Schwelle bestünde in der Ausbildung einer Scherfläche unter der gesamten Konstruktion hindurch (Bild 55). Die Gleitkreislänge erscheint im Verhältnis zu möglichen Druckdifferenzen zwischen Ober- und Unterwasser relativ gross, kann aber bei einem tiefen, nahe an die senkrechten Pfähle reichenden Kolk

vermindert werden. Eine grobe Rechnung für die Verhältnisse der Töss ergab jedoch, dass die Scherspannung entlang des Gleitkreises die für die Stabilität der Schwelle kritische Höhe bei weitem nicht erreicht.

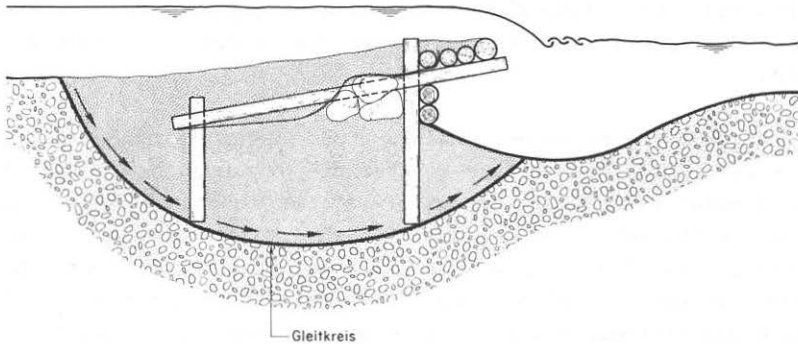


Bild 55 Hypothetische Gefährdung der Schwelle durch Ausbildung einer Scherfläche unter der ganzen Konstruktion hindurch. Die entstehenden Scherspannungen sind aber derart klein, dass dies unwahrscheinlich ist.

6. SCHLUSSFOLGERUNGEN

In den vom Amt für Gewässerschutz und Wasserbau des Kantons Zürich (AGW) im Zusammenhang mit den Vorgängen rund um eine von ihnen neu entwickelte Holzschwelle in Auftrag gegebenen Modelluntersuchungen konnten die praxisrelevanten Fragen beantwortet und zusätzlich der Gültigkeitsbereich der Aussagen über die spezielle Anwendung in der Töss hinaus erweitert werden.

Durch Beobachtung der Abfluss- und Sohlenverhältnisse im Verlauf eines Hochwassers konnten die grundsätzlichen Abläufe aufgezeigt werden. Die Schwelle wird bei einem genügend grossen Hochwasser unweigerlich eingekiest. Mit einer geeigneten Wahl der Randbedingungen lässt sich der Zustand der Einkiesung zwar verkürzen, nicht aber verhindern. Obwohl der Fischraum nach der Einkiesung vom Fluss abgeschlossen ist, bleibt er geschiebefrei und während der ganzen Zeit von grosser Turbulenz verschont. Am Ende eines Hochwassers wird der Fischraum allein durch die Strömung - ohne äussere Hilfeleistungen - wieder geöffnet.

Es konnten zudem Empfehlungen zur Vergrösserung des geschiebefrei bleibenden Fischraumes mit einfachen konstruktiven Mitteln abgegeben werden.

Prinzipiell wurden zwei verschiedene Abflusszustände mit unterschiedlichen Auswirkungen auf den Sohlenverlauf beschrieben. Bei kleinen Abflüssen taucht der Strahl nach dem Ueberfallholz und gräbt sich eine kurze, relativ tiefe Kolkform. Ein grosser Abfluss führt dagegen zu einem wellenförmigen Abfluss an der Wasseroberfläche, der infolge Walzenbildung eine Rückströmung an der Sohle induziert. Damit einher geht die Verlängerung des Kolkes und ein Rücktransport von Sohlenmaterial, der schliesslich die Trennung von Fischraum und Flusswasser bewirkt.

Die für die Einkiesung und Oeffnung des Fischaumes massgebenden Parameter sind der spezifische Abfluss q und die Wasserspiegeldifferenz ΔH_w an der Schwelle, die sich mit der Einführung der spezifischen potentiellen Energie e_p zusammenfassen lassen. Die Beschaffenheit des Sohlenmaterials spielt höchstens bei hohem Feinanteil eine Rolle, indem früher ausgebildeter Geschiebetrieb die Abtrennung des Fischaumes vom Flusswasser beschleunigen und die Oeffnung etwas hinauszögern kann.

Im übrigen stellt die Einkiesung ein eher seltenes Ereignis dar. Schwellen-Abstand und -Höhe lassen sich ohne weiteres so projektieren, dass die Einkiesung im statistischen Durchschnitt nur 1 mal jährlich erfolgt. Je höher die Schwelle gebaut wird, desto grösser ist der zur Einkiesung führende Abfluss und entsprechend seltener das Ereignis.

Um Angaben über Böschungs- und Schwellensicherung zu machen, wurden die zu den Kolkformen erhobenen Daten zur Entwicklung einer Kolkformel ausgewertet. Gebräuchliche Formeln konnten nicht auf das spezielle Problem der Holzschwelle angewendet werden. Wie beim Umschlagen wurde die Kolktiefe allgemein als Funktion von q und ΔH_w dargestellt und auf e_p zurückgeführt. Die für eine bestimmte Schwelle vom Ueberfallholz aus gemessene maximale Kolktiefe hingegen lässt sich als alleinige Funktion von ΔH_w annähern. Der ebenfalls untersuchte Einfluss der Korngrösse des Sohlenmaterials ist für die Kolkformeln nur von untergeordneter Bedeutung. Er macht sich allenfalls über eine Veränderung der Sohlenrauigkeit, damit des Wasserspiegelgefälles zwischen den Schwellen und letztlich von ΔH_w bemerkbar. Mit Angaben über den Abstand des tiefsten Kolkpunktes von der Schwelle und der Kolklänge konnte der Themenbereich des Kolkes abgerundet und damit die zur Dimensionierung der Holzschwelle und ihrer Sicherung notwendigen Angaben vervollständigt werden.

Dank

Verdankenswerterweise lieferte das AGW Modelle der Holzschwelle, die ausserordentlich sorgfältig konstruiert wurden und direkt in der Laborrinne verwendet werden konnten.

Dr. Peter Volkart, Chef der Abteilung Wasserbau, hat durch seine aufmerksame Durchsicht des Manuskripts und seine fachlichen Anregungen wesentlich zum Gelingen dieser Mitteilung beigetragen, ihm gebührt mein spezieller Dank.

Dr. Andreas Huber war mir in der Vorbereitungsphase, bei der Begehung und bei der Entnahme von Geschiebeprobe mit seiner Erfahrung eine grosse Hilfe.

Ein herzliches Dankeschön richtet sich an Eva Krätzer und Walter Thürig, die mit viel Liebe zum Detail die Figuren gestalteten und das Projekt bis zur Drucklegung begleiteten.

Ebenso verdient gemacht haben sich Paula Gisler und Bernhard Etter, die alle Wünsche nach speziellen Formaten und Kontrasthärten der Fotografien befriedigten.

Mein Dank richtet sich schliesslich an Herrn Dr. F. Raemy, der in seiner äusserst kompetenten Art für die Uebersetzung der Zusammenfassung in die französische Sprache besorgt war.

Symbole

B	mittlere Abflussbreite	[m]
c_i	dimensionsbehaftete Konstanten in empirisch ermittelten Gleichungen	
d_{90}	Korndurchmesser bei 90 % Siebdurchgang	[m]
E_k	kinetische Energie pro Zeiteinheit	[W]
E_p	potentielle Energie pro Zeiteinheit	[W]
e_k	spezifische kinetische Energie pro Zeiteinheit	[W/m]
e_p	spezifische potentielle Energie pro Zeiteinheit	[W/m]
Fr	Froude-Zahl	[-]
g	Erdbeschleunigung	9.81 [m/s ²]
h	Abflusstiefe	[m]
h_k	kritische Abflusstiefe	[m]
h_s	Abflusstiefe im Unterwasser	[m]
J_e	Längsgefälle der Energielinie	[-]
J_s	Längsgefälle der Sohle	[-]
J_u	Gefälle über die Schwellen	[-]
J_w	Längsgefälle des Wasserspiegels	[-]
k	Sohlenrauigkeit nach Strickler	[m ^{1/6} /s]
L	horizontaler Schwellenabstand	[m]
l_s	Distanz Schürze-Ueberfallholz	[m]
Q	Abfluss	[m ³ /s]
Q_m	maximaler Abfluss, Hochwasserspitze	[m ³ /s]
Q_0	Abfluss, bei dem Geschiebetrieb einsetzt	[m ³ /s]
Q_1	Abfluss, der zur Einkiesung führt	[m ³ /s]
Q_2	Abfluss, der zur Oeffnung des Fischraumes führt	[m ³ /s]
q	spezifischer Abfluss pro m Flussbreite	[m ³ /sm]
q_1	spez. Abfluss, der zur Einkiesung führt	[m ³ /sm]
q_m	spez. Abfluss, bei dem die Kolktiefe maximal wird	[m ³ /sm]
q_2	spez. Abfluss, der zur Oeffnung des Fischraumes führt	[m ³ /sm]
q_s	Geschiebebeschickung	[kg/s]
q'	Geschiebetransport-Kapazität	[kg/s]
r	Energiequotient e_k/e_p	[-]
r_1	Energiequotient bei Einkiesen	[-]

r_2	Energiequotient bei Oeffnen des Fischraumes	[-]
T	maximale Kolktiefe ab Kote Ueberfallholz	[m]
T_s	Kolktiefe bei der Schürze ab Kote Ueberfallholz	[m]
t	maximale Kolktiefe vom ungestörten Sohlenszustand aus	[m]
v	mittlere Abflussgeschwindigkeit	[m/s]
v_k	kritische Abflussgeschwindigkeit	[m/s]
x_1	horizontale Entfernung des tiefsten Kolkpunktes vom Ueberfallpunkt	[m]
x_2	notwendige Länge des speziellen Kolkschutzes am Ufer	[m]
β_i	allgemeine Exponenten	[-]
λ	Modellmassstab	[-]
ΔH_e	Energielinienendifferenz an der Schwelle	[m]
ΔH_w	Wasserspiegeldifferenz an der Schwelle	[m]
ΔH_{wm}	Wasserspiegeldiff., bei der die Kolktiefe maximal wird	[m]
Δh	Höhendifferenz zwischen zwei Schwellen	[m]
ρ	Dichte des Wassers	1000 [kg/m ³]

Literatur

Eidg. Amt für Strassen- und Flussbau (1974): "Die grössten bis zum Jahre 1969 beobachteten Abflussmengen von Schweizerischen Gewässern."

Eidg. Amt für Wasserwirtschaft (1982): "Hydrografisches Jahrbuch der Schweiz."

Fehr, R. (1987): "Geschiebeanalysen in Gebirgsflüssen." Mitteilung Nr.92 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich.

Göldi, C. und Niederer, H. (1990): "Naturnaher Ausbau kleiner Bäche." Schw. Ingenieur und Architekt, Vol.108, Nr.10, 258-260.

Kotoulas, D. (1967): "Das Kolkproblem unter besonderer Berücksichtigung der Faktoren "Zeit" und "Geschiebemischung" im Rahmen der Wildbachverbauung." Schweizerische Anstalt für das forstliche Versuchswesen, Vol.43, H.1.

Machado, L.I. (1982): "O Sistema de Dissipacao de Energia Proposto para a Barragem de Xingo." Trans. of the Int. Symp. on the Layout of Dams in Narrow Gorges, ICOLD, Brazil.

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 Kolk-tiefen flussabwärts eines Stauwerkes." Wasser- und Energiewirtschaft, Nr.2.

Strickler, R. (1923): "Beiträge zur Frage der Geschwindigkeitsformel und der Rauigkeitszahlen für Ströme, Kanäle und geschlossene Leitungen." Mitteilung Nr.16 des Eidg. Amtes für Wasserwirtschaft, Bern.

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.

VAW-Bericht 951 (1988): "Holzschwellen in der Töss." Bericht zuhanden des Amtes für Gewässerschutz und Wasserbau des Kantons Zürich, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich.

Veronese, A. (1937): "Erosion de Fond an aval d'une décharge." IAHR Meeting for Hydraulic Works, Berlin.

Volkart, P. (1972): "Die Stabilisierung von Flussläufen mittels einer Folge von Querswellen." Mitteilung Nr.6 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich.

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.

ANHANG

Berechnungsbeispiele

Zur Veranschaulichung der in dieser Mitteilung vorgestellten Untersuchungsergebnisse werden im Anhang die Berechnungsgänge anhand einer Holzschwelle in der Töss durchgespielt. Die Beispiele werden so gewählt, dass einige Diagramme aus dem Hauptteil hier wieder Verwendung finden.

A1 Abtrennung und Oeffnung des Fischraumes

Zu diesem Themenbereich sind zwei Fälle denkbar:

- A1.1 Eine Schwelle wird für einen bestimmten Fluss projektiert, Schwellenhöhe Δh und -abstand L werden gesucht aufgrund festzulegender Abflüsse q_1 und q_2 , die zum Abtrennen resp. zum Oeffnen des Fischraumes führen. Ist die Abflusscharakteristik aus statistischer Datenerhebung bekannt, kann der Dimensionierung die gewünschte statistische Wiederkehrens-Häufigkeit einer Einkiesung zugrunde gelegt und daraus q_1 gefordert werden.
- A1.2 An einer bereits gebauten Schwelle soll abgeschätzt werden, bei welchen Abflüssen q_1 und q_2 die Abtrennung resp. die Oeffnung des Fischraumes zu erwarten ist oder mit welchen Wiederkehrensintervallen gerechnet werden muss.

A1.1 Im untersuchten Tössabschnitt sollen Schwellenhöhe Δh und -abstand L bestimmt werden, so dass eine Einkiesung erst bei $q_1 = 2 \text{ m}^3/\text{sm}$ zu erwarten ist (entspricht bei Neftenbach einem 1-jährlichen Hochwasser). Im weiteren ist das Gefälle über die Schwellen mit $J_u = 5 \text{ ‰}$ vorgegeben.

Lösung

Die notwendige Wasserspiegeldifferenz ΔH_{w1} an der Schwelle wird mit Gl. (3) oder grafisch aus Bild 41 bestimmt:

$$\Delta H_{w1} = c_1 q_1^{0.8} = 0.31 \text{ [m]}.$$

Wie in Kap. 5.2 erwähnt, reicht dieses Ergebnis zur Projektierung der Schwelle nicht aus. Erst über die Ermittlung des Wasserspiegelgefälles J_w zwischen den Schwellen ergibt sich der Zusammenhang zu den gesuchten Δh und L .

Für unser Beispiel kann aus Bild 33a für $q = 2 \text{ m}^3/\text{sm}$ ein J_w von 2.6 ‰ herausgelesen werden. Dies muss normalerweise mit einer Staukurvenrechnung abgeschätzt werden. Mit ΔH_{w1} und J_{w1} lässt sich nun der Zusammenhang von Δh und L grafisch darstellen (Bild A1, wie Bild 42b). Wird die Linie

$$\Delta h = \Delta H_{w1} + L J_{w1}$$

mit dem vorgegebenen Gefälle über die Schwellen $J_u = 5 \text{ ‰}$ geschnitten (Bild A1), ergeben sich Δh und L :

$$\Delta H_{w1} + L J_{w1} = L J_u$$

$$L = \frac{\Delta H_{w1}}{J_u - J_{w1}} = 130 \text{ [m]}$$

$$\Delta h = L J_u = 0.65 \text{ [m]}$$

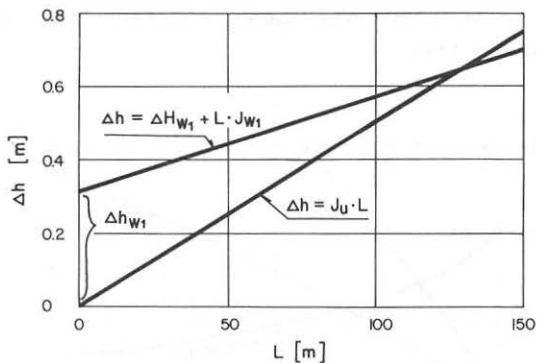


Bild A1 Grafik zur Ermittlung der gesuchten Kombination von Schwellenhöhe und -abstand.

Wird das Gefälle J_u über die Schwellen nicht als fix betrachtet, kann mit den Kombinationen von Δh und L entlang der Linie $\Delta h = \Delta H_{W1} + L \cdot J_{W1}$ frei gespielt und J_u über mehrere Schwellen hinweg ausgeglichen werden.

A1.2 In der Töss sind Schwellen mit einer Höhe $\Delta h = 0.4$ m und einem Abstand $L = 80$ m eingebaut. Bei welchen q_1 und q_2 kommt es zur Abtrennung resp. zur Oeffnung des Fischraumes?

Lösung

Mit Staukurvenberechnungen muss zuerst das Wasserspiegelgefälle J_w als Funktion des spezifischen Abflusses q beschrieben werden. Für die Töss ist dies in Bild 33a dargestellt. In der Folge lässt sich die Betriebslinie $\Delta H_w = f(q)$ daraus ableiten (Bild A2):

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

wobei J_w die in Bild 33a angegebene Funktion von q - also keine Konstante - ist.

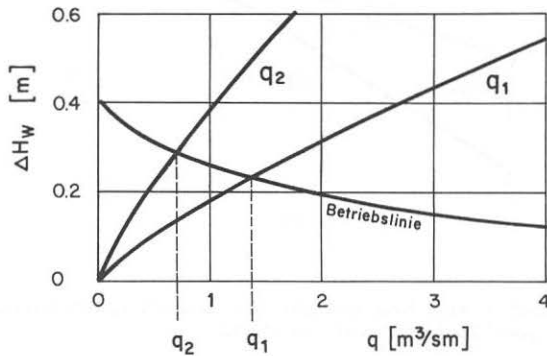


Bild A2 Grafische Bestimmung der Abflüsse q_1 und q_2 , die zu Abtrennung und Oeffnung des Fischraumes führen.

Die Schnittpunkte der Betriebslinie mit den in den Gl. (3) und (4) beschriebenen Funktionen zur Bestimmung von q_1 und q_2 (s. Kap. 5.2, Bild 42a), ergeben die Betriebspunkte, die zur Abtrennung resp. zur Oeffnung des Fischraumes führen (Bild A2). In unserem Fall sind dies

$$q_1 \approx 1.4 \quad [m^3/sm]$$

$$q_2 \approx 0.7 \quad [m^3/sm] .$$

A2 Kolkberechnungen

Die Beschreibung der Kurve, die alle Kolkstiefen einer bestimmten Schwelle als Funktion von q miteinander verbindet (in Bild 40 für die gemessenen Modellwerte aufgezeichnet), ist aufwendig. Die zu diesem Zweck entwickelte Gl. (12) bezieht die Kolkstiefe auf den Wasserspiegel. Um sich ein Bild vom tatsächlichen Ausmass der Kolkstiefen bei verschiedenen Abflüssen machen zu können, müssen sie erst auf denselben fixen Nullpunkt - z.B. das Ueberfallholz - bezogen werden.

Es wird hier folglich ein vereinfachtes Verfahren vorgestellt, das den Anforderungen der Praxis im Normalfall genügen dürfte. Zur Beschreibung des Kolkverlaufes im Hinblick auf Böschungs- und Schwellensicherung werden in der Folge die drei massgebenden Kolkpunkte bestimmt:

- A2.1 Lage und Tiefe des Maximalkolkes, der bei mittleren Abflüssen erzielt wird.
- A2.2 Maximale Kolkstiefe bei der Schürze, die bei sehr kleinen Abflüssen auftritt.
- A2.3 Kolklänge, bei der die Sohlenlage im Bereich üblicher Sohlenschwankungen liegt; für ihre Bestimmung sind Spitzenabflüsse massgebend. Es stellt sich daher die Frage, auf welches Hochwasser die Sicherungsmassnahmen dimensioniert werden sollen.

Dieses Verfahren stellt für die Abschätzung des Kolkverlaufes eine wesentliche Erleichterung bei einer zufriedenstellenden Näherung dar. Die aufwendigeren Rechnungen gemäss Gl. (12) würden im übrigen auch nur die Koten des jeweils tiefsten Kolkpunktes ergeben und daher die Durchführung der Abschätzungen A2.2 und A2.3 nicht ersetzen. An der unsicheren Bestimmung der Kolklänge würde sich damit also nichts ändern.

Die folgenden Rechenbeispiele werden für die in A1.1 dimensionierte Töss-Schwelle mit der Höhe $\Delta h = 0.65$ m und dem Abstand $L = 130$ m durchgeführt.

A2.1 Lage x_1 und Tiefe T des Maximalkolkes vom Ueberfallholz aus sollen abgeschätzt werden.

Lösung

Entsprechend Bild 48b müssen zuerst die Bedingungen bestimmt werden, die den Maximalkolk verursachen. Die Betriebslinie

$$\Delta H_w = \Delta h - L J_w(q) \quad (J_w(q) \text{ aus Bild 33a})$$

wird mit der durch Gl. (14) beschriebenen Funktion

$$\Delta H_w = c_7 \frac{q_m^{1.2}}{d_{90}^{0.3}} \quad (d_{90} = 0.085 \text{ m})$$

geschnitten (Bild A3).

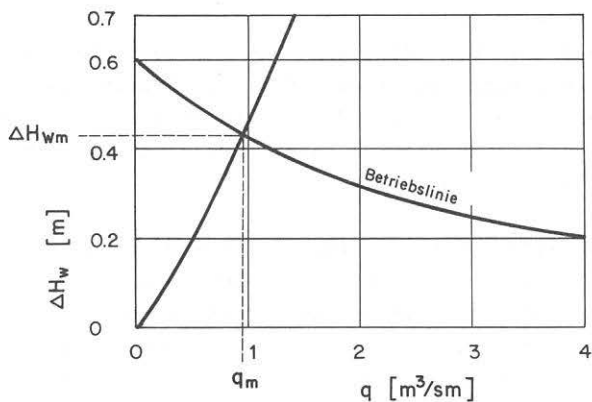


Bild A3 Grafische Bestimmung der Bedingungen q_m und ΔH_{wm} , die zur Bildung des Maximalkolkes führen.

Als massgebende Bedingungen können

$$\Delta H_{wm} = 0.43 \text{ [m]} \quad \text{und} \quad q_m = 0.95 \text{ [m}^3/\text{sm]}^3$$

aus Bild A3 herausgelesen werden. ΔH_{wm} in Gl. (13) für die Maximaltiefe T eingesetzt, ergibt

$$T = c_6 \Delta H_{wm}^{0.8} = 2.3 \text{ [m]} .$$

Der entsprechende horizontale Abstand x_1 vom Ueberfallholz errechnet sich durch Einsetzen von q_m in Gl. (15):

$$x_1 = c_8 q^{0.65} = 2.1 \text{ [m]} .$$

A2.2 Für die selben Randbedingungen wie in A2.1 soll die Tiefe T_s der Sohle bei der Schürze vom Ueberfallholz aus abgeschätzt werden.

Lösung

Es kommt Gl. (16) zur Anwendung

$$T_s = c_9 \frac{\Delta H_w}{d_{9,0}^{0.1}} , \quad \text{mit } d_{9,0} = 0.085 \text{ m} .$$

Bereits in Kap. 5.5 wurde erwähnt, dass sich ΔH_w mit Δh annähern lässt. Die Modellversuche haben gezeigt, dass die tiefsten Sohlenlagen bei der Schürze ausschliesslich bei sehr geringen Abflüssen zustande kommen, deren ΔH_w gemäss den Betriebslinien nur unwesentlich kleiner sind als Δh . Gl. (16) wurde für den Fall bestimmt, dass die Distanz l_s der Schürze zum Ueberfallholz 1.2 m beträgt, was einer bis anhin üblichen Rampenlänge entspricht. Für grössere l_s wird T_s kleiner, kürzere l_s sind nicht zu empfehlen.

Mit der Schwellenhöhe $\Delta h = 0.65 \text{ m}$ ergibt sich damit die Sohlenlage bei der Schürze zu

$$T_s = c_9 \frac{\Delta h}{d_{9,0}^{0.1}} = 2.1 \text{ [m]} .$$

A2.3 Es bleibt noch die Kolklänge x_2 vom Ueberfallholz aus abzuschätzen.

Lösung

Wie erwähnt ist hier die Frage nach dem Abfluss, auf den die Sicherungsmassnahmen sinnvollerweise ausgebaut werden sollen, von zentraler Bedeutung. Wie in Kap. 4.2 beschrieben, treten ab einem gewissen Spitzenabfluss andere Mechanismen auf, als sie für die Kolkbildung massgebend sind. Bei vorwärts gerichteter Strömung über die gesamte Abflusstiefe treten Dünen auf, die den Kolk ausgleichen. Der grösste spezifische Abfluss, der zur Bestimmung der Kolklänge begründet erscheint, liegt im Bereich zwischen 4 und 6 m^3/sm .

Für das Rechenbeispiel wird von $q = 5 \text{ m}^3/\text{sm}$ ausgegangen. In Kap. 5.4.2 wird aus Bild 50 im Bereich grösserer Abflüsse für x_2 der doppelte Betrag von x_1 herausgelesen. Somit ergibt sich für die Kolklänge

$$x_2 = 2 \cdot c_s \cdot q^{0.65} = 12.5 \text{ [m]} .$$

Die drei in A2.1, A2.2 und A2.3 errechneten Punkte können nun in einem Koordinatensystem mit dem Ueberfallholz als Referenzpunkt aufgezeichnet werden (Bild A4). T_s als minimale Schürzentiefe ist unbedingt einzuhalten. Für die Böschungssicherung darf die Kolklinie mit dem Faktor 0.8 reduziert werden.

Der nur unwesentlich grössere Maximalkolk T im Vergleich zur Tiefe T_s bei der Schürze ist eine Folge des grossen Schwellenabstandes L . Dies führt zu einer Betriebslinie, die im Bereich der die maximalen Kolktiefe verursachenden Abflüsse bereits relativ geringe Wasserspiegeldifferenzen ΔH_w aufzeigt. Die selbe Schwellenhöhe bei geringerem Abstand würde einen eindeutig tieferen Maximalkolk ergeben, während T_s an der Schürze davon unbeeinflusst bliebe.

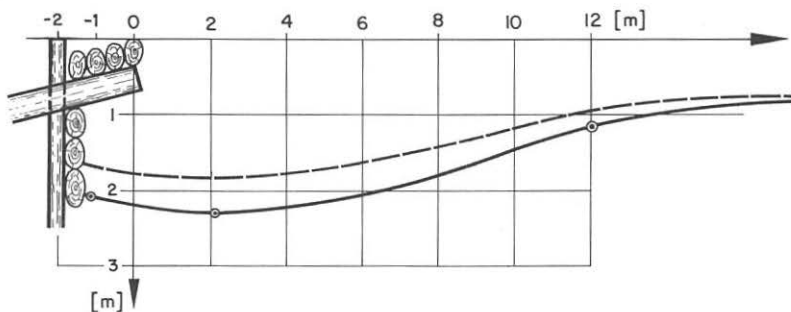


Bild A4 Linie aller zu erwartenden tiefsten Kolkpunkte für die gegebene Schwellenkonstellation von $\Delta h = 0.65$ m und $L = 130$ m. Errechnet wurden die 3 eingezeichneten Punkte. Gestrichelt ist die für die Böschungssicherung massgebende Linie angegeben, deren Tiefenlage gegenüber der Flussmitte um den Faktor 0.8 reduziert wurde.

