

Hydraulische Entwurfs- und Bemessungskriterien für Sohlschwellen

Hydraulic Criteria for the Design of Weir Sills

Kurzfassung / Summary

Eine Verbesserung der insbesondere im Niedrigwasserbereich bis heute oft sehr mangelhaften Abflußbestimmung kann mit dem Einbau von Sohlschwellen als Meßbauwerke an Pegelanlagen erzielt werden. Neben meßtechnischen und baulichen Problemen müssen hierbei Belange der Fischerei und des Wassersports mit berücksichtigt werden. Im folgenden wird ein entsprechendes Bemessungsverfahren für Sohlschwellen entwickelt.

By installation of weir sills as discharge measurement structures at water gauges it is possible to improve the so far inadequate determination of low discharges. Besides the problems of measurement and construction, attention has to be paid to fishery and water sports. An adequate method of dimensioning weir sills in rivers is developed.

1 Einführung

Pegelmessstellen an kleinen und mittleren Gewässern zeigen häufig eine unzureichende Meßgenauigkeit insbesondere im Bereich der Niedrigwasserabflüsse. Eine Verbesserung der Abflußbestimmung in diesem Bereich kann durch den Einbau von Sohlschwellen erzielt werden, durch die ein von Verkräutung und Geschiebe unabhängiger Meßquerschnitt geschaffen wird, welcher einen eindeutigen Zusammenhang zwischen Oberwasserstand und Abfluß liefert [1, 2]. Andererseits sollen diese Einbauten bei Hochwasserabflüssen keinen nennenswerten Aufstau hervorrufen.

Die Wasserwirtschaftsverwaltung des Landes Baden-Württemberg führt derzeit eine Sanierung ihres Pegelnetzes durch [3], in dessen Rahmen das Institut für Wasserbau der Universität Stuttgart eine systematische Modelluntersuchung zur hydraulischen Gestaltung von Sohlschwellen unternahm. Hierbei waren neben den Fragen der hydraulischen und baulichen Gestaltung des Meßbauwerks auch die Belange der Fischerei [4] und des Kanusports [5] mit zu berücksichtigen. Die nachfolgenden Überlegungen beziehen sich auf kleinere und mittlere Gewässer mit Einzugsgebieten von weniger als 300 km², mit Gewässerbreiten im Bereich von 5–30 m und folgenden Abflußverhältnissen:

Zentralabfluß ZQ:	2 bis 10 m ³ /s
Mittelwasserabfluß MQ:	5 bis 20 m ³ /s
Hochwasserabfluß HHQ:	einige 100 m ³ /s

2 Entwurfskriterien

2.1 Meßtechnische Gesichtspunkte

Eine typische Pegelkurve ohne Sohlschwelle ist in *Bild 1* dargestellt. Soll durch den Einbau einer Sohlschwelle die Meßgenauigkeit im Bereich niedriger Abflüsse erhöht werden, so ist zunächst für jeden Standort festzulegen, bis zu welchem Bemessungsabfluß Q_B eine eindeutige Abflußbestimmung durch die Sohlschwelle gewährleistet werden soll, und ab welchem Abfluß Q_R die Aufstauwirkung der Sohlschwelle vernachlässigbar klein sein soll [6a]. Die prinzipielle Veränderung der Pegelkurve durch den Einbau der Sohlschwelle ist in *Bild 1* dargestellt. Die Sohlschwelle ist nun so zu dimensionieren, daß bis zum Bemessungsabfluß Q_B vollkommener Überfall und damit eindeutige Abflußverhältnisse an der Meßstelle herrschen. Als Grenze der Rückstaufreiheit wird derjenige Abfluß Q_R definiert, bei dem der zusätzliche Aufstau Δy zufolge der Sohlschwelle nur noch 1% der entsprechenden Normalabflußtiefe y_N ausmacht. Es liegt nahe, als Bemessungsabfluß den Bereich des Zentralabflusses und als Grenze für die Rückstaufreiheit den Mittelwasserabfluß anzusetzen:

$$\begin{aligned} Q_B &\approx ZQ \\ Q_R &\approx MQ \end{aligned}$$

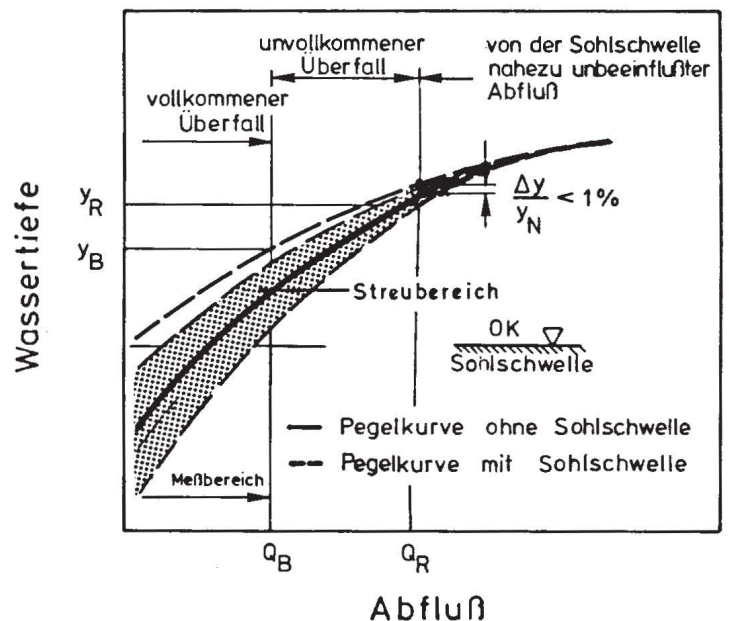


Bild 1: Veränderung der Pegelkurve durch den Einbau einer Sohlschwelle

2.2 Bauliche Gesichtspunkte

Erosionserscheinungen unterhalb der Sohlschwelle können die Standsicherheit des Bauwerks gefährden. Neben einer ausreichenden Gründung und konstruktiven Durchbildung des Bauwerks ist daher der Entwurf einer entsprechenden Kolk sicherungsstrecke erforderlich. Durch entsprechende Gestaltung und Befestigung dieses Bereichs ist ein Angriff der Sohle und der Böschungen im Bereich des Wechselsprungs hinter der Sohlschwelle und im Bereich des Übergangs zum natürlichen Flußprofil zu vermeiden. Diese Maßnahmen sind sowohl aus landschaftsgestalterischen als auch aus Kostengründen möglichst einfach und gering zu halten.

2.3 Belange der Fischerei

Um einen Fischeaufstieg vom Unterwasser ins Oberwasser in einem möglichst großen Abflußbereich zu ermöglichen, sollte die Wasserspiegeldifferenz an der Sohlschwelle auf 0,4 bis 0,6 m begrenzt bleiben [4]. Außerdem sind Ruhe zonen mit geringer Fließgeschwindigkeit im Unterwasser direkt hinter der Sohlschwelle erforderlich. Durch eine geeignete Sohlschwellenform muß zudem dafür Sorge getragen werden, daß der Überfallstrahl möglichst weit von der Sohlschwelle entfernt ins Unterwasserpolster eintaucht. Dadurch finden die Fische an der Unterwasserseite der Sohlschwelle im Schutz des Überfallstrahls eine Warteposition vor dem Sprung ins Oberwasser. Durch entsprechende Ausbildung der Kolk sicherungsstrecke sind vor allem

in den böschungsnahen Bereichen im Unterwasser weitere Ruhe- zonen und somit den Fischeaufstieg begünstigende Strömungs- verhältnisse zu schaffen.

2.4 Belange des Kanusports

Für Kanusportler haben sich in der Vergangenheit an Sohl- schwellen und Abstürzen energiereiche Grundwalzen mit hori- zontaler Achse als besonders gefährlich erwiesen, wie sie beim Eintauchen des Überfallstrahls in das Unterwasserpolster und beim Wechselsprung entstehen. Gelangt der Kanufahrer in die Kreisbewegung einer ausgeprägten Walze mit entsprechend ho- hem Energiegehalt, dann kann er sich kaum mehr befreien [5]. Deshalb ist durch geeignete Bauwerksgestaltung das Entstehen energiereicher Grundwalzen zu vermeiden. Eine Verminderung der von der Größe des Abflusses und der Wasserspiegeldifferenz abhängigen Grundwalzenintensität wird durch eine Reduzie- rung der Einbauhöhe des Bauwerks erzielt. Nach Erfahrungs- werten des Württembergischen Kanuverbandes gelten Absturz- höhen bis zu 0,4 m als akzeptabel und für Kanusportler gefahr- los.

2.5 Entwurfsziel

Die genannten Entwurfskriterien führen zu widersprüchlichen Zielvorstellungen, denen durch entsprechende Gestaltung und Dimensionierung des Bauwerks Rechnung getragen werden muß. Während aus Gründen der Meßtechnik eine möglichst große Schwellenhöhe erstrebenswert ist, muß die Einbauhöhe aus Gründen der Hochwasserrückstaufreiheit begrenzt werden. Für den Fischeaufstieg ist eine möglichst tiefe Kolkwanne direkt hinter der Sohlschwelle im Unterwasserbett günstig; die Belan- ge des Kanusports hingegen erfordern geringere Unterwasser- tiefen, um das Entstehen ausgeprägter Grundwalzen zu vermei- den. Zur Erfüllung der verschiedenen Anforderungen muß der entwerfende Ingenieur eine geeignete Wahl der Sohlschwellen- höhe und Flankenneigung, der Grundriß- und Querschnittsform sowie der Kolsicherungsstrecke treffen.

3 Bemessung von Sohlschwellen für Pegelanlagen

3.1 Sohlschwellenhöhe

Die erforderliche Sohlschwellenhöhe ergibt sich aus der Forde- rung, daß der Abfluß über die Sohlschwelle bis zum Bemessungs- abfluß Q_B rückstaufrei erfolgen soll (Bild 2). Als Grenzbedin- gung für beginnenden Rückstau wurde aus den Modelluntersu- chungen für vielerlei Sohlschwellen- und Gerinneformen folgen- de Beziehung ermittelt [6b]:

$$\text{Rückstaugrenze bei } y_{uw} \approx \frac{1}{2} y_w$$

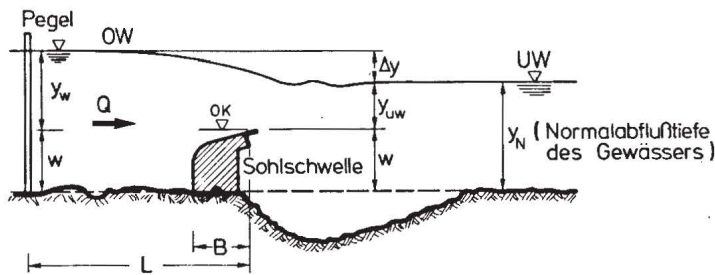


Bild 2: Definitionsskizze

In Bild 3 sind beispielhaft die Meßergebnisse eines Versuches dargestellt, aus denen die Grenze des vollkommenen Überfalls (Oberwasserstand unabhängig vom Unterwasserstand) deutlich sichtbar wird.

Für die iterative Bestimmung der Schwellenhöhe w ist nun zu- nächst die Normalabflusstiefe y_N im ungestörten Flußbett beim Bemessungsabfluß Q_B zu ermitteln. Sodann ist eine Wehrschwel- lenhöhe w anzunehmen, die in jedem Fall kleiner als diese Nor- malabflusstiefe sein muß und mit Rücksicht auf die Fischerei-

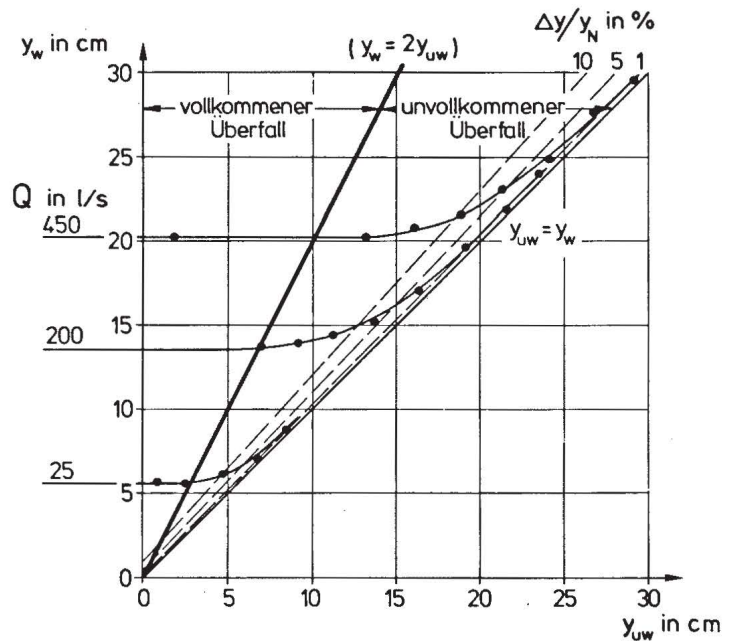


Bild 3: Ober- und Unterwasserstände bei gegebenen Durchflüssen (Sohl- schwellenhöhe 10 cm, Sohlschwellenbreite 12 cm, Neigung der Seiten- flanken 1:20)

und Kanubelange nach Möglichkeit 0,4 m nicht überschreiten sollte. Für die gewählte Schwellenhöhe ist nach Festlegung von w die rechnerische Oberwasserhöhe y_w am Pegel zu ermitteln (s. Bild 2 und Abschnitt 3.4). Anhand der so ermittelten Oberwas- ser- und Unterwasserstände ist dann zu prüfen, ob die Bedin- gung eines vollkommenen Überfalls bis zum Bemessungsabfluß Q_B gewährleistet ist.

Für die so bestimmte Schwellenhöhe ist weiter zu prüfen, ob bei größerem Abfluß ($Q > Q_R$) ein störender Aufstau, d.h. eine Wasserspiegeldifferenz zufolge der Sohlschwelle von größer als 1% der Normalabflusstiefe, zu erwarten ist. Zur Abschätzung dient eine ebenfalls aus den Modelluntersuchungen gewonnene empirische Beziehung. Hierzu wird die Normalabflusstiefe mit der (fiktiven) Überfallhöhe y_w verglichen, die sich beim Ab- fluß Q_R und vollkommenem Überfall einstellen würde. Die Be- dingung der Rückstaufreiheit war bei allen Modellversuchen er- füllt für

$$y_N(Q_R) \geq w + 2 y_{w, \text{vollk.}}(Q_R)$$

Für den Abfluß Q_R kann die fiktive Überfallhöhe $y_{w, \text{vollk.}}$ an- hand der Abflußbeziehungen in Abschnitt 3.4 ermittelt und damit die Bedingung der Rückstaufreiheit überprüft werden.

3.2 Grundrißform

Die Anordnung der Sohlschwelle im Grundriß ist vor allem für die Energieumwandlung im Unterwasser sowie für die Kolkbil- dung von vorrangiger Bedeutung. Verschiedene Grundrißformen wurden deshalb in einem Modell mit einer beweglichen Sand- sohle im Hinblick auf die Kolkbildung untersucht [6c]. Typi- sche Kolkbilder einer Versuchsreihe mit drei verschiedenen Grundrißformen sind in Bild 4 dargestellt. Bei einer rechtwink- lig zur Flußachse verlaufenden Sohlschwelle ergeben sich Sei- tenkolke unmittelbar hinter der Schwelle sowie ein entsprechend stromab liegender Mittenkolk. Eine gegen die Fließrichtung ab- gewinkelte Grundrißform verstärkt die ohnehin vorhandene Konzentration der Energieumwandlung zur Gerinnemitte hin, so daß ein verstärkter Angriff der Sohle in diesem Bereich statt- findet. Das gesamte Abflußbild bei dieser Grundrißform ist für die Belange der Fischerei (keine Ruhe zonen im Bereich des Auf- stiegs) und des Kanusports (ausgeprägte intensive Grundwalze) ungünstig. Im Gegensatz dazu bewirkt eine in Fließrichtung ab- gewinkelte Sohlschwellenform durch die Umlenkung des Über- fallstrahls zu den Seitenböschungen hin einen verstärkten An- griff der Böschungen und führt zu einer ausgeprägten Kolkbank

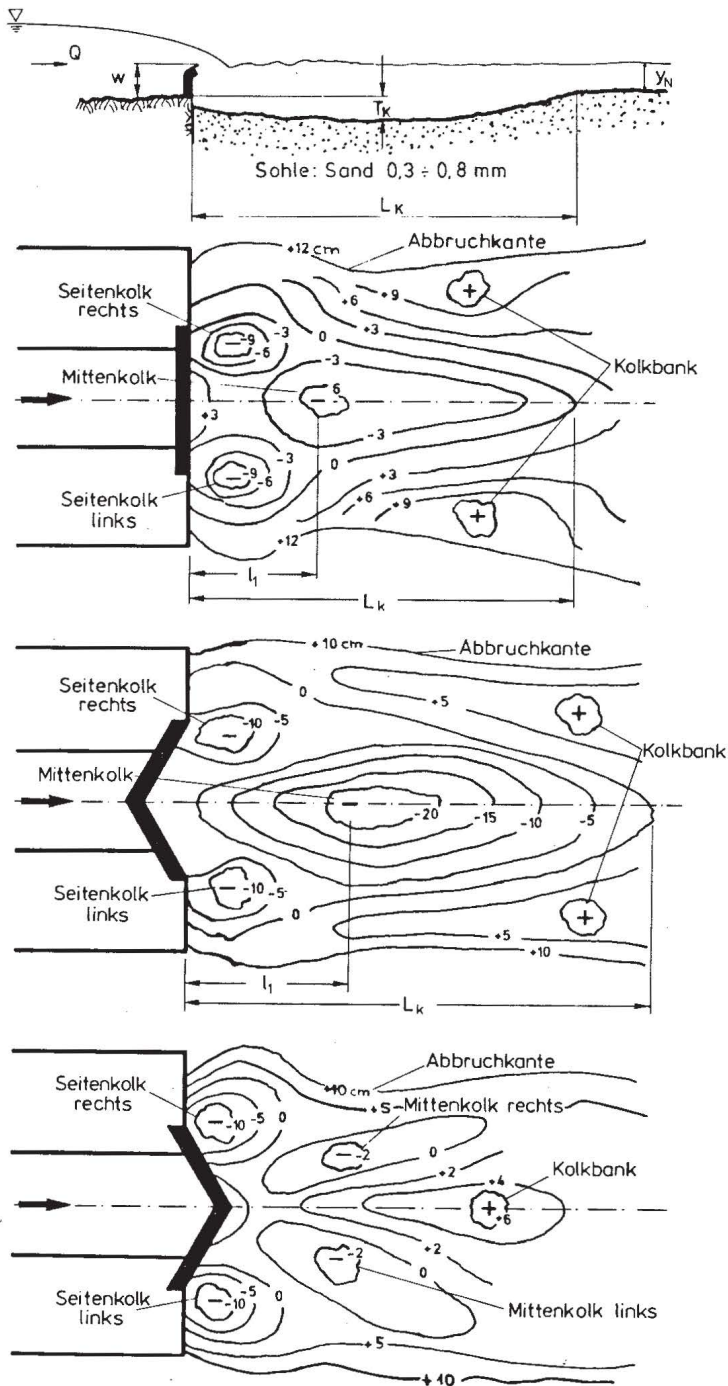


Bild 4: Kolkstrukturen an Sohlschwellen mit verschiedenen Grundrißformen (Abfluß $Q = 50 \text{ l/s}$, Normalabflußtiefe $y_N = 8 \text{ cm}$, Sohlschwellenhöhe $w = 5 \text{ cm}$)

auf der Gerinneachse, die möglicherweise zu Rückstau führen kann. Auch diese Grundrißform weist ein für Fischerei und Kanusport ungünstiges Abflußbild auf (kleine Ruhezone, Beschleunigung zu den Böschungen hin, Kolkbank).

Als Ergebnis der Modellversuche ist daher zu empfehlen, Sohlschwellen im Grundriß gerade und rechtwinkelig zur Flußachse anzuordnen.

3.3 Querschnittsform

Der Querschnitt der Sohlschwelle soll strömungsgünstig ausgebildet sein und stabile und eindeutige Abflußverhältnisse gewährleisten. Anlandungen im Staubereich vor der Sohlschwelle, wie sie in der Natur stets zu erwarten sind, dürfen keinen Einfluß auf die Pegelkurve im Niedrigwasserbereich haben. Aufgrund der Modellversuche sowie unter Berücksichtigung der Anforderungen der Fischerei wurde eine insgesamt als günstig erachtete Querschnittsform entwickelt, wie sie in Bild 5 dargestellt ist [6c]. Durch die kreisförmige Abrundung an der Ober-

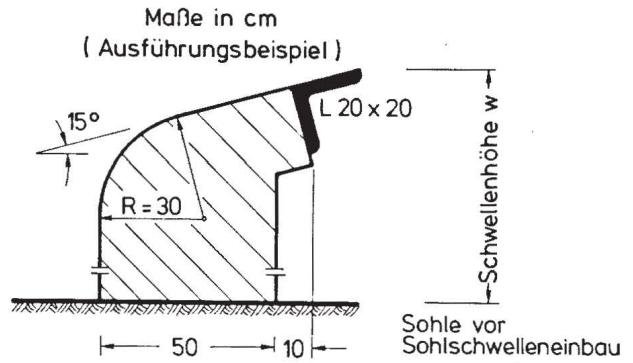


Bild 5: Im Modellversuch optimierte Sohlschwellenform

wasserseite und die unter 15° gegen die Horizontale geneigte Oberfläche mit angesetzttem Winkelprofil als Überfallkante ergibt sich ein bautechnisch einfaches und strömungsgünstiges Querschnittsprofil. Das aufgesetzte Winkelprofil bildet zusammen mit dem Sohlschwellenkopf eine Art Überfall schnabel, unter dem die erforderliche seitliche Belüftung gut untergebracht werden kann. Die scharfe Überfallkante gewährleistet bei ausreichender Belüftung eine stabile Beziehung zwischen Wasserstand und Abfluß, die durch Feststoffablagerungen vor der Sohlschwelle nicht meßbar verändert wird. Es zeigte sich zudem, daß solche Ablagerungen bei größeren Abflüssen nahezu vollständig ausgeräumt werden. Auch für den Fischaufstieg bei besonders kritischen Abflußzuständen (vollkommener Überfall) wirkt diese Form günstig. Infolge der schräg ansteigenden Überfallkante taucht der Strahl relativ weit von der Schwelle entfernt ins Unterwasserpolster ein, wodurch zwischen Schwelle und Überfallstrahl eine relativ ausgedehnte Ruhezone für Fische entsteht.

3.4 Neigung der Seitenflanken

Zur Einhaltung der erforderlichen Mindestüberfallhöhen auch bei kleinsten Abflüssen empfiehlt es sich, die Sohlschwelle ausgehend vom Mittelstich in Flußachse symmetrisch nach den Seiten hin mit geringer Neigung ansteigen zu lassen (Bild 6). Durch eine Steigerung dieser Flankenneigung m_1 kann – ähnlich wie bei Dreiecksmeßwehren – die Meßempfindlichkeit und Ablesegenauigkeit der Pegelmeßstelle erhöht werden. Andererseits wird durch eine stärkere Neigung auch die Aufstautendenz erhöht, so daß die Flankenneigung nicht zu groß gewählt werden sollte (Obergrenze z.B. 1:10).

	$y_w \leq s$ $Q = c_Q \frac{8}{15} \sqrt{2g} m_1 y_w^{2.5}$
	$y_w > s$ $Q = c_Q \frac{8}{15} \sqrt{2g} [m_1 y_w^{2.5} - (m_1 - m_2) (y_w - s)^{2.5}]$
	$Q = c_Q \frac{2}{3} \sqrt{2g} [b + \frac{4}{5} y_w m_2] y_w^{3/2}$

Bild 6: Überfallformeln für Sohlschwellen

Analog zur Herleitung der bekannten Überfallformeln für scharfkantige Wehre wurden für die hier untersuchten Sohlschwellen entsprechende Überfallformeln hergeleitet, die in Bild 6 dargestellt sind [6b]. Mit Hilfe dieser Beziehungen läßt sich die Pegelkurve einer Sohlschwelle rechnerisch bestimmen, sofern der von der Querschnittsform abhängige Abflußbeiwert C_Q bekannt ist. Bild 7 enthält gemessene Abflußbeiwerte für den in Bild 5 dargestellten fischereifreundlichen Querschnitt bei zwei verschiedenen Flankenneigungen. Für andere Querschnittsformen ergaben sich Zahlen im Bereich von 0,6 bis 0,95.

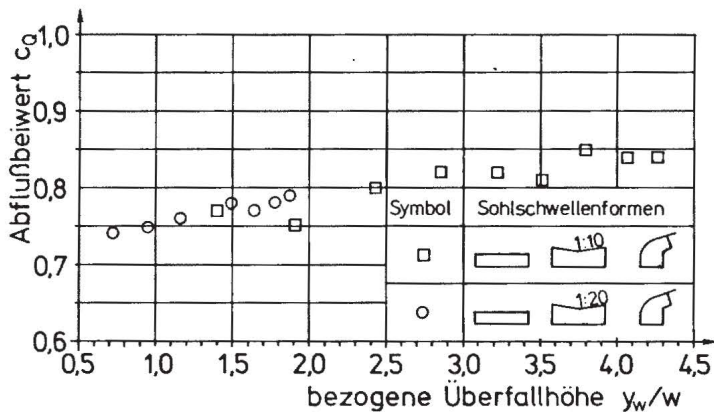


Bild 7: Abflußbeiwerte für vollkommenen Überfall

Für einen angenommenen Abflußbeiwert C_Q kann somit für den geplanten Pegel eine rechnerische Abflußkurve bestimmt werden, mit deren Hilfe sich die eingangs gestellten Forderungen (vollkommener Überfall bis Q_B , näherungsweise Rückstaufreiheit ab Q_R) überprüfen lassen.

Die in Bild 6 dargestellten Abflußbeziehungen dienen zur Dimensionierung des Bauwerks und können selbstverständlich die sorgfältige und genaue Eichung durch Flügelmessungen vor

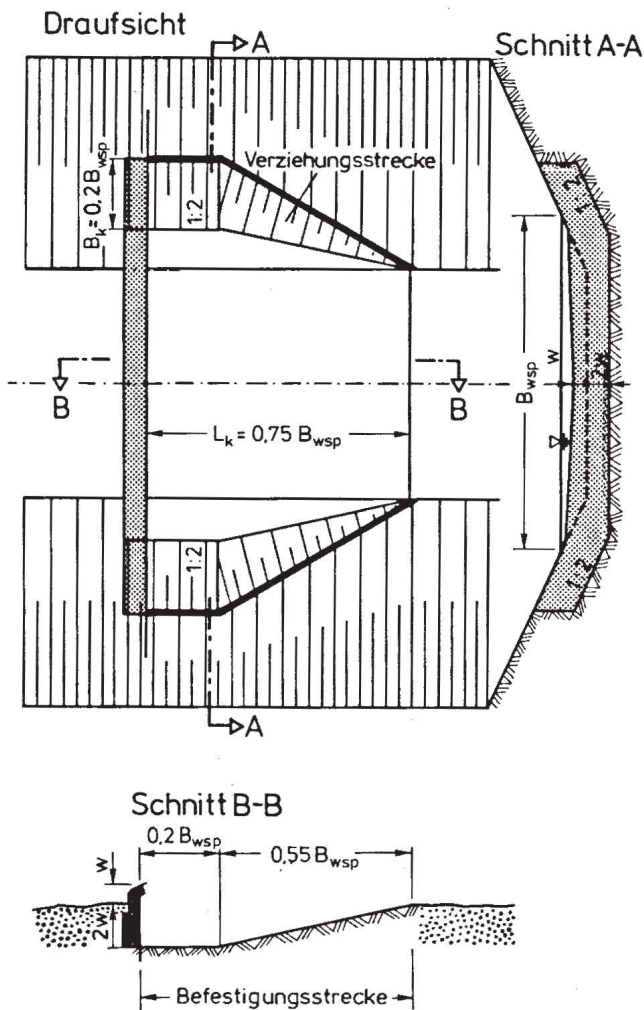


Bild 8: Kolk sicherungsstrecke

Ort nicht ersetzen, wie sie für jedes Pegelbauwerk unerlässlich ist.

3.5 Kolk sicherung

Anhand der Modellversuche zur Kolkbildung wurde ein Vorschlag zur Ausbildung der Kolk sicherungsstrecke im Unterwasser entwickelt, der sich an den Formen und Abmessungen des natürlichen Kolkbildes orientiert [6c]. Die Kolk sicherungsstrecke ist so dimensioniert, daß die Energieumwandlung für einen großen Abflußbereich innerhalb der befestigten Strecke stattfindet und somit ein starker Angriff des natürlichen Flußbettes vermieden wird. Extreme Hochwasserereignisse blieben hierbei jedoch außer Betracht. Aufgrund der Modellversuche ergab sich der in Bild 8 dargestellte Vorschlag, dessen Hauptabmessungen in Abhängigkeit von der Sohlschwellenhöhe und der Wasserspiegelbreite beim Bemessungsabfluß Q_B festgelegt wurden. Die Form der Kolk sicherungsstrecke wurde bewußt einfach gewählt; der seitliche senkrechte Übergang von der Kolkmulde in die Böschungslinie kann je nach landschaftlichen Gesichtspunkten auch in anderer Form ausgeführt werden. Neben einer hochwasserfesten Befestigung ist auf einen langsamen, stetigen Übergang der Sohle zum unbefestigten Flußbett zu achten.

4 Schlußbemerkung

Der vorliegende Beitrag enthält einen gedrängten Überblick über die wesentlichsten Ergebnisse eines zweijährigen Untersuchungsprogramms. Angeregt und mit fachkundigem Rat unterstützt wurde das Programm von Herrn ORBR Daucher von der Landesanstalt für Umweltschutz. Insbesondere ihm sowie den Herren Dr. Kullak als Fischereisachverständigen und Wulle vom Württembergischen Kanuverband sind die Autoren für wertvolle Anregungen und sachdienliche Hinweise zu besonderem Dank verpflichtet.

Schrifttum

- [1] Knapp: Ausfluß, Überfall und Durchfluß im Wasserbau, Braun Verlag, Karlsruhe 1960
- [2] International Institute for Land Reclamation and Improvement OLRI: Discharge Measurement Structures, The Netherlands, Wageningen 1976
- [3] Daucher, H.: Typisierung von Pegeln an Oberflächengewässern, Vortrag beim 10. Lehrgang zur Weiterbildung von Bediensteten im Wasser- und Wegebau sowie Wassermengenwirtschaft des Ministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Umwelt Baden-Württemberg, August 1977
- [4] Kullak, E.: Berücksichtigung fischereilicher Belange beim Gewässerausbau, Vortrag beim 11. Lehrgang zur Weiterbildung von Bediensteten im Wasser- und Wegebau sowie Wassermengenwirtschaft des Ministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Umwelt Baden-Württemberg, November 1977
- [5] Buzengeiger, G.: Belange des Wassersports beim Ausbau und Unterhaltung der Gewässer, Sonderdruck des Referenten für Wasserbau im Deutschen Kanuverband
- [6] Technische Berichte des Instituts für Wasserbau der Universität Stuttgart zur vorliegenden Untersuchung:
 - a) Möglichkeiten der Abflußbestimmung in Fließgewässern und Entwurfskriterien für Sohlschwellen (HWV 012, August 1979)
 - b) Systematische Modellversuche zur Bestimmung des Abflußverhaltens von Sohlschwellen (HWV 017, April 1980)
 - c) Modellversuche zu Anlandung, Erosion und Kolk sicherung an Sohlschwellen für Pegelanlagen unter Berücksichtigung der Belange der Fischerei und des Kanusports (HWV 023, Januar 1981)

Anschrift der Verfasser: Dipl.-Ing. Peter Müller, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 61, 7000 Stuttgart 80
 Prof. Dr. Helmut Kobus, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 61, 7000 Stuttgart 80