Instream River Training (IRT)

Naturnaher Flussbau nach Viktor Schauberger

Handbuch (v2.8)

zusammengestellt von

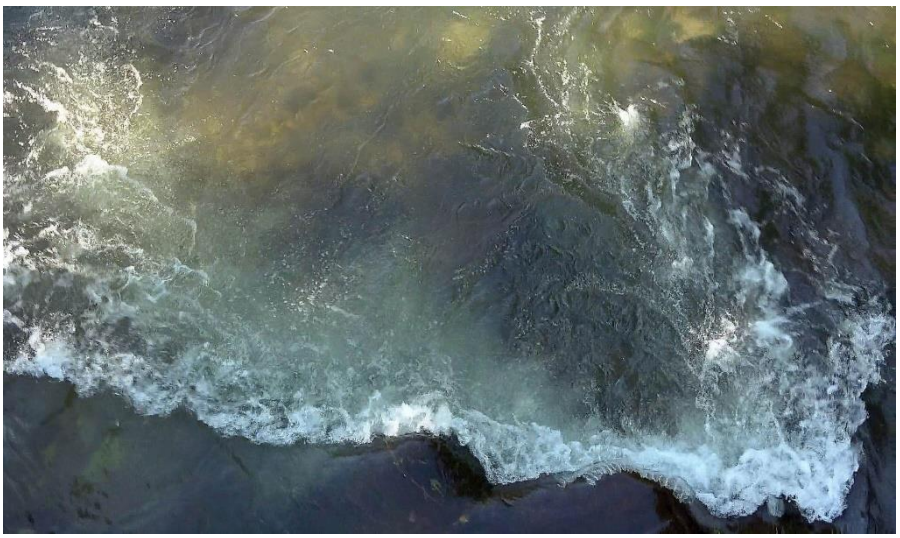
Franz Fitzke

aus Beiträgen von

**Otmar Grober, Matthias Mende, Christine Sindelar,
Niels Werdenberg, Jörg Schauberger, Anton Sàlat u.a.**

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung: Ursache und Wirkung im Flussbau 1
2 Definition: Instream River Training (IRT) 1
2.1 Begriffsklärung: Sekundärströmungen und Spiralströmungen 2
3 Vorteile von IRT im Vergleich zum konventionellen Flussbau 3
4 Zur Geschichte des Instream River Trainings 4
5 Bauweisen des Instream River Trainings 9
5.1 Lenkbuhnen 9
5.1.1 Zum Einbau von Lenkbuhnen 16
5.1.2 Sonderformen der Lenkbuhne 18
5.1.2.1 Trichterbuhne (Strömungstrichter) 19
5.1.2.2 Schneckenbuhne (Wasserschnecke) 24
5.1.3 Schlussbetrachtung Lenkbuhnen 26
5.2 Pendelrampe 30
5.2.1 Zum Einbau einer Pendelrampe 37
5.2.2 Ganzheitliche Schlussbetrachtung 41
6 Anhang 42
6.1 Bemessungsregeln für Lenkbuhnen 42
6.2 Dimensionierung einer Pendelrampe 60
Quellennachweis 67
Kontaktadressen 70



Strömungsvielfalt an einer Lenkbuhne in der Mürz in Kapfenberg (Steiermark)

Foto: F.Fitzke

[EV 01]

1 Einleitung: Ursache und Wirkung im Flussbau ↑

Der Flussbau ist in den letzten Jahrzehnten deutlich naturnäher geworden und verfolgt heute als zentrales Ziel eine eigendynamische Gewässerentwicklung. Die wesentliche Voraussetzung hierfür ist ein ausreichender Entwicklungsraum, der dem Gewässer jedoch vielfach nicht zurückgegeben werden kann. Ein großer Teil flussbaulicher Maßnahmen beinhaltet daher auch heute noch den Ausbau der Ufer und der Sohle. Dies gilt sowohl für Maßnahmen des Hochwasserschutzes als auch für Renaturierungen. Aufgrund des fehlenden Entwicklungsraums wird davon ausgegangen, dass die Ufer und die Sohle mehr oder minder hart definiert und befestigt werden müssen, um bei Hochwasser dem maximalen Strömungsangriff standhalten und somit Ufer- und Sohlerosion vorbeugen zu können.[1]
Die gängige Uferstabilisierung, z. B. mit Längsverbauungen wie Blocksatz oder Krainerwänden, ist aber als **Symptombekämpfung** zu bezeichnen, da sie nur die Auswirkungen des Strömungsangriffs bekämpft. Weiterhin ist sie mit hohen Kosten und ökologischen Nachteilen verbunden. Die wesentliche Ursache von Ufererosion (und anderen Veränderungen im Flussbett) ist die Strömung. Daher stellen Methoden, bei denen gezielt die Strömung angepasst wird, eine **ursachenorientierte** Herangehensweise im Flussbau dar.[1]
Eine relativ unbekannte Methode zur Strömungsmodifizierung ist es, im Fluss selbst Sekundärströmungen zu erzeugen, die mit der Hauptströmung interagieren. Durch die gezielte Induzierung von Sekundärströmungen können prognostizierbare Veränderungen der Geschwindigkeitsverteilung und der Querprofilgeometrie hervorgerufen werden. Dies ist die Grundidee des „Instream River Training".[1] In einem Satz gesagt: **Mit Hilfe von IRT-Einbauten in den Fluss sollen die Strömungskräfte des Wassers so gelenkt werden, dass sie keinen Schaden mehr anrichten und stattdessen sogar einen Nutzen erbringen.**

2 Definition: Instream River Training (IRT) ↑

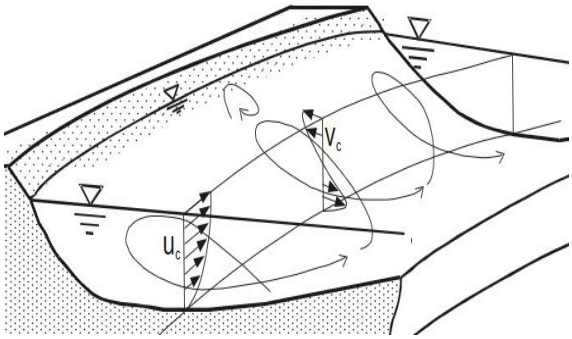
Matthias Mende und ***Christine Sindelar*** haben IRT im Jahr 2010 wie folgt definiert:
„Das Instream River Training (übersetzt: Flussbau im Gewässerbett) ist eine Form des Flussbaus, bei der die Strömung als Ursache für Ufer- und Sohlenerosionen durch die Induzierung einer oder mehrerer Sekundärströmungen modifiziert wird. Hierzu werden bereits bei Niedrigwasser überströmte Bauweisen innerhalb der benetzten Gewässersohle eingesetzt. Je nach Anwendungsgebiet wird mit der Strömungsmodifizierung mindestens eines der folgenden Ziele verfolgt:
a) Gewässerstabilisierung unter weitgehendem Verzicht auf massive Maßnahmen (z. B. Blocksatz),
b) Nachhaltiges Geschiebemanagement,
c) Initialisierung von Eigendynamik." [2]

Von ***Otmar Grobers*** IRT-Einbauten (Lenkbuhnen und Trichter) erzeugte Fließstrukturen in der Mur, dem längsten Fluss der Steiermark. Sichtbar sind nur die oberflächennahen Strömungen.

Foto: G.Hauer

2.1 Begriffsklärung: Sekundärströmungen und Spiralströmungen ↑

Die Induzierung (Erregung, Erzeugung) von Sekundärströmungen mit relativ kleinen Einbauten ist die entscheidende Neuerung des Instream River Trainings im Flussbau. Deshalb sollte gleich zu Beginn eine Begriffsklärung erfolgen.
Eine **Sekundärströmung** ist eine senkrecht zur Hauptströmung gerichtete Strömungskomponente.[14] Die Überlagerung einer Sekundärströmung mit der Hauptströmung eines Flusses führt zur Ausbildung einer **Spiralströmung**. In dieser bewegen sich die Wasserteilchen in einer korkenzieherartigen Kurvenbahn („Wirbel“). Die Spiralströmung wird nachfolgend auch als **Längswirbel** bezeichnet, da ihre Drehachse längs zur Fließrichtung verläuft.
Sekundärströmungen werden in der Strömungslehre zur Vereinfachung meist nur zweidimensional betrachtet, im Falle von Flussläufen sind sie oft annähernd elliptisch. Die Sekundärströmung hat also im Gegensatz zur Spiralströmung keine Tiefe in Fließrichtung.[47]
Ausgelöst werden Sekundärströmungen z.B. durch Reibung an Hindernissen. Sie entstehen aber auch in natürlichen Flusskrümmungen: Die Fliehkräfte in einer Kurve drücken das Wasser nach außen. Nahe der Sohle, wo in der Regel die Fließgeschwindigkeit am kleinsten ist, wirken geringere Fliehkräfte als nahe dem Wasserspiegel. Da der Wasserstand in der Außenkurve nun höher ist als in der Innenkurve, kommt es zu einer Rückströmung. Der Druck Richtung Innenkurve, der als Gegenspieler zu den Fliehkräften agiert, „überdrückt“ die geringeren Fliehkräfte im Sohlbereich, d.h. die Rückströmung erfolgt im sohlnahen Bereich. Aus der Überlagerung bzw. aus dem Kräftespiel von Druck- und Fliehkräften entsteht ein walzenartiges Strömungsmuster.[48] Diese walzenartige Strömung ist eine Spiralströmung.



Natürliche, kurveninduzierte Sekundärströmung, die sich räumlich zu einer Spiralströmung ausbildet.
Modifizierte Darstellung nach *Hafner* [48]

Beim IRT regen Einbauten in den Fluss (z.B. Lenkbuhnen) einen Strömungsimpuls an, der zur Ausbildung einer Sekundär- bzw. Spiralströmung führt.[49] Lenkbuhnen können die Strömung in Flusskurven so verändern, dass sie die kurveninduzierte Sekundärströmung im Buhnenbereich neutralisieren. Dadurch werden die Strömungsverhältnisse in der Flusskurve quasi umgedreht und die Hauptströmung vom Prallufer in Richtung Gewässermitte gelenkt.[47]

Außenkurve der Isar an der B 13 Bad Tölz - Lenggries. Die roten Pfeile stellen die schnelle oberflächennahe Strömung dar, die grünen Pfeile die langsamere sohlnahe (Rück-)Strömung.[50] *Foto: WWA Weilheim*

Die selbe Stelle nach dem Einbau von Lenkbuhnen. Die oberflächennahe Strömung (rot) fließt nun in Richtung Innenkurve, die sohlnahe Strömung (grün) in Richtung Außenkurve.[50] *Foto: LDBV Bayern*

In den beiden Einzeichnungen von *T.Hafner* und *R.Patri* sind die Strömungsverhältnisse stark vereinfacht dargestellt.

3 Vorteile von IRT im Vergleich zum konventionellen Flussbau ↑

- IRT-Einbauten entlasten die Ufer (Schutzeffekt), erzeugen aber gleichzeitig Strömungsvielfalt und eine dynamische Sohle (Kolkbildung). Diese Strukturierung des Gewässers führt zu einer ökologischen Qualitätsverbesserung. IRT-Maßnahmen erfüllen also schutzwasserbauliche und ökologische Anforderungen gleichermaßen.[1]
- Aus ökologischer Sicht bewirkt IRT eine Steigerung der Gewässergüte (Selbstreinigung, pH-Wert-Neutralisierung), eine Erhöhung der Fischpopulation und Artenvielfalt sowie eine Förderung des Randbewuchses.[3]
- IRT sorgt auch bei Niedrigwasser für einen dynamischen Gewässerlauf (Niedrigwassergerinne statt stehendem Gewässer). Dies ist von wachsender Bedeutung, da im Zuge des Klimawandels nicht nur mit Starkregen, sondern auch mit lang anhaltenden Trockenperioden zu rechnen ist.[4]
- IRT ist kostengünstiger, da weniger Baumaterial benötigt wird.[1, 2, 6, 15, 25, 37]
- IRT ermöglicht dem eingezwängten Gewässer ähnliche Bewegungsformen wie einem natürlich mäandrierenden Flusslauf.[5] Hierdurch entstehen auch ähnliche Strukturen, z.B. Kolke und Kiesbänke.

Diese von ***Gerd Stellmacher*** in Horka (Lausitz) gebaute Pendelrampe gibt einem kleinen, begradigten Bach wieder die Möglichkeit, naturnah zu mäandrieren. Im Winter ist der Effekt dieser IRT-Bauweise besonders gut zu sehen.

Fotos: G.Stellmacher

- Bei der IRT-Bauweise Pendelrampe (siehe auch dort) wird die biologische Durchgängigkeit im Sinne der EU-Wasserrahmenrichtlinie optimiert.[1] Sie ist damit in vielen Fällen eine echte Alternative zu den Fischaufstiegshilfen („Fischtreppen“), um z.B. ein altes Wehr zu ersetzen.
- Mit dem Einsatz der im Verhältnis zur Wirkung fast unauffälligen IRT-Bauweisen, der Verwendung von gewässereigenen Baustoffen und deren Akzeptanz durch das Gewässer, erfolgt die Einbindung in das Landschaftsbild unmittelbar und störungsfrei.[6]
- Der IRT-Flussbauer arbeitet **mit** dem Wasser und **nicht gegen** das Wasser - das Wasser wird zum gewünschten Verhalten nicht gezwungen, sondern dazu „eingeladen“.[7]
- IRT ist eine nachhaltige Wasserbaumaßnahme, da sie wirksam, dauerhaft, kostengünstig und ressourcenschonend ist.[8]

4 Zur Geschichte des Instream River Trainings ↑

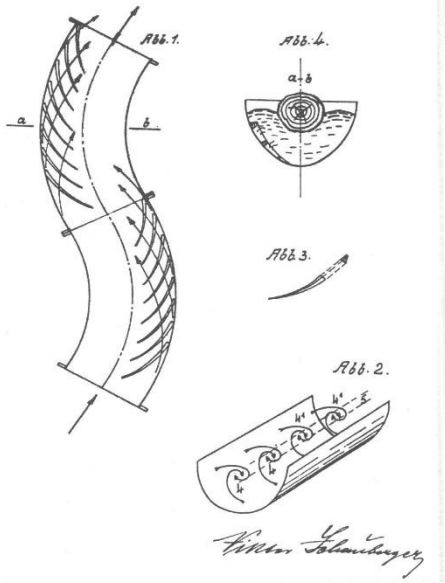
Die Idee, in einem Gewässergerinne gezielt die vorhandene Strömung zu modifizieren, ist keineswegs neu. Bereits 1930 schrieb der österreichische Naturforscher ***Viktor Schauberger***: *„Man kann durch kleinere Einbauten dort, wo diese zum Schutze von Kulturgütern unvermeidlich werden, gewisse Verbesserungen schaffen, doch wäre es falsch, eine Regulierung des Flusses von seinen Ufern aus durchführen zu wollen, also nur die Auswirkungen, nicht aber die Ursachen zu bekämpfen.“* [9] Das heißt: Ufereinbauten nur in Ausnahmefällen!
Mit diesem **ursachenorientierten** Ansatz war Schauberger seiner Zeit weit voraus. Später taucht in einem Buch über Schauberger von ***Olof Alexandersson*** der noch prägnantere Satz auf: *„Man reguliert einen Wasserlauf nie von seinen Ufern aus, sondern von innen her, vom fließenden Medium selber.“* [10] Da der Satz in Anführungszeichen steht, kann davon ausgegangen werden, dass Alexandersson hier Schauberger zitiert hat (es fehlt leider eine Fußnote bzw. ein genauerer Quellenverweis).
In der Abhandlung aus dem Jahr 1930 führt Viktor Schauberger zum Thema Flussregulierung weiter aus: *„Es muss getrachtet werden, die Geschiebeführung so zu regulieren, dass Anlandung oder Abtrag dort erfolgen, wo sie gewünscht werden.“* [11] Mit heutigen Fachbegriffen fordert Schauberger ein „nachhaltiges Geschiebemanagement“, das laut Definition eines der Ziele des Instream River Trainings ist.
Viktor Schauberger war in den 1920er Jahren durch seine Holzschwemmanlagen bekannt geworden. In den Wandungen der Gerinne brachte er Holzrippen an (eine Art Drall-Profil), die im Wasser Längswirbel erzeugten. Heute spricht man von induzierten Spiralströmungen. Durch sie wurden die Hölzer auch in Kurven in der Mitte des Gerinnes transportiert, so dass sie nicht verkanteten. 1940 hat Viktor Schauberger die Anordnung der Rippen in einem Patententwurf präzisiert (siehe Zeichnungen unten).[34]

Holzschwemmanlage von Viktor Schauberger in Neuberg an der Mürz. Teilgerinne am Freinbach zwischen dem damaligen Taschl-See und Frein an der Mürz.

Standbild aus dem Dokumentarfilm „Tragendes Wasser“ von 1929 [EV 02]

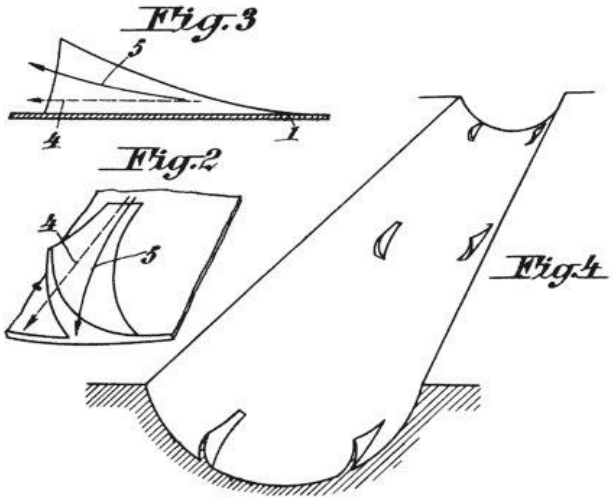
Die von den Rippen erzeugten Längswirbel halten das Holz-Bloch (Rundholz) auf Distanz zur Gerinnewand in der jeweiligen Außenkurve.

Interessant ist die Ähnlichkeit der Rippen (Abb.3) mit den später von ***Otmar Grober*** entwickelten Sichelbuhnen (vergleiche hier).



Zeichnungen links: Olof Alexandersson [35]
Zeichnungen rechts: Viktor Schauberger [34]

1933 erhielt Schauberger ein Patent für „leitschaufelartige Flächen“ (Patent „Drallrohr“). Er wollte mit diesen Leitelementen (auch „Energiekörper“ genannt) die Durchflussmenge in Gerinnen und Rohren vergrößern und dadurch Sedimentationen (Ablagerungen) vermeiden.[12]



(Modifizierte) Darstellung von Leitelementen aus der österreichischen Patentschrift 134543 für Viktor Schauberger [12]

Mit einem Zusatzpatent (Patent „Doppeldrallrohr“) verfolgte Schauberger den Zweck, *„die voreilende Bewegung des Wassers im Kern gegenüber der Wasserführung in den Randzonen zu begünstigen.“* [13] Dazu sollte eine schraubenförmige Strömung im Kern erzeugt werden.

In Deutschland erfolgten erste Versuche, mit buhnenähnlichen Strukturen Sekundärströmungen zu erzeugen, in den 1950er Jahren bei der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) in Karlsruhe. Im physikalischen Modell der Rheinstrecke Düsseldorf wurde überprüft, ob durch in Kurvenkolken angeordnete Grundschwellen ein wirksamer Kolkverbau erreicht werden kann. Durch ihre inklinante Lage (gegen die Fließrichtung) sollten die Schwellen am Innenufer vorbeiziehendes Geschiebe in einer „Grundwalze“ (Sekundärströmung mit horizontaler Drehachse) zum Außenufer – also in die Kolke – verlagern und sie auf diese Weise verbauen. Die Versuche endeten aber erfolglos.[14]

Erst in den 1980er Jahren wurde die Methode der Induzierung von Sekundärströmungen verstärkt in der wissenschaftlichen Forschung aufgegriffen. Am Iowa Institute of Hydraulic Research (IIHR) entwickelte Professor ***Jacob Odgaard*** Leitelemente, die große Ähnlichkeit mit den Leitschaufeln von Viktor Schauberger besitzen.[14]

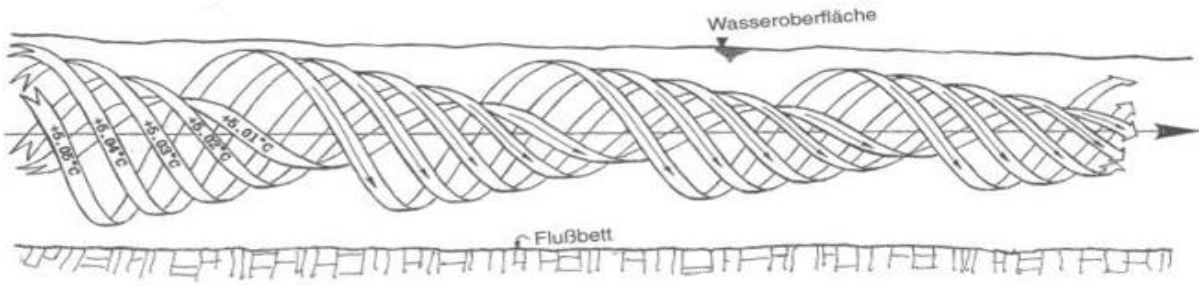
Einbau von Iowa Vanes an einem erodierenden Prallufer des Wapsipinicon River bei Niedrigwasserabfluss im Jahr 1988 (links). Der gleiche Flussabschnitt ist zwei Jahre später durch deutliche Verlandung im Bereich des Prallufers gekennzeichnet (rechts).
(Download am 12.06.2005 unter http://www.iihr.uiowa.edu/projects/IowaVanes) [14]

Diese als „Submerged Vanes“ oder „Iowa Vanes“ bezeichneten Gewässereinbauten werden in der Regel aus Beton- oder Spundwandelementen hergestellt und ragen deutlich aus der Gewässersohle heraus. Trotz ihrer guten Wirksamkeit hinsichtlich Uferschutz und Geschiebemanagement konnten sich die „Iowa Vanes“ in Europa nicht durchsetzen, was vermutlich auch auf ihre naturferne Ausbildung (sie wirken als Fremdkörper) zurückzuführen ist. Sie werden daher im Folgenden nicht weiter berücksichtigt.[1]
Ab den 1990er Jahren baute man in den USA weitere „Instream Structures“ in Gewässer ein. Insbesondere die von ***David Rosgen*** in Colorado entwickelten „Cross-Vanes“, „W-Weirs“ und „J-Hook Vanes“ besitzen ein vergleichsweise naturnahes Erscheinungsbild und wirken strömungstechnisch wie IRT-Einbauten.[15] Doch ähnlich den „Iowa Vanes“ konnten sie in Europa bislang nicht Fuß fassen.

Unabhängig von den Versuchen in Deutschland und unabhängig von den Forschungen in den USA wurden von ***Otmar Grober*** in Österreich seit den 1980er Jahren aus der Praxis heraus neue Flussbauweisen entwickelt, die gezielt die Strömung modifizieren. Seine ersten Lenkbuhnen baute er 1980 in die Walster und 1986 in die Salza ein.[36] Damals war das Gedankengut Viktor Schaubergers selbst in Österreich kaum bekannt. Dagegen verfügten Grober und seine Vorgesetzten bei der Baubezirksleitung (BBL) Bruck an der Mur in der Steiermark über gute Kenntnisse der alternativen Konzepte und Ideen Schaubergers. Das mag damit zusammenhängen, dass Neuberg an der Mürz, wo einst die bekannteste Holzschwemmanlage von Schauberger stand, zum Bereich des Baubezirks Bruck gehört.

IRT-Pioniere: Viktor Schauberger (1885 – 1958), Otmar Grober (mit seinem bevorzugten Baumaterial)

Viktor Schaubergers Leitprinzip war das „k.u.k.-Prinzip“: *„Wir müssen die Natur **kapieren**, um sie in ihren Bewegungsvorgängen zu **kopieren**.“* [16] Flussbau nach Viktor Schauberger ist also ein **naturnaher** Flussbau, er selbst sprach von „naturrichtiger Wasserführung“. Eine wesentliche Rolle spielt dabei für Schauberger die Wassertemperatur. Vereinfacht gesagt, soll sie möglichst niedrig sein und sich dem Anomaliepunkt des Wassers (+4 Grad Celsius) annähern. Dazu ist ein beschattender Uferbewuchs unerlässlich. Eine Abkühlung der Wassertemperatur lässt sich aber laut Schauberger auch erreichen, indem man das Wasser einwirbelt. Schauberger spricht beim „Geheimnis der naturrichtigen Massenbewegung im Wasser“ von „zykloiden Spiralraumkurven“, die im natürlichen Flusslauf durch Reibungswiderstand am Ufer (oder an Steinen) entstehen.[17] Solche Längswirbel wollte auch Flussbaumeister Otmar Grober durch seine Einbauten erzeugen bzw. anregen.



Längswirbel bezeichnete Viktor Schauberger als „zykloide Spiralraumkurven“ *Zeichnung: Callum Coats* [18]

Grober betrachtete bei der Entwicklung seiner Bauweisen die Natur als Lehrmeisterin und studierte natürliche Bäche und Flüsse in der Alpenregion im Jahreslauf. Entscheidende zusätzliche Anregungen erhielt er aus dem Quellenstudium Viktor Schaubergers.[6]

Natürliche Pendelrampe in der Ill in Vorarlberg (links). Als Bergbach erschafft sich der Rheinzufluss seine Lenk- und Bremsstrukturen selbst.

Fotos: O.Grober

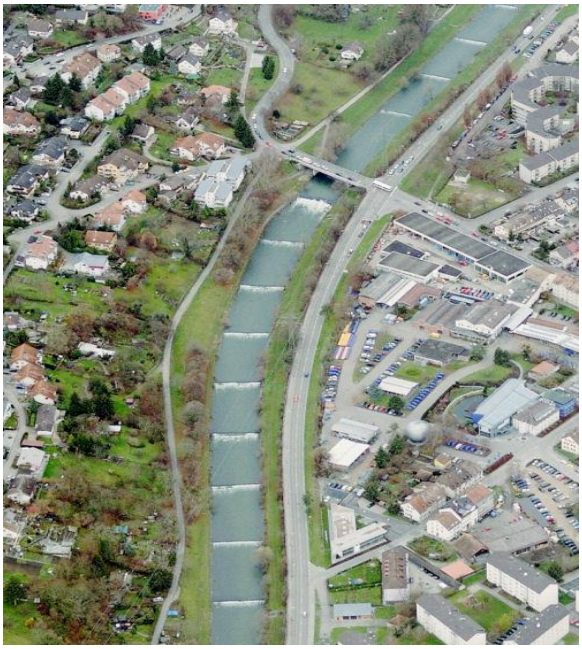
Otmar Grober ließ sich von der natürlichen Ill inspirieren und baute gemäß dem k.u.k.-Prinzip Schaubergers (s. oben) künstliche Pendelrampen – z.B. in den Aschbach in der Steiermark (rechts).

Beiden Pionieren ist gemeinsam, dass ihre Maßnahmen zur Flussregulierung „instream“ stattfinden. So wie es Schauberger schon 1933 bei den Flussbauern eingefordert hatte: *„Sowenig es je einem Arzte einfiele, brechende oder sich im Querschnitt verändernde Kapillaren im menschlichen Körper mit Zwirn und Nadel zu flicken, so wenig sollte es einem denkenden Techniker einfallen, brüchig werdende Ufer eines Wasserlaufs mit Rammpfählen (…) zu verdichten oder Anrisse sinnlos mit Zement zu verschmieren.“* [19]

Der Grünauerbach bei Mariazell bei einem hundertjährlichen Hochwasser 1997. Otmar Grobers erste Pendelrampe bewährt sich schon kurz nach ihrem Einbau: Die Rampe erzeugt in der Gewässermitte ein nach oben gewölbtes Fließbild, die Ufer werden kaum angegriffen. Solche für jedermann sichtbaren „Phänomene“ waren hilfreich bei der Etablierung von IRT-Bauweisen in der Steiermark. *Foto: O.Grober*

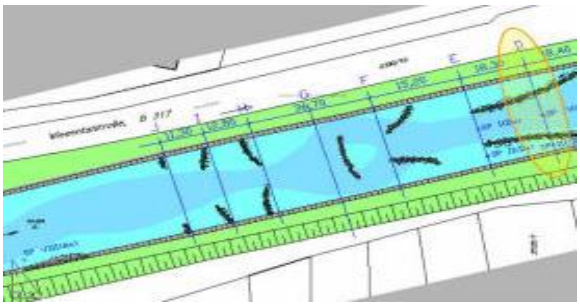
In Deutschland wurde erstmals 2006 eine IRT-Bauweise realisiert. ***Gerd Stellmacher*** baute in Horka in der Lausitz eine kleine Pendelrampe in den Mühlgraben (s. Fotos). Das nötige knowhow hatte sich der Autodidakt bei Flussbauseminaren von Otmar Grober erworben, die jedes Jahr an der Pythagoras-Kepler-Schule (PKS) in Bad Ischl stattfinden.

Zur ersten größeren Umsetzung von IRT-Maßnahmen in Deutschland kam es 2007/2008. Im Rahmen des Projekts „Wiesionen“ wurden im Fluss Wiese in Lörrach (Südschwarzwald) Sohlschwellen entfernt und durch Lenkbuhnen ersetzt. Im Schlussbericht für die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) heißt es: *„Mit Mitteln aus dem normalen Gewässerunterhalt des Regierungspräsidiums Freiburg wurden in den Jahren 2007 und 2008 auf der gewässerökologisch schlechtesten Strecke von 500 m die Sohlschwellen entfernt und mit alternativen Gewässerbauten ersetzt, die auf Erkenntnissen des Försters, Erfinders und Naturphilosophen Viktor Schauberger sowie des Wasserbaumeisters Otmar Grober beruhen.“* [20]
Für das Regierungspräsidium Freiburg war ***Erich Linsin*** der verantwortliche Bauleiter dieser IRT-Maßnahmen, wissenschaftlich beraten wurde er von ***Matthias Mende,*** damals noch wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Technischen Universität Braunschweig.



Wiese vor dem Umbau *Quelle: wiesionen.de*

Wiese nach dem Umbau *Quelle: wiesionen.de*



Plan der IRT-Maßnahmen: Eingebaut wurden die Bauweisen Lenkbuhne und Trichter *Quelle: IUB AG*

In der Schweiz erfolgten die ersten IRT-Einbauten ebenfalls in den Jahren 2007/2008. Die erste Pendelrampe der Schweiz wurde im Scherlibach im Kanton Bern umgesetzt (s. Fotos). Kurze Zeit später wurden im Ellikerbach im Kanton Zürich erste Lenkbuhnen eingebaut (s. hier).

5 Bauweisen des Instream River Trainings

Als naturnahe Bauweisen des Instream River Trainings sind die von Otmar Grober und der Baubezirksleitung Bruck an der Mur/Steiermark entwickelten **Lenkbuhnen** und die **Pendelrampe** zu nennen. Dabei werden ausschließlich naturnahe Materialien wie formwilde Blocksteine eingesetzt, die häufig mit ingenieurbiologischen Baustoffen (Gehölzen und Wurzelstöcken) kombiniert werden. Sie sind auch für Gebirgsbäche und Flüsse mit großem Strömungsangriff geeignet.[1]
Lenkbuhnen gibt es in verschiedenen Ausführungen, wobei die jeweilige Namensgebung zu einem gewissen Wirrwarr an Bezeichnungen geführt hat. Der in diesem Handbuch verwendete Überbegriff **Lenkbuhne** umfasst die in Österreich gebräuchlichen Begriffe **Sohlgrund(lenk)buhne** bzw. **Sohllenkbuhne**. Leichte Modifizierungen davon sind die **Sichelbuhne** und die **Hakenbuhne** (auch **Hakenlenkbuhne** genannt). Etwas komplexere Variationen sind die **Schneckenbuhne** (auch **Wasserschnecke**) und **Trichterbuhne** (auch als **Strömungstrichter** bezeichnet).
Die in den USA entwickelten Bauweisen (siehe dort) werden in diesem Handbuch nicht weiter erläutert, da sie weniger naturnah sind und in Europa bislang nicht zum Einsatz kamen.

5.1 Lenkbuhnen

Die Lenkbuhne ist eine besondere Bauform der Buhne, die bereits bei Niedrigwasser überströmt wird und in ihrer hydraulischen Wirkung daher eher Grundschwellen als „klassischen Buhnen“ ähnelt. Grundschwellen wie auch Lenkbuhnen ragen nur wenig über die Sohle hinaus. Im Unterschied zu reinen Grundschwellen, die meist rechtwinklig zur Strömung über die gesamte Sohlenbreite eingebaut sind, reichen Lenkbuhnen, die schräg zur Strömung angeordnet sind, nur über einen Teil der Sohle. Der Hauptunterschied liegt darin, dass Lenkbuhnen bei größeren Abflüssen eine Spiralströmung erzeugen.[2]

Ein mittleres Hochwasser in der Taverna in der Schweiz, wo Lenkbuhnen zum Schutz des Prallufers eingesetzt wurden. Gut zu erkennen sind die von Lenkbuhnen erzeugten Spiralströmungen. Die (skizzierten) Lenkbuhnen befinden sich ca. 80 cm unter der Wasseroberfläche. Die induzierten Längswirbel laufen schräg zum Innenufer. In der Bachmitte wandelt sich ihre Fließenergie um, es entstehen Kolke. Das ganze wiederholt sich an den folgenden Lenkbuhnen. So wird das Außenufer ohne harten Verbau geschützt. *Foto/Einzeichnung: N.Werdenberg*

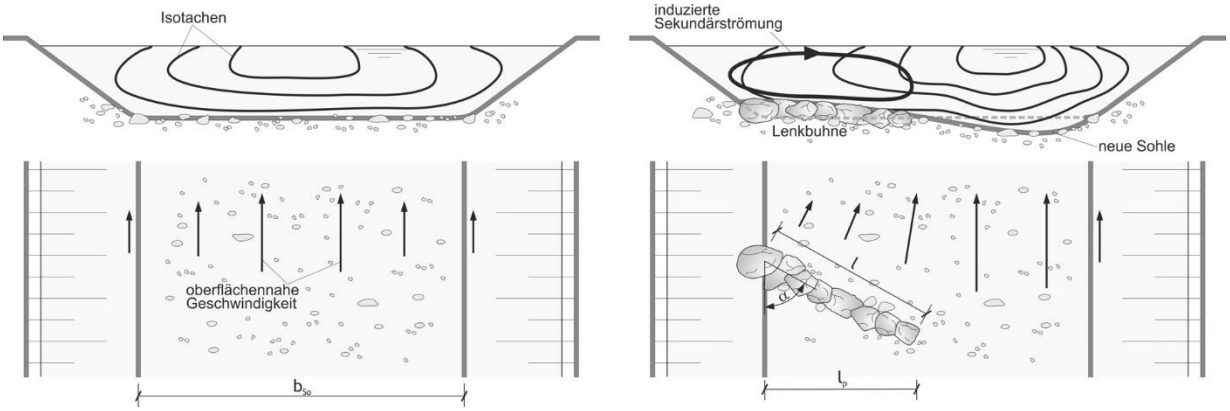
Lenkbuhnen in der Taverna bei Niedrigwasser und bei Hochwasser (s.a. Taverna)

Bei Niedrigwasser sieht man die Blocksteine der eingebauten Lenkbuhnen, kann aber keine Spiralströmungen erkennen.

Bei Hochwasser sieht man die Spiralströmungen, kann aber keine Lenkbuhnen erkennen.

Fotos/Einzeichnungen: N.Werdenberg [37]

Bei inklinanter Anordnung der Lenkbuhne (d.h. gegen die Fließrichtung) lenkt die induzierte Strömung langsam fließendes sohlennahes Wasser in den Bereich der Einbauten. Schnell fließendes oberflächennahes Wasser wird dagegen heraus transportiert. Dieser Massen- und Impulsaustausch bewirkt im Einbaubereich eine deutliche Verringerung der Fließgeschwindigkeit. Dadurch wird die Ablagerung von Sedimenten begünstigt und das Ufer entlastet. Außerhalb der Einbauten steigt die Fließgeschwindigkeit und es kommt zu Eintiefungen.[2, 21]



Schematische Isotachendarstellung eines geraden Gewässerabschnitts ohne (links) und mit inklinanter Lenkbuhne.[21] (Isotachen = Linien gleicher Fließgeschwindigkeit im Querschnitt eines Wasserlaufs)

Lenkbuhnen werden bisher in den Bereichen Uferschutz, Gewässerstrukturierung und Geschieberegulierung eingesetzt. Im Gegensatz zu „klassischen Buhnen“ (dammartige Steinschüttungen) bewirken sie keine wesentliche Querschnittsverengung und damit auch keine Anhebung der Hochwasserspiegellage.[22] Lenkbuhnen sind durch eine kleine Bauwerkshöhe gekennzeichnet. In der Mur (Sohlbreite ca. 50 m) wurden sie von ***Otmar Grober*** mit einer Höhe von ca. 50 cm bis 80 cm eingebaut (sie ragen nur ein Drittel der Steinhöhe aus der Sohle heraus).[1]

Lenkbuhnen zum Schutz eines Prallufers der Mur bei St.Michael (Steiermark)

Foto: G.Hauer

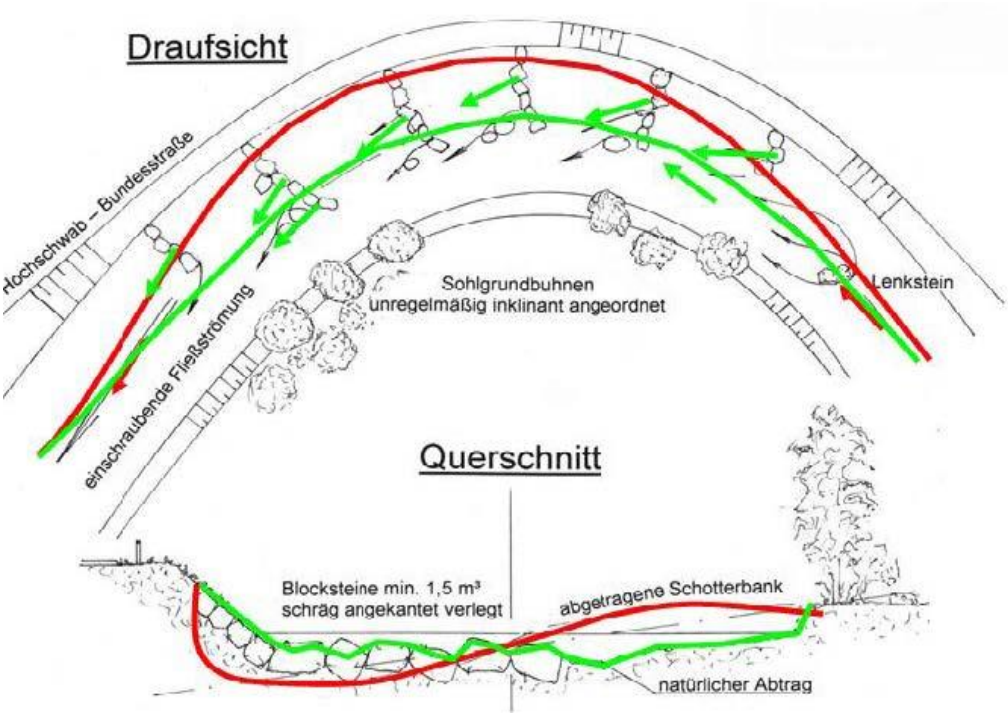
Ein wichtiges Einsatzgebiet von Lenkbuhnen bildet die Sicherung von Prallufern, wo sie üblicherweise in Gruppen angeordnet werden. Die Lenkbuhnen induzieren eine Spiralströmung, deren Drehrichtung der ufergefährdenden Kurvenströmung entgegengesetzt ist. Letztere ist ebenfalls eine Spiralströmung und wird von der Fliehkraft in der Kurve verursacht. Weisen beide Sekundärströmungen die gleiche Stärke auf, heben sie sich gegenseitig auf (siehe auch Kap.2.1). Statt wie üblich am Prallufer zu graben (Kurvenkolk), tieft sich der Fluss jetzt in der Mitte des Betts ein und lagert Sedimente am Prallufer ab. Der Stromstrich und der Talweg verlagern sich in Richtung Innenufer, dortige Auflandungen werden abgetragen.[1, 15]

Lenkbuhnen in Pralluferbereichen schützen mittlerweile auch zahlreiche (Fern-)Straßen. Zum Beispiel in der Steiermark an der Mürz und an der Salza, in Bayern an der Isar.

Inklinante Lenkbuhnen zum Schutz eines Prallufers der Mürz, direkt dahinter die B 23. Die Lenkbuhnen schließen an den bestehenden Blocksatz an, der gänzlich erhalten werden konnte und seit dem Einbau stabil ist.[1]

Foto: M.Mende

[EV 03]

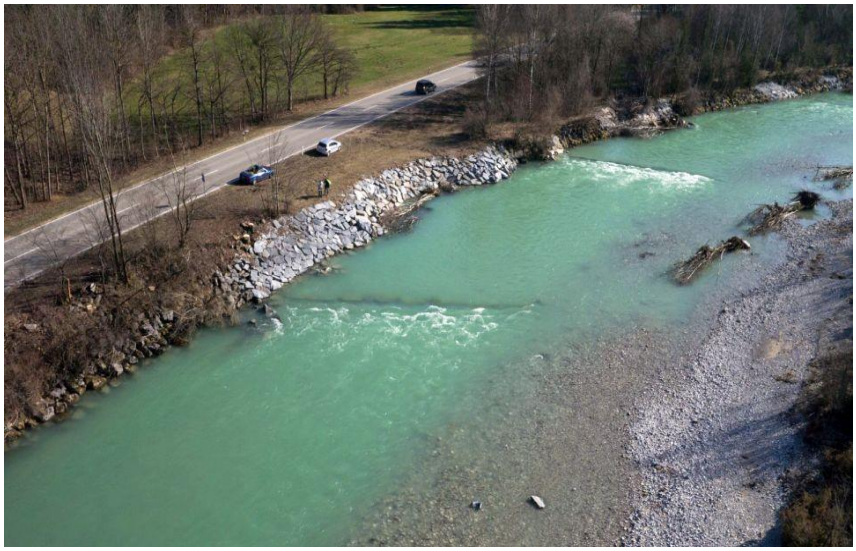


Inklinante Lenkbuhnen in der Salza. Die grünen Linien markieren Strömungssituation und Sohlzustand nach dem Einbau. Direkt am Ufer verläuft die B 24, die ehemalige Hochschwab-Bundesstraße.

Zeichnung: O.Grober/BBL Bruck (1997) modifiziert v. M.Mende[22]

Lenkbuhnen in der Isar an der B 13. Ein Hochwasser im Jahr 1999 hatte hier einen Uferanriss auf einer Länge von ca. 50 m verursacht. Die Ufersicherung aus klassischem Steinsatz musste in den folgenden Jahren mehrmals saniert werden. 2017 wurde der gesamte Uferbereich durch fünf inklinante Lenkbuhnen zusätzlich gesichert[50] (siehe auch hier).

Foto: WWA Weilheim



Zur Sicherung eines Uferdamms unter gleichzeitiger Verbesserung der Gewässerstruktur wurden von ***Matthias Mende*** im Jahr 2008 erstmalig in der Schweiz in fünf Abschnitten des Ellikerbachs Lenkbuhnen eingebaut, wobei verschiedene Materialien (u. a. Blocksteine und gerammte Fichtenspaltpfähle) verwendet wurden. Der im nördlichen Teil des Kantons Zürich verlaufende Bach ist im Unterlauf stark begradigt und durch ein einheitliches Trapezprofil gekennzeichnet. Über weite Strecken verläuft das Gewässer entlang einer Straßenböschung, die bereits an mehreren Stellen erodiert wurde.[2]
Der Gewässerunterhalt sah vor allem häufige Baggerungen vor, um Verlagerungen des Stromstrichs in Richtung Damm zu verhindern. Diese Praxis ist jedoch nicht nachhaltig und führt daher zu dauerhaften Kosten und wiederkehrenden massiven Eingriffen in das Ökosystem Fließgewässer.[1]
Die Maßnahme wurde durch ein Monitoring begleitet, das die Aufnahme von Querprofilen, Geschwindigkeitsmessungen und eine Fotodokumentation beinhaltet.

Situation vor (links) und zwei Monate nach dem Einbau von Lenkbuhnen aus Blocksteinen (Mitte); visualisierte Oberflächenströmung bei erhöhtem Abfluss nach dem Einbau (rechts). Blick in Fließrichtung.[2]

Die Ergebnisse der Monitorings fasst Mende wie folgt zusammen:

- Vor dem Einbau war die Strömung bei Niedrig- und Mittelwasser in allen Abschnitten durch einheitliche, meist geringe Fließgeschwindigkeiten über die gesamte Breite gekennzeichnet (Foto links). Nach dem Einbau ist eine deutliche Zunahme der Strömungsdiversität zu verzeichnen. Insbesondere weist der Bach heute auch Bereiche mit größeren Fließgeschwindigkeiten auf, was rheophilen Arten (vorzugsweise in strömendem Wasser lebend) zu Gute kommt.
- Die strömungslenkende Wirkung und daraus resultierende Entlastung der Straßenböschung bleibt auch bei erhöhtem Abfluss erhalten (Foto rechts).
- Bereits wenige Monate nach Einbau konnte eine merkliche Zunahme der Tiefenvarianz festgestellt werden. Die vorher annähernd horizontale Sohle ist heute durch Flachwasserzonen und Kolke gekennzeichnet (Foto Mitte)
- Lokal konnten Laufverlagerungen um bis zu einem Meter von der gefährdeten Straßenböschung weg nachgewiesen werden. Entlang der Böschung ist keine Erosion mehr feststellbar, stattdessen wird hier Geschiebe abgelagert. Teilweise kommt auf diesen Ablagerungen bereits Bewuchs auf, durch den die Böschung weiter stabilisiert und das überbreite Niedrig- und Mittelwasserprofil auf ein naturnahes Maß eingeengt wird.
- In den beiden Abschnitten mit Lenkbuhnen aus Blocksteinen ist eine annähernde Verdopplung des Fischbestands (Individuenzahl) zu verzeichnen, wobei insbesondere die Bachschmerle als rheophile Art von dem Einbau profitiert hat. Hervorzuheben ist eine Verfünffachung (!) der größeren Fische (> 30 cm), was auf die neu entstandenen Kolke (Fischeinstände) im Lenkbuhnenumfeld zurückgeführt wird.[2]
- Die Lenkbuhnen aus Blocksteinen (Gewicht nur ca. 0.5 t) waren relativ einfach einzubauen, zeigen vielfältige Strömungsverhältnisse und fügen sich auch optisch gut in das Gewässer ein. Einbauten aus Holz (Fichtenspaltpfähle, Fichtenstämme) sind aufwändiger in der Herstellung und werden eher als Fremdkörper wahrgenommen.
  Da sie jedoch überströmt werden und sich schnell verfärben, sind sie insbesondere für Gewässer mit eher feinkörniger Sohle durchaus geeignet. Tendenziell zeigte sich bei den Lenkbuhnen aus Fichtenspaltpfählen aufgrund der scharfkantigen Ausbildung eine etwas bessere Wirkung hinsichtlich Strömungslenkung und Uferschutz als bei den annähernd horizontal eingebauten runden Fichtenstämmen, die zudem aufgrund des Auftriebs nur schwer präzise einzubauen sind.[1]

Die Bilder vom Ellikerbach zeigen, dass man Lenkbuhnen auch in kleinere Bachläufe einsetzen kann. Sollte der Bach zu eng sein, um mit dem Bagger zur Einbaustelle zu gelangen, bietet sich als Alternative ein Schreitbagger an. Dieser ist auf Grund seiner besonderen Konstruktion in der Lage, auch von der Seite ins Bachbett „einzusteigen“.

Ein Schreitbagger steigt in das Bachbett der Kupfer (Baden-Württemberg) hinab

Foto: F.Fitzke

[EV 04]

Beengte Platzverhältnisse bei den Baumaßnahmen herrschen oft in Ortslagen. Aber auch dort lassen sich Lenkbuhnen problemlos mit ähnlichen Wirkungen - wie oben beschrieben - einsetzen. **Für kommunale Entscheidungsträger besonders interessant:** Da das gesamte Geschehen „instream“ stattfindet, kann eine Revitalisierung auch dann vorgenommen werden, wenn keine zusätzlichen Flächen zur Verfügung stehen. Dazu eine grundsätzliche Anmerkung: Bäche und Flüsse brauchen Raum. Wo immer möglich und wo immer es einen Sinn ergibt, sollten sie Raum zurück erhalten. Wo das aber nicht mehr geht (und das ist häufig der Fall), kommt das Instream River Training ins Spiel. **IRT ist also keine Konkurrenz zu "klassischen" Renaturierungen**; es ist vielmehr eine Ergänzung, vor allem für Abschnitte, in denen aufgrund beengter Platzverhältnisse eine "klassische" Renaturierung unmöglich ist.

Gewässerstrukturierung durch Lenkbuhnen, die von ***Matthias Mende*** in den Dorfbach von Biberist bei Solothurn (Schweiz) eingebaut wurden.

Foto: M.Mende [EV 05]

Foto: F.Fitzke

[EV 06]

Zur Regulierung des Geschiebetransports wurden Lenkbuhnen vor allem unterstrom von Flusskraftwerken eingebaut. Die hier häufig auftretenden Auflandungen führen zu einer Anhebung des Unterwasserstands und damit zu einer Verringerung der energetisch nutzbaren Fallhöhe. Aus diesem Grund werden sie vielfach durch kostenintensive und ökologisch nachteilige Baggerungen entfernt. Wie Untersuchungen der TU Graz an sechs Kraftwerken in der Mürz zeigten, kann der Unterwasserstand bei Niedrig- und Mittelwasserabfluss durch den Einbau beidseitig angeordneter Lenkbuhnen nachhaltig gesenkt werden. Nach Auskunft der Betreiber resultiert daraus eine Erhöhung der Jahresenergieproduktion um fünf bis sechs Prozent. Darüber hinaus können Räumungen und die mit ihnen verbundenen negativen Auswirkungen dauerhaft vermieden werden.[1, 23]

Die Mürz unterhalb des Kraftwerks Trieb mit Lenkbuhne im Vordergrund. Anhand der Verfärbungen der Betonmauer am linken Ufer (im Bild oben) ist noch gut das lange Zeit im Mittel ca. 80 cm höher stehende Unterwasser zu erkennen.[1]

Foto: M.Mende

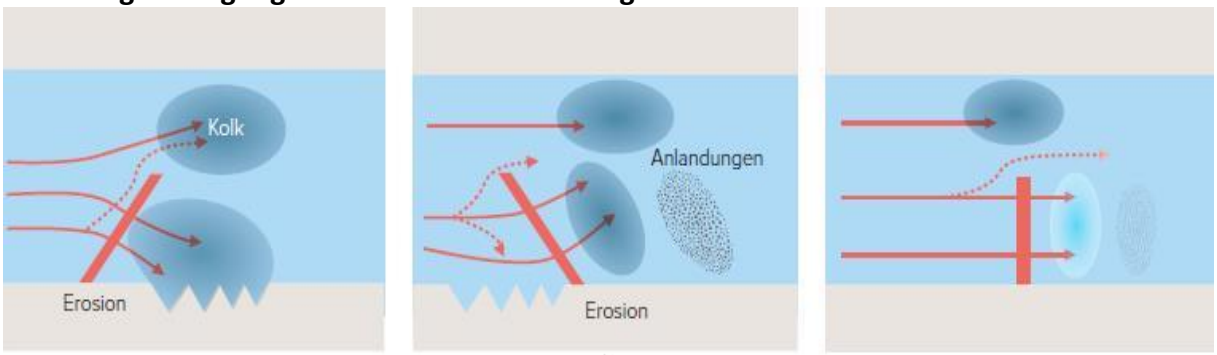
Flussbaumeister ***Otmar Grober***, der 2011 in Pension gegangen war, stellte sich 2017 einer weiteren großen Herausforderung: der „Reparatur“ der March unweit von Wien. Die March ist der Grenzfluss zwischen Österreich und der Slowakei mit ökologisch wertvollen Lebensräumen. Insgesamt sieben Gasleitungen verlaufen von der Slowakei nach Österreich und versorgen Westeuropa mit Gas. Im Bezirk Gänserndorf unterqueren die Leitungen in speziellen Rohrführungen (Düker genannt) die March. Wie weit diese Düker unterhalb der Flusssohle liegen müssen, ist behördlich vorgeschrieben. Das Problem: Die March gräbt sich seit vielen Jahren immer tiefer in das Flussbett und verringerte somit die vorgeschriebene Mindestüberdeckung. Das Eingraben des Flusses musste im Bereich der Gasdüker gestoppt werden. Die Gasleitungsbetreiber beauftragten ein Wiener Ingenieurbüro, diese schwierige Aufgabe nachhaltig und schonend für die Umwelt zu lösen. Das Ingenieurbüro wiederum engagierte Otmar Grober als Berater, um mit seinem reichen Erfahrungsschatz die Sohlenerosion der March zu stoppen.
Die IRT-Maßnahmen in der March wurden im Sommer 2017 umgesetzt. Hier ein kurzer Bericht aus dem newsletter eines Gasleitungsbetreibers:
„Als nachhaltigste Variante, um die Mindestüberdeckung der Düker zu sichern, entschied man sich für den Einsatz so genannter Sohllenkbuhnen. Das sind Reihen aus großen Blocksteinen, die der Strömungslenkung dienen. Sie verhindern, dass sich der Fluss weiter eingräbt und stellen durch gezielte Ablagerungen die Mindestüberdeckung her. Jeder dieser rund 300 Steine ist etwa 2 m lang, 1 m breit, 1,5 m hoch und wiegt 6 bis 10 Tonnen. Die insgesamt acht Buhnen werden Richtung flussauf sowie vom österreichischen Ufer Richtung slowakisches Ufer hergestellt. Die Blocksteinreihen werden mit einem Raupenbagger mit GPS-unterstützter Maschinensteuerung zentimetergenau eingebaut. Das technisch herausfordernde Verfahren wird erstmalig in einem Tieflandfluss angewendet.“ [24]

Ein 80-Tonnen-Bagger beim Einbau von Lenkbuhnen in die March 2017. Für seine IRT-Maßnahmen in den 1990er Jahren standen Otmar Grober 20-Tonnen-Bagger zur Verfügung. Viktor Schauberger indes konnte von solchen Einbauhilfen nur träumen. *Foto: A.Putz/Riocom*

5.1.1 Zum Einbau von Lenkbuhnen ↑

Lenkbuhnen reichen über ca. die Hälfte bis 2/3 der Gewässerbreite und strukturieren die Sohle daher großflächig. In einer Buhnengruppe sollten die erste und die letzte Buhne etwas kürzer sein. Wichtig ist, die Lenkbuhnen tief einzubauen, so dass sie bereits bei Niedrigwasser vollständig überströmt werden. Die Kolke hinter den Buhnen bilden dann ideale Fischeinstände und die Strömungsvielfalt ist am größten. Werden die Buhnen gegen die Fließrichtung eingebaut *(inklinant, s. Abb.)* wirken sie uferschützend. In Fließrichtung eingebaute Lenkbuhnen *(deklinant, s. Abb.)* erzeugen ufernahe Kolke und sollten nur dann verwendet werden, wenn das Ufer z.B. durch Erlenwurzeln stabil ist.[25]

Strömungserzeugung durch unterschiedlich angeordnete Lenkbuhnen



Deklinante Buhne verstärkt die Strömung auf der eigenen Uferseite

Inklinante Lenkbuhne lenkt die Strömung in die Gewässermitte

Rechtwinklige Buhnen haben meist nur geringe Wirkung auf das Ufer

Oberflächennahe Strömung Sohlnahe Strömung

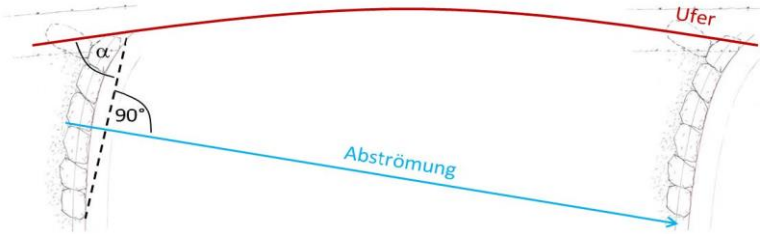
Grafik: übernommen aus [25]

Zu Baubeginn wird der äußere Stein der Lenkbuhne tief ins Ufer eingebunden und ringsherum ingenieurbiologisch *(z.B. Heckenbuschlage)* oder mit weiteren Steinen gesichert, um ein Umspülen der Buhnenwurzel zu verhindern. Danach werden die Steine vom Ufer ausgehend Stück für Stück in die Sohle eingebaut. Sie sind zu mindestens 2/3 ihrer Höhe in die anstehende Sohle einzubauen. Die Steine sollten unbehauen *(formwild)*, jedoch annähernd quaderförmig sein, um einen guten Steinverband zu erreichen.[25]

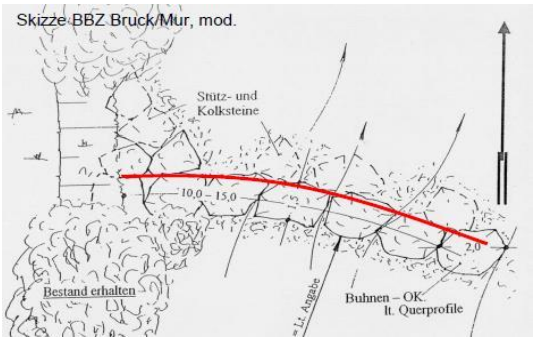
Wenn ***Matthias Mende*** Vorträge vor einem Fachpublikum hält, nennt er weitere Details, die beim Einbau von Lenkbuhnen zu beachten sind:

- Das Höhenniveau entlang der Gewässerachse beträgt ±0 (Bezug: mittlere Sohlenebene).
- Bei langen Buhnen (2/3 der Gewässerbreite) liegt der Buhnenkopf unter der mittleren Sohlenebene.
- Falls möglich, sollte eine große Buhnenlänge gewählt werden. Dann sind weniger Lenkbuhnen nötig, was wiederum den Materialverbrauch senkt. Gleichzeitig nehmen die Strömungs- und damit Strukturvielfalt über die ganze Gewässerbreite zu.
- Eine Lenkbuhne steigt vom Kopf zur Wurzel um ca. 1-3 Prozent an.
- Höhe an der Buhnenwurzel bei kleinen bis mittleren Gewässern (Sohlenbreite ca. 2 bis 20 Meter): ca. 15-30 cm.
- Höhe an der Buhnenwurzel bei größeren Gewässern (Sohlenbreite ca. 50 Meter): ca. 40-60 cm.

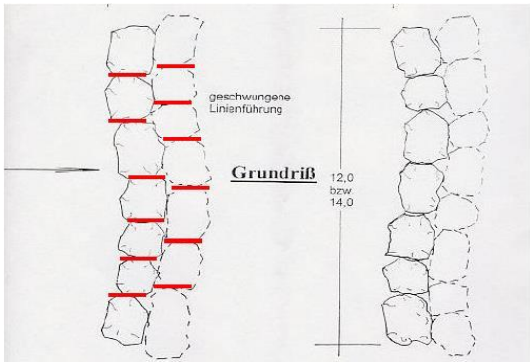
- Der Inklinationswinkel α ist so zu wählen, dass die Abströmung der oberen Buhne auf den Kopf der unteren trifft (Orientierungswert α ~ 60°)



- Bei der Lagegenauigkeit daran denken, dass die Hinterkante („Steuerkantenlinie“) ausschlaggebend ist. Sie sollte eine Linie bilden (max. 10 - 20 cm versetzt).



- Die Steine müssen kraftschlüssig gesetzt werden (keine Lücken). Bei einem mehrreihigen Aufbau die Steine versetzt anordnen.



- Kolkschutzsteine sollten möglichst eine abfallende Oberfläche haben, um einen langgestreckten Kolk zu ermöglichen (Ökologie, Stabilität).
  Wenn Oberkannte Stein – Oberkante anstehende Sohle ≤ 50 cm (1/3 der Gesamthöhe des Steins) kann auf einen Kolkschutzstein verzichtet werden.[22]

Niels Werdenberg ermittelt in seinen Faustregeln für die Bemessung inklinanter Lenkbuhnen die Buhnenabstände in der Außenkurve wie folgt:

Buhnenabstände in Aussenkurve nach Massgabe Kurvenradius r und Sohlenbreite B

kleine Kurvenradien (r < 3 x B)	B x 0,8 bis 1,0
mittlere Kurvenradien	B x 1,5
grosse Kurvenradien (r > 8 x B)	B x 1,8 bis 2,0

Die Abstände beim Einbau sollten nie exakt gleich sein, sondern leicht variieren.[44]

Unter Berücksichtigung der lokalen Gegebenheiten in Österreich, der Schweiz und in Süddeutschland wurden Lenkbuhnen bisher vor allem aus Blocksteinen gebaut. Die Bemessung der Steine erfolgte anhand von Erfahrungswissen; bei mittleren und großen Gewässern liegt das Steinvolumen zwischen 1,5 und 3,0 m³. Je nach Strömungsangriff werden die Blocksteine zusätzlich durch Stützsteine gesichert, außerdem wird die Einbindung ins Ufer mit Blocksteinen verstärkt.
Bei einem Naturversuch an der Brookbäke im Landkreis Oldenburg wurden erstmals Lenkbuhnen aus Totholz umgesetzt. Die Ergebnisse machen deutlich, dass auch andere Materialien zum Bau von Lenkbuhnen grundsätzlich geeignet sind und somit die Materialwahl dem Gewässertyp entsprechend angepasst werden kann. Damit stellen Lenkbuhnen eine naturnahe Alternative zu rein technischen Leitelementen dar, die sich nie in Europa etablieren konnten.[21] Naturnah bedeutet also auch, dass Lenkbuhnen mit regionalem Baumaterial realisiert werden können – im Prinzip überall auf der Welt.

5.1.2 Sonderformen der Lenkbuhne

Der Bautyp **Hakenbuhne** oder **Hakenlenkbuhne** ist den inklinanten (gegen die Fließrichtung laufenden) Lenkbuhnen sehr ähnlich. Dieser Bautyp wird zumeist auf einer geraden Strecke eingebaut und setzt sich aus einem inklinanten Teil am Ufer und einem deklinanten Teil am Buhnenkopf zusammen. Der inklinante Teil entlastet das Ufer, unterstrom des abgeknickten Buhnenkopfs entsteht ein ausgeprägter Kolk.[15]

Deklinanter Buhnenkopf einer soeben fertiggestellten inklinanten Haken(lenk)buhne bei Niedrigwasser

Foto: F.Fitzke

[EV 07]

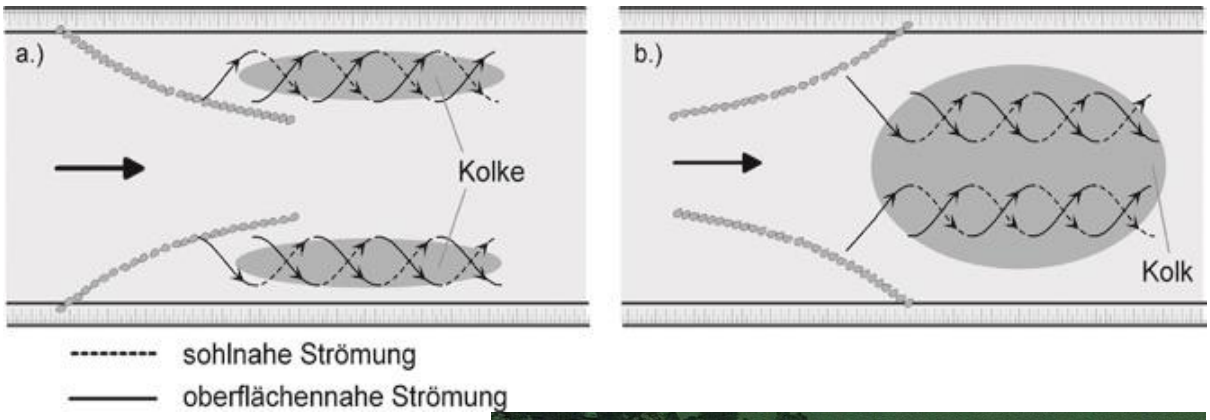
Längere Lenkbuhnen hat Otmar Grober meist sichelförmig (d.h. gekrümmt) ausgeführt. Die **Sichelbuhne** unterstützt eine bessere Lenkung der (gewünschten) Strömungsrichtung und des Sedimenttransports.[26] Sichelförmige Buhnen sind die Hauptbestandteile von größeren **Strömungstrichtern**, die – ebenso wie die Sonderform **Schneckenbuhne** – in eigenen Unterkapiteln dargestellt werden.

Leicht gekrümmte (nachgespannte) Sichelbuhne in der Mur *Foto: O.Grober*

5.1.2.1 Trichterbuhne (Strömungstrichter) ↑

In geraden Gewässerabschnitten kommen beidseitig angeordnete (Sichel-)Lenkbuhnen zum Einsatz. Ein solches Lenkbuhnenpaar wird als Trichterbuhne oder Strömungstrichter bezeichnet. ***Otmar Grober***, der in den 1990er Jahren einen ersten Trichter in die Salza bei Mariazell eingebaut hatte, beschreibt diesen Bautyp wie folgt: *„Strömungstrichter tragen zur Dynamisierung von strömungsarmen Flussabschnitten bei, lenken die Strömung in die Flussmitte und entlasten dadurch die Ufer. Die Wirkung eines Strömungstrichters erstreckt sich auf die vier- bis fünffache Trichterlänge."* [26]
Trichterbuhnen bewirken eine große Strömungsdiversität mit daraus resultierender Tiefenvarianz und Substratsortierung, wodurch die Lebensbedingungen insbesondere für die Fischfauna verbessert werden.[21]
Je nach Anordnung der Trichter zur Fließrichtung (deklinant oder inklinant) werden unterschiedliche Kolk- und Strömungsbilder hervorgerufen.

Hydraulik und Sohlenmorphologie bei Strömungstrichtern: a) deklinante und b) inklinante Anordnung [21]



Deklinanter und inklinanter Strömungstrichter in der Mur (Mur-Trichter 2+3). Beide Einbauten dienen sowohl dem Uferschutz als auch der Gewässerstrukturierung.

Foto: Google Earth

Im Januar 2005 wurde bei St. Stefan in der Steiermark von Otmar Grober ein deklinanter Strömungstrichter in der Mur bei km 178,9 eingebaut (Mur-Trichter 1). Die mittlere Sohlenbreite beträgt hier 41 Meter. Ziel der Maßnahme war es, die Tiefenvarianz der Sohle und die Strömungsvielfalt zu erhöhen, um so wieder verbesserte Lebensbedingungen für den dort heimischen Huchen (ein Großsalmonide, auch Donaulachs genannt) zu erhalten.

Lage der drei Mur-Trichter bei St. Stefan ob Leoben (Steiermark) *Foto: Google Earth*

Otmar Grober beim Einbau von Mur-Trichter 1.
Foto: H.Schmiedel [EV 08]

Die Lage der Blocksteine wurde mit GPS überprüft.
Foto: F.Fitzke

Mur-Trichter 1 wurde als erstes IRT-Bauwerk von einem wissenschaftlichen Monitoring-Programm begleitet. Schon vor dem Einbau war die Sohle in sieben Querprofilen im Abstand von 40 bis 60 m geodätisch aufgenommen worden.
Im Oktober 2005 ereignete sich ein Hochwasser mit einem Spitzenabfluss von 526 m³/s, bei dem die Mur im Untersuchungsgebiet über die Ufer trat. Im Dezember 2005 führte das Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU Graz ADCP-Messungen durch, um die Strömungsverhältnisse und die Sohlenveränderungen nach dem Hochwasser zu messen. Es herrschte dabei ein mittlerer Durchfluss von 37 m³/s. Es wurden die Querprofile 1 bis 6 gemessen. Im August 2007 bzw. 2008 wurden erneut ADCP-Messungen durchgeführt.[21]

(ADCP = Acoustic Doppler Current Profiler = Ultraschall-Doppler-Profil-Strömungsmesser, ein Aktivsonar, das die Doppler-Frequenzverschiebung des Nachhalls von Streukörpern im Wasser zur Bestimmung der lokalen Strömungsgeschwindigkeit nutzt. Die Geräte können je nach Bauart und Konfiguration die dreidimensionale Wassergeschwindigkeit in verschiedenen Tiefenhorizonten messen. *Quelle: Wikipedia*)

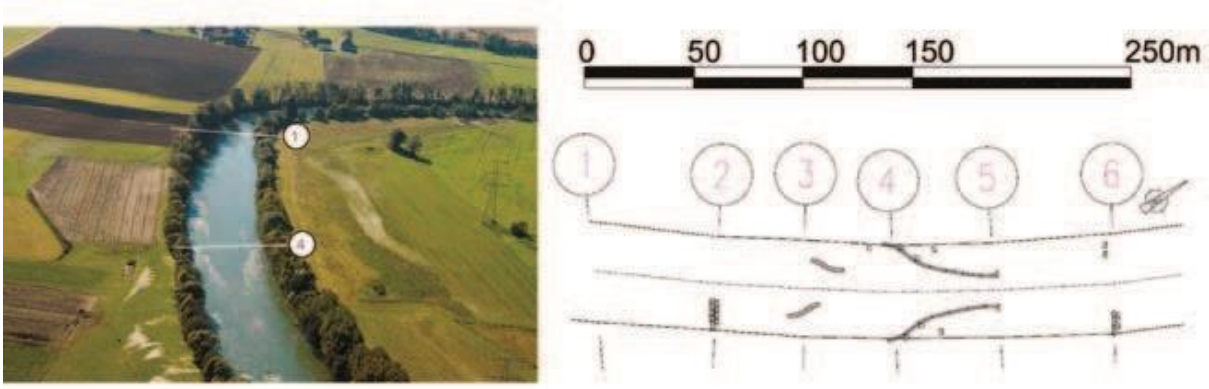
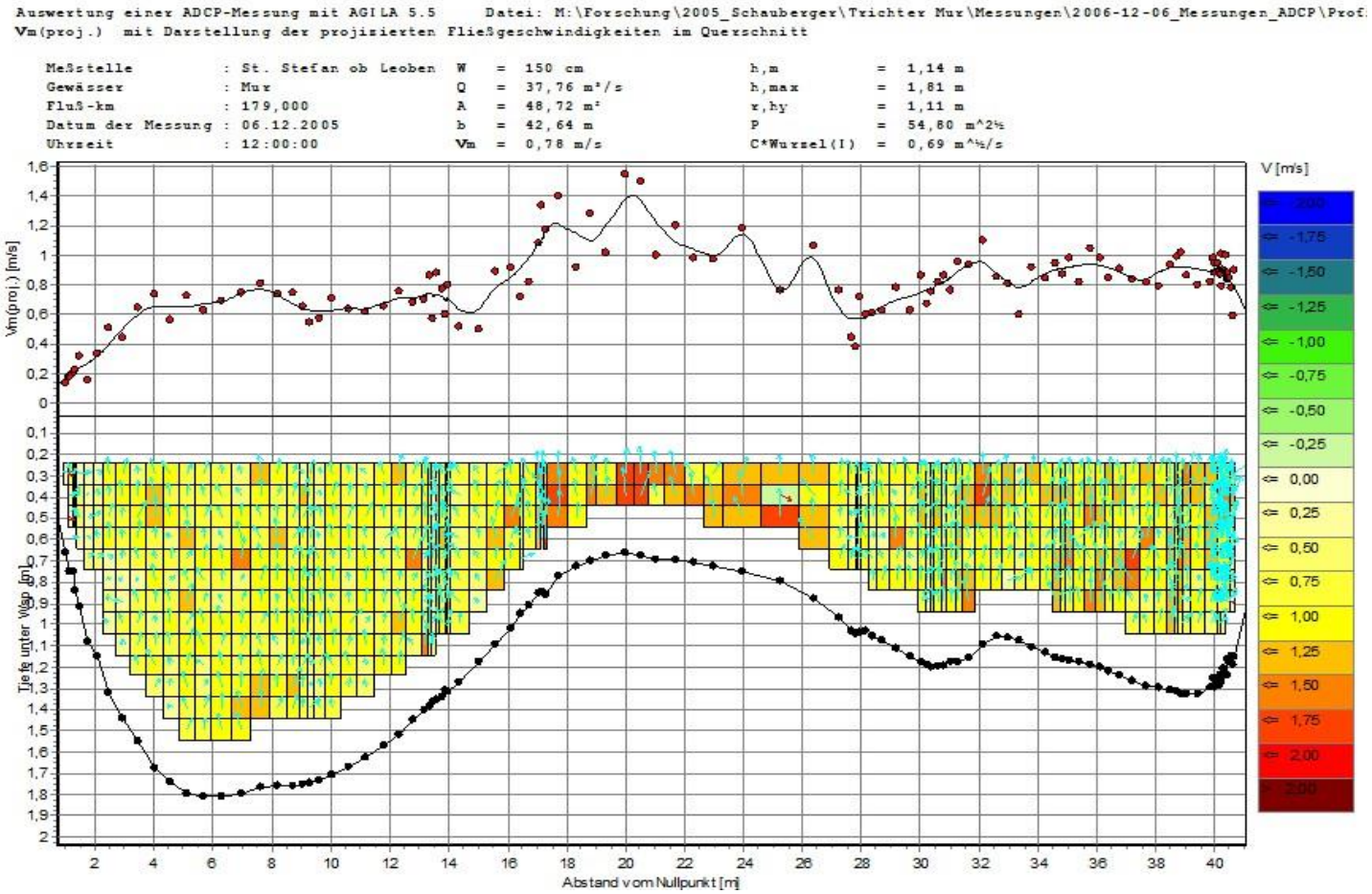


Foto: G.Hauer

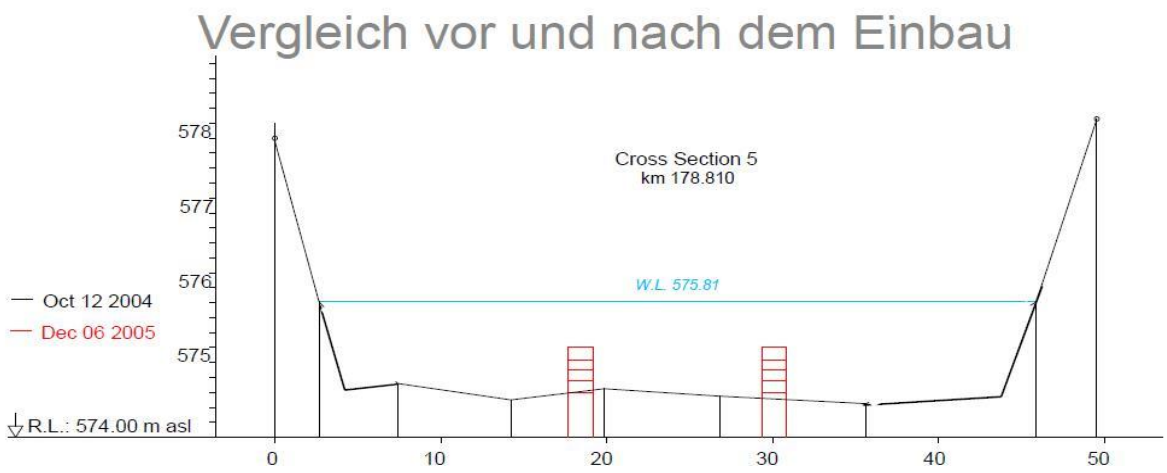
Lage der Querprofile für das Monitoring des ersten Mur-Trichters. Das flussauf liegende Querprofil 1 dient als von dem Einbau unbeeinflusstes Referenzprofil. Querprofil 4 liegt am Trichtereinlauf.[21] Außerdem zu erkennen: Der Trichter wird bei der Strömungslenkung durch zusätzliche Lenkbuhnen unterstützt.

Die ADCP-Messungen belegen, dass sich die Kolke entsprechend dem Prinzip-Bild (s. hier) einstellten. Die Ufer blieben auch nach dem bordvollen Abfluss im Oktober 2005 intakt.[21]

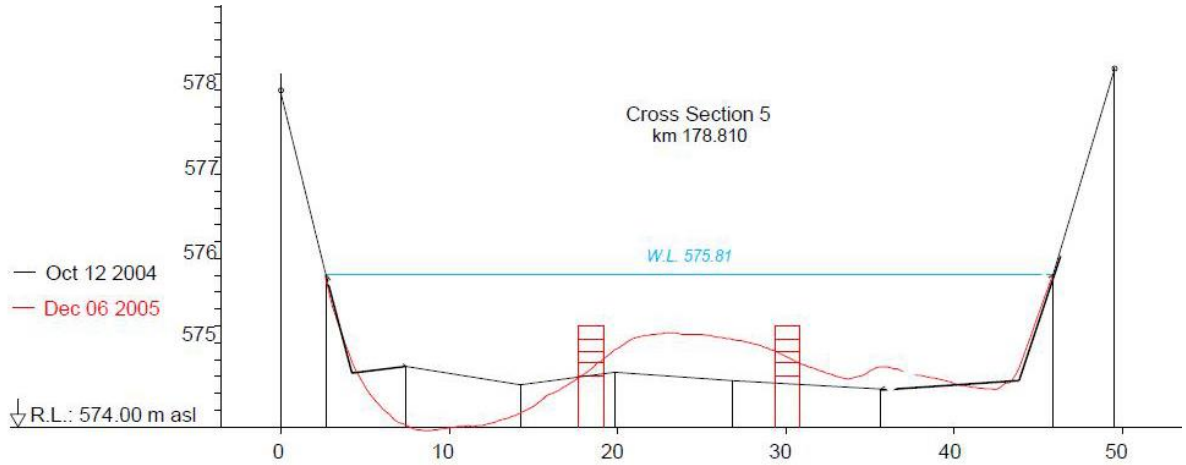


Quelle: O.Grober / TU Graz

Die obige Messauswertung (Profil 5, Trichterauslauf) zeigt eine hohe Strömungsdiversität. Die Fließgeschwindigkeit ist in der Mitte am höchsten, gleichzeitig wurde hier die Sohle angehoben. Zu den Ufern hin nehmen die Fließgeschwindigkeiten ab. Beim Hochwasser wurde in diesen Längswirbelbereichen die Sohle eingetieft.

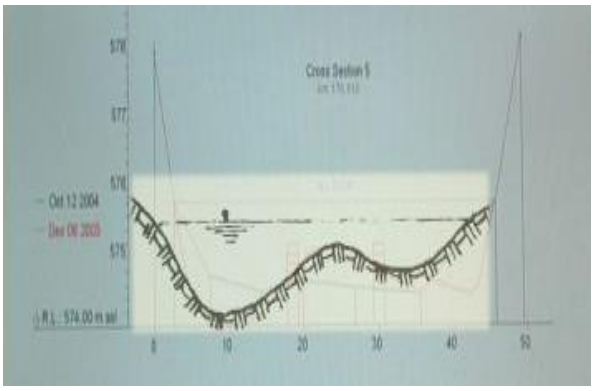


An der TU Graz wertete ***Christine Sindelar*** die Messreihen aus. Der obige Querschnitt (ebenfalls Profil 5) zeigt die Situation vor dem Einbau des Trichters (12. Oktober 2004): Die Mur hat ein glattes, trapezförmiges Profil.



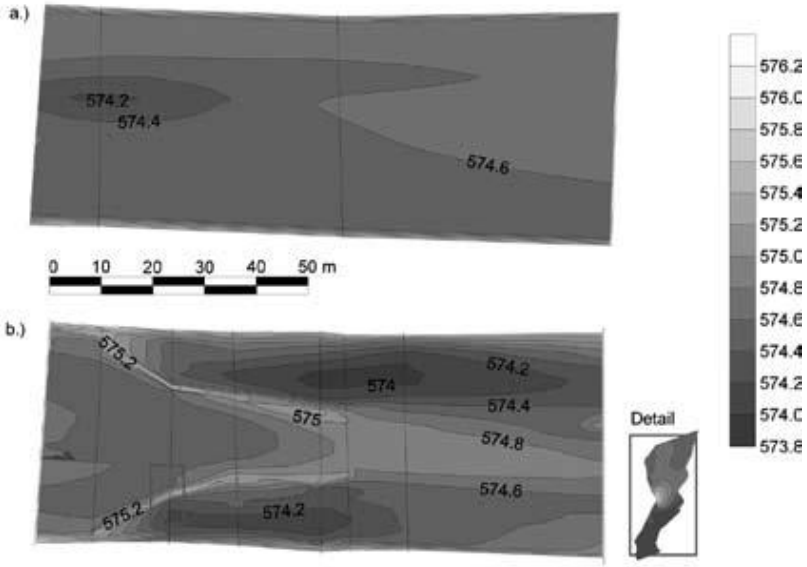
Die Vermessung vom 6.Dezember 2005 (nach dem Einbau des Trichters und nach dem Hochwasser) ergab ein stark verändertes Sohlprofil der Mur. Die rote Linie zeigt eine sehr starke Dynamik im Flussbett. Im linken Uferbereich haben sich Kolke gebildet, was gut für die Fische ist, denn hier finden sie Ruhe- und Aufenthaltszonen.[27]

Rund 80 m oberstrom des Trichters (Querprofil 2) wurde eine Lenkbuhne vom rechten Ufer aus eingebaut, um die Sohle zu stabilisieren.[32]
Obwohl der Trichter symmetrisch in der Flussachse liegt, sind die Kolke auf der linken Seite stärker ausgeprägt als auf der rechten. Am rechten Ufer ist die Kolkbildung geringer, da hier dicht unter der Kiessohle Fels ansteht.[51]



Anm.d.Verf.: Egal, ob beabsichtigt oder nicht: Das durch den Einbau des Buhnensystems veränderte Sohlprofil der Mur ähnelt nun dem Doppelprofil eines natürlichen Flusses bei der Furtbildung, so wie es Viktor Schauberger 1930 gezeichnet hatte.[28]

Montage: F.Debo/F.Fitzke



Auch die ADCP-Messungen von 2007 und 2008 ergaben ein ähnliches Mur-Profil wie 2005.

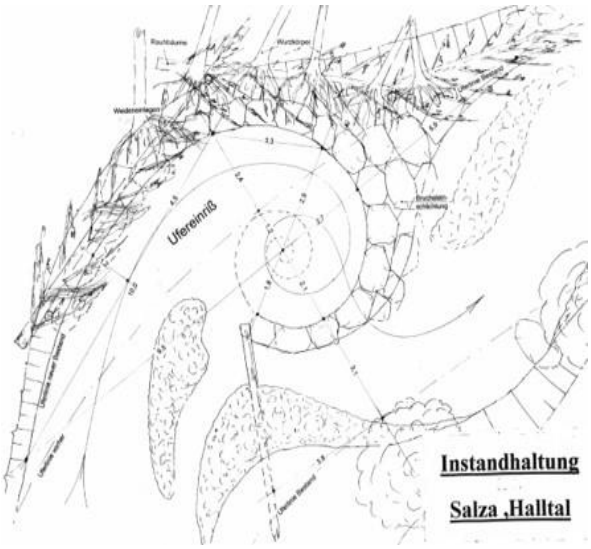
Sohlenmorphologie Mur-Strömungstrichter:
a) vor Einbau
b) nach Einbau
(im August 2007) [21]

Das Monitoring macht deutlich, dass die Strömungsvielfalt und Tiefenvarianz mit dem Buhnensystem deutlich vergrößert werden konnte. Eine Fischbestandserhebung, durchgeführt vom Institut für Hydrobiologie und Gewässermanagement der Universität für Bodenkultur (BOKU) Wien, kam in einem ca. 8,5 km langen Abschnitt der Mur zu dem Ergebnis, dass die Lenkbuhnen die Lebensraumqualität der Fische erhöhen. Drei flusstypische Begleitarten (Neunauge, Bachschmerle, Flussbarsch) und das Rotauge konnten ausschließlich im Bereich des Strömungstrichters nachgewiesen werden.[2]

Mur-Trichter 1, kurz nach seinem Einbau bei Niedrigwasser im Januar 2005 *Foto: F.Fitzke*

5.1.2.2 Schneckenbuhne (Wasserschnecke) ↑

Eine weitere Sonderform der Lenkbuhne ist die Schneckenbuhne. Sie wird zum Uferschutz an Prallufern in die Sohle eingebaut, oftmals dort, wo Ufereinrisse bestehen. Die Schneckenbuhne weist einen in Fließrichtung kleiner werdenden Radius auf (siehe Abbildung). Gemäß dem Drehimpulserhaltungssatz muss die Fließgeschwindigkeit zunehmen, wenn der Radius kleiner wird. Dieser z. B. vom Auslaufwirbel im Waschbecken bekannte Effekt wird umgangssprachlich als „Pirouetteneffekt“ bezeichnet. Das Umfeld der Schneckenbuhnen ist aufgrund der sich ständig ändernden Fließgeschwindigkeiten durch eine sehr große Strömungsvielfalt gekennzeichnet. Durch die Wirbelbildung in der Gewässermitte wird ein großer Teil der Strömungsenergie umgewandelt, unterhalb liegende Gewässerabschnitte werden entlastet. Zur Entlastung des Prallufers trägt darüber hinaus bei, dass die Schneckenbuhne zum Innenufer hin um ein bis zwei Dezimeter abfällt und den Abfluss somit dort konzentriert.[1, 29]



Schneckenbuhne in der Salza (Steiermark) *Zeichnung: O.Grober/BBL Bruck Foto: F.Fitzke*

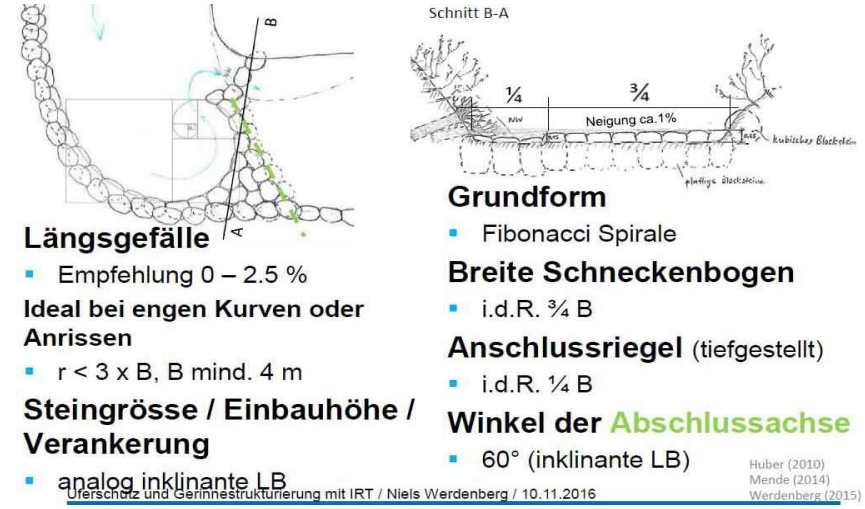
Die erste „Wasserschnecke“ wurde von ***Otmar Grober*** 1997 in die Salza bei Mariazell eingebaut. Bei Filmaufnahmen erläuterte er das ungewohnte Bild, dass sich das Wasser am Prallufer fast gegenläufig zur Hauptströmung bewegt: *„Die Schnecke befindet sich auf dem Grund des Baches und deswegen kann man die Strömungen und Einwirbelungen nicht klar erkennen. Was man aber sehen kann ist, dass sich das Wasser vom Ufer fortbewegt und das Ufer daher nicht mehr in diesem Maß angreift als wenn die Schnecke nicht da wäre.“* [30]
Grober setzt die Schneckenbuhne dort ein, wo aufgrund von starken Richtungsänderungen Ufer eingerissen sind oder Bäche sich ein neues Bett suchen wollen. Beim konventionellen Flussbau wird der Ufereinriss ufergleich geschlossen und damit die dortige Fließgeschwindigkeit erhöht. Dagegen ist bei Einbau der Schneckenbuhne der Anrissradius gleichzeitig der natürliche Außenbogen für den Schneckeneinlauf.[31]
Der in der Schnecke entstehende Wirbel verlagert die Fließenergie in die Bachsohle und in Richtung Innenufer. Nach dem Einbau der Wasserschnecke findet kein Angriff des äußeren Ufers mehr statt.[26]
In der Schnecke kommt es bei Hochwasser zu einer kegelförmigen Sohleintiefung und in der ablaufenden Hochwasserwelle wieder zur Auflandung der Sohle.[32] Man kann also feststellen: **Der Fluss „repariert“ sich selbst.**

Messungen zeigten, dass sich der pH-Wert infolge der Schneckenbuhne um 0,2 Einheiten in Richtung Normalwert bewegte. Außerdem wurden in diesem Abschnitt der Salza vermehrt Fische beobachtet. Für Grober eine Bestätigung dafür, dass IRT-Einbauten und die von ihnen verursachten Fließformen auch die Wasserqualität von Flüssen verbessern.[26]

Fotos: E.Linsin

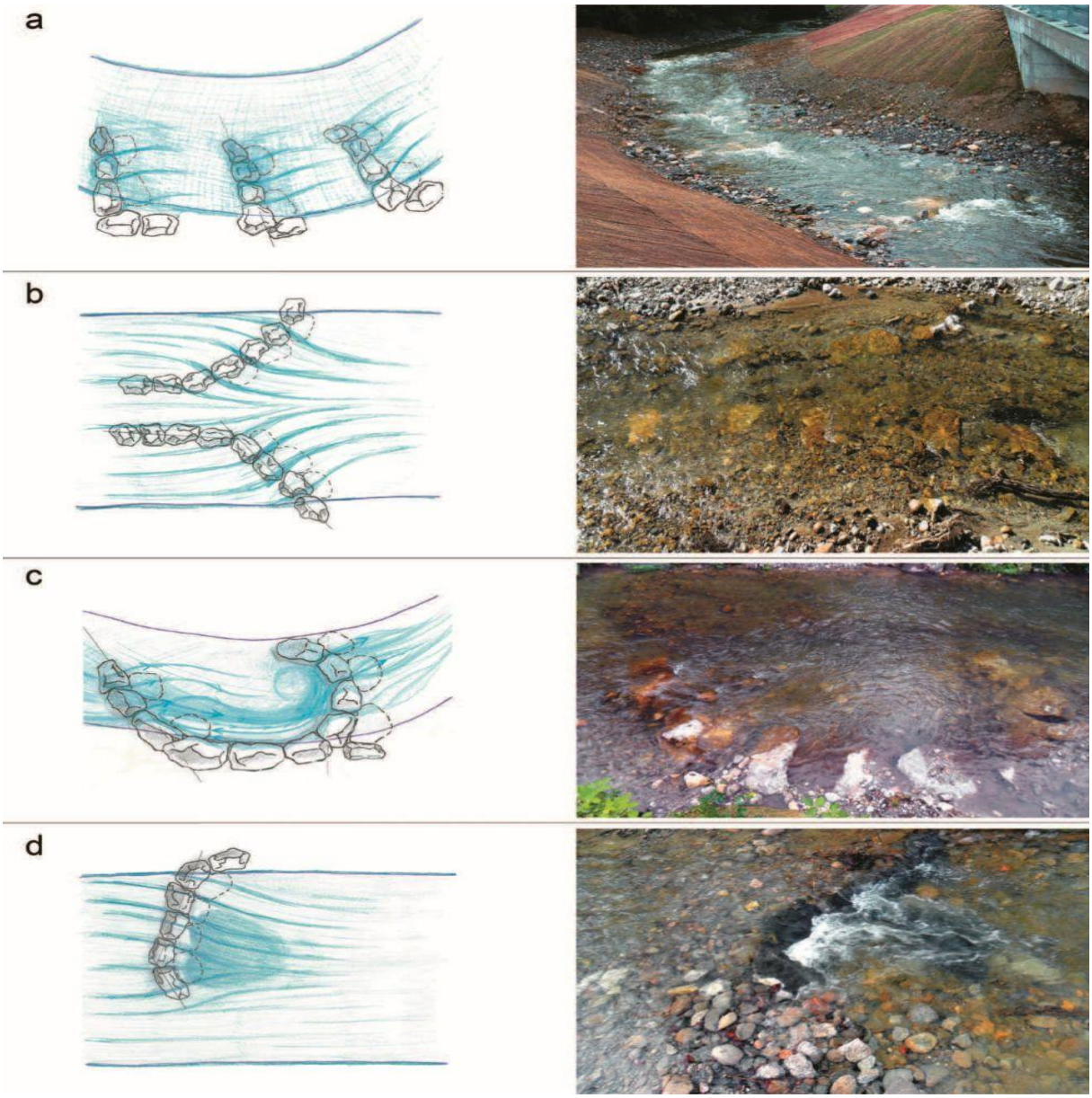
In Deutschland wurden Wasserschnecken zuerst von ***Erich Linsin*** im Schwarzwald umgesetzt. Links eine Schneckenbuhne in der Wiese bei Maulburg. Das rechte Bild zeigt die Dreisam bei Freiburg i.B. Durch Teilöffnung einer Grundschwelle in Kombination mit einer Schnecken-buhne wurde hier die biologische Durchgängigkeit des Flusses wiederhergestellt.[33]

In einer Vortragsfolie von 2016 hat ***Niels Werdenberg*** Faustregeln für die Bemessung einer Schneckenbuhne zusammengestellt.[44]



5.1.3 Schlussbetrachtung Lenkbuhnen ↑

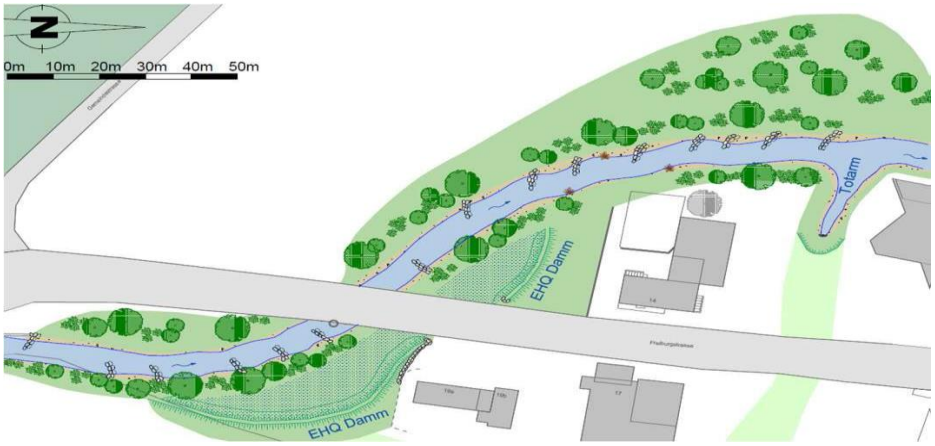
Im Voralpenfluss Taverna im Schweizer Kanton Freiburg haben ***Niels Werdenberg et al.*** 2011 fast alle der in diesem Handbuch aufgeführten Typen von Lenkbuhnen eingesetzt. Mit dem Einbau von rund 40 Lenkbuhnen für Uferschutz und Gerinnestrukturierung auf insgesamt 600 Meter Länge entstand an der unteren Taverna die bisher umfangreichste Pilotstrecke für die verschiedenen Lenkbuhnentypen.[15]



An der unteren Taverna eingesetzte Lenkbuhnen-Typen:
a) 30 inklinante Lenkbuhnen b) 5 inklinante Trichterbuhnen c) 2 Schnecken d) 2 Hakenlenkbuhnen [15]

Die unauffällige und kosteneffiziente Methode ermöglichte es, auf den Längsverbau der Ufer weitgehend zu verzichten sowie ein naturnahes Gerinne mit vielfältiger Morphologie und optimaler Längs- und Quervernetzung zu schaffen.
Insgesamt ließen sich mit dem Einbau der Lenkbuhnen in die Taverna im Vergleich zu klassischem Längsverbau mit Natursteinblöcken ca. **30 bis 50% der Baukosten einsparen**.[15]

Bisher fehlte im IRT-Bereich eine vergleichende Langzeituntersuchung eines Praxisbeispiels, welche die Funktionalität für Uferschutz und die postulierten ökonomischen und ökologischen Vorteile untersucht. Der 2011 gänzlich neu erstellte, rund 200 m lange Abschnitt der Taverna-Umlegung bot gute Voraussetzungen, um die Wirkung der Einbauten hinsichtlich Uferschutz, Strukturierung und Baukosten genauer zu untersuchen und die entsprechenden Nachweise zu erbringen. Diese Erfolgskontrolle wurde vom ausführenden Ingenieurbüro Basler & Hofmann initiiert (Phase 2011 bis 2012) und im Auftrag des Kantons Freiburg und des eidgenössischen Bundesamts für Umwelt BAFU von 2013 bis 2018 weitergeführt.[37]



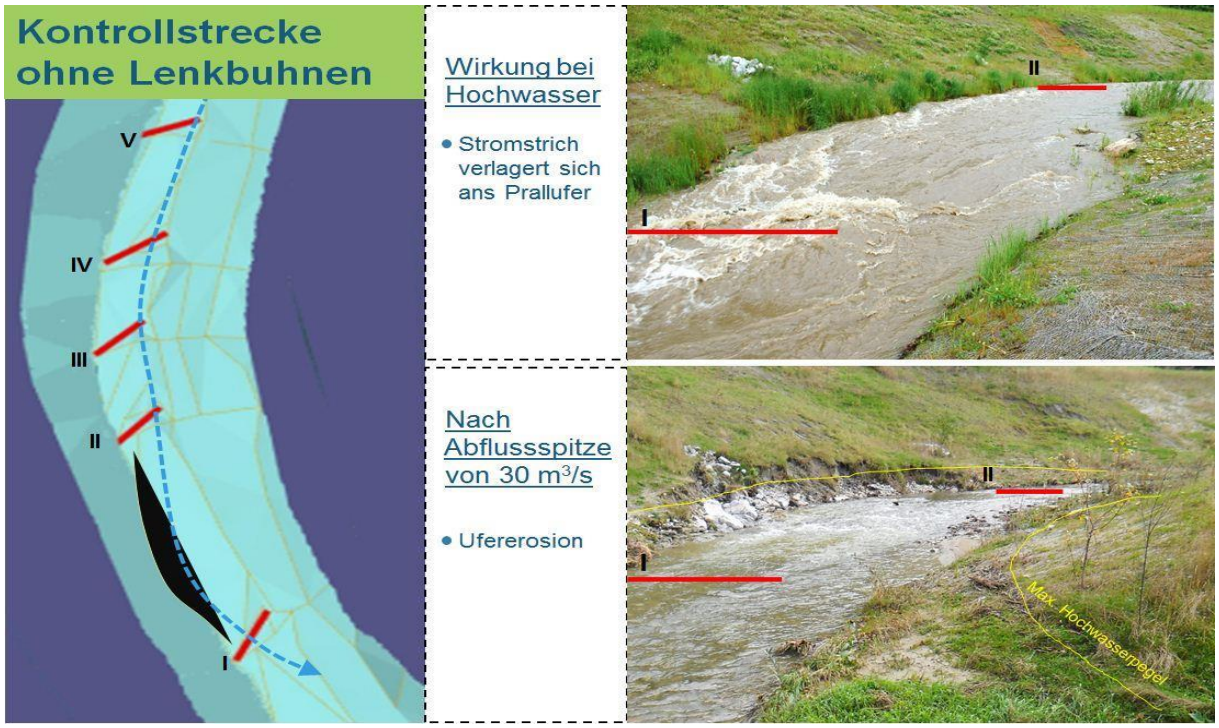
Plan der Taverna-Umlegung mit 15 Lenkbuhnen auf 200 Meter Länge. Das neue Gerinne entstand oberhalb der Siedlung Flamatt.

Quelle: Basler & Hofmann West AG

Zusammengefasst die Ergebnisse der Erfolgskontrolle:

Uferschutz:

In der achtjährigen Untersuchung fanden einige Hochwasserereignisse statt. Dreimal wurden Abflüsse von 30 m³/s erreicht, welche damit nahe beim Dimensionierungswert von 38 m³/s liegen. Die Daten der Gerinnevermessungen zeigen, dass die mit Lenkbuhnen gesicherten Ufer überall stabil geblieben sind. Demgegenüber ist im kurzen Kontrollabschnitt ohne Lenkbuhnen bereits beim ersten größeren Hochwasser eine Seitenerosion von ca. 3 m aufgetreten (siehe Abb.). In den Abschnitten mit IRT statt Längsverbau beträgt das Sohlengefälle 1.6%, der maximale Schleppspannungswert bei Dimensionierungsabfluss ca. 200 N/m².



Ufererosion in der Kontrollstrecke zwischen den Lenkbuhnen II und I *Fotos/Grafik: N.Werdenberg* [37]

Ökomorphologie
Die Vermessungsdaten zeigen, dass im Umfeld der Lenkbuhnen die Diversität der Sohlenmorphologie deutlich zunimmt. Diese von den Lenkbuhnen induzierte Strukturierung der Gewässersohle zeigt die Tendenz, ökologisch wertvolle Habitate zu schaffen.
Ökonomie
Das Praxisbeispiel der Taverna zeigt, dass der Einsatz von Lenkbuhnen den Materialaufwand gegenüber herkömmlichem Längsverbau stark minimiert. Bezogen auf die Baukosten für Uferschutz können bei einem geradlinigen Gerinneverlauf Ersparnisse von bis zu 50% und in Gerinnekurven bis zu 30% realisiert werden. Dies weil in Gerinnekurven die Abstände zwischen den Lenkbuhnen geringer sind als auf geradlinigen Abschnitten.
Fazit / Empfehlung
Es wird generell empfohlen, bei Projekten an Fließgewässern die Einsatzmöglichkeit von *Lenkbuhnen anstelle von Längsverbau* standardmäßig zu prüfen, sobald folgende Voraussetzungen gegeben sind:
1. die zu schützenden Ufer sind geotechnisch stabil
2. die Sohlenlage unterliegt keinen starken Schwankungen
3. das Längsgefälle der Sohle liegt maximal bei 2 Prozent.[37]

Längswirbel in einem Lenkbuhnenfeld der unteren Taverna bei einem mittleren Hochwasser. Solche uferschützenden Spiralströmungen wurden hier über die Jahre immer wieder in ähnlicher Form dokumentiert (vgl. dieses Foto).

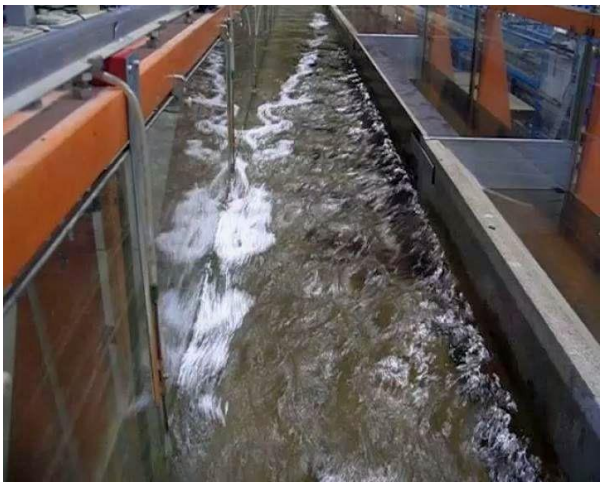
Foto: N.Werdenberg

[EV 09]

Obwohl Längswirbel wie in der Taverna auch in natürlichen Bachläufen zu beobachten sind, war die Induzierung von Spiralströmungen durch Lenkbuhnen in der Literatur selbst Anfang des 21. Jahrhunderts noch nicht beschrieben. Bei Modellversuchen im Leichtweiß-Institut für Wasserbau der TU Braunschweig konnte die Induzierung einer Spiralströmung durch Lenkbuhnen 2007 erstmals nachgewiesen werden.[21]

Die Auswertung der Messungen zeigte, dass alle inklinanten, also vom Ufer gegen die Strömungsrichtung laufenden Lenkbuhnen (Winkel = 30° und 60°) Sekundärströmungen erzeugen. Dabei induzieren Lenkbuhnen nahe der Buhnenwurzel, also am zu schützenden Ufer, den stärksten Drehimpuls. Von dort nimmt er annähernd linear zum Kopf hin bis auf null ab.[14] Die Laborversuche zeigten außerdem, dass selbst **in 10-facher Überströmungshöhe die Buhnen noch eine deutliche Ablenkung der Hauptströmung verursachen**.[14]

Die durch Lenkbuhnen induzierte Spiralströmung wurde nicht nur durch Geschwindigkeitsmessungen, sondern auch indirekt über die Visualisierung der Oberflächenströmung nachgewiesen. Die folgenden Bilder zeigen den Strömungskanal der Technischen Universität Braunschweig zunächst im Versuchsaufbau (ohne Wasser). Deutlich sind die inklinanten Lenkbuhnen zu erkennen. Danach im Versuchsbetrieb sind die Lenkbuhnen nur noch schemenhaft (unter Wasser) zu sehen.



Lenkbuhnen im Braunschweiger Strömungskanal und ein in Fließrichtung nach rechts induzierter Längswirbel.
Fotos: M.Mende [EV 10]

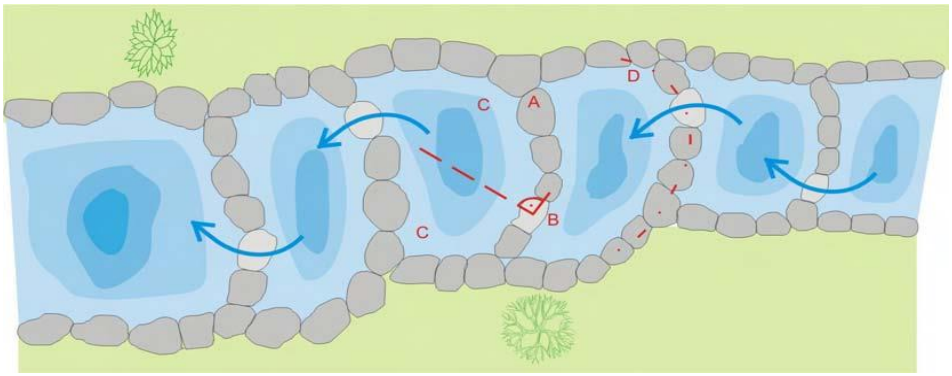
Matthias Mende, der die Versuche im Strömungskanal durchgeführt hat, räsonierte aber noch einige Jahre später: *„Trotz mehr als 20jähriger Erfahrung bei der Baubezirksleitung und guter Wirkung hinsichtlich des Uferschutzes wurde die Lenkbuhne bisher nicht wissenschaft-lich untersucht. Folglich wurden keine fundierten Bemessungsansätze entwickelt, unter deren Anwendung die Funktion der Lenkbuhnen gewährleistet werden kann. Die Bauweise wird daher außerhalb der Steiermark nur zurückhaltend verwendet. Das Fehlen wissenschaftlich basierter Bemessungsansätze steht damit einer weiten Verbreitung der naturnahen und kostengünstigen Lenkbuhnen entgegen, die durch ihre belastungsreduzierende Wirkung auch eine vermehrte Anwendung ingenieurbiologischer Bauweisen ermöglichen*.“ [14]
Deshalb entwickelte Mende in seiner Doktorarbeit Bemessungsregeln für Lenkbuhnen. Sie sind im letzten Kapitel *Bemessungsregeln* seiner Dissertation dargestellt, das im Anhang dieses Handbuchs als Screenshot übernommen wird.

Was hätte wohl Viktor Schauberger zu den Lenkbuhnen, den „steinernen Gerinne-Rippen“ gesagt?
Fotomontage: N.Werdenberg

5.2 Pendelrampe ↑

Um Gefälleunterschiede in Gewässern zu überbrücken, kommen im Flussbau zahlreiche (Sohle-)Rampen (bzw. -Gleiten) zum Einsatz. Die verschiedenen Rampentypen lassen sich zwei Hauptgruppen zuordnen: den geschlossenen (klassischen) Rampen und den offenen (aufgelösten) Rampen. Bei den geschlossenen Typen (z.B. Raue Rampen) ist die Gewässersohle im Bereich des Bauwerks flächig mit Steinen befestigt. Bei den offenen Typen (z.B. Riegelrampen) besteht der Rampenkörper aus ineinander verzahnten Steinriegeln, zwischen denen sich in der unbefestigten Sohle beckenartige Kolke ausbilden können und sollen.[39]

Mitte der 1990er Jahre wurde von ***Otmar Grober*** und der BBL Bruck die Pendelrampe als eine **neue Bauform der Riegelrampe** entwickelt. Die Pendelrampe weist wechselseitig geneigte Riegel (Sohlgurte) auf. Sie bilden treppenähnliche Stufen, in denen das Wasser von der einen auf die andere Seite geleitet wird. Statt direkt über die nächste Stufe abzufließen, legt das Wasser zunächst auf jeder Stufe einen längeren Weg zurück.[26] Bei Niedrig- oder Mittelwasser stellt sich somit ein "pendelnder" Stromstrich (Mäander) ein, bei höheren Abflüssen wird durch die wechselseitige Neigung der Riegel der Stromstrich in die Rampenmitte gelenkt.



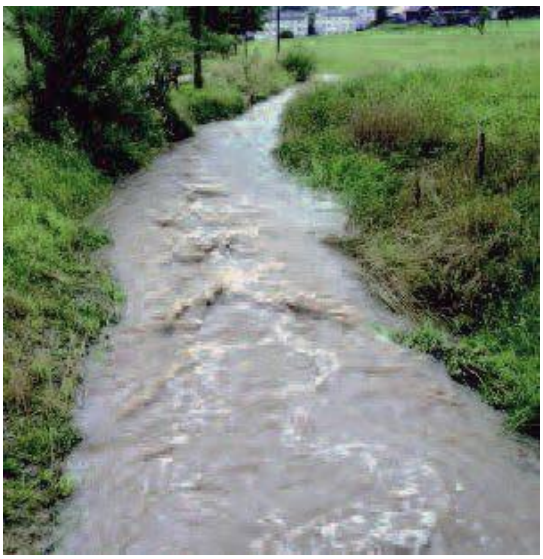
Legende:
A = höchster Punkt des Riegels
B = tiefster Punkt des Riegels
C = Stillwasserbereich
D = Bogenförmige Abstützung

Schematische Darstellung einer Pendelrampe bei Niedrig- und Mittelwasserabfluss [38]

Mit der Verringerung des effektiven Gefälles und der Fließgeschwindigkeit wird zusammen mit der Abflusskonzentration auf eine Teilbreite die biologische Durchgängigkeit der Rampe optimiert. Da üblicherweise (bei Niedrig- und Mittelwasser) nur Teile der Riegel überströmt werden, entstehen ober- und unterstrom der nicht überströmten Riegelbereiche Stillwasserzonen, in denen sich aufsteigende Fische ausruhen können.[38] Pendelrampen sind damit nicht nur hydraulische Bauwerke, sondern auch **naturnahe Fischtreppen**.

Otmar Grobers zweite Pendelrampe im Stübmingbach bei Turnau (Steiermark), ca. 10 Jahre nach ihrem Einbau. Die Rampe führt Mittelwasser. *Fotos: J.Haslauer* [EV 11 + EV 12]

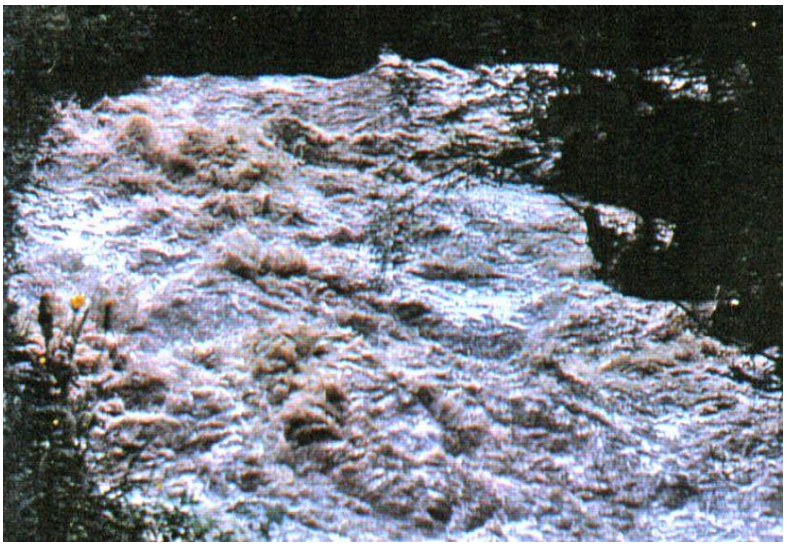
Die Blocksteinriegel der Pendelrampe sind bogenförmig gegen die Fließrichtung eingebaut und ermöglichen so eine Kraftabtragung ins Ufer. Sie sind für die Rampenhydraulik bei Hochwasser von großer Bedeutung. Die Riegel können als beidseitig angeordnete inklinante Lenkbuhnen aufgefasst werden, die im Bereich der Gewässermitte zusammenlaufen. Bei starker Überströmung im Hochwasserfall induzieren die Riegel also zwei Spiralströmungen mit entgegen gesetzter Drehrichtung. An der Sohle drehen die beiden Strömungen in Richtung Ufer und bewirken einen Geschiebetransport zum Ufer hin. Am Wasserspiegel laufen die Spiralströmungen aufeinander zu.[2,38] Es kommt zu Fließüberschneidungen der Längswirbel; sichtbar wird in der Bachmitte ein Fließbild, das ***Otmar Grober*** als „Wasserzopf" bezeichnet. Die beiden gegenläufigen Längswirbel neutralisieren sich, am Ende der Rampe haben sie sich aufgelöst.



Auf diesem Foto einer Pendelrampe im Lettenbach (Kanton Luzern) sieht man sehr schön die beiden induzierten Längswirbel, die dann aufgrund von Fließüberschneidungen in einen „Wasserzopf" übergehen.

Foto: Urs Huber

In einem TV-Interview erklärte Otmar Grober die Wirkung der Pendelrampe wie folgt:



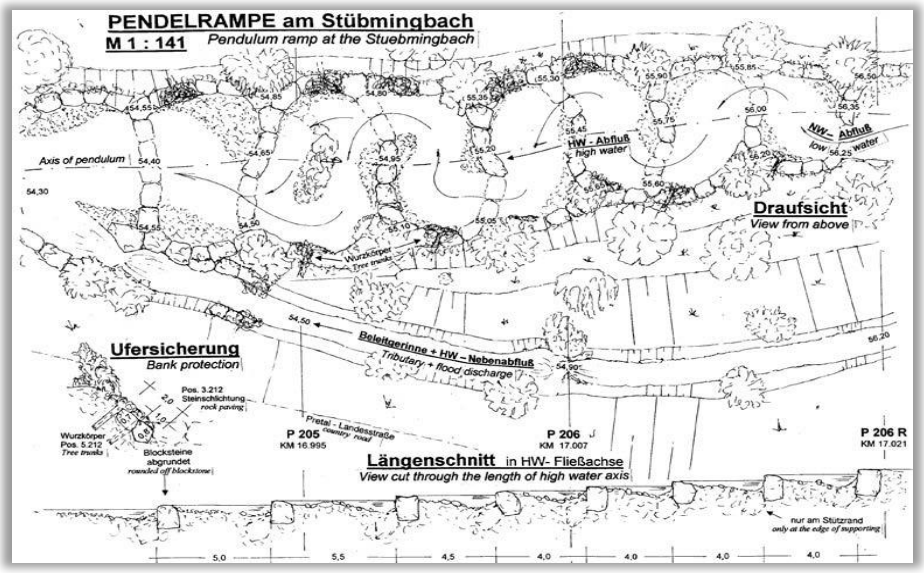
Nach oben gewölbtes Fließbild im Grünauerbach bei Hochwasser – kurz nach Einbau der ersten Pendelrampe (s.a. dieses Foto). *Foto: O.Grober*

„Die Grundidee von der Pendelrampe ist ja eigentlich, dass die alten Fließstrukturen dem Bach wieder zugeführt werden, sodass er seine ursprüngliche, pendelartige Bewegung wieder erreichen kann. Wir geben praktisch nur eine Initialzündung, dass er sein Leben wieder ausleben kann. ***Bei Hochwasser*** *kommt es zu Eindrehungen in sich und das Wasser fängt zum Wirbeln an. Es entsteht anstelle der hin- und herschleifenden Bewegung ein drehender, ein fließender Zopf, ein Wasserzopf. Das heißt: Ich habe ein* ***nach oben gewölbtes Fließbild*** *– im Gegensatz zu den herkömmlichen Rampen, dort habe ich ein nach unten gewölbtes Fließbild und an den Seitenrändern die Uferangriffe. Die Pendelrampe bewirkt, dass ich* ***am Ufer keine Schäden mehr*** *zu erwarten habe. Ich konzentriere die Energie in der Mitte des Flusslaufs."* [30]

Aus finanzieller Sicht führen die kompakte Bauweise der Pendelrampe sowie die reduzierten Ufersicherungsmaßnahmen im Vergleich zu den konventionellen Rampentypen zu erheblich niedrigeren Baukosten. Otmar Grober bezifferte sie auf ungefähr ein Drittel der üblichen Kosten.

Grobers zweite Pendelrampe im Stübmingbach (eingebaut im Jahr 2000) liegt in der oberen Forellenregion und besteht aus acht Riegel-Becken-Einheiten und einer Grundschwelle am unteren Ende der Rampe. Sie ist vom ersten bis zum achten Riegel 31 m lang und weist einen Höhenunterschied von 2,1 m auf, womit sich ein Gefälle von 6,8 % ergibt. Die Höhendifferenz zweier benachbarter Riegel beträgt 24 - 39 cm, der Horizontalabstand misst 3,3 – 5,45 m. Die einzelnen Riegel bestehen aus Blocksteinen mit einem Durchmesser von ca. 1,5 m, die tief in die natürliche Sohle eingebunden sind. Flussab eines Riegels stützen kleinere Blocksteine (ca. 0.8 m Durchmesser) die Riegelsteine ab. Die Becken sind nicht gesichert und bestehen aus dem natürlichen Bachsediment. Seit dem Einbau hat die Rampe, die primär der Sohlenstabilisierung dient, mehrere große Hochwasserereignisse ohne Schaden überstanden.[2]

Von der TU Graz und der BBL Bruck wurden 2007 und 2009 zwei Sohlenvermessungen durchgeführt. Im Dezember 2009 konnte bei sehr geringer Wasserführung auch die Verteilung der Korngrößen des Sediments in den acht Becken dokumentiert werden.[2]



Zeichnung: O.Grober/BBL Bruck

Zusammengefasst die Ergebnisse der Monitorings:

- Unterhalb eines jeden Riegels haben sich Kolke gebildet, die aufgrund der Querneigung der Riegel über die Breite unterschiedlich tief sind. Mittelt man die Kolktiefen über die Querprofilbreite, so ergeben sich Kolktiefen zwischen 37 und 73 cm. Punktuell beträgt die maximale Kolktiefe bis zu 91 cm. Die Kolke befinden sich nur im oberen Drittel einer Riegel-Becken-Einheit, danach steigt die Sohle stetig bis zum flussab gelegenen Riegel an.
- Bei der klassischen Blocksteinrampe stellt die Kolkbildung unterhalb der Rampe häufig ein Problem dar. Bei der Pendelrampe treten keine Kolke am Rampenfuß auf.
- Während flussauf bzw. flussab der Rampe die einzelnen Kornfraktionen des Sediments gut durchmischt sind, findet in den Becken der Pendelrampe eine deutliche Sortierung des Sediments statt.[2]

Die naturnahen, wechseldynamischen Strömungsverhältnisse und Einwirbelungen in der Pendelrampe scheinen sich direkt auf die Wasserqualität auszuwirken. Dies zeigt sich auch am **Bewuchs der Ufer**, der sich wesentlich stärker entwickelt als in anderen Bachbereichen. Bei einem Versuch mit Weidenstecklingen trieben die Weiden oberhalb der Rampe im ersten Jahr um 80 Zentimeter aus, unterhalb um 220 Zentimeter. Pestwurzpflanzen zeigten nach der Rampe wesentlich stärkere Wuchsformen als gewöhnlich (bis zu knapp einem Meter Durchmesser), und auch die Brunnenkresse entwickelte sich überdurchschnittlich.[26]

Stübmingbach vor Einbau der Pendelrampe (2000) und kurz nach Einbau (2001). Man beachte den spärlichen Bewuchs am Bachufer. Er sollte schon bald üppig sein (vgl. neuere Bilder). *Fotos: O.Grober/W.Bachschwell*

Nach Errichtung der Pendelrampen im Grünauerbach und im Stübmingbach (es folgte eine weitere im Aschbach – s. Foto) fehlte eine wissenschaftliche Untersuchung dieses neuen Rampentyps. Das (damalige) österreichische „Lebensministerium“ und die Niederösterreichische Landesregierung beauftragten im Jahr 2006 die Technische Universität Graz, einen Modellversuch durchzuführen, um die Stabilität einer Rampe am Standort Große Tulln in Niederösterreich nachzuweisen (zu den Untersuchungsfaktoren, die vom jeweiligen Standort abhängen, gehört z.B. die Korngröße des Sohlenmaterials). Außerdem galt es, einen Ausführungsvorschlag für Pendelrampen im Bereich Altlengbach/Neulengbach zu erarbeiten.

Auf Grundlage der praktischen Erfahrungen von Otmar Grober wurden im Wasserbaulabor der TU Graz ein physikalisches Modell einer Pendelrampe im Maßstab 1:10 errichtet sowie Untersuchungen der komplexen Strömungsvorgänge in einem Glasgerinne durchgeführt. Das Projekt am Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU Graz mündete in der Doktorarbeit von ***Christine Sindelar***, in der sie ein optimales Design und Dimensionierungsrichtlinien für Pendelrampen entwickelt hat. Die Dissertation ist in englischer Sprache verfasst.[40]
Das letzte Kapitel: *Dimensionierung einer Pendelrampe* wird in deutscher Übersetzung im Anhang dieses Handbuchs als Screenshot wiedergegeben.

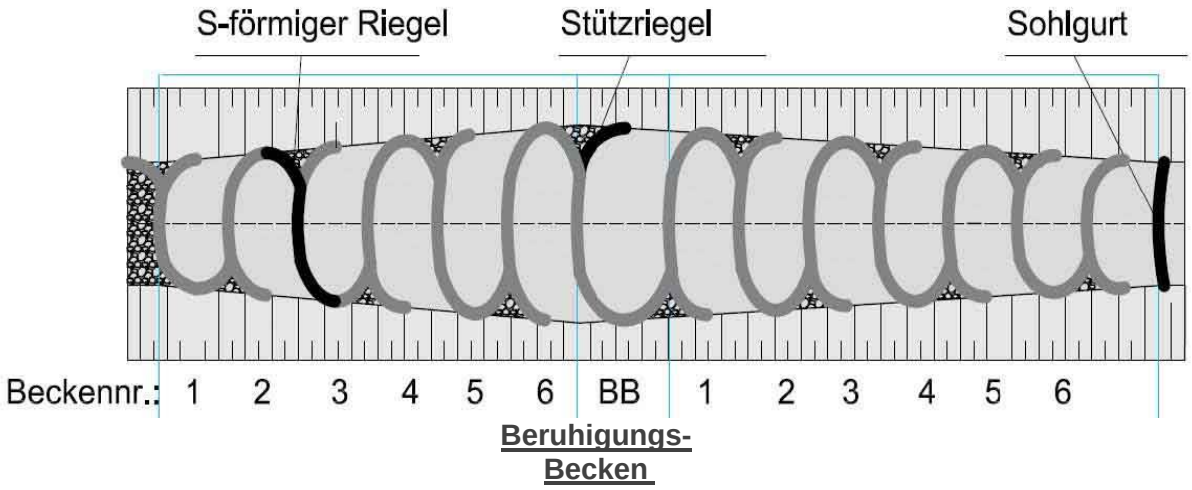
Modell einer Pendelrampe im Fließkanal (oben) und im Glasgerinne (unten) der TU Graz.

Fotos: J.Haslauer [41]

Der charakteristische Fließzustand der Pendelrampe ist laut Sindelar der sogenannte „Tumbling Flow“, bei dem das Wasser kaskadenförmig über die Riegel abfließt. In den Becken wird dem Abfluss ein Teil der Bewegungsenergie entzogen („Tosbecken“). Der Tumbling Flow ist eine zyklische Abfolge von strömendem und schießendem Abfluss, der Fließwechsel (auch Wechselsprung genannt) findet im Tosbecken statt. Bei sehr hohen Durchflüssen ändert sich das Fließbild drastisch. Der Tumbling Flow geht in den sogenannten „Rapid Flow“ über, der Wasserspiegel ist nun weitgehend eben, der Abfluss über die Riegeloberkanten ist schießend. In den Becken entstehen Walzen mit horizontaler Achse quer zur Fließrichtung.[41]

Der Tumbling Flow ist aufgrund seiner hervorragenden Energieumwandlung dem Rapid Flow vorzuziehen. In den Versuchen im Glasgerinne konnte gezeigt werden, dass der Tumbling Flow für umso größere Durchflüsse erhalten werden kann, je tiefer die Becken sind. Da bei einer Pendelrampe dynamische Prozesse erlaubt sind, erodieren die Becken bei einer ansteigenden Hochwasserwelle, womit der Tumbling Flow länger erhalten werden kann. In der abfallenden Hochwasserwelle setzen sich die vom Fluss transportieren Sedimente in den Becken ab und füllen diese wieder auf.[41]

Als eines der wichtigsten Ergebnisse ihrer Arbeit bezeichnet Sindelar die Erkenntnis, dass der Fließübergang von Tumbling Flow zu Rapid Flow der kritische Lastfall für die Stabilität der Rampenstufen ist [40] (also **nicht** der höchste angenommene Abfluss).
Sindelar hat das optimale Pendelrampen-Design schrittweise entwickelt. Für das finale Design wurde eine HQ100-Welle mithilfe frequenzgesteuerter Pumpen simuliert.[41]



Maßstäbliches Grundriss-Schema einer Pendelrampe (modifiziert) [40]

Die Riegel der Pendelrampe sind **S-förmig** in der Lage und schließen nahtlos an den flussauf bzw. flussab liegenden Querriegel an. Die Riegelsteine bilden so eine durchgehende „Schlangenlinie“.
Die Riegel der Rampe werden in die Böschungsfußsicherung integriert.
Jeder Querriegel wird auf jener Uferseite, an welcher er die maximale Höhe erreicht, durch einen bogenförmigen **Stützriegel** flussab stabilisiert. Gemeinsam mit dem Stützriegel ist der Riegelabschluss zum flussab gelegenen Becken U-förmig.
Von der Rampenkrone bis etwa zur Hälfte der Rampe, wird Flussbreite aufgeweitet. Im der zweiten Hälfte verjüngt sich die Flussbreite wieder auf das ursprüngliche Maß.
Neben der Reduktion des spezifischen Abflusses bewirkt die Aufweitung- und Wiederverjüngung auch eine erhöhte Strömungsdiversität und eine verbesserte Tiefenvarianz.
In der Mitte der Rampe ist ein horizontales **Beruhigungsbecken** angeordnet. Es erfüllt einen hydraulischen Nutzen, nämlich die Abbremsung der Strömung, dient aber auch als Rastplatz für aufsteigende Fische.
Unterhalb des Rampenfußes schließt ein bogenförmiger **Sohlgurt** das Rampenbauwerk ab.[41]

Für den Einbau dieser Pendelrampe in die Große Tulln kamen zunächst mehrere Standorte in Frage. Dabei spielte auch die biologische Durchgängigkeit im Sinne der Europäischen Wasserahmenrichtlinie eine wichtige Rolle. Infolge von Hochwässern wurde 2009 das Leitsberg-Wehr im Laabenbach (Oberlauf der Großen Tulln) stark beschädigt. Damit lag es auf der Hand, den Prototypen in Leitsberg (Ortsteil von Altlengbach) zu realisieren.

Reste des Leitsberg-Wehrs 2011. *Foto: J.Haslauer*

Die Pendelrampe wurde 2011 unter der Bauherrschaft des Wasserverbands Große Tulln eingebaut. Die Errichtung lag federführend beim Wiener Ingenieurbüro Dr. Lengyel (BDL) und die Gewässerökologie wurde vom Büro Eberstaller (ezb), ebenfalls Wien, wahrgenommen. ***Otmar Grober*** war begleitend vor Ort.

Die errichtete Rampe ist mit einer Gesamtlänge von 114 m die längste Pendelrampe, die bisher gebaut wurde. Die mittlere Beckenlänge (18 Becken) zwischen den Riegeln beträgt knapp 6 m, die Sohlbreite 8-12 m. Die Höhendifferenz misst insgesamt 2,2 m.[41, 42]

Pendelrampe Leitsberg im oberen Teil (kurz nach Fertigstellung 2011)

Fotos: J.Haslauer

[EV 13 + EV 14]

Pendelrampe Leitsberg im unteren Teil (nach der Brücke). Beide Bilder in Fließrichtung.

Aufgrund der zu schützenden 2. Wiener Hochquellenleitung, einer Kanalisation und des vorbeiführenden Radwegs wurde die Böschungssicherung im oberen Teil massiv ausgeführt. Die Erfahrungen bei Hochwasserereignissen werden darüber Aufschluss geben, inwieweit diese Sicherung für künftige Pendelrampen-Bauwerke reduziert werden kann.[41]

Nahaufnahme des oberen Teils der Pendelrampe gegen die Fließrichtung. Das Teleobjektiv erkennt wesentlich mehr Details in den Fließstrukturen als das normale Auge zu sehen vermag.

Foto: O.Grober

[EV 15]

Im Rahmen des Projekts wurden Wasserqualitätsparameter vor und nach dem Einbau der Rampe gemessen. Zur Anwendung kamen die pH-Wert- und Redox-Potential-Bestimmung, die UV-Spektroskopie sowie die Trockentropfenbildmethode. Um den Erfolg der Pendelrampe Leitsberg hinsichtlich ihrer biologischen Durchgängigkeit zu überprüfen, war laut Wasserrechtsbescheid ein Fischmonitoring notwendig.[41]
Im Jahr 2012 wurde diese fischökologische Beweissicherung der Rampe durchgeführt. Dazu wurde der Fischaufstieg im Frühjahr und Herbst mittels Fischreusen dokumentiert. Zur Bestimmung des Aufstiegspotentials fanden Elektrobefischungen im Unterwasser statt. Im Zuge des Monitorings wurde der Aufstieg aller acht im Unterwasser vorkommenden Fischarten sowohl in juvenilen als auch adulten Entwicklungsstadien belegt. Laut dem ökologischen Projektpartner ezb ist die Pendelrampe in allen relevanten Kategorien als voll funktionsfähig einzustufen.[42]

Aufgrund der positiven Ergebnisse beschloss der Wasserverband Große Tulln, ca. 15 km flussabwärts in Plankenberg (10 km nördlich von Neulengbach) eine weitere Pendelrampe dieses Typs und ähnlicher Dimensionierung zu beauftragen. Auch diese Rampe ersetzt ein altes Wehr. Der Einbau begann im Herbst 2018, im Frühjahr 2019 wurde Tulln-Pendelrampe 2 fertig gestellt.

Pendelrampe Leitsberg (Tulln-Pendelrampe 1) bei Niedrigwasser

Foto: Google Earth

5.2.1 Zum Einbau einer Pendelrampe ↑

Da die Pendelrampe eine spezielle Form der Riegel(becken)rampe ist, gelten für sie zunächst die gleichen grundsätzlichen Einbauregeln wie für eine normale Riegelrampe.
Bei allen Rampen treten im Hochwasserfall hohe Fließgeschwindigkeiten und damit große Belastungen auf. ***Matthias Mende*** mahnt deshalb an, größere Rampen nicht ohne die Einbindung eines erfahrenen Fachplaners zu bauen.[25]

Das Gefälle der Riegelrampe sollte auch in der Forellenregion möglichst nicht mehr als 5%, die Fallhöhe zwischen den Riegeln nicht mehr als 20 cm (bzw. 15 cm in der Äschenregion) betragen. Beim Bauvorgang wird - je nach örtlicher Situation - zunächst der bestehende Absturz abgesenkt (Abbruch der Absturzkrone) und die Sohle unterhalb auf das Niveau der zukünftigen Rampe angehoben. Die äußeren Steine der einzelnen Riegel werden weit ins Ufer eingebunden und oberhalb und unterhalb ingenieurbiologisch (z.B. Heckenbuschlage, Wurzelstöcke) oder mit weiteren Steinen gesichert, um ein Umspülen des Riegels zu verhindern. Die Steine der eigentlichen Blocksteinriegel (unbehauen, aber annähernd quaderförmig) werden vom Ufer ausgehend in die Sohle eingebaut. Die Steine müssen zu mindestens 2/3 ihrer Höhe in die Sohle eingebunden sein. Um einen pendelnden Stromstrich zu erreichen, werden einzelne Steine aufeinander folgender Riegel wechselseitig vertieft angeordnet.[25] Für die vertieften Riegelbereiche (auf Sohlenniveau) sollten möglichst gerundete Steine zur Vermeidung abgelöster Strömungen gewählt werden.[2]

Wechselseitig vertiefte Riegelbereiche oder schon ganz einfache Steinschlitze reichen aus, um das Wasser in den Becken zum Pendeln zu bringen. Deshalb gibt es immer wieder Riegel(becken)rampen, die von ihren Planern oder Bauherren als „Pendelrampen“ bezeichnet werden. Diese Bauwerke haben aber mit den in diesem Handbuch besprochenen IRT-Pendelrampen wenig gemein. Vor allem können mit herkömmlichen Rampen keine gezielten Spiralströmungen erzeugt werden; ihr Fließbild ist also bei Hochwasser nicht nach oben gewölbt, sondern nach unten mit den daraus resultierenden Uferangriffen. Der Begriff „Pendelrampe“ ist nicht geschützt. Vielleicht sollte man sie deshalb tatsächlich IRT-Pendelrampe nennen.

Schachbrettartige Riegelbeckenrampe in der Ischl (Oberösterreich), die auf einer Schautafel als „Pendelrampe“ bezeichnet wird. *Foto: F.Fitzke*

Begleitend zum Bau der Pendelrampe im Laabenbach (Tulln-Pendelrampe 1) hat ***Christine Sindelar*** eine Lehr-DVD erstellt.[41] Darin ist neben dem Rampendesign auch der Einbau der Rampe näher beschrieben.
Die Pendelrampe wird im fließenden Gewässer bei Niederwasserabfluss eingebaut. Zusätzlich zum Entfall teurer Flussumleitungen ist so bereits während des Baufortschrittes das Fließbild erkennbar, womit es gegebenenfalls korrigiert werden kann.
Der Einbau der Riegel beginnt im Regelfall bei der Rampenkrone.

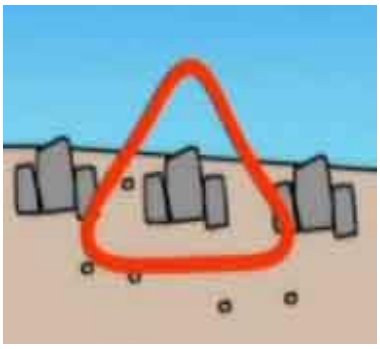
Vor dem Einbau eines Riegels wird seine Lage eingemessen und mit Pflöcken abgesteckt. Zuerst erfolgt der Einbau der Hauptriegelsteine, beginnend an der tiefsten Stelle des Riegels.

An der entsprechenden Position werden eine Künette (keilförmige Ausschachtung) ausgehoben, Stein für Stein gesetzt und in Feinarbeit und ständigem Nachmessen auf die im Plan definierte Höhe gebracht.[41]

Fotos: J.Haslauer

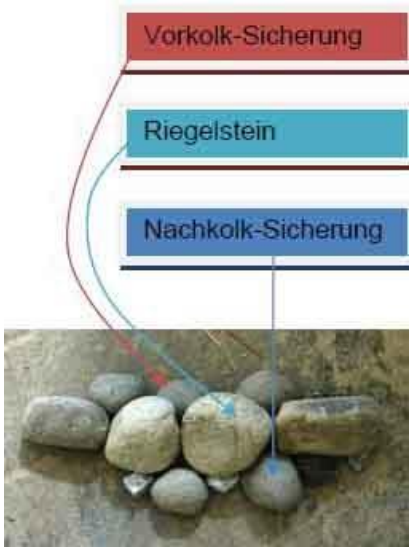
[EV 16 + EV 17]

Nach Fertigstellung des Hauptriegels wird der Stützriegel gesetzt (s. Grundriss-Schema). Beim Einbau des Stützriegels ist darauf zu achten, dass er in Fließrichtung ansteigt. Der erste Stein eines Stützriegels, der unmittelbar an den Hauptriegel anschließt, wird etwa 15 cm niedriger eingebaut als sein Hauptriegel. Das entstehende Dreieck zwischen Hauptriegel, Stützriegel und Böschungsfuß wird mit grobem Steinmaterial gut verblockt. Erst wenn der Riegel in der Lage und in der Höhe korrekt positioniert ist und das Fließbild zufriedenstellend ausfällt, werden die Kolksicherungssteine platziert.[41]



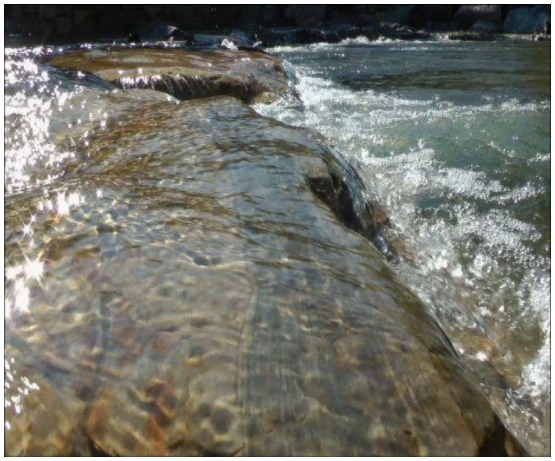
Grafik: J.Haslauer

Der gesamte Riegelaufbau setzt sich zusammen aus einem Hauptriegelstein und je einem Kolksicherungsstein (auch Stützstein) flussaufwärts sowie flussabwärts. Empfohlen wird ein ungefähr dreiecksförmiger Aufbau. Er verhindert nicht nur, dass der Riegelstein irgendwann in seinen eigenen Kolk fällt; auch vermindert er eine Ablösung der Strömung und das Entstehen stark erosiver Walzen.[41]



Riegelaufbau (Symbolbild) [43]

Die Rampenneigung soll laut Sindelar 2,5% bis 3% betragen, die Querneigung der Riegel liegt bei etwa 3%. Optimal sind eine Beckenlänge von 6 m und ein Höhenunterschied von 15 cm zwischen zwei Riegeln. Die ersten vier Becken der Rampe werden muldenförmig mit Blocksteinen gesichert. Vom ursprünglichen Gedanken, die Rampe ganz ohne Beckensicherung zu bauen, musste nach Laborversuchen Abstand genommen werden, da die ersten Becken besonders starken Belastungen ausgesetzt waren.[41, 43] (Anm.d.Verf.: Durch die Beckensicherung wird die Rampe in diesem Bereich zu einer geschlossenen Rampe.)
Von großer Bedeutung für die Bauausführung sind die Fertigkeiten der Baggerführer. Eine Einschulung vor dem Einbau wird dringend empfohlen.[41]



Vermessung der Zentimeter genauen Maßarbeit des Baggers: Überflossener Rampenriegel. *Fotos: J.Haslauer*

Die wissenschaftliche Entwicklung der Pendelrampe an der TU Graz wurde auch in der Schweiz mit Interesse verfolgt. ***Niels Werdenberg*** komplettierte das IRT-Ensemble an der unteren Taverna im Kanton Freiburg (s. Taverna) mit einer Pendelrampe im Jahr 2014. ***Matthias Mende*** baute 2017 eine Pendelrampe in den Stegbach im Kanton Solothurn.

Schweizer Pendelrampen in der Taverna (FR) und im Stegbach (SO). *Fotos: N.Werdenberg (l.); M.Mende (r.)*

Werdenberg übernimmt in seinen Faustregeln für die Bemessung einer Pendelrampe von 2016 weitgehend die Empfehlungen von Sindelar. Beim Längsgefälle der Rampe sieht er allerdings mit bis zu 5% Neigung mehr Spielraum als Sindelar (bis zu 3%).[44]
Die Rampe von ***Mende*** hat eine mittlere Neigung von 2,5% und eine maximale Neigung von 3,4%. Die weiteren Daten: Fallhöhe gesamt: 1,7 m, Fallhöhe je Riegel: 0,17 m, Anzahl der Becken: 11, Gesamtlänge: 68 m. Bei Mendes Pendelrampe (rechts) fällt die ingenieurbiologische Ufergestaltung ins Auge – insbesondere die zahlreichen Wurzelstöcke.

In einer Vortragsfolie von 2018 hat Mende die Abfolge beim Bau der Pendelrampe wie folgt zusammengefasst:

1) Grabenaushub für Riegelsteine und Kolkschutzsteine.
2) Einbau Filterschicht in Graben (notwendig, da d90 nur 40 mm).
3) Kraftschlüssiges Setzen der Riegelsteine, Genauigkeit in der Höhe +/- 5 cm, in der Lage +/-10 cm (Hinterkante ausschlaggebend), auch an der Riegeloberkante dürfen keine größeren Lücken (< 15 cm) entstehen.
4) Setzen der Kolkschutzsteine 60 cm tiefer als die Riegelsteine.
5) Setzen der Uferschutzsteine (untere Reihe; Setzen in Filterschicht). Im Bereich der Riegel liegt der Uferschutzstein auf dem ufernahen Kolkschutzstein auf, wird also durch diesen abgestützt.
6) Einbau von Wurzelstöcken in sich ergebende Lücken im Blocksatz (Durchmesser Wurzelstöcke 1-2 m, Stammansatz min. 1.5 m).
7) Setzen der oberen Reihe der Uferschutzsteine (Setzen in Filterschicht).
8) Becken 1 - 4: Nach Fertigstellung zweier Riegel und dazwischenliegender Ufersicherung wird zunächst die Filterschicht, dann die Beckensicherung eingebaut. Die Blöcke sind im Becken gut zu verkeilen, d.h. die Blöcke sind deckend im Verbund zu setzen.
9) Oberseitiges Anschütten der Riegel mit Filtermaterial, so dass Lücken verfüllt werden (Einschlämmen). Einbau und Verteilen des entnommenen Bachkieses in die fertig gestellten Becken.
10) Wiederholen der Schritte 1 bis 9, bis die eigentliche Rampe fertiggestellt ist.
11) Nach Abschluss der Arbeiten mit Blocksteinen: Gestaltung oberer Böschungsbereich gemäß Plan (Ingenieurbiologie, Wurzelstöcke etc.).

Der Bau der Rampe erfolgt von oben nach unten, d.h. Riegel 1 wird zuerst gebaut.[45]

Bilder der ersten schweizerischen Pendelrampe im Scherlibach im Kanton Bern. Die Rampe ist 2007 gebaut und 2008 optimiert worden.

Fotos: M.Mende

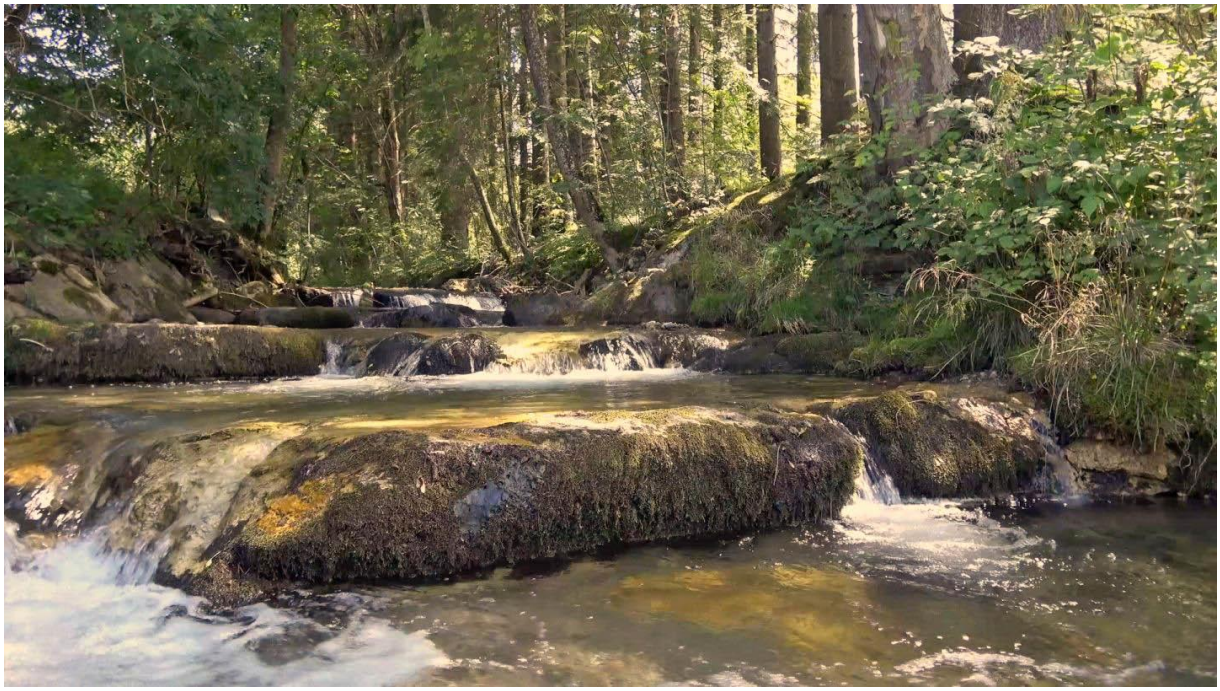
Bei niedrigem Wasserstand sieht man schön die Bogenform der Riegel und auch die aus ökologischer Sicht sehr wertvolle Kolkbildung. Gut zu erkennen ist außerdem das natürliche Sohlensubstrat in den Becken.

5.2.2 Ganzheitliche Schlussbetrachtung ↑

Bauliche Maßnahmen zur Flussregulierung werden oft (nicht zuletzt im Amtsdeutsch!) als „Gewässerunterhaltung“ bezeichnet. Im wahrsten Sinne des Wortes bedeutet dies, dass sich der Flussbauer mit dem Gewässer unterhält. Er kommuniziert mit ihm. Der Flussbauer kann das im „militärischen Tonfall“ tun und mit harten Uferverbauungen signalisieren: „Bis hierhin und nicht weiter“. Er kann aber auch auf diplomatische Weise das Wasser dazu animieren, so zu fließen, wie es das von Natur aus gewohnt ist (aber immer mehr daran gehindert wird). Die Antwort des Wassers muss unterschiedlich ausfallen. Im ersten Fall wird es aggressiv reagieren, im zweiten Fall freundlich – und dabei sogar tanzend und inspirierend.

Das mäandrierende Abfließen des Wassers über die Pendelrampe gleicht optisch einer Sinusschwingung. Akustisch werden die Laufgeräusche des Bachs zum Grundton einer „Wassermusik“, deren Resonanzkörper das gesamte Bachbett mitsamt dem Uferbewuchs ist. ***Otmar Grober*** bringt es auf den Punkt: Letztlich ist das Wasser selbst der Konzertmeister - und dabei fühlt sich nicht nur das Wasser wohl, sondern auch der Mensch.[26] Zunächst sind es Fische und die Uferpflanzen, die in diesem nicht nur optisch und akustisch wahrnehmbaren Ambiente gut gedeihen (siehe Kap. 5.2). Ein Ort wie die Pendelrampe, wo rein physikalisch in den Tosbecken eine Dissipation (Umwandlung) von (Fließ-)Energie stattfindet, übt ganz offensichtlich auch auf Menschen eine Anziehungskraft aus – ähnlich einem Wasserfall.

Naturnahe Flusslandschaften gehören heute zu den wichtigsten Erholungsorten unserer Gesellschaft. Grober empfindet seine behutsamen IRT-Einbauten als „Akupunkturpunkte in der Landschaft, die das Potenzial des Gewässers und zugleich der ganzen Landschaft erhöhen.“ [26] An einer Pendelrampe werden Energie und Harmonie fokussiert und verstärkt wahrgenommen. Der Mensch fühlt sich von diesem Ambiente angezogen, geht in Resonanz mit dem dynamisch strömenden und fallenden Wasser. Anders gesagt von einem Nicht-Flussbauer: „Die Pendelrampe hat eine wunderschöne Wirkung auf die Gemüter, auf die Emotionslage der Menschen.“ [46]



Die Pendelrampe im Stübmingbach, 18 Jahre nach ihrem Einbau. Kaum zu glauben, dass dieses Flussambiente von Menschenhand geschaffen wurde. *Foto: F.Fitzke* [EV 18]

6 Anhang

6.1 Bemessungsregeln für Lenkbuhnen ↑

Screenshot von Kapitel 7 (S. 95-112) der Dissertation von Matthias Mende [14]

Naturnaher Uferschutz mit Lenkbuhnen

- Grundlagen, Analytik und Bemessung -

Von der

Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften

der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina

zu Braunschweig

zur Erlangung des Grades eines

Doktoringenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte

Dissertation

von

Matthias Mende

geboren am 30. Mai 1974

aus Beelen

Eingereicht am:	24. Januar 2014
Disputation am:	16. April 2014
Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. A. Dittrich
	Prof. a.D. Dr. sc. techn. I. Storchenegger

(2014)

7 Bemessungsregeln

7.1 Grundsätze

7.1.1 Höhe

Wie in Kapitel 6.2 gezeigt wurde, ist der Einfluss der relativen Höhe H auf die induzierte Sekundärströmung und die Änderung der Geschwindigkeitsverteilung gering. Das bedeutet, niedrige Lenkbuhnen (H = 1/10) haben nahezu die gleiche uferschützende Wirkung wie höhere. Auf Grundlage dieser Erkenntnis wird empfohlen, Lenkbuhnen möglichst niedrig zu bauen. Aus der geringen Höhe resultieren zahlreiche Vorteile:

- Niedrige Lenkbuhnen führen zu einem geringen bis vernachlässigbaren Wasserspiegelanstieg, wodurch die Ausuferungsgefahr nicht oder nur unwesentlich verschärft wird (Kapitel 6.2.3). Niedrige Lenkbuhnen können daher in der Regel auch unter beengten Platzverhältnissen wie in Ortslagen zur Uferstabilisierung aber auch zur Strukturierung eingesetzt werden.
- Je niedriger die Lenkbuhne, umso kleiner ist der Materialbedarf.
- Aus einer geringen Bauwerkshöhe resultieren kleinere Bauwerkskolke, die Versagensgefahr des Bauwerks sinkt.
- Die Strömung im Umfeld niedriger Lenkbuhnen ist bei starker Überströmung im Hochwasserfall nur wenig beschleunigt. Im Gegensatz dazu kommt es bei höheren Buhnen zu stark beschleunigten Abflüssen auf den Buhnenrücken, woraus insbesondere nahe der Buhnenwurzel eine erhöhte Uferbelastung resultieren kann.
- Niedrige Lenkbuhnen werden ständig überströmt und daher nicht als Fremdkörper im Landschaftsbild wahrgenommen (Kapitel 3.8.1). Die ständige Überströmung bietet darüber hinaus ökologische Vorteile: Hinter den Lenkbuhnen bildet sich bei Niedrig- und Mittelwasserabfluss eine bewegte, häufig mit lokalem Weißwasser verbundene Wasseroberfläche. Diese Strömungsverhältnisse dienen zahlreichen Fischarten als Deckungsstruktur (Newton et al. 1998) und werten die Kolke unterhalb der Lenkbuhnen zusätzlich ökologisch auf. Die Kolke im Umfeld der Lenkbuhnen stellen daher gute Fischeinstände dar (Kapitel 3.8.2).

Auch Rosgen (2006) empfiehlt die Verwendung niedriger Gewässereinbauten, die das natürliche Energieliniengefälle eines Flusses nicht nennenswert ändern. Sind die Einbauten zu hoch, führen sie zu einem Rückstau und verringern das Energieliniengefälle oberhalb. Dadurch neigt der Fluss zu einem höheren Windungsgrad (Abb. 7.1), der definiert ist als das Verhältnis von Lauflänge zu Talweg (Scherle 1999), und die Gefahr von Seitenerosion nimmt zu.

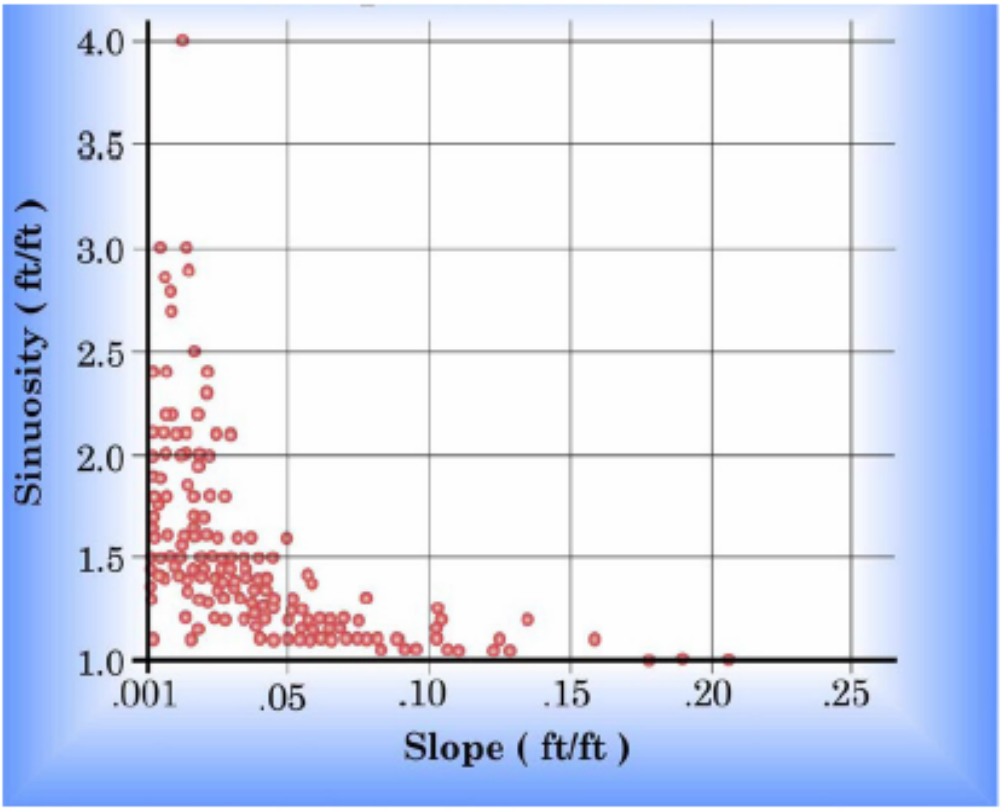


Abb. 7.1: Zusammenhang zwischen Gefälle und Windungsgrad (engl. *Sinuosity*) in natürlichen Flüssen (Rosgen 2006)

Als Bezugsniveau zur Berechnung der Höhenlage der Lenkbuhnen hat sich in der Praxis die „Neutrale Sohlenlage" etabliert (Mende & Koll 2006), die auch als „mittlere Sohlenebene" bezeichnet werden kann. Die mittlere Sohlenebene ist eine über die Sohlenbreite und die Fließstrecke gemittelte Sohlenlage. Zur Bestimmung der mittleren Sohlenebene wird zunächst für jedes vorhandene Querprofil des Einbauabschnitts (inkl. einer Strecke ober- und unterhalb des Abschnitts von jeweils etwa der 10fachen Sohlenbreite) die mittlere Sohlenlage berechnet. In einem weiteren Schritt wird dann ein Längenprofil der mittleren Sohlenlage erstellt und eine lineare Näherungsfunktion bestimmt, mit der für jede beliebige Station des Untersuchungsgebiets die lokale Höhenkote auf der mittleren Sohlenebene berechnet werden kann (Abb. 7.2).

Zur Berechnung der Höhenlage geplanter Lenkbuhnen wird zunächst mit Hilfe der Näherungsfunktion die Höhenkote der mittleren Sohlenebene am Einbauort berechnet und dann die gewählte Höhe der Buhne addiert. Durch diese Vorgehensweise kann die Höhenlage der einzelnen Lenkbuhnen optimal aufeinander abgestimmt werden.

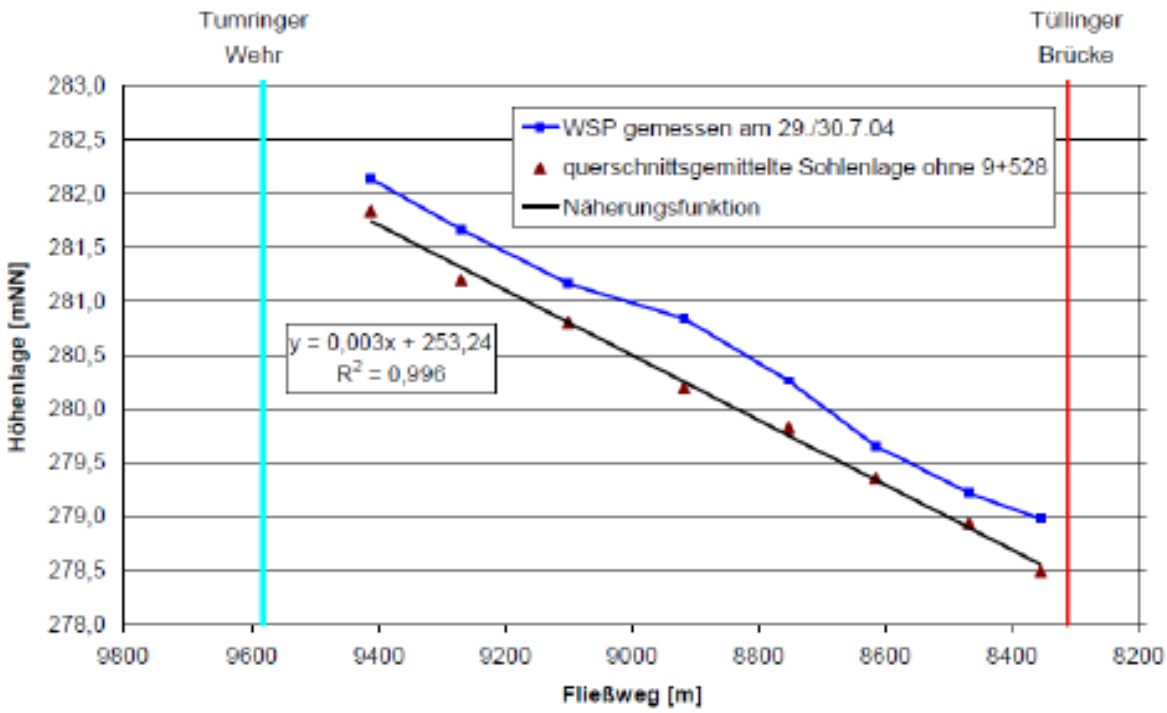


Abb. 7.2: Längsprofil der Wiese im Stadtgebiet von Lörrach mit der Näherungsfunktion „mittlere Sohlenebene" (Mende & Koll 2006)

7.1.2 Länge

Zentrale Größe bei der Bemessung von Lenkbuhnen ist der relative Abstand A_B. Bei gleichem relativem Abstand sinkt die Zahl der notwendigen Lenkbuhnen mit zunehmender projizierter Buhnenlänge l_p. Je größer die gewählte Länge ist, umso weniger Buhnen müssen gebaut werden.

Der Materialbedarf einer Lenkbuhne setzt sich zusammen aus dem Bedarf für die Blocksteinreihe und die Anbindung an das Ufer (Abb. 3.12). Werden Lenkbuhnen in Kurvenkolken eingebaut, müssen sie hier zusätzlich, je nach Kolktiefe, durch einen ein- oder mehrreihigen Blocksteinaufbau fundiert werden (Abb. 7.3). Außerhalb des Kolks reicht in der Regel ein einreihiger Aufbau, da die Sohle zum Innenufer hin ansteigt. Der Blocksteinbedarf je Laufmeter Lenkbuhne nimmt daher, sofern die Buhne über den Kolkbereich hinaus gebaut wird, von der Buhnenwurzel zum -kopf stark ab.

Insbesondere in Flusskrümmungen mit Kurvenkolken gilt daher, dass der Materialbedarf je Laufmeter geschütztem Ufer mit steigender projizierter Buhnenlänge deutlich sinkt. Grundsätzlich gilt diese Aussage aber auch für gerade Flussstrecken, da der Anteil der Anbindung am Gesamtmaterialbedarf einer Lenkbuhne ebenfalls mit zunehmender Länge sinkt.

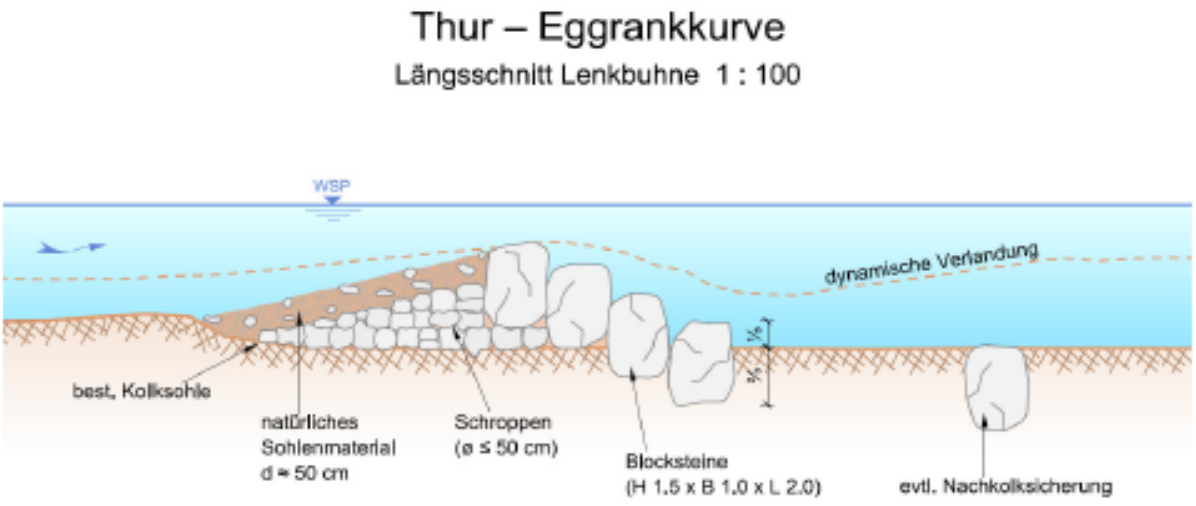


Abb. 7.3: Lenkbuhnenaufbau bei Einbau in Kurvenkolk (IUB Engineering AG 2013)

Es ist daher vorteilhaft, möglichst lange Lenkbuhnen zu verwenden. Neben dem geringeren Materialbedarf und den damit verbundenen geringeren Baukosten bieten lange Lenkbuhnen auch ökologische Vorteile. Sie führen zu einer großräumigen Strukturierung der Sohle, kurze Buhnen wirken sich dagegen nur ufernah aus.

Die große Buhnenlänge darf jedoch nicht zu einer Gefährdung des gegenüber den Lenkbuhnen liegenden Ufers führen. Diese Gefahr besteht vor allem in Flusskrümmungen, in denen Lenkbuhnen einseitig zum Schutz des Prallufers eingebaut werden.

Mit den Laborversuchen konnte gezeigt werden, dass die Fließgeschwindigkeit außerhalb der Lenkbuhnen in geraden Strecken nur unwesentlich zunimmt. Selbst bei der größten untersuchten Länge $l_P = 0.6\ b_{30}$ nahm die Geschwindigkeit in der Regel nur um maximal 10% zu (Kapitel 6.2.2).

Bei **einseitiger Lenkbuhnenanordnung** in Flusskrümmungen ist dagegen eine größere Zunahme der Fließgeschwindigkeit zwischen den Buhnenköpfen und in diesem Fall dem Innenufer zu erwarten. Sie ist jedoch nicht primär auf die im Labor untersuchte Lenkbuhnenwirkung, sondern vielmehr auf die durch die Lenkbuhnen hervorgerufene starke Querschnittsverringerung im Kolkbereich zurückzuführen.

Der Lenkbuhneneinbau kommt quasi einem linearen, quer zum Ufer gerichteten Kolkverbau gleich. Die Kolkbereiche zwischen den Lenkbuhnen landen infolge der lenkbuhneninduzierten Sekundärströmung auf. Am Innenufer kommt es dagegen zu einem Sohlenabtrag (Abb. 3.17), die durchströmte Querschnittsfläche, der breitenspezifische Abfluss, d. h. der Abfluss pro laufender Meter Sohlenbreite und die Fließgeschwindigkeit nehmen zu.

Aufgrund der großen Ähnlichkeiten der Wirkungsweise von Lenkbuhnen und Leitelementen kann davon ausgegangen werden, dass die durchströmte Querschnittsfläche nach Einbau

der Lenkbuhnen und erfolgtem Abtrag am Innenufer wie bei den Untersuchungen von Odgaard & Wang (1991) etwa der der Ausgangssituation entspricht.

Die Größe des Abtrags am Innenufer hängt dann von dem durch die Lenkbuhne verbauten Querschnittsanteil, also von der Höhe und Länge der Buhne ab. Werden die Lenkbuhnen beispielsweise 20 cm hoch und über die Hälfte der Sohlenbreite eingebaut, tieft sich die Sohle, unter Annahme einer unveränderlichen Sohlenbreite, zwischen Lenkbuhnenkopf und Innenufer im Mittel um etwa 20 cm unter das Niveau der ausgeglichenen Sohlenlage (Abb. 7.2) ein. Werden die Lenkbuhnen über 2/3 der Sohlenbreite eingebaut, ist die Eintiefung bereits doppelt so groß.

Bei der Festlegung der Buhnenlänge und auch der Buhnenhöhe (Abschnitt 7.1.1) ist daher zu überprüfen, welche Eintiefung am Innenufer tolerierbar ist. In den meisten Fällen sind Eintiefungen um einige Dezimeter unproblematisch, da Ufersicherungen wie z.B. ein Blocksatzverbau bis weit unter die mittlere Sohlenlage fundiert sind. Bei ungesicherten Innenufern können Eintiefungen und damit ggf. verbundene leichte Ufererosionsprozesse in der Regel toleriert werden.

Die in Grober (1998) gewählte Länge $l_P \approx 2/3\ b_{So}$ (Abb. 3.17) stellt daher für die meisten Lenkbuhnen in Krümmungen einen guten Orientierungswert dar. Müssen Ufererosionsprozesse an ungesicherten Innenufern zwingend vermieden werden, sollte die Länge auf $l_P = 1/2\ b_{So}$ reduziert werden, wie es auch Werdenberg et al. (2012a, b) empfehlen. Beide Empfehlungen setzen möglichst niedrige Lenkbuhnen voraus (Abschnitt 7.1.1). Über $2/3\ b_{So}$ hinaus gehende Buhnenlängen sollten nur dann gewählt werden, wenn Ufererosion am Innenufer toleriert werden kann oder gewünscht ist.

Bei **beidseitiger Lenkbuhnenanordnung** in geraden Gewässerabschnitten treten Eintiefungen zwischen den Buhnenköpfen auf, wodurch eine Ufergefährdung ausgeschlossen werden kann. Aus oben genannten Gründen werden auch für gerade Abschnitte möglichst lange Lenkbuhnen empfohlen. Da das Maß der Eintiefung zwischen den Buhnenköpfen jedoch mit der Buhnenlänge steigt, führen zu lange Lenkbuhnen zu einer naturfernen Querprofilgeometrie mit tief eingeschnittenem Talweg, der darüber hinaus eine tiefe Fundierung der Lenkbuhnen nötig macht.

In der Praxis hat sich bei beidseitigen Lenkbuhnen das Drittelprinzip bewährt (Kapitel 3.2.2.2). Die beiden Lenkbuhnen werden in der Summe über etwa 2/3 der Sohlenbreite eingebaut. Wie bei einseitiger Buhnenanordnung tieft sich die Sohle um etwa die doppelte Buhnenhöhe unter die neutrale Sohlenlage ein. Bei z.B. 20 cm hohen Buhnen ist folglich mit einer Eintiefung um etwa 40 cm zu rechnen. Eine solche Eintiefung kann insbesondere in strukturarmen Fließgewässern mit ebener Sohle eine deutliche ökologische Aufwertung des Lebensraums bewirken. Da sich der Abfluss in der rinnenartigen Eintiefung konzentriert, stehen den Fischen hier insbesondere in Niedrigabflussphasen ausreichende Fließtiefen zur Verfügung. Darüber hinaus wird durch die Rinnenbildung der Anstieg der Wassertemperatur minimiert.

Das Drittelprinzip wird daher bei beidseitiger Lenkbuhnenanordnung empfohlen. Es sollte jedoch darauf geachtet werden, dass die Buhnenlängen immer leicht variieren, wodurch das Erscheinungsbild naturnah und wenig mechanisch wirkt. Dies gilt selbstverständlich auch bei

einseitiger Anordnung. Durch die Variation wird neben der Aufwertung des Erscheinungsbilds auch die Strömungsvielfalt erhöht, woraus wiederum eine ökologische Aufwertung resultiert.

7.1.3 Abstand

Mit den Laboruntersuchungen konnte gezeigt werden, dass die ufernahe Fließgeschwindigkeit im Lenkbuhnenbereich auch bei großen relativen Abständen nennenswert verringert werden kann (Bsp. A_B = 6, Verringerung ũ (y = 3 cm) ≈ 20% (Abb. 6.19)). Es wird erwartet, dass diese Verringerung bei beweglicher Sohle noch größer ist, da sich die Sohle entlang der Buhnenköpfe eintiefen wird. Der Abfluss konzentriert sich daher entlang der bzw. zwischen den Buhnenköpfen, die Ufer werden zusätzlich entlastet.

Auch die induzierten relativen Quergeschwindigkeiten sind im ufernahen Lenkbuhnenbereich bei großem A_B noch so groß, dass sie im Bereich üblicher relativer Quergeschwindigkeiten in Krümmungen liegen (Bsp. A_B = 6: c = 5 ÷ 10% (Abb. 6.16 und Abb. 6.17)). Die krümmungsinduzierte Sekundärströmung in Ufernähe könnte folglich zumindest bei der Mehrzahl der Kurven auch bei großem A_B durch die Lenkbuhnen aufgehoben werden.

Trotz des auch bei großem A_B nachgewiesenen Einflusses der Lenkbuhnen auf die Strömung wird empfohlen, bei der Verwendung von Lenkbuhnen in Fließgewässer eher kleinere relative Abstände zu wählen. Die Strömungsverhältnisse in ausgebauten und insbesondere in naturnahen Fließgewässern sind weit komplexer als in einer geraden Laborrinne mit fester Sohle. Es sind daher bei der Festlegung des Buhnenabstands Unwägbarkeiten zu berücksichtigen, die zu einem verstärkten Strömungsangriff auf zu schützende Ufer führen können. Zu nennen sind insbesondere morphologische Veränderungen wie die Bildung von Kiesbänken, die auch in geraden Gewässerabschnitten zu ungleichmäßig über die Breite verteilten Fließgeschwindigkeiten führen.

Aufgrund der in der Praxis zu berücksichtigenden Unwägbarkeiten kann aus den Laboruntersuchungen kein exakter maximaler Buhnenabstand hergeleitet werden. Die Versuche plausibilisieren jedoch die aus Praxiserfahrungen abgeleiteten, in Werdenberg et al. (2012a, b) zusammengestellten Empfehlungen zum Abstand in Kurven, wonach bei engen Kurven (r < 3b) A_B einen Wert von 2, in weiten Kurven (r > 8b) einen Wert von 4 nicht unterschreiten sollte (Kapitel 3.2.2.1).

In geraden Gewässerstrecken kann der Abstand grundsätzlich größer als in Kurven gewählt werden, da keine erhöhte Verlagerungstendenz des Stromstrichs ans Ufer besteht. Vor diesem Hintergrund und unter Berücksichtigung der Empfehlungen von Werdenberg et al. (2012a, b) für das Anwendungsgebiet Flusskurven wird für gerade Strecken ein maximaler relativer Abstand von 6 empfohlen. Damit ergibt sich unter Anwendung des Drittelprinzips (Kapitel 7.1.2) ein Lenkbuhnenabstand von maximal zwei Sohlenbreiten. Steht in geraden Gewässerstrecken nur die morphologische Aufwertung im Vordergrund, können auch größere relative Abstände gewählt werden.

Wie bei der Länge (Kapitel 7.1.2) sollte auch der Abstand innerhalb einer Lenkbuhnenstrecke leicht variieren, um ein naturnahes Erscheinungsbild und Strömungsvielfalt zu erzielen.

7.1.4 Inklinationswinkel

Bei gleicher projizierter Länge ist die wahre Länge bei einem Inklinationswinkel von 30° um ca. 70% größer als bei 60°. Der Materialbedarf ist daher bei 30° wesentlich größer als bei 60°.

Unter ansonsten gleicher Anordnung reduzieren Lenkbuhnen mit einem Inklinationswinkel von 60° die ufernahe Fließgeschwindigkeit im Lenkbuhnenbereich etwas stärker als solche mit 30° (Kapitel 6.2.2). Die induzierte Quergeschwindigkeit ist dagegen bei einem Winkel von 30° größer (Kapitel 6.2.1), wobei auch hier die Unterschiede zu 60° wenig ausgeprägt sind.

Da sich die Wirkung von Lenkbuhnen auf die Strömung zwischen 30° und 60° nur geringfügig unterscheidet, der Materialbedarf und die damit verbundenen Baukosten jedoch bei 30° weit höher sind, wird für Lenkbuhnen ein Inklinationswinkel von 60° empfohlen. 60°-Buhnen sind für die meisten Anwendungsgebiete ausreichend. Lediglich bei sehr engen Kurven mit großen auftretenden Quergeschwindigkeiten kann die Verwendung von 30°-Buhnen notwendig sein, wenn 60°-Buhnen die kurveninduzierte Sekundärströmung nicht mehr neutralisieren können oder eine größere Sicherheit erforderlich ist.

Ebenso wie die Länge und der Abstand sollte auch der Inklinationswinkel von Buhne zu Buhne um wenige Grad (± 5°) variiert werden. Zusätzlich wird die Wahl einer leicht geschwungenen oder gebogenen Buhnenachse empfohlen (vgl. Abb. 3.12). Aus den Untersuchungen von Marelius & Sinha (1998; Kapitel 4.3) lässt sich ableiten, dass diese Variationen nur wenig Einfluss auf die induzierte Sekundärströmung und die Geschwindigkeitsverteilung haben. Sie wirken sich jedoch positiv auf die Strömungsvielfalt und das Erscheinungsbild aus.

7.2 Bauwerksstabilität

7.2.1 Steingrößen

Bei der Baubezirksleitung Bruck an der Mur werden in der Regel Blocksteine mit einer Masse von mindestens 5 Tonnen verwendet, die Kantenlängen betragen etwa 1.5 m (Abb. 3.12). Bei großen Gewässern wie der Mur werden Steine mit einer Masse von 5 bis 10 Tonnen eingebaut. Die Steingröße wird anhand von Erfahrungswerten festgelegt. Bewährt haben sich unbehauene, möglichst kubische Steine (Kapitel 3.5.1). Sie weisen eine erhöhte Standfestigkeit auf und ermöglichen einen guten Steinverbund. Durch die Wahl großer Steine, die mindestens bis zu ihrer halben Höhe in die anstehende Sohle eingebunden werden, kann vielfach auf einen zusätzlichen Stützstein zur Nachkolksicherung verzichtet werden (s.a. Kapitel 7.2.2). Dies erleichtert den Einbau, erhöht die Standsicherheit der Lenkbuhne und ermöglicht die Ausbildung verhältnismäßig tiefer, aus ökologischen Gründen gewünschter Bauwerkskolke.

Liegen keine Erfahrungswerte vor, können die erforderlichen Steingrößen durch Bemessungsansätze bzw. -diagramme festgelegt werden.

Für kleinere Fließgewässer mit bordvollen Abflüssen zwischen 0.5 und 114 m^3/s, mittlere bordvolle Fließtiefen zwischen 0.3 und 1.5 m und Sohlschubspannungen bis 25 kg/m^2 (ent-

spricht ca. 250 N/m²) stellt das Bemessungsdiagramm von Rosgen (2001) eine einfache Möglichkeit dar, den erforderlichen Steindurchmesser abzuschätzen (Abb. 7.4).

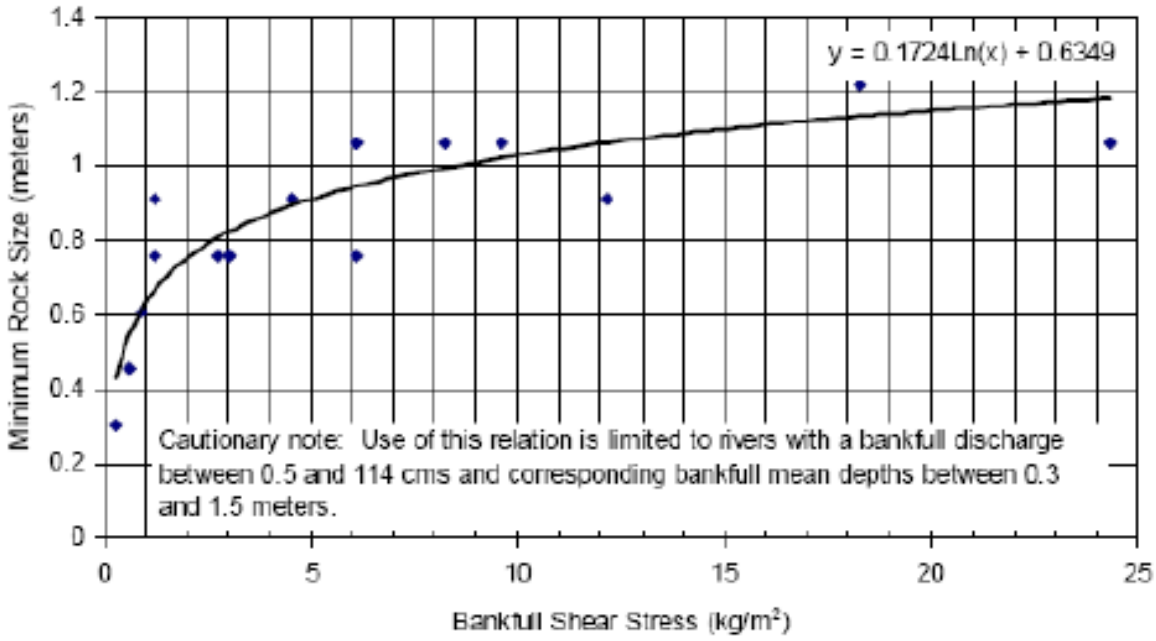


Abb. 7.4: Minimaler Steindurchmesser als Funktion der Schubspannung bei bordvollem Abfluss (Rosgen 2001)

Ein physikalisch hergeleitetes und für alle Fließgewässer anwendbares Verfahren ist das zur Bemessung der erforderlichen Riegelsteingröße bei Riegelrampen (LfU 2000). Bei diesem Bemessungsverfahren wird zur Ermittlung der Standfestigkeit eines Riegel- bzw. Lenkbuhnensteins von einem Kräftegleichgewicht zwischen

- der durch die Strömung auf das Element ausgeübten Strömungskraft P [N],
- der hangabwärtsgerichteten Komponente G_P der Gewichtskraft unter Auftrieb G [N] und
- der Haftreibungskraft R [N], die das Element der Strömungskraft P und der hangabwärtsgerichteten Komponente G_P der Gewichtskraft entgegensetzt,

ausgegangen (Abb. 7.5):

$$P + G_P = R \qquad \text{Gl. 7.1}$$

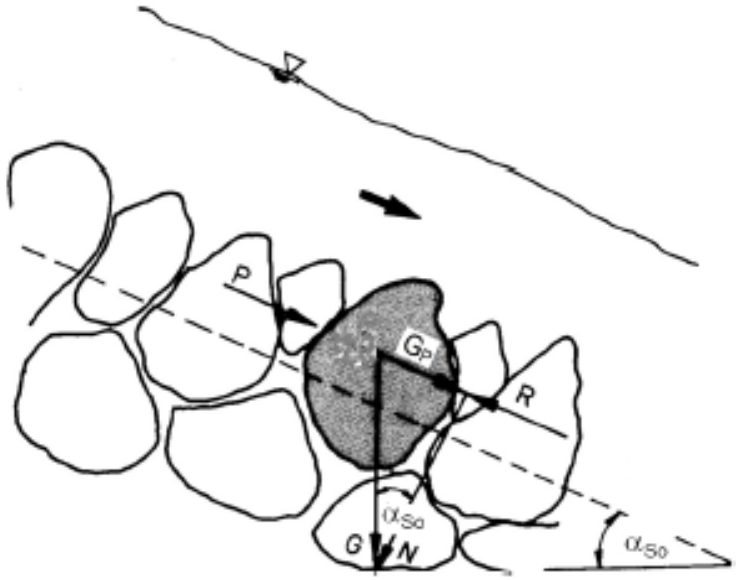


Abb. 7.5: Vereinfachtes Kräftegleichgewicht am Einzelstein (LfU 2000, modifiziert)

Die genannten Kräfte werden wie folgt berechnet:

$$P = \rho \cdot A_s \cdot u^2 \qquad \text{Gl. 7.2}$$

$$G_P = G \cdot \sin\alpha_{So} \qquad \text{Gl. 7.3}$$

$$R = G \cdot \tan\varphi \cdot \cos\alpha_{So} \qquad \text{Gl. 7.4}$$

mit:

A_s = angeströmte Steinfläche [m²]

u_b = Anströmgeschwindigkeit beim Bemessungsabfluss Q_b [m/s]; unter Vernachlässigung der räumlichen Heterogenität kann näherungsweise $u_b = \tilde{u}_b$ gesetzt werden, mit $\tilde{u}_b$ = über die Wassertiefe gemittelte Geschwindigkeit in Fließrichtung beim Bemessungsabfluss Q_b [m/s] (ggf. sollte ein Sicherheitsbeiwert verwendet werden, z. B. $u_b = 1.5 \cdot \tilde{u}_b$)

α_{So} = Neigungswinkel der Sohle [°]

φ = innerer Reibungswinkel des Riegels [°] (≈ 35°)

Bei dem Bemessungsverfahren wird vereinfacht davon ausgegangen, dass der halbe Stein angeströmt wird. Damit ist

$$A_s = \frac{1}{8} \cdot \pi \cdot d_s^2 \qquad \text{Gl. 7.5}$$

mit:

d_s = äquivalenter Steindurchmesser [m]

Bei Gewässern mit geringer Sohlenneigung ist der Neigungswinkel der Sohle $\alpha_{So} \approx 0$, damit kann G_P vernachlässigt werden (s.a. Bemessungsbeispiel in Anhang 9).

7.2.2 Kolkschutz

Liegt die Sohle an der Einbaustelle eines Lenkbuhnenblocksteins so tief, dass die Einbindetiefe von mindestens der halben Steinhöhe beim Setzen des Steins auf die vorgesehene Einbaukote nicht eingehalten wird, ist je nach Wassertiefe mindestens ein Stützstein einzubauen. Der Stützstein ist ebenfalls mindestens zur Hälfte in die anstehende Sohle einzubinden. Er sollte ca. 50 bis 80 cm unter der Buhnenoberkante liegen, um eine gewisse, aus ökologischen Gründen gewünschte Kolkbildung zu ermöglichen (Glüh 2005).

Abb. 7.6: Lenkbuhnenaufbau mit Stützstein zur Nachkolksicherung (Glüh 2005)

Bei großen Wassertiefen wie in den Kurvenkolken großer Talflüsse muss die Nachkolksicherung mehrreihig aufgebaut werden, um die erforderliche Einbindung in die anstehende Sohle zu erreichen (Abb. 7.3). Beim Einbau wird zunächst der unterste Stützstein in die anstehende Sohle eingebunden und die Lenkbuhne von unten nach oben aufgebaut. Der genaue Einbau der Steine unter Wasser ist anspruchsvoll, da der Baggerfahrer die Steine nicht sieht und ihre Lage nur mit Hilfe des Baggerarms abschätzen muss. Um Strömungen durch die Blocksteinlücken und damit verbundene Geschiebeausträge zu vermeiden, wird oberhalb der Blocksteine gebrochenes Material (schweizerisch Schroppen (Abb. 7.3)) mit Korngrößen von 63 bis 500 mm eingebaut, das die Lücken verschließt.

Auf eine Vorkolksicherung durch einen Blockstein oberstrom des obersten Lenkbuhnensteins wird bei der Baubezirksleitung Bruck an der Mur verzichtet. Die bisherige Praxiserfahrung zeigt, dass sich an Lenkbuhnen keine nennenswerten Vorkolke bilden (Mitteilung O. Grober 2012).

7.2.3 Uferanbindung

Der Anbindung an das Ufer kommt für die Standsicherheit der Lenkbuhne und die Uferstabilität eine hohe Bedeutung zu.

Bei einem unverbauten Ufer wird der Lenkbuhnenriegel zur Vermeidung eines Hinterspülens der Buhnenwurzel mindestens 1.5 Meter tief in das Ufer eingebunden. Unterstrom der Lenkbuhne werden zwischen Riegel und Ufer auf einer Länge von etwa 3 bis 4 m Kolkschutzsteine eingebaut (Abb. 3.12). Sie liegen rund 50 bis 80 cm tiefer als die Riegelsteine und verhindern bei allen Abflusszuständen eine ufergefährdende Kolkbildung.

Werden Lenkbuhnen vor einen bestehenden Blocksatz gebaut, muss die Buhnenwurzel bündig anschließen. Andernfalls ist mit einem Hinterspülen der Wurzel zu rechnen. Die weitere Anbindung entspricht der bei unverbautem Ufer.

7.3 Gerade Gewässerabschnitte

Der Einsatz von Lenkbuhnen zum Uferschutz verfolgt das Ziel, die auf eine Uferböschung wirkende hydraulische Belastung so weit zu reduzieren, dass keine zusätzlichen Uferschutzmaßnahmen notwendig sind oder zumindest auf „harte" und kostenintensive Bauweisen wie z.B. Steinschüttungen verzichtet werden kann (Kapitel 1.2). Durch die Reduzierung der Belastung können auch in Bereichen ursprünglich großer Belastung ($\tau > 140$ N/m², Tab. 2.1) vermehrt naturnahe ingenieurbiologische Bauweisen verwendet werden. Ohne die belastungsreduzierende Wirkung der Lenkbuhnen müssten diese Bauweisen in der Regel mit flächig eingebauten, toten Baustoffen (Steinwurf, Steinschüttung, Steinsatz) kombiniert werden (Johannsen & Burmeister 2008, Stowasser 2011).

Für die Dimensionierung von Lenkbuhnen in geraden Gewässerabschnitten und die Festlegung von evtl. mit ihnen zu kombinierenden ingenieurbiologischen Bauweisen wird folgendes Vorgehen empfohlen:

Schritt 1: Bestimmung der hydraulischen Belastung auf Sohle und Ufer am Einbauort

Wie bei der Planung ingenieurbiologischer Bauweisen (Johannsen & Burmeister 2008) ist der betrachtete Gewässerabschnitt auch bei der Planung von Lenkbuhnen im Gesamtzusammenhang zu sehen. Neben allgemeinen gewässermorphologischen Betrachtungen (z.B. Erosionstendenz, Sedimentationstendenz) spielt eine gründliche Begehung und Beurteilung des Planungsbereichs inkl. seines Umfelds eine wichtige Rolle. Zu beurteilen sind unter anderem die lokalen Strömungsverhältnisse (z.B. „Düseneffekte" durch Engstellen) oder die Ursachen vorhandener Uferabbrüche.

Nach dieser grundsätzlichen Beurteilung des Planungsbereichs dienen hydraulische Berechnungen als Grundlage für eine anwendungsbezogene Planung der Lenkbuhnen. Analog zu den Empfehlungen von Johannsen & Burmeister (2008) wird auch für Lenkbuhnen bei ungleichförmigen Strömungsverhältnissen eine 1D-Wasserspiegellagenberechnung dringend empfohlen, da hier mit lokal stark variierenden hydraulischen Belastungen zu rechnen ist.

Die hydraulische Belastung der Ufer wird, ebenso wie die Belastbarkeiten von Ufersicherungen, entweder in Form einer Schubspannung oder einer Fließgeschwindigkeit beschrieben (z.B. Gerstgraser 2000, Johannsen & Burmeister 2008, Stowasser 2011). In der Regel wird hierbei vereinfachend die Sohlenschubspannung oder mittlere Fließgeschwindigkeit im Hauptgerinne herangezogen (Gerstgraser 2000), was sich insbesondere in geraden Strecken in der Praxis bewährt hat (Stowasser 2011). An Prallufern muss dagegen die vereinfacht berechnete Belastung durch den Verstärkungskoeffenzienten ε (Kapitel 2.2.2.4, Tab. 2.2) nach Schröder & Römisch (2001) erhöht werden, was jedoch für die hiesigen Betrachtungen eines geraden Gerinnes nicht relevant ist. In den Laboruntersuchungen, auf denen der hier vorgestellte Bemessungsansatz basiert, wurde die hydraulische Belastung in Form

der Fließgeschwindigkeit gemessen. Sie dient daher als Eingangsgröße für das weitere Bemessungsverfahren.

Schritt 2: Abschätzung der Verringerung der hydraulischen Belastung auf die Ufer durch den Einbau von Lenkbuhnen

Nach Durchführung der hydraulischen Berechnungen zur Abschätzung der auf die zu schützenden Ufer wirkenden hydraulischen Belastung in Form der mittleren Fließgeschwindigkeit wird abgeschätzt, wie stark die Fließgeschwindigkeit in Ufernähe durch den Einbau von Lenkbuhnen verringert werden kann.

Die Abschätzung der Verringerung erfolgt für Lenkbuhnen mit einem Inklinationswinkel $\alpha = 60°$ mit Hilfe des Diagramms in Abb. 6.19, für $\alpha = 30°$ mit dem Diagramm in Abb. A11 (siehe Anhang 6). Die Eingangsdaten ergeben sich aus den in Kapitel 7.1 erläuterten Grundsätzen.

Beispiel: In einem geradlinigen Flussabschnitt mit einer Sohlenbreite von 18 m beträgt die Fließgeschwindigkeit in Ufernähe im Bemessungsfall (z.B. HQ_{100}) $\tilde{u}_b = 4.0$ m/s und die Fließtiefe h = 2.5 m. Basierend auf den Grundsätzen (Kapitel 7.1) wird gewählt: H = 1/10, $\alpha = 60°$, $l_P = 1/3$ b, $A_B = 6$. Damit ergibt sich $h_B = 0.25$ m, $l_P = 6.0$ m, $a_x = 36$ m. Die Verringerung der ufernahen Fließgeschwindigkeit beträgt etwa 22% (Abb. 7.7). Die für die Bemessung von Ufersicherungen relevante Fließgeschwindigkeit sinkt somit von $\tilde{u}_b = 4.0$ m/s auf 3.1 m/s.

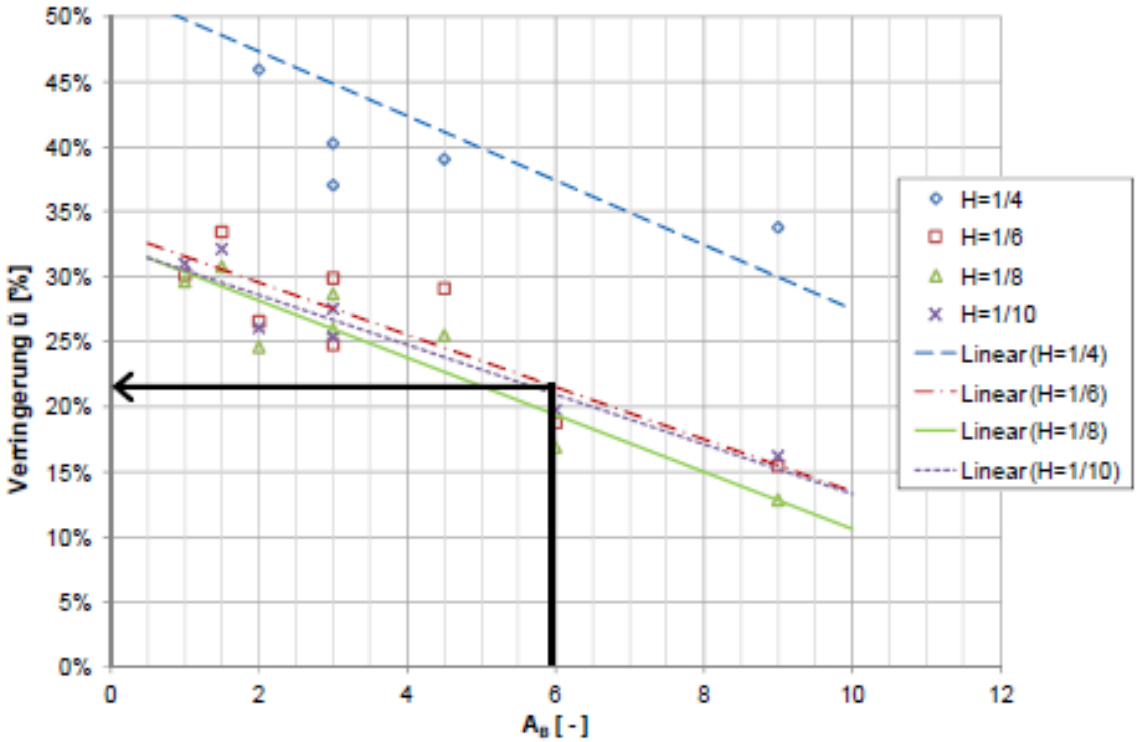


Abb. 7.7: Abschätzung der Verringerung der ufernahen Fließgeschwindigkeit (Beispiel: $\alpha = 60°$, H = 1/10, $A_B = 6$)

Bei der Abschätzung der ufernahen Geschwindigkeitsverringerung ist zu berücksichtigen, dass die den Diagrammen zugrunde liegenden Laboruntersuchungen bei fester Sohle durchgeführt wurden. Im Gegensatz dazu weisen die meisten Fließgewässer eine bewegli-

che Sohle auf. Zwischen den Lenkbuhnenköpfen ist daher in der Praxis mit Eintiefungen von wenigen Dezimetern zu rechnen (Kapitel 7.1.2). Es resultiert daraus eine Abflusskonzentration in der Gerinnemitte, durch die die Ufer zusätzlich entlastet werden. Die Verwendung der Diagramme zur Abschätzung der hydraulischen Belastung nach Einbau der Lenkbuhnen beinhaltet daher eine zusätzliche Sicherheit.

Schritt 3: Stabilitätsnachweis der Uferböschung, bedarfsweise Auswahl einer ingenieurbiologischen Sicherung

Die durch die Lenkbuhnen verringerte hydraulische Belastung wird nun in Beziehung zur hydraulischen Belastbarkeit von im Uferbereich vorhandenen Böden und Substraten bzw. potentiell verwendeten Lebendbauweisen gesetzt.

Die im Beispiel berechnete hydraulische Belastung durch $\tilde{u}_b$ = 3.1 m/s überschreitet die Belastbarkeit natürlich anstehender Substrate an Ufern (Johannsen & Burmeister 2008). Es bedarf daher neben den Lenkbuhnen einer zusätzlichen Sicherung, die möglichst kostengünstig und naturnah sein sollte. Sofern eine Erhöhung der Uferrauheit und der damit verbundene Wasserspiegelanstieg akzeptiert werden kann, sollte eine ingenieurbiologische Sicherung gewählt werden.

Eine Auswahl geeigneter Sicherungen soll beispielhaft anhand der in Tab. 7.1 zusammengestellten Belastbarkeiten ingenieurbiologischer Bauweisen erläutert werden. Umfangreichere Zusammenstellungen finden sich unter anderem in Johannsen & Burmeister (2008) und Stowasser (2011). Es wird deutlich, dass die im Beispiel erzielte Verringerung der Belastung von 4.0 auf 3.1 m/s die Verwendung zahlreicher Lebendbauweisen (z.B. Flechtzaun, Weidenfaschine, Faschinenwand, Weidenstreckhölzer, Grassoden) ermöglicht. Ohne Lenkbuhnen wäre höchstens eine Faschinenwand in Betracht gekommen, die jedoch bei 4 m/s bereits an die Grenze ihrer Belastbarkeit stößt. Aus diesem Grunde wäre in der Praxis vermutlich ein harter Längsverbau zur Ufersicherung verwendet worden.

Für Lenkbuhnen in geraden Strecken wird, wie auch im Beispiel gewählt, ein relativer Abstand von max. A_e = 6 empfohlen (Kapitel 7.1.3). Für den Fall, dass die Fließgeschwindigkeit die Belastbarkeiten selbst von besonders belastbaren Lebendbauweisen wie Faschinenwänden (vgl. Tab. 7.1) überschreitet, sollte ein kleinerer relativer Abstand A_e in Betracht gezogen werden, um die ufernahe Fließgeschwindigkeit noch stärker zu verringern.

Unter der Annahme, dass Lenkbuhnen die ufernahe Fließgeschwindigkeit um maximal 30% reduzieren (Abb. 7.7) und ingenieurbiologische Bauweisen bis zu einer Fließgeschwindigkeit von 4.0 m/s verwendet werden können, ermöglichen die Lenkbuhnen die Verwendung von Lebendverbau auch in Bereichen, in denen ohne sie ufernahe Geschwindigkeiten von bis zu 5.7 m/s auftreten. Das Einsatzgebiet ingenieurbiologischer Bauweisen wird durch die Kombination mit Lenkbuhnen folglich stark vergrößert.

Tab. 7.1: Belastbarkeiten ingenieurbiologischer Bauweisen (Gerstgraser 2004, modifiziert)

	Bauweise	Autor	τ [N/m^2]	u [m/s]
1	Weidenspreitlage	FLORINETH (1982)	195 - 218	----
2	Weidenspreitlage	FLORINETH (1995)	309*	----
3	Flechtzaun	STEIGER (1918)	50	----
4	Flechtzaun	GERSTGRASER (1998b)	100 - 120	3,2 - 3,5
5	Totfaschine	LFU (1996)	70 - 100	2,5 - 3,0
6	Weidenfaschine	LFU (1996)	100 - 150	3,0 - 3,5
7	Weidenfaschine	GERSTGRASER (1998b)	150 - 200	3,3 - 3,8
8	Faschinenwand	GERSTGRASER (1998b)	180 - 240	3,5 - 4,0
9	Faschinen auf Buschlagen	GERSTGRASER (1998b)	120 - 150**	2,0 - 2,5*
10	Geotextilpackungen auf Buschlagen	GERSTGRASER (1998b)	120 - 160**	3,0 - 3,5*
11	Geotextil mit Steckhölzern	GERSTGRASER (1998b)	80 - 120**	2,2 - 2,8*
12	Weidensteckhölzer	WITZIG (1970)	165	----
13	Weidensteckhölzer	LFU (1996)	100 - 150	3,0 - 3,5
14	Weidengebüsch	WITZIG (1970)	100	----
15	Wurzelstockreihen	GERSTGRASER (1998b)	50 - 80**	1,5 - 2,0*
16	Rasen	WITZIG (1970)	50 - (100)	----
17	Grassaat	LFU (1996)	40	1,8
18	Grassoden	LFU (1996)	>60	>3,5

(Bauweisen durch Hochwasser * beschädigt bzw. ** zerstört)

7.4 Prallufer

7.4.1 Zielsetzung und grundsätzliche Überlegungen

Der Einbau von Lenkbuhnen zum Uferschutz verfolgt das Ziel, die hydraulische Belastung durch die Verringerung der ufernahen Fließgeschwindigkeit zu reduzieren. Beim Einbau an einem Prallufer sollen sie darüber hinaus die Ausbildung eines tiefen ufernahen Kurvenkolks verhindern, der die Standsicherheit des Ufers durch das Unterspülen des Böschungsfußes zusätzlich zur hydraulischen Belastung herabsetzt.

Da der Kurvenkolk infolge der kurveninduzierten Sekundärströmung und der mit ihr verbundenen Änderungen der Geschwindigkeitsverteilung entsteht, kann seine Ausbildung durch die Induzierung einer mindestens gleich starken Sekundärströmung umgekehrter Drehrichtung mit Hilfe von Lenkbuhnen bzw. Leitelementen verhindert werden. Bestehende Kolke werden dann nach Einbau von Lenkbuhnen eigendynamisch verfüllt.

Odgaard & Wang (1991) formulierten daher als Bemessungsziel des Einsatzes von Leitelementen in Flusskurven ein Kräftegleichgewicht zwischen der krümmungsinduzierten und der leitelementinduzierten Sekundärströmung (Kapitel 4.2). Aufgrund der ähnlichen Wirkungsweise wird dieses Bemessungsziel auch für Lenkbuhnen verfolgt.

Um die Ausbildung eines ufernahen Kurvenkolks zu vermeiden, werden Lenkbuhnen daher so bemessen, dass die lenkbuhneninduzierte Sekundärströmung nahe der Buhnenwurzel mindestens bis zum Bemessungsabfluss (i.d.R. HQ_{100}) größer als die kurveninduzierte ist. Da die lenkbuhneninduzierte Sekundärströmung von der Wurzel zum Kopf auf null abnimmt (Kapitel 6.1.1.2), bildet sich im kopfnahen Bereich der Lenkbuhne wieder die kurveninduzierte Sekundärströmung aus (Abb. 7.8). Die hydraulische Belastung der Lenkbuhne ist daher am Kopf besonders groß. Der Talweg bildet sich entlang der Buhnenköpfe aus, er wird durch die Lenkbuhnen also vom Prallufer in Richtung Innenufer verschoben (s.a. Abb. 6.13 rechts), wodurch ein Unterspülen des Böschungsfußes verhindert wird.

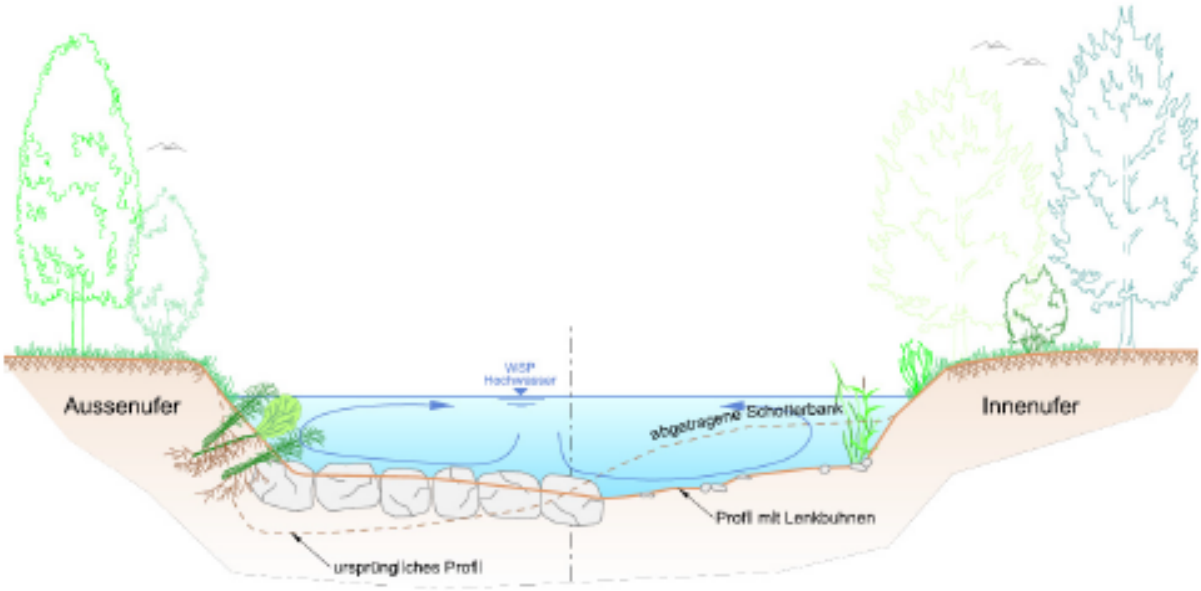


Abb. 7.8: Schematische Darstellung der Sekundärströmungen in einer Flusskrümmung mit inklinanten Lenkbuhnen (nach Grober 1998, modifiziert)

Durch das Verfüllen des Kurvenkolks und die damit verbundene Verringerung der Fließtiefe ermöglichen Lenkbuhnen auch den vermehrten Einsatz ingenieurbiologischer Bauweisen entlang von Prallufern, an denen ihre Einsatzmöglichkeiten ansonsten stark eingeschränkt sind (Kapitel 3.6.2.1). Ihre Verwendung kommt hier nur in Kombination mit wasserbautechnischen Fußsicherungen (z.B. Steinschüttung) in Betracht. Dies resultiert aus der selbst bei Bäumen nur bis in eine Tiefe von etwa ein bis zwei Meter reichende „armierende Wirkung der Wurzeln" (Oplatka 1998). Auch Weiden und Erlen, die in der Regel wenige Dezimeter oberhalb der Sommermittelwasserlinie angepflanzt werden (Schröder & Römisch 2001) und auch unterhalb der Wasseroberfläche wurzeln, können ein Prallufer daher nur bis zu einer Wassertiefe (Abstand Sohle – Mittelwasserlinie) von etwa einem Meter bis maximal 1.5 m sichern. Durch die Verringerung der Kurvenkolktiefe mit Lenkbuhnen kann damit der Einsatzbereich ingenieurbiologischer Sicherungen ohne „tote" Fußsicherung deutlich ausgeweitet werden.

7.4.2 Bemessung

Wie bereits erläutert, soll die kurveninduzierte Sekundärströmung neutralisiert werden. Zu ihrer analytischen Beschreibung wurden verschiedene Verfahren entwickelt, von denen das Verfahren aus dem Standardwerk zur Kurvenströmung von Rozovskii (1957) das gebräuchlichste ist (Kapitel 2.3.3). In dem Verfahren wird eine lineare Verteilung der Quergeschwindigkeit über die Tiefe angenommen. Die Quergeschwindigkeit ist folglich an der Wasseroberfläche und an der Sohle gleich groß, die Fließrichtung jedoch umgekehrt (Gl. 2.16, S. 15).

Zur analytischen Beschreibung der durch Lenkbuhnen hervorgerufenen Quergeschwindigkeit wurde für jede Versuchsanordnung eine ebenfalls lineare Verteilung abgeleitet, deren Drehimpuls dem der gemessenen Quergeschwindigkeitsverteilung entsprach (Kapitel 6.2.1).

Relative Quergeschwindigkeiten an der Wasseroberfläche, die nach Rozoskii (1957) berechnet werden, sind also unmittelbar vergleichbar mit den lenkbuhneninduzierten, die in Abb. 6.16 und Abb. 6.17 in Abhängigkeit von A_B und H dargestellt sind. Bei gleicher Quergeschwindigkeit an der Wasseroberfläche tritt daher der gleiche Drehimpuls auf. Da aus der Quergeschwindigkeit an der Wasseroberfläche direkt auf die Quergeschwindigkeit an der Sohle und den Drehimpuls geschlossen werden kann, ist es ausreichend, nur die Quergeschwindigkeit an der Wasseroberfläche zu betrachten. Ist die lenkbuhneninduzierte Quergeschwindigkeit an der Wasseroberfläche bei entgegengesetzter Fließrichtung größer als die kurveninduzierte, überwiegt auch der lenkbuhneninduzierte Drehimpuls. Die kurveninduzierte Sekundärströmung wird vollständig eliminiert, es überwiegt die durch die Lenkbuhnen hervorgerufene Sekundärströmung.

Um die Verhinderung eines Kurvenkolks und damit die Stabilität des Prallufers mindestens bis zum Bemessungsabfluss zu gewährleisten, muss die Lenkbuhnenordnung und -geometrie so gewählt werden, dass die buhneninduzierte Querströmung nahe des Prallufers größer als die kurveninduzierte ist.

Zur Bemessung der Lenkbuhnen sind somit folgende Schritte notwendig:

Schritt 1: Berechnung der relativen kurveninduzierten Quergeschwindigkeit $c_{Kurve} = v_s/u_m$ (Gl. 6.1)

Schritt 2: Ermittlung des maximalen relativen Lenkbuhnenabstands A_B und der relativen Höhe H mit Abb. 6.16 und Abb. 6.17, so dass gilt $c_{Lenkbuhne} > c_{Kurve}$.

Schritt 3: Festlegung einer Lenkbuhnenanordnung und -geometrie für das ermittelte A_B und H unter Einhaltung der in Kapitel 7.1 beschriebenen Grundsätze

Für die Bemessung der Lenkbuhnen in Flusskurven müssen folglich nur der Krümmungsradius und die Fließtiefe im Talweg der zu schützenden Kurve bekannt sein. Außerdem sollte die Rauheit (z.B. in Form des Darcy-Weisbach-Widerstandsbeiwert λ) bekannt sein, um den Sekundärströmungskoeffizienten α_v (Gl. 2.24, S. 16) genau zu berechnen. Da der Wertebereich von α_v jedoch mit 6.3 bis 6.7 (Malcherek 1999) klein ist, kann eine ausreichend genaue Bemessung i.d.R. bereits unter Verwendung des Mittelwerts 6.5 erzielt werden (Kapitel 2.3.3).

Schritt 2: Ermittlung des maximalen relativen Lenkbuhnenabstand A_B und der relativen Höhe H, so dass nahe des Prallufers gilt $c_{Lenkbuhne} > c_{Kurve}$

Die in Schritt 1 berechnete relative kurveninduzierte Quergeschwindigkeit c_{Kurve} dient als Eingangswert für die Bemessung (Abb. 7.9). Soweit möglich wird ein Inklinationswinkel $\alpha = 60°$ verwendet (Kapitel 7.1.4). Aus Abb. 7.9 wird deutlich, dass zur Neutralisierung der Sekundärströmung in Prallufernähe ein relativer Abstand von $A_B = 1.5$ bei $H = 1/10$ notwendig ist.

Schritt 3: Festlegung einer Lenkbuhnenanordnung und -geometrie für das ermittelte A_B und H unter Einhaltung der beschriebenen Grundsätze

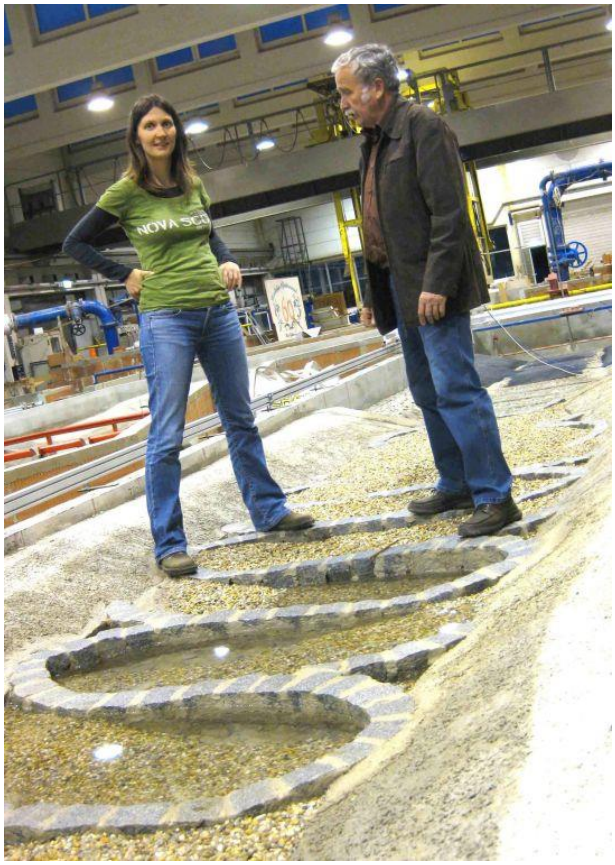
Unter Einhaltung des Drittelprinzips ergibt sich bei der Sohlenbreite von 60 m eine Lenkbuhnenlänge $l_p = 40$ m. Der Abstand zwischen den Lenkbuhnen ist

$$a_x = A_B \cdot l_p = 60\,\text{m}.$$

Die Höhe der Lenkbuhne über der ausgeglichenen Sohlenlage (Abb. 7.2) beträgt:

$$h_B = h_b \cdot H = 5.0 \cdot \frac{1}{10} = 0.5\,\text{m}.$$

Matthias Mende



Christine Sindelar und Otmar Grober

6.2 Dimensionierung einer Pendelrampe ↑

Screenshot der dt. Übersetzung von Kapitel 7 der Dissertation von Christine Sindelar [40]

Design of a Meandering Ramp
Dissertation

vorgelegt von
Mag. Dipl.-Ing. Christine Sindelar

verfasst am
Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft

eingereicht an der
Fakultät für Bauingenieurwissenschaften, Technische Universität Graz

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktorin der technischen Wissenschaften (Dr. techn.)

Begutachtung:
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Gerald Zenz (Technische Universität Graz)
Prof. Ing. Stefano Pagliara (Università di Pisa)

Graz, März 2011

Dimensionierung einer Pendelrampe

Morphologische und hydrologische Voraussetzungen

Die Pendelrampe eignet sich für kleinere Kies-Flüsse mit moderaten Durchflüssen. Die Flussbreite soll maximal 10 m betragen.

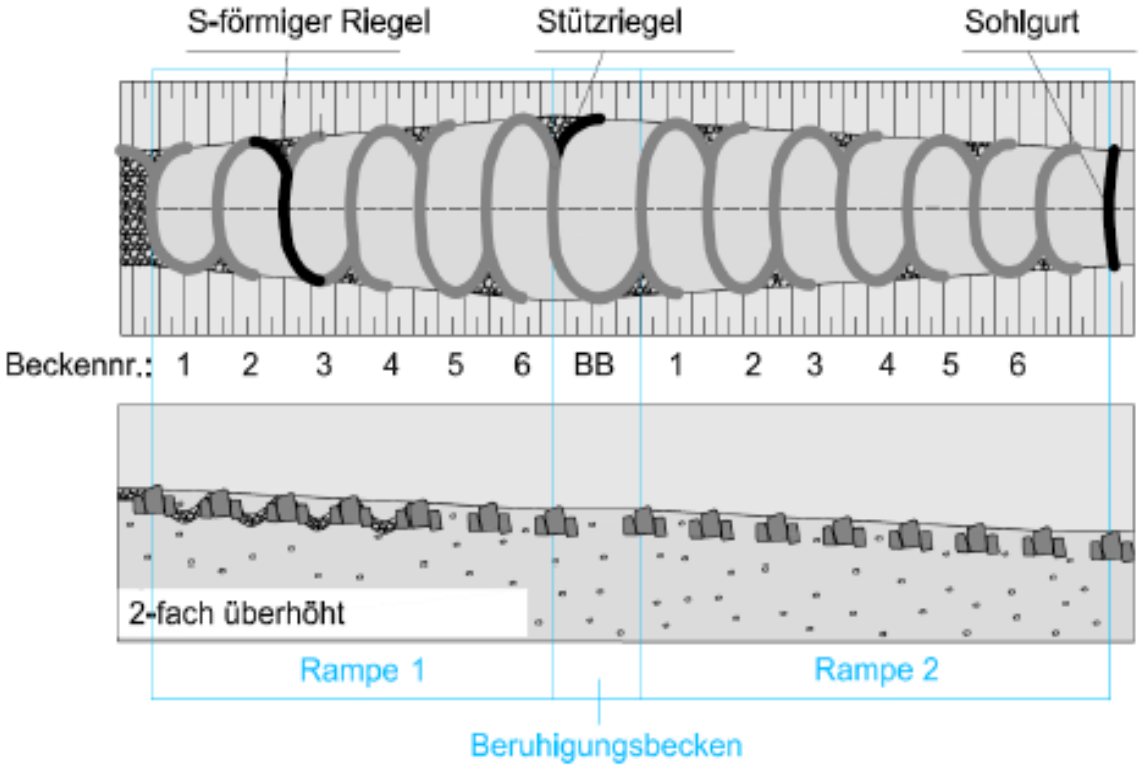


Abbildung 1: Maßstäbliche Schema Pendelrampe, Grundriss (oben), Längenschnitt in Flussachse (unten), Querprofile siehe Abbildung 2

Der natürliche Geschiebetrieb darf bei großen Hochwasserereignissen nicht zu stark beeinträchtigt sein. Der Geschiebetransport wirkt dem Entstehen von Vorkolken (unmittelbar flussauf eines Riegels) entgegen. Die Dimensionierungsrichtlinien sind so ausgelegt, dass der kritische Fließübergang von Tumbling Flow auf Rapid Flow bei spezifischen Abflüssen von $q = 3.5 - 6\ \mathrm{m^3/sm}$ auftritt. Daher:

- Ermittlen Sie den Durchfluss $q_{crit,sed}$ $(\mathrm{m^3/sm})$ für den Beginn des Sedimenttransports im Bereich oberhalb der Rampe
  - Wählen Sie eine geeignete Sedimenttransport-Formel (z.B. Meyer-Peter Müller)
- Stellen Sie sicher, dass $q_{crit,sed} < 3.5\ \mathrm{m^3/sm}$
- Beachten Sie potentielle Einflussfaktoren, die den natürlichen Geschiebetransport q_b $(\mathrm{kg/ms})$ im Oberwasser der Rampe einschränken (z.B. Geschieberückhaltebecken, Flusskraftwerke und deren Spülmanagement). Als Faustregel beachten Sie, dass der natürliche Geschiebetrieb um weniger als 50% eingeschränkt ist.

Eine weitere Voraussetzung ist, dass der Fließzustand im Ober- bzw. Unterwasser der Rampe strömend für alle Durchflüsse bis zum Bemessungshochwasser q_{design} ist (Abbildung 4).

	Optimal	Zulässiger Bereich
Spez. Bemessungshochwasser $q_{design}(\mathrm{m}^3/\mathrm{sm})$		≤ 10
Flussbreite W (m)		$W \leq 10$
Charakteristische Durchmesser Flusssediment $d_{90,b}$ (mm)	≥ 140, see [1]	weitere Forschung notwendig
Charakteristische Durchmesser $d_{m,b}$ (mm)	≥ 60, see [1]	
Beckensicherung Durchmesser d_a (mm)	500 [1]	Filterkriterium beachten, z.B. Terzaghi
Kritischer Durchfluss für den Beginn des Sedimenttransports $q_{crit,sed}(\mathrm{m}^3/\mathrm{sm})$		< 3.5

[1] Diese Werte entsprechen dem Flusssediment der Großen Tulln in Neulengbach, für die in einem Modellversuch das optimale Design einer Pendelrampe ermittelt wurde.

Tabelle 1: Morphologische und Hydrologische Voraussetzungen

Dimensionierung der Rampe

In Tabelle 2 sind die wichtigsten Designparameter zusammengefasst (siehe auch Abbildung 2).

	Optimal	Zulässiger Bereich
Rampenneigung I (%)	2.5	$\leq 3\%$
Riegelabstand L (m)	6	$5 \leq L \leq 7$
Höhenunterschied zwischen zwei Riegeln in Flussachse Δh (m)	0.15	$\Delta h = \frac{I}{100} \cdot L \cdot \cos\alpha$
Querneigung der Riegel I_y (%)	3	
Höhe, die ein Riegel in der Flussachse aus der Sohle ragt h_{Achse} (m)	$0.5 \cdot B \cdot I_y$	
Höhe, die ein Riegel maximal aus der Sohle ragt (m)	$B \cdot I_y$	

Tabelle 2: Rampengeometrie

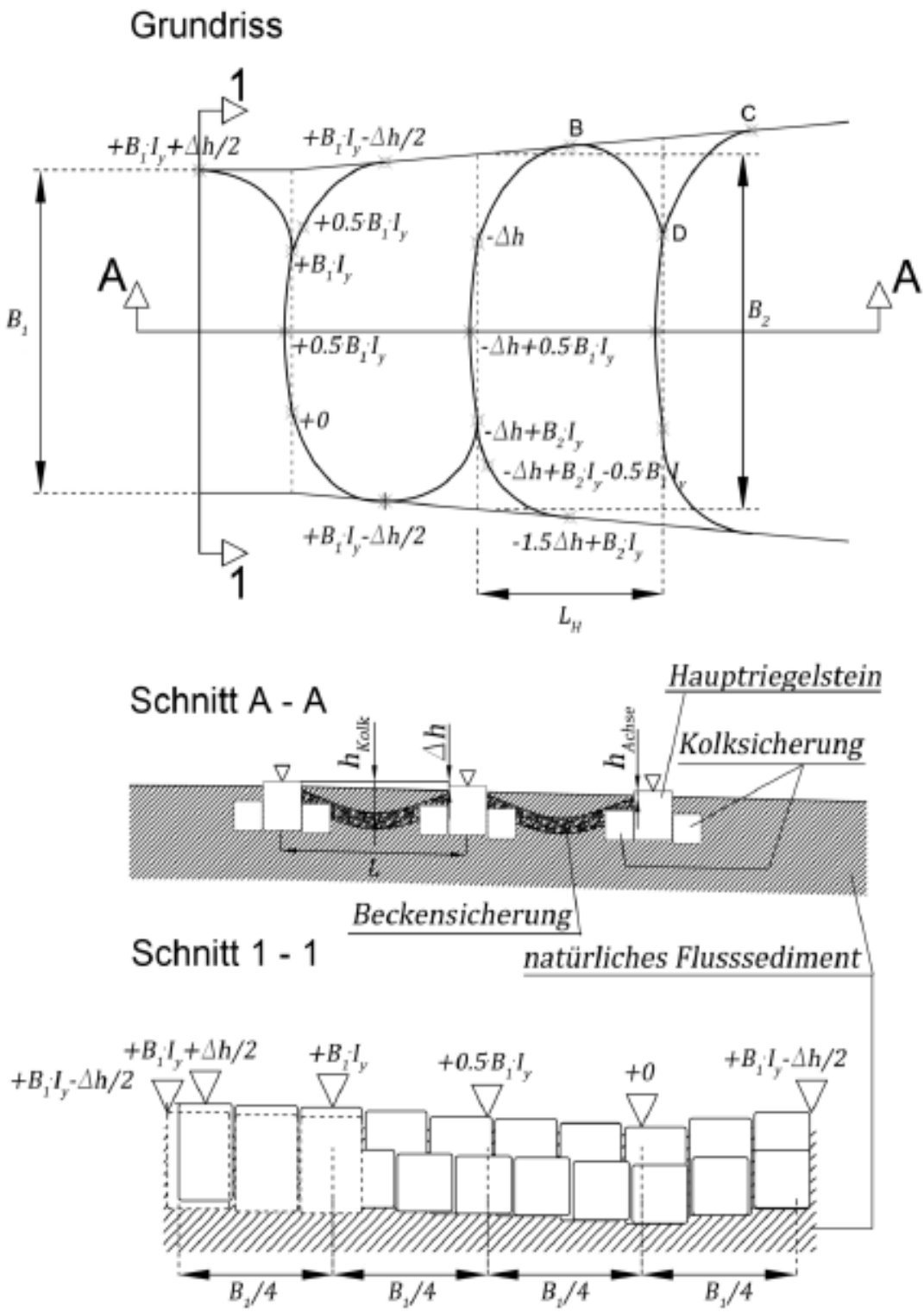


Abbildung 2: Rampengeometrie: Grundriss und Schnitte – Höhenlagen der Riegel

Riegelform

- Die Riegel sind in der Lage S-förmig (Abbildungen 1 und 2)
- Das höhere Ende eines Riegels, welches abwechselnd beim linken bzw. rechten Ufer liegt, wird mit einer bogenförmigen Stützriegel flussab abgesichert (Abbildungen 1 und 2)
- Der Riegelaufbau besteht aus einem Hauptriegelstein und je einem kleineren Kolksicherungsstein flussauf bzw. flussab des Hauptriegelsteins (Abbildung 2, Schnitt A-A)
- Auf die Kolksicherung kann beim Stützriegel verzichtet werden
- Die Wasserbausteine sind annähernd quaderförmig

Ein Wasserbaustein ist durch seine drei Achsen definiert:

Achsen	Hauptriegelstein	Kolksicherung
Vertikale Achse (m)	l_a	$l_{a,K}$
Horizontale Querachse (m)	l_b	$l_{b,K}$
Horizontale Achse in Fließrichtung (m)	l_c	$l_{c,K}$

Tabelle 3: Bezeichnungen der Achsen der quaderförmigen Wasserbausteine

Riegelabmessungen und -aufbau

Die Abmessungen der Wasserbausteine in Tabelle 4 garantieren die Stabilität der Rampe für spezifische Abflüsse bis zu 10 $\mathrm{m^3/sm}$ (Dichte der Wasserbausteine: $\rho_s = 2{,}65\ \mathrm{t/m^3}$).

Riegel – benötigte Steinmasse pro Breitenmeter (t/m)	$(l_a \cdot l_c + l_{a,sc} \cdot l_{c,sc}) \cdot \rho_s \geq 9$	
Hauptriegelstein	**Optimal**	**Zulässiger Bereich**
Vertikale Achse l_a (m)	1.5	$l_a \geq 1.5$
Horizontale in Fließrichtung l_c (m)	1.2	$l_c \geq 1.2$
Kolksicherung		
Vertikale Achse $l_{a,sc}$ (m)	0.9	Hauptriegelstein und Kolksicherung müssen das obige Massekriterium erfüllen
Horizontale Achse in Fließrichtung $l_{c,sc}$ (m)	0.9	
Beckensicherung		
Beckensicherung Durchmesser d_a (m)	0.5 [1]	Filterkriterium anwenden (z.B. Terzaghi)

[1] ermittelt in einem Modellversuch zur Dimensionierung einer Pendelrampe in der Großen Tulln in Neulengbach, Österreich

Tabelle 4: Riegelabmessungen, die die Stabilität der Rampe für spezifische Abflüsse bis zu 10 $\mathrm{m^3/sm}$ garantieren

Wenn die Pendelrampe für Bemessungsabflüsse dimensioniert werden soll, die deutlich geringer als $10\mathrm{m^3/sm}$ sind, kann Abbildung 3 herangezogen werden, um die erforderliche Steinmasse M zu ermitteln. Wenn die erforderliche Steinmasse im Bereich von 4 $\mathrm{t/m}$ liegt, soll der Riegel nur aus einem Wasserbaustein bestehen. Für Steinmassen zwischen 4 und 7 Tonnen pro Breitenmeter kann man die Vorkolksicherung zugunsten eines schwereren Hauptriegelsteins weglassen. In beiden Fällen sollen die Wasserbausteine so in die Sohle eingebettet werden, dass der Riegelaufbau im Längsschnitt dreieckförmig ist.

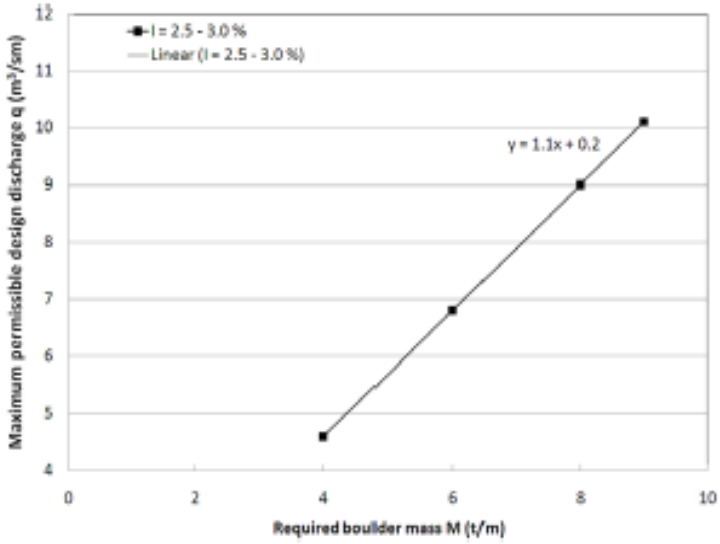


Abbildung 3: Erforderliche Steinmasse M (t/m) um die Stabilität zu gewährleisten

Aufweitung - Beruhigungsbecken

- Ordnen Sie ein Beruhigungsbecken nach etwa 6 Becken an
  - $L \approx 8\,\mathrm{m},\ \ \Delta h = 0\,\mathrm{m}$
- Die Flussbreite wird entlang der Rampe wie folgt kontinuierlich aufgeweitet und dann wieder auf die ursprüngliche Flussbreite verjüngt:
  - Die größte Flussbreite B_{max} wird im Beruhigungsbecken erreicht.
  - Unterhalb des Beruhigungsbeckens wird die Flussbreite kontinuierlich reduziert, bis sie am Rampenfuß die ursprüngliche Flussbreite B erreicht hat.
  - $B_{max} \approx 1.5 \cdot B$
  - Wenn möglich, soll die ursprüngliche Böschungsneigung im Rampenbereich beibehalten werden, wodurch sich die Böschungsoberkante ebenso aufweitet und wieder verjüngt.

Das Beruhigungsbecken erfüllt hydraulische und Fisch-ökologische Aspekte.

Zusätzliche Sicherungen

- Die ersten 4 Becken der Rampe werden gesichert (Durchmesser der Beckensicherung d_a, Tabelle 1). Die Sicherung ist muldenförmig mit dem tiefsten Punkt auf halber Beckenlänge. Die maximale Kolktiefe beträgt $h_{Kolk} = 0.9\,\mathrm{m}$ und wird von der Oberkante des oberen Riegels gemessen. Für geringe Beckenlängen ($\sim$5 m) wählt man die Kolktiefe $h_{Kolk} = 0.75\,\mathrm{m}$ (Abbildung 2). Die restlichen Beckensohlen bestehen aus dem natürlichen Flusssediment.
- Das entstehende Dreieck zwischen Hauptriegel, Stützriegel und Böschungsfuß (Punkte BCD in Abbildung 2) wird mit grobem Steinmaterial (Durchmesser $\approx d_a$) gut verblockt.

Sohlgurt

Unterhalb des Rampenfußes schließt ein bogenförmiger Sohlgurt das Rampenbauwerk ab. Der Abstand zwischem dem Riegel des Rampenfußes und des Sohlgurts entspricht der Beckenlänge L. Der Sohlgurt is U-förmig in der Lage und ist in der Flussachse auf Sohlniveau. Der Riegel schließt $L/2$

Meter unterhalb an die bestehende Böschungssicherung an. An den Böschungen ragt der Riegel jeweils $B \cdot I_y$ Meter aus der Sohle.

Ober- und Unterwassersicherung

Für die Abschätzung, ob eine Sicherung der Ober- bzw. der Unterwasserstrecke erforderlich ist, sollen Energiehöhenvergleiche herangezogen werden. Dabei kann man annehmen, dass über der Rampenkrone die Grenztiefe erreicht wird. Am Rampenfuß gilt als Abschätzung für die Froudezahl: $\mathrm{Fr} = 1$ (für Tumbling Flow, d.h. für $q < 3.5 - 6\,\mathrm{m}^3/\mathrm{sm}$) bzw. $\mathrm{Fr} = 1.5$ (für Rapid Flow $q \geq 6\,\mathrm{m}^3/\mathrm{sm}$).

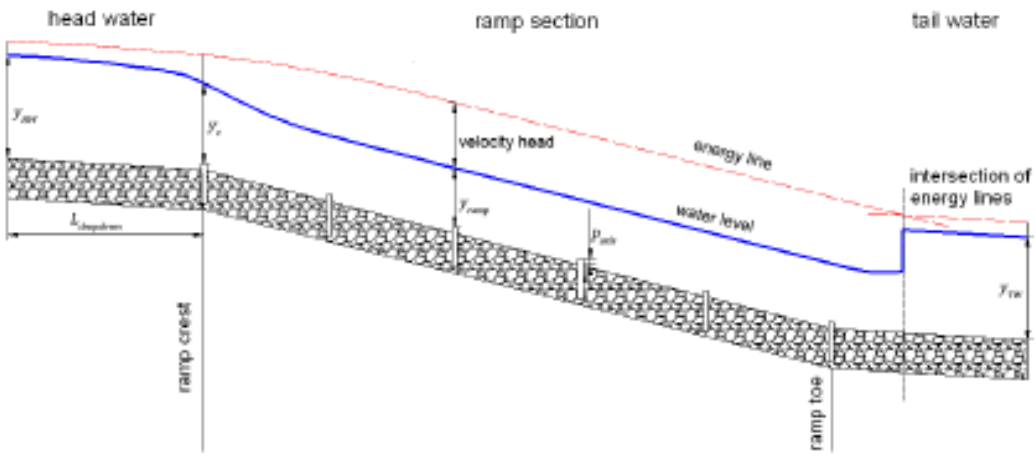


Abbildung 4: Energiehöhenvergleich für Ober- und Unterwasserbereiche

Ufersicherung

- Entlang der gesamten Rampe wird der Böschungsfuß mit einem Böschungsansatzstein gesichert, der dieselben Abmessungen wie der Hauptriegelstein hat (Tabelle 2).
- Die Riegel der Rampe werden in die Böschungsfußsicherung integriert.
- Die Höhe der bestehenden Böschungssicherung wird beibehalten.
- Oberhalb der Böschungssicherung sollen regionstypische Bäume gepflanzt werden. Sie sollen die Abflusskapazität nicht negativ beeinflussen.

Literatur

Diese Dimensionierungsrichtlinien entsprechen bis auf geringfügige Kürzungen und Änderungen der Übersetzung des 7. Kapitels der Dissertation „Design of a Meandering Ramp". Die Dissertation ist online verfügbar (Englisch, pdf ca. 25 MB):

http://portal.tugraz.at/portal/page/portal/Files/i2130/pdf/Lehre/dissertationen/englisch/PhD-thesis-Sindelar.pdf

Sindelar, C.: *Design of a Meandering Ramp,* Dissertation am Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU Graz, 2011.

Kontakt

Dr. Christine Sindelar: christine.sindelar@alumni.tugraz.at

Quellennachweis

Mit ↑zurück zum Inhaltsverzeichnis

[1] Mende, M.: *Instream River Training – Naturnaher Flussbau mit minimalem Materialeinsatz.* Korrespondenz Wasserwirtschaft 2012 (5) Nr. 10, S.537-543
[2] Mende, M.; Sindelar, C.: *Instream River Training: Lenkbuhnen und Pendelrampen.* Beitrag zum 15. Gemeinschafts-Symposium der Wasserbau-Institute TU München, TU Graz und ETH Zürich vom 1.–3. Juli 2010, S.35–44
[3] Sàlat, A.: *Was bringt uns das Instream River Training?* PowerPoint Vortrag, Gera 10.3.2015
[4] Grober, O.: *Flussbau nach Schauberger,* PowerPoint Vortrag, Bad Ischl 20.8.2018
[5] Grober, O.: Statement in der Filmdokumentation *Die Flussflüsterer,* ZDF 2012
[6] Grober, O.: *Erfahrungen am Wasser.* Unveröffentlichtes Manuskript, 2001
[7] Schauberger, J.: *Internationale Vernetzung in der Schauberger-Forschung.* PowerPoint Vortrag, Zell a.H. 3.3.2018
[8] Sàlat, A.: *Instream River Training und Nachhaltigkeit.* PowerPoint Vortrag, o.O. 20.9.2012
[9] Schauberger, V.: *Temperatur und Wasserbewegung.* Sonderdruck aus „Die Wasserwirtschaft“, Heft 24, Wien, 1930
[10] Alexandersson, O.: *Lebendes Wasser. Über Viktor Schauberger und eine neue Technik, unsere Umwelt zu retten.* Ennsthaler Verlag, Steyr, 8. überarbeitete und erweiterte Auflage 1998, S.63
[11] Schauberger, J.: *Viktor Schauberger. Das Wesen des Wassers.* Originaltexte, herausgegeben und kommentiert von J.Schauberger, AT Verlag Baden (Aarau) und München 2006, S.294
[12] Österreichisches Patentamt: Patentschrift Nr. 134543, Viktor Schauberger in Wien. *Wasserführung in Rohren und Gerinnen.* Angemeldet am 12. August 1931, Beginn der Patentdauer am 15. April 1933
[13] Österreichisches Patentamt: Patentschrift Nr. 138296, Viktor Schauberger in Wien. *Wasserführung* – Zusatzpatent zum Patent 134543. Angemeldet am 2. November 1932, Beginn der Patentdauer am 10. Juli 1934
[14] Mende, M.: *Naturnaher Uferschutz mit Lenkbuhnen.* Dissertation, TU Braunschweig, Leichtweiss-Institut für Wasserbau, 2014
[15] Werdenberg, N. et al.: *Strömungslenkung an der unteren Taverna.* Aqua & Gas, Fachzeitschrift für Gas, Wasser und Abwasser des SVGW, 2012, Nr. 4
[16] Schauberger, V.: *Das k.u.k.-Prinzip.* Einleitung zum Artikel: „Die Natur als Lehrmeisterin“ aus: Implosion – Biotechnische Nachrichten, herausgegeben vom Verein für Implosions-forschung und Anwendung e.V., Zell a.H., Nr.7, S.21
[17] Schauberger, J.: *Viktor Schauberger. Das Wesen des Wassers.* Originaltexte, herausgegeben und kommentiert von J.Schauberger, AT Verlag Baden (Aarau) und München 2006, S.75
[18] Coats, C.: *Naturenergien verstehen und nutzen. Viktor Schaubergers geniale Entdeckungen*. Aachen, Omega-Verlag, 3. Auflage 2001, S.248

Mit ↑zurück zum Inhaltsverzeichnis

Mit ↑zurück zum Inhaltsverzeichnis

[19] Schauberger, V.: *Unsere sinnlose Arbeit.* Wiederveröffentlichung einer Abhandlung aus dem Jahr 1933, J.Schauberger Verlag, Bad Ischl 2001, S.19
[20] Rüetschi, D.: *Für eine neue Lebensgemeinschaft zwischen der Stadt Lörrach und ihrem Fluss.* Schlussbericht zu Händen der Deutschen Bundesstiftung Umwelt, Suhr, 13.09.2011
[21] Sindelar, C.; Mende, M.: *Lenkbuhnen zur Strukturierung und Stabilisierung von Fließgewässern.* Wasserwirtschaft, Heft 1–2/2009, S.70–75
[22] Mende, M.: *Instream River Training: Von den Grundlagen bis zur Ausführung von Lenkbuhnen.* PowerPoint Vortrag, WBW-Fortbildung Kupferzell, 10.10.2018
[23] Friedrich, J.: *Naturmessungen über die Funktionsweise von Buhnen an der Mürz.* Diplomarbeit am Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU Graz, 2008
[24] N.N.: *Der Sache „auf den Grund" gehen.* Erdgas im Fokus, Newsletter der Gas Connect Austria GmbH Wien, Ausgabe 27, September 2017
[25] Mende, M.: *Bausteine zum Instream Restaurieren* in: Gründler, S. et al.: Fischer schaffen Lebensraum, Schweizerischer Fischerei-Verband SFV, Bern 2016, S.45-81
[26] Grober, O.: *Flüsse verstehen* in: *Vom Wasser berührt*. Das Hansgrohe Wassersymposium 2011, Schiltach 2011, S.54-71
[27] Sindelar, C.: Statement in der Filmdokumentation *Viktor Schauberger. Die Natur kapieren und kopieren,* DVD, J.Schauberger Verlag, Bad Ischl 2008
[28] Schauberger, J.: *Viktor Schauberger. Das Wesen des Wassers.* Originaltexte, herausgegeben und kommentiert von J.Schauberger, AT Verlag Baden (Aarau) und München 2006, S.290/291
[29] Mende, M. et al.: *Ökologische Aufwertung der Thur an der Eggrankkurfe bei Andelfingen.* in: „Wasser Energie Luft", 106. Jahrgang, 2014, Heft 2, CH-5401 Baden
[30] Grober, O.: Statement in der Filmdokumentation *Die Wassermeister,* arte 2002
[31] Grober, O.: *Neue Ufer im Gewässerraum.* Unveröffentlichtes Manuskript, 2007
[32] Grober, O.: Email an den Verfasser vom 20.11.2018
[33] Mende, M.: *Kostengünstige Bausteine zur ökologischen Aufwertung von Fliessgewässern.* Ingenieurbiologie, hrsg. vom Verein für Ingenieurbiologie, Rapperswil, Heft 1/2013
[34] Schauberger, V.: *Einrichtung zur Abspaltung einer energetischen Kernzone in strömenden Flüssigkeiten und gasförmigen Stoffen.* Patententwurf 1940, PKS-Archiv Bad Ischl
[35] entnommen aus: Albert, S.: *Projektanalyse flussbaulicher Maßnahmen nach dem Prinzip des Instream River Training.* Masterarbeit, Universität für Bodenkultur Wien, 2014
[36] Grober, O.: Email an den Verfasser vom 16.3.2018
[37] Werdenberg, N.: *Erfolgskontrolle Lenkbuhnen an der Taverna.* Abschlussbericht 2018, Zollikofen/Murten, 29. Oktober 2018
[38] Mende, M.; Gassmann, E.: *Pendelrampen – Funktionsweise und Erfahrungen.* In: Ingenieurbiologie, hrsg. vom Verein für Ingenieurbiologie, Rapperswil, Heft 3/2009
[39] Patt, H. et al.: *Naturnaher Wasserbau. Entwicklung und Gestaltung von Fließgewässern.* Springer Verlag, Heidelberg, 4. Auflage 2011, S.361
[40] Sindelar, C.: *Design of a Meandering Ramp.* Dissertation, TU Graz, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, 2011
[41] Sindelar, C.: *Die Pendelrampe.* DVD-Lehrfilm, Johannes Haslauer Videoproduktion, www.haslauer.tv, 2011

Mit ↑zurück zum Inhaltsverzeichnis

Mit ↑ zurück zum Inhaltsverzeichnis

[42] N.N.: *Pendelrampe Laabenbach.* Internet-Projektseite von eberstaller zauner büros (ezb): https://www.ezb-fluss.at/385/pendelrampe-laabenbach/ Download am 15.12.2018
[43] Zenz, G. et al.: *Pendelrampe Neulengbach. Dimensionierung und Stabilität.* Bericht an die Auftraggeber. Kurzfassung, Graz 2009
[44] Werdenberg N.: *Uferschutz und Gerinnestrukturierung mit Instream River Training.* DWA-Seminar: Bauen mit dem Fluss / Instream River Training. Minimaler Material-einsatz durch gezielte Nutzung der Strömungskräfte. Karlsruhe, 10.11.2016.
[45] Mende, M.: *Pendelrampe und Revitalisierung Stegbach.* PowerPoint Vortrag, WBW-Fortbildung Kupferzell, 10.10.2018
[46] Rauber, K.: Statement im Informationsfilm *Instream River Training (IRT). Naturnaher Flussbau nach Viktor Schauberger.* Mainz 2019
[47] Mende, M.: Emails an den Verfasser vom 18.2. und 24.2. 2019
[48] Hafner, T.: *Uferrückbau und eigendynamische Gewässerentwicklung.* Dissertation, TU München, Lehrstuhl und Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft, 2008
[49] Werdenberg, N.: Email an den Verfasser vom 7.1. 2019
[50] Gröbl, P. et al.: *Statt Längsverbau mal quergedacht.* In: Die Flußmeister, hrsg. vom Bund der Flußmeister Bayerns e.V., Kempten, Ausgabe 2018, S.39-45
[51] Mende, M.: Email an den Verfasser vom 26.4. 2019

Mit ↑ zurück zum Inhaltsverzeichnis

Kontaktadressen

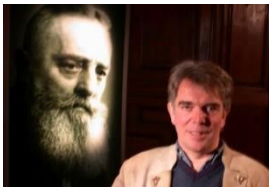
Franz Fitzke
Freier Journalist
Mainz
franzfitzke@arcor.de

Otmar Grober
Flussbaumeister i.R.
Kindberg/Steiermark
otmar.grober@gmx.net

Dr.-Ing. Matthias Mende
Flussbauingenieur
Bern
matthias.mende@iub-ag.ch

Dr.techn. Christine Sindelar
Leiterin des Wasserbaulabors
Universität für Bodenkultur
Wien
christine.sindelar@boku.ac.at

Niels Werdenberg
Flussbau- und Umweltingenieur
Bern
niels.werdenberg@emchberger.ch



Jörg Schauberger
Viktor- Schauberger-Archiv
J. Schauberger Verlag
Bad Ischl
joerg.schauberger@aon.at

Dr.med. Anton Sàlat
IRT-Ansprechpartner
Verein für Implosionsfor-
schung und Anwendung e.V.
Zell a.H./Schwarzwald
anton-salat@aponet.de

Ein Bild mit Symbolcharakter: Ein Bagger entfernt im Kupfer-Bach Steine aus der Uferbefestigung. So wie in der Kupfer werden sie oftmals nicht mehr gebraucht.

Fotos: F.Fitzke [EV 19 + EV 20]

In der Kupfer ziehen jetzt IRT-Einbauten (Lenkbuhnen und Trichter) die Strömung nach innen und entlasten somit die Ufer. Gleichzeitig erzeugen sie Strömungsvielfalt, was wiederum das Gewässer ökologisch deutlich aufwertet.