

# Hydrodynamisches Stauwehr zur Verhinderung der Sohlenerosion in Flüssen und zur Erhaltung der Schiffbarkeit bei Niedrigwasser

Ottfried Arnold, D 89275 Elchingen

Es wird ein hydrodynamisch wirkendes Stauwehr vorgestellt, mit dessen Hilfe die Erosion der Flusssohle gestoppt werden kann. Seine Wirkungsweise erlaubt es, den Erosionsschutz von der Grundwasseranhebung, wie sie bei stark eingetieften Flüssen oft erforderlich wird, zu entkoppeln. Beide Aufgaben lassen sich daher getrennt voneinander lösen und zwar „maßgeschneidert“, so dass der bisherige Kompromiss zwischen Grundwasseranhebung und Erosionsschutz nicht mehr nötig ist. Das Wehr hat eine Vielzahl von ökologischen und wasserbaulichen Vorteilen, welche die wasserrechtliche Genehmigung erleichtern. Es wird eine kostengünstige Kombination von Schlauchwehren und beweglichen stählernen Wehrkörpern vorgeschlagen, welche auch geeignet ist, die Schiffbarkeit selbst bei ausgeprägtem Niedrigwasser aufrecht zu erhalten.

## 1 Einführung und Zielsetzung

Viele „ausgebaute“ Flüsse tiefen sich ein und zwar meist so langsam, dass es nicht ohne weiteres auffällt. Über längere Zeiträume betrachtet ist die Eintiefung jedoch nicht vernachlässigbar: So hat sich die Donau in Baden-Württemberg in den rd. 120 Jahren seit ihrem Ausbau über größere Strecken um bis zu 1 m eingetieft, oberhalb von Riedlingen sogar um 3 m, was den Bau eines neuen Flussbettes über 3 km Länge erforderlich machte [5]. An der Iller schreitet die Sohlenerosion während Hochwasserabflüssen bisweilen sprunghaft voran (s. u.). Auch an der Salzach führt die Sohleintiefung zu gravierenden Problemen.

Als geeignete Methoden, die Sohlenerosion zu verhindern, stehen bislang nur das Offene Deckwerk zur Verfügung sowie die ökologisch problematischen hohen Wehre und Rauen Rampen [2]. Die dritte Möglichkeit, eine erhebliche Verbreiterung des Flussbetts (Verdoppelung der Breite und mehr), scheitert in aller Regel am Grunderwerb.

Im Folgenden soll eine neuartige Möglichkeit vorgestellt werden, die Sohlenerosion zu stoppen.

## 2 Die Eintiefung ausgebauter Flüsse, ihre Ursache und Auswirkungen

Die Problematik wird am Beispiel der Iller erläutert [1], einem alpinen Fluss, der bei Ulm in die Donau mündet: Ursprünglich lief das Mittelwasser in einem verzweigten Rinnensystem ab. Bei Hochwasser wurde das Flussbett auf seiner gesamten Breite von rd. 600 m durchflossen, wobei der Bewuchs in Form von Auwald die Strömung bremste. Selbst bei schwerem Hochwasser ( $HQ_{100} = 900 \text{ m}^3/\text{s}$ ) dürfte die Wassertiefe nur lokal größer als 3 m gewesen sein. Im 19. Jahrhundert wurde ein gestrecktes trapezförmiges Flussbett mit nur 52 m Sohlbreite und einem Gefälle von ca. 1,7 ‰ hergestellt, dessen  $k_s$ -Wert mit ca. 28 wesentlich über dem ursprünglichen Wert von ca. 12 liegt (im Hochwasserbett). Infolge dieses hohen Wertes, des gestreckten Verlaufs und der strömungsgünstigen Form (tiefes Flussbett) fließt das Hochwasser heutzutage mit bis zu 3 m/s ab. Bei Fließtiefen von 6 m und mehr treten an der Sohle hohe Schleppspannungen (ca.  $100 \text{ N/m}^2$ ) auf, die um mindestens 100 % über den früheren liegen und zu einer Sohlenerosion führen.

Bereits um 1900 hatte sich die Iller in ihrem Oberlauf soweit eingetieft, dass man dort Wehre einbauen musste, um das Wasser weiterhin zu den Wassertriebwerken ausleiten zu können. Diese Wehre unterbinden jedoch die Geschiebezufuhr vom Gebirge her. Da das Hochwasser weiterhin Kies von der Sohle aufnimmt, bis das Geschiebegleichgewicht erreicht ist, kann sich die Flusssohle während eines einzigen HQ5 bis HQ100 auf 1 bis 2 km Länge um 0,3 – 0,5 m eintiefen, weiter stromab allmählich weniger. Auf diese Weise hatte sich die Iller weiträumig um bis zu 3 m eingetieft. In den betroffenen Auen hatte sich die Ergiebigkeit der Brunnen stark verringert; wo die Pflanzen den dauernden Kontakt zum Grundwasser verloren haben, waren die Weichholzaunen schwer geschädigt. Von daher war die Wiederanhebung des Grundwasserspiegels und die Verhinderung einer erneuten Sohlenerosion geboten. Für die wasserwirtschaftlich-ökologische Sanierung wurden in den zurückliegenden 20 Jahren von Bayern und Baden-Württemberg über 28 Mio. Euro ausgegeben. Die erfolgreiche Sanierung wird fortgesetzt [1].

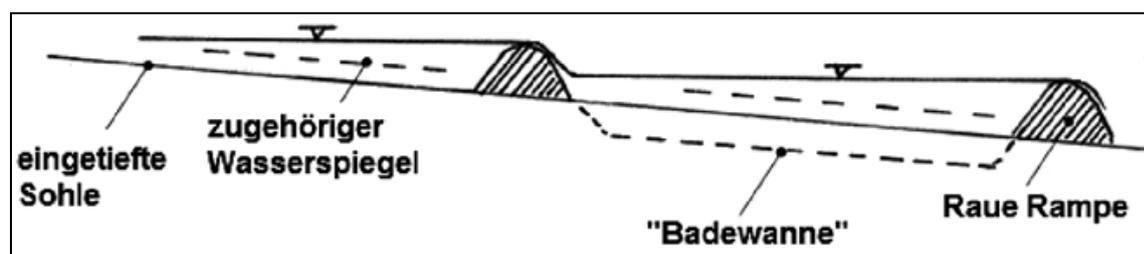
### 3 Bekannte Lösungen und Lösungsvorschläge zur Verhinderung der Sohlenerosion und Formulierung der Anforderungen an eine verbesserte Lösung

#### 3.1 Hohe Wehre/ Raue Rampen

Diese Bauwerke bringen die Sohlenerosion auf einer gewissen Strecke zum Stillstand, verringern allerdings die Fließgeschwindigkeit insbesondere bei Niedrigwasser (NW) so stark, dass strömungsbedürftige Fische, wie sie für alpine Flüsse typisch sind, im Stau nicht überleben können. Dabei sind die Fische ein maßgebliches Kriterium zur ökologischen Bewertung von Fließgewässern nach der WRRL. Die Verringerung der Fließgeschwindigkeit ist besonders ausgeprägt, wo Wasser zu Wasserkraftanlagen ausgeleitet wird. Im Übrigen scheidet diese Lösung aus, wo die damit verbundene hohe Anhebung des Grundwassers Hauskeller einstaut.

#### 3.2 Niedrige Raue Rampen

Wo die Sohlenerosion bereits weit fortgeschritten ist, ist es i. A. erforderlich, den Grundwasserspiegel mit niedrigen Rauhen Rampen wieder etwa auf die frühere Höhe anzuheben. Diese niedrigen Bauwerke können die Sohlenerosion nicht stoppen, weil sie vom Hochwasser ohne Aufstau überströmt werden. Infolgedessen kann sich die Flusssohle mit der Zeit über nahezu die ganze Länge der jeweiligen Stauhaltung um z. B. 1 m eintiefen („Badewanne“ in **Abb. 1**), wodurch die Fließgeschwindigkeit bei Niedrigwasser (NW) in ökologisch unerwünschtem Umfang verringert wird. Dies gilt auch bei Mittelwasser (MW), wenn ein Großteil des Wassers in einen Triebwerkskanal ausgeleitet wird.



**Abb. 1** Übertiefe in der Stauhaltung („Badewanne“) zwischen niedrigen Rampen

### 3.3 Offenes Deckwerk

Die Sohlenerosion kann mit dem Offenen Deckwerk gestoppt werden. Dies wird seit einigen Jahren an der Iller und der Wertach über größere Strecken eingesetzt [3]. Bisher hat sich diese Bauart bewährt. Die morphologische Selbstentwicklung des Flussbetts ist trotz des „Korsetts“ eingeschränkt möglich. Auf glatten, z.B. aus Flinz bestehenden Flusssohlen, kann das Offene Deckwerk nicht eingesetzt werden, ebenso wenig bei schiffbaren Flüssen.

### 3.4 V-Rampe nach Aufleger

Aufleger schlägt zur Verhinderung der Sohlenerosion eine hohe Raue Rampe vor, die in Flussmitte eine V- oder eher trapezförmige Öffnung hat ([6], [7]). Das NW/MW fließt nahezu ungestaut ab. Dagegen staut sich das Hochwasser an der Rampe hydrodynamisch auf, d. h. der Aufstau nimmt mit dem Abfluss zu. Bei Hochwasser ergießt sich durch die V-förmige Öffnung ein mächtiger „Strahl“ mit 6 bis 7 m/s. Aufleger hat eine Sohlenstruktur entwickelt, welche den Strahl auffächert. Es braucht dennoch eine große Fließlänge, bis sich die Fließgeschwindigkeit vergleichmäßig hat. Dementsprechend muss der Fluss über eine große Länge befestigt werden. Die V-Rampe tritt bei NW/MW als großes Bauwerk unvorteilhaft in Erscheinung. - Die V-Rampe wurde für die Iller projektiert, jedoch trotz der nachgewiesenen Machbarkeit wegen hoher Baukosten nicht realisiert.

### 3.5 Schlauchwehr zum Aufstau des Hochwasserabflusses

Die buhnenartigen Baukörper der V-Rampe kann man evtl. durch zwei Schlauchwehre ersetzen, die bei Hochwasser aufgeblasen werden. Für diese Bauart sprechen die niedrigen Bau- und Unterhaltungskosten, ein Punkt, auf welchen die Wasserwirtschaftsverwaltungen Wert legen.

## 4 Verhinderung der Sohlenerosion durch hydrodynamischen Aufstau

### Anforderungen an die gesuchte Lösung

Gesucht wird eine Lösung, welche die Nachteile der vorgestellten Lösungen vermeidet, indem sie das NW/ MW nur im Maß der erforderlichen Grundwasseranhebung aufstaut, aber dennoch - bei Hochwasser - die Sohlenerosion verhindert. Die Lösung sollte sich auch für glatte Flusssohlen und schiffbare Flüsse eignen und die morphologische Selbstentwicklung des Flussbetts zulassen, ebenso die Passage der Fische (auch stromauf!) und des Geschiebes.

### Ermittlung des zu nutzenden Prinzips

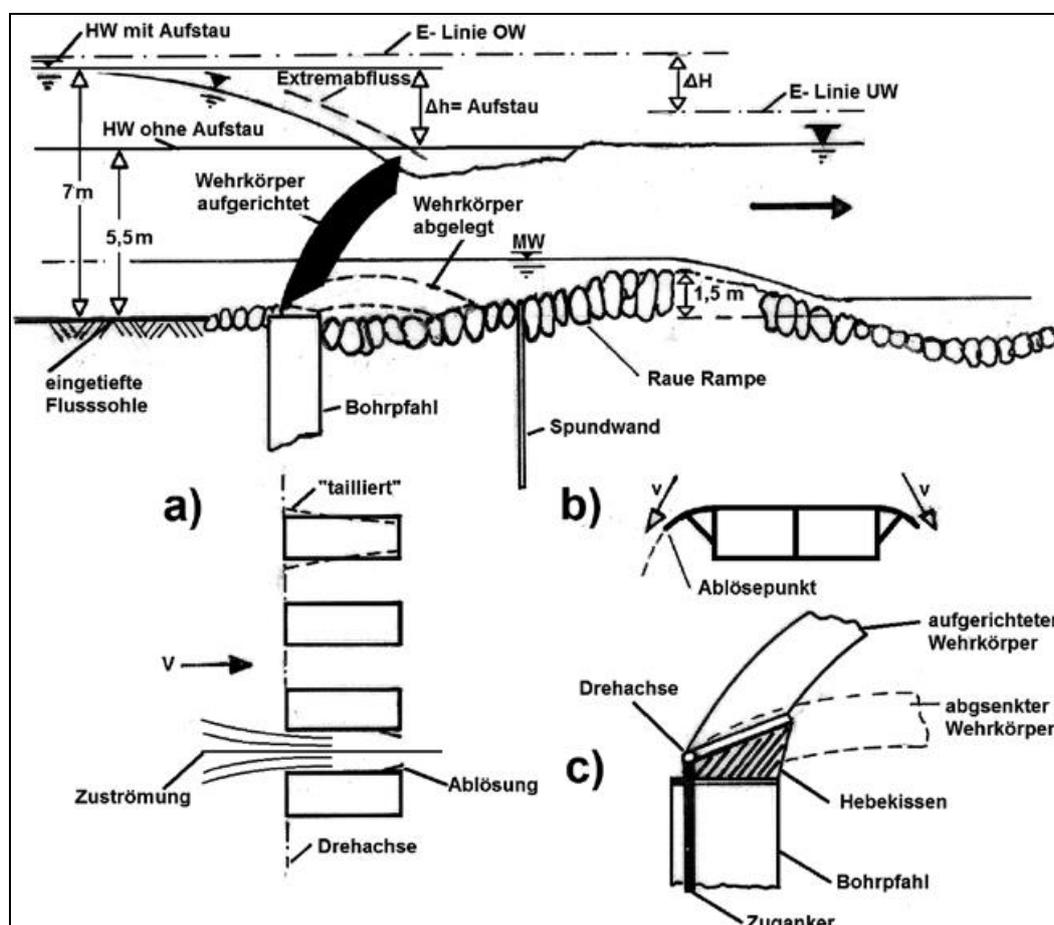
Wie in Ziff. 2 dargestellt, kann der gegenüber dem „Naturzustand“ verringerte Fließwiderstand ausgebauter Flüsse als die wichtigste Ursache der Sohleintiefung angesehen werden. Die Lösung der wasserbaulichen Aufgabe besteht daher darin, den Fließwiderstand wieder zu erhöhen. Das im Folgenden vorgeschlagene „Hydrodynamische Wehr“ ist hierzu in der Lage, indem seine Wehrkörper als „Widerstandskörper“ wirken. Es staut den Wasserspiegel hydrodynamisch auf, d. h. umso mehr, je größer der Abfluss ist. So werden das NW und das MW nicht aufgestaut (im Gegensatz zu herkömmlichen hohen Wehren, welche „hydrostatisch“ aufstauen), während die Abflusstiefe etwa des HQ5 z. B. von 4 m auf 5,5 m und die des HQ50 z. B. von 5,5 m auf 7 m erhöht werden. Das neuartige Wehr wirkt also nur dann, wenn es notwendig ist, nämlich bei Hochwasser, da nur dann ein Geschiebetrieb und demzufolge eine

Sohlenerosion möglich ist. Es erlaubt so, den Erosionsschutz von der Anhebung des NW/MW ( $\rightarrow$  Grundwasseranhebung) zu entkoppeln und jede dieser beiden Aufgaben getrennt und damit „maßgeschneidert“ zu erledigen. Ein problematischer Kompromiss zwischen Anhebung des NW/ MW und Erosionsschutz wie etwa bei Ziff. 3.1 oder 3.2 ist nicht mehr erforderlich.

#### 4.1 Hydrodynamisches Wehr in Stahlbauweise nach Arnold

Im Folgenden wird das Hydrodynamische Wehr in Stahlbauweise vorgestellt. Es wird der Regelfall betrachtet, dass die Sohlenerosion bereits weit fortgeschritten ist, weshalb das Grundwasser mit niedrigen Rampen wieder angehoben werden muss. Die weitere Sohlenerosion wird mit Hilfe des Hydrodynamischen Wehrs gestoppt (**Abb. 2**).

Das Wehr besteht bei 50 m Flussbreite z. B. aus 10 stählernen Wehrkörpern von 2,5 m Breite und ca. 4 m Länge. Die Wehrkörper haben die Form von Bananen, damit Äste, Baumstämme und anderes Treibzeug über die Wehrkörper abgeführt werden. Die Durchflussöffnungen zwischen den Wehrkörpern sind ebenfalls rd. 2,5 m breit.



**Abb. 2** Hydrodynamisches Wehr an einer niedrigen Rauhen Rampe. Oben: Längsschnitt. a) zeigt die aufgerichteten Wehrkörper im Grundriss, gestrichelt ist ein „taillierter“ Wehrkörper dargestellt; b) zeigt den Schnitt durch einen Wehrkörper und die dortige Strömung; c) zeigt die Lagerung auf einem Bohrfahl inkl. Hebekissen. E-Linie = Energielinie; OW bzw. UW = Ober- bzw. Unterwasser)

Bei anlaufendem Hochwasser (HW) werden die Wehrkörper automatisch aufgerichtet. Das Oberwasser staut sich dann so hoch auf, dass die Energiehöhe  $H$  gerade ausreicht, um den Abfluss abzuführen. Diese Energiehöhe bezeichnet man als  $H_{\text{grenz}}$ . In den „Strahlen“, welche

durch die Abflussöffnungen treten (s. a) in Abb. 2), herrschen dementsprechend die Grenztiefe und die Grenzgeschwindigkeit. Indem man die Abmessungen der Wehrkörper und der Durchflussöffnungen geeignet wählt, lässt sich bei Hochwasser ein Aufstau  $\Delta h$  erreichen, der die Schleppkraft auf der zu schützenden Fließstrecke ausreichend reduziert. Das Grenzgefälle der Energielinie, ab welchem der Kies nicht mehr in Bewegung kommt, kann nach Schöberl [8] bestimmt werden.

## 4.2 Wirkungsweise

Die Wehrkörper werden bei Hochwasser aufgerichtet, indem die „Hebekissen“ (s. **Abb. 2 c**) mit Wasser über eine gemeinsame Druckleitung gefüllt werden. Solche Hebekissen bestehen aus Gummi oder Kunststoff und werden heutzutage als Wagenheber für Lastwagen eingesetzt, wo sie mit dem Auspuff aufgeblasen werden; sie liegen geschützt im „Lee“ der Wehrkörper. Die Wehrkörper stehen schließlich wie dicke Pfeiler einer Brücke im Fluss, allerdings nach Bild 2 geneigt, damit anschwimmende Baumstämme darüber hinwegrutschen. Der resultierende Aufstau  $\Delta h$  vergrößert die Wassertiefe beim HQ50 z. B. von 5,5 m auf 7 m und verringert dadurch die Schleppkraft so weit, dass die Flusssohle im Oberwasser über eine Strecke von typischerweise 500 bis 1000 m vor Erosion geschützt ist.

Eine rasche Energieumwandlung ist gegeben: Zwischen den Wehrkörpern fließt das Wasser mit der Grenzgeschwindigkeit von rund 6,5 m/s ab, die sich aus  $V^2/(2g) = H/3$ , errechnet, wobei H die Energiehöhe im Oberwasser bezeichnet (diese entspricht in etwa der dortigen Wassertiefe). Dagegen ist die Fließgeschwindigkeit im „Lee“ der Widerstandskörper – zumindest theoretisch – nahe Null. Die große Geschwindigkeitsdifferenz verursacht eine starke Turbulenz, durch welche die „überschüssige Energie“, ausgedrückt als die Energiehöhe  $\Delta H$ , in Wärme umgewandelt wird (nur hundertstel Grad, also unschädlich). Auf der Rauen Rampe baut sich die Turbulenz schadlos ab. - Wie man leicht zeigen kann, entspricht  $\Delta H$  in etwa dem Aufstau  $\Delta h$ .

## 4.3 Vorteile des Hydrodynamischen Wehrs

Das Hydrodynamische Wehr hat überraschend viele ökologische und wasserbauliche Vorteile, welche auch die wasserrechtliche Zulassung deutlich erleichtern dürften.

### Ökologische Vorteile

- Der Fließwassercharakter bleibt erhalten, da nur der Hochwasserspiegel angehoben wird. Zu sonstigen Zeiten liegen der Wasserspiegel und das damit korrespondierende Grundwasser auf dem Niveau, das durch die niedrige Raue Rampe bestimmt ist.
- Die biologische Durchgängigkeit (Fischauf- und -abstieg) ist nicht eingeschränkt, die Geschiebepassage ist nicht behindert.
- Die morphologische Entwicklung des Flussbetts bleibt grundsätzlich möglich.

### Wasserbauliche Vorteile

- Da das Grundwasser bei NW/MW mit Hilfe der niedrigen Rampen meist nur um 1 bis 1,5 m angehoben wird, werden in der Flussaue gelegene Hauskeller in aller Regel nicht eingestaut (was bei hohen herkömmlichen Wehren der Fall wäre). Wenn die Hochwasserspitze (der „oberste Meter Wasserstand“) wie an der Iller nur ein bis zwei

Tage andauert, kann der Aufstau schon nach dieser Zeit reduziert werden. Es lässt sich berechnen, ob der Grundwasseranstieg währenddessen in den benachbarten Siedlungen überhaupt „ankommt“ und zu Schäden führt.

- Der Aufstau bei Hochwasser ist nicht höher als bei hohen herkömmlichen Wehren, wie man sie zum Erosionsschutz benötigt. Infolgedessen lässt er sich in derselben Weise durch lokale Ufererhöhungen beherrschen. Der Verlust an Energiehöhe  $\Delta H$  (Bild 2) kann so hoch sein wie bei festen Wehren großer Bauhöhen.
- Bei extremem Hochwasser kann Wasser auch über die Spitzen der Wehrkörper (s. Bild 2) – und im Falle eines Hybrid-Wehrs (s. Ziff. 5) – auch über das Schlauchwehr abfließen (und zwar mit guter Energieumwandlung).
- Die erforderliche „Staukurve“ lässt sich erreichen, indem man die Breite, den Abstand und die Form der Wehrkörper geeignet wählt (s. „Taillierung“ in Bild 2).
- Die Ablösekanten können geeignet ausgebildet werden, um strömungsbedingte Schwingungen zu verhindern und die Verletzungsgefahr für Kanufahrer zu minimieren.
- Die heftige Turbulenz klingt auf der ohnehin vorhandenen, stark befestigten Rauhen Rampe und der nachfolgenden Sohlensicherung ab.
- Eine Verklausung der Wehranlage wird verhindert, indem vom Hochwasser mitgeführte Baumstämme über die bananenförmigen und dann nassen Wehrkörper hinwegrutschen. Bleibt bei Hochwasser ein Baumstamm dennoch hängen, drückt er den Wehrkörper etwas um (die anderen Wehrkörper stellen sich wegen der gemeinsamen Druckleitung etwas steiler auf), woraufhin der Stamm abschwimmt. Belässt man in den Hebekissen eine bestimmte Luftmenge, können die Wehrkörper federnd nachgeben. Im äußersten Fall wird der Druck in der Druckwasserleitung vorübergehend verringert, so dass sich alle Wehrkörper etwas weiter in Fließrichtung umlegen.
- Da die „Wasserstrahlen“ eingeschnürt werden, kann die lichte Weite zwischen den Wehrkörpern entsprechend größer gewählt werden, was die Gefahr einer Verklausung durch Treibzeug herabsetzt.
- Das Wehr kann nachträglich an bestehende Rampen angebaut werden, um die Bildung von „Badewannen“ gemäß Bild 1 zu verhindern.
- Das Hydrodynamische Wehr kann auch eingesetzt werden, wo die Erosion erst beginnt (wobei dann stromab eine Endschwelle erforderlich ist).
- Wenn trotz des Wehrs eine Sohlenerosion eintritt, bleibt diese örtlich begrenzt.
- Das Wehr kann auch dort eingesetzt werden, wo das Flussbett zu glatt ist, als dass ein Offenes Deckwerk liegen bliebe (so steht an der Iller vielerorts der nackte Flinz-Tonstein an).
- Mit diesem Wehr geschützte Flussstrecken sind unempfindlich gegen Beschädigung durch Eisgang, Schraubenstrahl und vom Hochwasser mitgeführte Baumstämme.

- Die Gründung von Pfählen und Spundwandkonstruktionen als Fundament des Hydrodynamischen Wehrs ist ohne Wasserhaltung möglich. (Taucher können die Montagearbeiten bei nur 1 m Wassertiefe mühelos durchführen und dabei über Schnorchel atmen).
- Die Wehrkörper werden mit Hilfe der o. g. Hebekissen aufgerichtet, d. h. ohne verschleißanfällige bewegliche Teile. Für die Wehrkörper und Drehlager stehen rostfreie oder korrosionsarme Lösungen zur Verfügung
- Beim Hybrid-Wehr (s. Ziff. 5) sind nur wenige stählerne Wehrkörper in der Abflussöffnung erforderlich, was die Bau- und Unterhaltungskosten vermindert.

#### Landschaftsästhetische Vorteile

Die Wehrkörper (und das Schlauchwehr nach Ziff. 5) sind bei Niedrig- und Mittelwasser getaucht, also fast unsichtbar. Man kann den baulichen Aufwand verringern, indem man das Wehr auf den höchsten Punkt der Rauen Rampe platziert. Dann liegen die abgesenkten Wehrkörper allerdings sichtbar auf der Rampe.

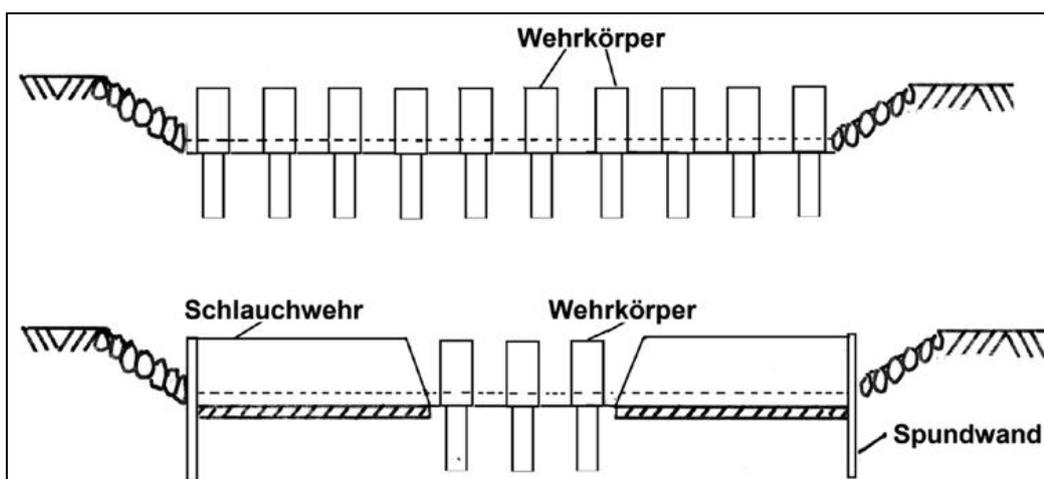
#### Verkehrswasserbauliche Vorteile

Das Hybrid-Wehr (Ziff. 5) eignet sich auch für schiffbare Flüsse. Mit ihm kann die Schiffbarkeit selbst bei ausgeprägtem Niedrigwasser erhalten werden (s. Ziff. 6).

## 5 Das „Hybrid-Wehr“ als resultierender Lösungsvorschlag

### 5.1 Aufbau des „Hybrid-Wehrs“

Im Folgenden wird das „Hybrid-Wehr“ vorgeschlagen (**Abb. 3, unten**): Es kombiniert die Vorteile der unter Ziff. 3 geschilderten Lösungen und dürfte deshalb in Bau und Unterhaltung billiger sein als der oben dargestellte reine Stahlwasserbau.



**Abb. 3** Gegenüberstellung von reiner Stahlwasserbauweise (oben) und Hybridwehr (unten) im Querschnitt durch den Fluss. Die Oberkante der Rauen Rampe (gestrichelt dargestellt) bestimmt die Lage des NW/MW-Spiegels. Außerhalb von Hochwasser sind sowohl die stählerne Wehrkörper als auch die Schlauchwehre umgelegt und liegen damit tiefer als die gestrichelte Linie

Das Hybrid-Wehr besteht aus zwei buhnenartigen Schlauchwehren und einigen wenigen beweglichen Wehrkörpern in der trapezförmigen Abflussöffnung. Es wird also die Idee der V-Rampe aufgenommen, wobei jedoch Schlauchwehre anstelle der Steinbuhnen verwendet werden. Diese Schlauchwehre sind bei NW/MW entleert und liegen dann unter dem Wasserspiegel. Der sich durch die Öffnung ergießende Hochwasser-Strahl wird durch die Wehrkörper gemäß Ziff. 4.1 oder ggf. durch ähnlich geformte aufblasbare Wehrkörper in mehrere Strahlen aufgeteilt, um die „überschüssige“ Strömungsenergie auf kurzer Strecke in Wärme umzuwandeln. Als Alternative kommt die Sohlenstruktur nach Kap. 3.4 in Betracht, wenn davon keine Gefahren für Kanufahrer ausgehen.

## 5.2 Konstruktion des „Hybrid-Wehrs“

**Buhnen:** Um die buhnenartigen Schlauchwehre leichter bauen und montieren zu können, wird gemäß **Abb. 3 unten** die Böschung des Flusses durch eine senkrechte Mauer verkürzt, so dass lokal eine horizontale Flusssohle entsteht. Die uferseitigen kleinen „Zwickel“ werden ohne Nachteil für die Energieumwandlung vom Hochwasser durchströmt. Die Buhnen liegen auf einem sehr starken Blech auf, welches auf einer Spundwandkonstruktion befestigt ist.

**Wehrkörper in der Fließöffnung:** Die Stahlblech-Staukörper werden auf je einem starken Bohrpfahl gegründet.

## 6 Hybrid-Wehr zur Erhaltung der Schiffbarkeit bei Niedrigwasser

Mit Hilfe des Hybrid-Wehrs kann auch der Wasserspiegel angehoben werden, um die Schifffahrt selbst bei ausgeprägtem Niedrigwasser sicherzustellen, nachdem hierzu in aller Regel die Anhebung des Wasserspiegels um wenige Dezimeter genügt. Es kommen zwei Lösungen in Betracht:

- a) Schiffe umfahren die Raue Rampe in einer seitlich gelegenen Schleuse.
- b) Man verringert die durchströmte Breite zwischen den Schlauchwehren bei ausgeprägtem Niedrigwasser, indem man beidseitig an die großen Schlauchwehre niedrige Schlauchwehre von typischerweise 5 bis 10 m Länge anschließt. Die niedrigen Schlauchwehre können für die Passage eines Schiffes abgesenkt werden (die dortigen stählernen Wehrkörper liegen ohnehin ausreichend tief). Wenn nur wenige kleine Schiffe wie z. B. Ausflugsboote verkehren, kann die Passage auch durch eine besonders enge „Durchfahrt-Lücke“ gewährleistet werden, über welche nicht viel Wasser abfließt. Auch sind Konstruktionen denkbar, die vom passierenden Schiffe niedergedrückt wird. Der Passage hinderliche Wehrkörper können evtl. als aufblasbare Wehrkörper ausgeführt werden, die nach Entleerung flach an der Flusssohle liegen.

## Literatur

- [1] Arnold, O. et al.: Die Sanierung der Unteren Iller – Grundwasseranhebung und Renaturierung unter schwierigen Randbedingungen. In: WasserWirtschaft 96 (2006), Heft 11, S. 10-15.
- [2] Arnold, O.; Gebler, R.-J.: Erfahrungen zur Stabilität einer 3 m hohen Rauhen Rampe in der Iller. In: WasserWirtschaft 97 (2007), Heft 9, S. 36-40.
- [3] Sander-Kessels, B.; Schöpfer, C.; Hartlieb, A.: Wasserwirtschaftlich-ökologische Entwicklung der Iller – Naturversuch „Offenes Deckwerk“. In: WasserWirtschaft 96 (2006), Heft 11.

[4] Arnold, O., Schlauß, M.: Verbreiterung der Iller durch forcierte morphologische Entwicklung – Naturversuch zur Verbreiterung der Flusssohle. In: WasserWirtschaft 98 (2008), Heft 3, S. 22-26.

[5] Arnold, O.; Klepser, H.-H.: Die Renaturierung der baden-württembergischen Donau zwischen Mengen und Ulm. In: WasserWirtschaft 102 (2012), Heft 1-2, S. 47-51.

[6] Aufleger, M.; Niedermayr, A.: V-Rampen – ökologisch vollkommen durchgängige Querbauwerke. In: Bautechnik 82 (2005), Heft 12, S. A14-A15.

[7] Aufleger, M.: V-Rampen – Ein Konzept zur Stabilisierung von Flüssen. In: Berichte der Versuchsanstalt Oberrach und des Lehrstuhls für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Technischen Universität München (2004), Nr. 100, S. 65-71.

[8] Schöberl, F.: Abpflasterungs- und Selbststabilisierungsvermögen erodierender Gerinne. In: Österreichische Wasserwirtschaft 33 (1981).

[9] Arnold, O.: Hydrodynamisches Wehr zur Verhinderung der Sohlenerosion in Flüssen und zur Erhaltung der Schifffbarkeit bei Niedrigwasser, WasserWirtschaft 2014, Heft 11, S. 23-27

### **Hydrodynamically Functioning Weir to Prevent Riverbed Erosion and to Ensure Navigability when the Water Level is Low**

Straightening of rivers causes erosion and deepening, damaging water conservation and supply and ecology. A movable hydrodynamic weir which can be raised during flood is proposed as a countermeasure. It separates groundwater restoration and erosion prevention functions and has many advantages over conventional weirs. Using inflatable lifting elements additional to movable steel weirs minimizes construction and maintenance costs. In this design it may also be raised when river levels are low to ensure navigability.

Оттфрид Арнольд

### **Гидродинамический затвор для предотвращения донной эрозии в реках и для сохранения судоходности при низком уровне воды**

В статье представляется гидродинамический затвор для защиты от донной эрозии тех рек, где необходимо предотвратить начинающуюся или повторно возникающую донную эрозию. С его помощью защита от эрозии не будет зависеть от повышения уровня грунтовых вод и, таким образом, вопросы защиты от эрозии можно решать с учетом специфических особенностей. Благодаря этому появляется множество экологических и гидротехнических преимуществ. Предлагается экономически рентабельная комбинация гибких надувных плотин и подвижных стальных плотинных элементов, которая без каких-либо ограничений подходит для поддержания судоходности даже при выраженном низком уровне воды.