Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 92 (2000)
Heft: 5-6

Artikel: Der Einfluss von Buhnen auf die Hydraulik, die Flussmorphologie und den Geschiebetransport

Autor: Weber, Monika / Roth, Marcel / Hermann, Felix

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-940262

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

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

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

Download PDF: 01.10.2025

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

Der Einfluss von Buhnen auf die Hydraulik, die Flussmorphologie und den Geschiebetransport

■ *Monika Weber, Marcel Roth, Felix Hermann*

Zusammenfassung

Buhnen werden heute wieder vermehrt im Wasserbau eingesetzt, beispielsweise als Uferschutz an Fliessgewässern. Die Buhnen bieten unter gewissen Umständen ökologische Vorteile gegenüber den harten Längsverbauungen. Sie engen aber den Abflussquerschnitt des Gewässers ein und führen zu komplexen Strömungsverhältnissen. In vielen Fällen muss mit einer Anhebung der Wasserspiegellage gerechnet werden, die Sohlenlage im Hauptgerinne tieft sich tendenziell ein, das Geschiebetransportvermögen nimmt zu und im Nahbereich des Buhnenkörpers bildet sich ein Kolk (lokale Erosion). Verallgemeinern lassen sich die Auswirkungen von Buhnen auf die Hydraulik, die Flussmorphologie und den Geschiebetransport jedoch nicht. Es ist unerlässlich, die Verhältnisse im Einzelfall zu untersuchen. Um diese Einflüsse näherungsweise quantitativ zu erfassen, stehen heute neben den physikalischen Modellversuchen verschiedene Berechnungsansätze zur Verfügung, die von einfachen eindimensionalen Handrechnungen bis zu komplexen mehrdimensionalen numerischen Simulationen reichen.

Résumé

Les épis sont des remblais positionnés transversalement à la direction de l'écoulement et protégeant les rives contre l'érosion. Il en résulte un rétrécissement de la section, ainsi que des conditions complexes d'écoulement. Dans la plupart des cas, une surélévation du niveau d'eau ainsi que un abaissement du lit de la rivière et une augmentation des capacités de charriage sont observés. Un affouillement se développe également au droit des extrémités des épis. L'influence des protections en épis sur l'écoulement, ainsi que sur la morphologie de la rivière et du charriage n'est pas généralisable. Une étude individuelle est par conséquent indispensable. En plus des études sur modèle physique, il existe actuellement différents modèles de calcul, allant de l'undimensionnel manuel au tridimensionnel numérique.

1. Einleitung

Buhnen als dammartige Querwerke gehören zu den ältesten Bauwerken im Flussbau. Sie wurden in der Schweiz im Zuge der Flusskorrektionen bereits im 19. Jahrhundert zahlreich eingesetzt. Später sind die Buhnen weitgehend in Vergessenheit geraten, und der Längsverbau übernahm in den meisten Fällen die Funktion des Uferschutzes. In der jüngeren Vergangenheit wurde die Forderung laut, wieder vermehrt den Einsatz von Buhnen als Uferschutz zu erwägen, weil diese unter gewissen Umständen ökologische Vorteile gegenüber den harten Längsverbauungen bieten.

Der vorliegende Artikel versucht die wichtigsten Einflüsse von Buhnen auf die Hydraulik, die Flussmorphologie und den Geschiebetransport qualitativ zu beschreiben. Besprochen werden ferner mögliche Modellansätze für eine näherungsweise quantitative Erfassung der massgebenden Prozesse. Abschliessend folgt die kurze Diskussion eines Fallbeispiels.

Vertiefte Kenntnisse der Hydraulik, der Flussmorphologie und des Geschiebetransports sind meist unerlässlich bei der Dimensionierung, Bemessung und konstruktiven Ausgestaltung von Buhnen. Entsprechende Abklärungen gehören deshalb zu einer seriösen Planung und Projektierung.

2. Wirkungsweise der Buhnen

2.1 Hydraulik

Einengung des Abflussquerschnittes

Durch den Einbau von Buhnen wird der Abflussquerschnitt des Gerinnes sowohl geometrisch als auch hydraulisch eingeengt. Die geometrische Einengung ist mit der Wirkung einer durchgehenden Längsverbauung vergleichbar.

Der eingeengte Querschnitt wird seitlich durch eine fiktive Trennfläche begrenzt, die in der Flucht der Buhnenköpfe verläuft (vgl. Bild 1).

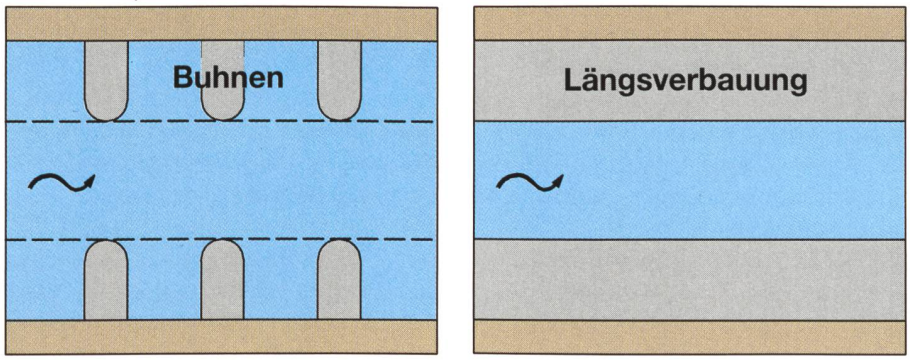

Bild 1. Geometrische Einengung des Gerinnequerschnitts durch Buhnen (links) im Vergleich mit der Einengung durch Längsverbauung (rechts).

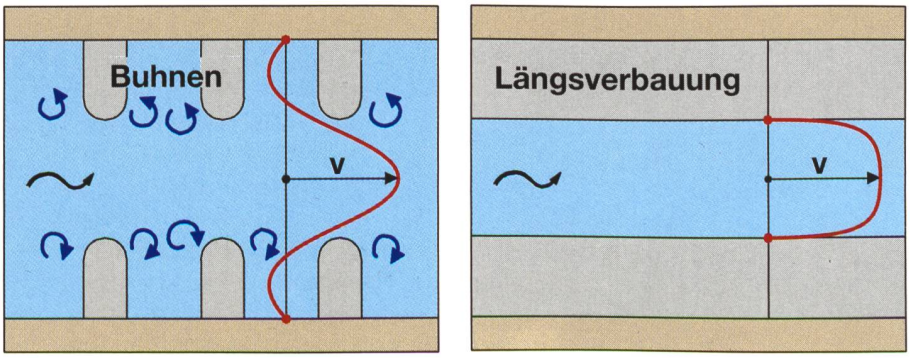

Bild 2. Charakteristische horizontale Verteilung der Fliessgeschwindigkeiten bei Buhnenverbauungen (links) und Längsverbauungen (rechts).

Im Gegensatz zu den Längsverbauungen wird der Abflussquerschnitt durch Buhnen zusätzlich hydraulisch eingeengt («Buhneneffekt»). Im Nachlauf der Buhnen bildet sich eine Wirbelstrasse, welche die Strömung im Hauptgerinne beeinflusst. Betrachtet man die Geschwindigkeitsverteilung im Gerinnequerschnitt (vgl. Bild 2), so nimmt bei einer Längsverbauung die Geschwindigkeit in Richtung der Flussmitte rasch zu. Diese Geschwindigkeitszunahme ist ausschliesslich auf den Wandeinfluss zurückzuführen. Bei den Buhnen sind die hydraulischen Verhältnisse komplexer. Zwischen dem Hauptgerinne (Flussschlauch) und den seitlich angrenzenden Buhnenfeldern findet ein hydraulischer Impuls- und Massenaustausch statt, der die Strömung sowohl im Hauptgerinne als auch in den Buhnenfeldern beeinflusst. Der Geschwindigkeitsgradient im seitlichen Randbereich des Hauptgerinnes nimmt ab und der Abfluss wird zur Gerinnemitte hin konzentriert, was für den «Buhneneffekt» bezeichnend ist.

Der Einsatz von Buhnen bewirkt als Folge der geometrischen und hydraulischen Einengung im Allgemeinen eine Anhebung des Wasserspiegels. Es muss somit berücksichtigt werden, dass durch den Einbau von Buhnen in ein bestehendes Gerinne die Hochwassersicherheit vermindert werden kann.

Kleinräumige Strömungsverhältnisse

Die Strömung im Nahbereich der Buhnen wird in erster Linie durch die Geometrie der Buhnen, die Buhnenlänge b, den Buhnenabstand L und den Abfluss beeinflusst. Oft sind die Buhnen so gebaut, dass sie bei Nieder- und Mittelwasser trocken liegen, bei Hochwasser aber überströmt werden.

Bild 3 zeigt die typischen Strömungsverhältnisse bei nicht überströmten Buhnen. Der auf eine Buhne treffende Abfluss teilt sich im sogenannten Staupunkt auf. Zum einen wird der Abfluss um den Buhnenkopf herum abgelenkt, zum andern weist eine Teilströmung in das Buhnenfeld hinein. Zusätzlich kann vor der Buhne eine Tauchströmung auftreten. Durch den Aufstau ergibt sich eine deutliche Differenz zwischen der Wasserspiegellage im Ober- und Unterwasser der Buhne. Die Strömung wird um den Buhnenkopf herum beschleunigt, und es treten lokal relativ grosse Geschwindigkeiten auf.

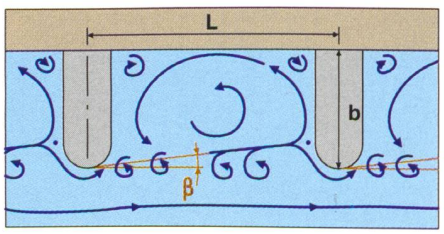

Bild 3. Strömungsverhältnisse bei nicht überströmten Buhnen.

Im Nachlauf der Buhne fällt die Strömung in einem Winkel β von rund 6° in das unterwasserliegende Buhnenfeld ein. Bei der Festlegung des Buhnenabstandes ist zu beachten, dass die ins Buhnenfeld einfallende Strömung auf den nachfolgenden Buhnenkörper trifft. Andernfalls wird die Uferlinie direkt angeströmt, und es muss unter Umständen mit Ufererosion gerechnet werden.

Bei nicht überströmten Buhnen wird innerhalb des Buhnenfeldes oft eine ausgeprägte Rückströmung (Zirkulationsströmung) in Form eines Horizontalwirbels beobachtet. Dieser Wirbel kann das ganze Buhnenfeld ausfüllen.

Werden die Buhnen überströmt, ändern sich die kleinräumigen Strömungsverhältnisse. Überströmte Buhnen wirken hydraulisch ähnlich wie Dammüberfälle. Beim Buhnenkörper tritt meist ein Fliesswechsel vom strömenden zum schiessenden Abfluss mit nachfolgender Tauchströmung im Unterwasser ein. Infolge der Überströmung ist es möglich, dass der Horizontalwirbel im Buhnenfeld abgeschwächt, flussabwärts gedrängt oder aus dem Buhnenfeld hinausgedrückt wird.

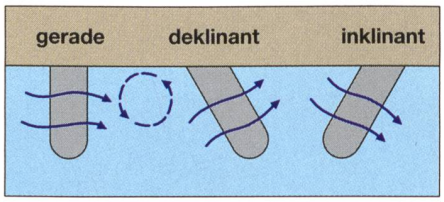

Bild 4. Charakteristische Strömungsverhältnisse bei überströmten Buhnen mit unterschiedlichen Inklinationen.

Die Hydraulik wird beim Überströmen auch von der Anordnung der Buhnen beeinflusst (vgl. Bild 4). Bei deklinanten Buhnen (Ausrichtung in Fliessrichtung) wird die Strömung in Richtung des Ufers gelenkt. Inklinante Buhnen (Ausrichtung gegen die Fliessrichtung) leiten die Strömung gegen die Flussmitte.

2.2 Morphologie und Geschiebetransport

Geschiebehaushalt von Flussstrecken mit Buhnen

Die beschriebenen hydraulischen Prozesse, die Morphologie des Flussgerinnes und der Geschiebetransport beeinflussen sich gegenseitig in vielfältiger Weise. So bewirkt beispielsweise die Einengung des Abflussquerschnittes durch Buhnen (ΔB) neben der

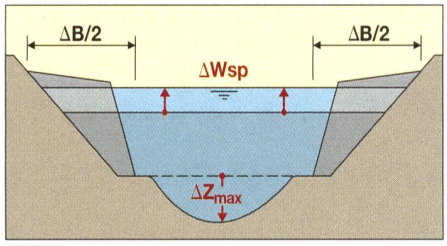

Bild 5. Eintiefung im Hauptgerinne nach dem Einbau von Buhnen.

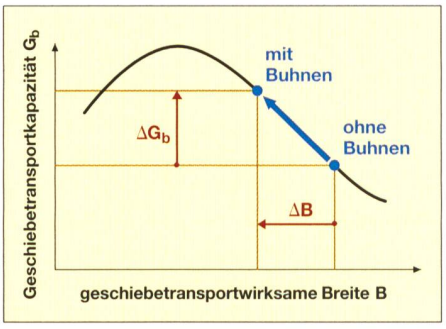

Bild 6. Geschiebetransportkapazität in Funktion der transportwirksamen Breite.

Anhebung der Wasserspiegellage (ΔWsp) auch eine Zunahme der hydraulischen Sohlenschubspannung (Schleppspannung) im Hauptgerinne. Dadurch tieft sich die Flusssohle zwischen den Buhnen tendenziell ein (vgl. Bild 5), sofern die Erosion nicht durch eine künstliche oder natürliche «Abpflästerung» der Sohlendeckschicht verhindert wird. Als Folge dieser Eintiefung der Sohle (ΔZ_{max}) senkt sich tendenziell auch die Wasserspiegellage ab und kompensiert dabei in der Regel einen Teil der einengungsbedingten Wasserspiegelanhebung.

Durch den Einbau von Buhnen wird die geschiebetransportwirksame Breite des Flussgerinnes verringert. Trotzdem nimmt die Geschiebetransportkapazität auf der verbauten Flussstrecke in den meisten Fällen zu (ΔG_b), weil die Schleppspannung im Hauptgerinne, wie oben beschrieben, vergrössert wird. Bei sehr geringen Flussbettbreiten ist es jedoch in Ausnahmefällen möglich, dass die Geschiebetransportkapazität durch den Einbau von Buhnen unverändert bleibt oder sogar abnimmt. Eine projektbezogene Beurteilung der morphologischen und geschiebetechnischen Verhältnisse bleibt daher unerlässlich.

Kolkprozesse

Betrachtet man die Entwicklung der Morphologie kleinräumig, so sind im Nahbereich der Buhne ausgeprägte Kolke zu erwarten. Bild 7 zeigt schematisch die Kolkbildung bei nicht überströmten Buhnen. Die grössten Kolktiefen treten dabei im Oberwasser und seitlich des Buhnenkopfs auf, wo die Strömung ausgeprägte Turbulenzen zeigt.

Beim Übergang von nicht überströmten zu überströmten Buhnen ändern sich nicht nur die Strömungsverhältnisse, sondern auch die Kolkerscheinungen (vgl. Bild 8). Bei überströmten Buhnen sind die Ufer tendenziell höheren hydraulischen Belastungen ausgesetzt und die Kolke treten näher an die Uferlinie. Auskolkungen sind insbesondere dort zu erwarten, wo der Buhnenkörper ins Ufer eingebunden ist. In diesen Fällen ist die Funktion der Buhnen als Uferschutz in Frage gestellt. Unter Umständen muss das Ufer zwischen den Buhnen zusätzlich geschützt werden (U.S. Federal Highway Administration, 1997).

Im Falle von überströmten Buhnen ist das Kolkbild durch die Inklination mitbeeinflusst. Bei deklinanten Buhnen wird die Strömung gegen das Ufer gelenkt und kann das Ufer im Unterwasser angreifen. Deshalb werden bevorzugt gerade und inklinante Buhnen gebaut, um der Gefahr eines Uferangriffs zu begegnen. Die Tiefe des Kolks am Buhnenkopf wird jedoch durch die üblicherweise gewählten Inklinationen nur unwesentlich beeinflusst; tendenziell ist bei inklinanten Buhnen die Kolktiefe in diesem Bereich etwas tiefer als bei deklinanten.

3. Modelle

3.1 Übersicht

Um die Wirkungsweise von Buhnen zumindest näherungsweise quantitativ zu erfassen, können physikalische Modelle (experimentelle, wasserbauliche Laborversuche) und Berechnungsmodelle eingesetzt werden. Zu den Berechnungsmodellen zählen eindimensionale (1D) hydraulische und sedimentologische Berechnungen sowie aufwendige mehrdimensionale (2 und 3D) numerische Simulationen.

Für den Einsatz sind die Modelle je nach Anwendung und Fragestellung unterschiedlich geeignet. In Tabelle 1 sind diese Eignungen im Überblick zusammengestellt. Physikalische Modelle sind anschaulich, prozessnah und vermögen die Abläufe kleinräumig aufzulösen. Sie setzen aber eine umfangreiche Infrastruktur voraus, die der Abbildung grossräumiger Situationen Grenzen setzt. Mit eindimensionalen hydraulischen Berechnungsansätzen können beispielsweise mittlere Wasserspiegellagen über längere Flussabschnitte ermittelt werden, eine detaillierte Erfassung kleinräumiger Strömungsverhältnisse ist damit aber nicht möglich. Zu den eindimensionalen Modellen zählen auch die empirischen Kolkformeln, die eine grobe Abschätzung der Kolktiefe am Buhnenkopf erlauben. Zweidimensionale hydraulische Simulationen, teilweise gekoppelt mit der Nachbildung des Geschiebetransports und der morphologischen Veränderungen werden zunehmend als Hilfsmittel in der Projektierungspraxis eingesetzt. Mit Hilfe solcher Simulationen kann der Einfluss von Buhnen zuverlässig erfasst werden. Lediglich im unmittelbaren Nahbereich des Buhnenkörpers treten ausgeprägt dreidimensionale Effekte auf, die eine entsprechende Modellierung notwendig machen. Dreidimensionale hydraulische und sedimentologische Simulationsmodelle sind zurzeit in Entwicklung und werden teilweise schon eingesetzt.

		Hydraulik		Morphologie Geschiebetransport	
		grossräumig	kleinräumig	grossräumig	kleinräumig
Physikalische Modelle		(+)	+	(+)	+
Berechnungsmodelle	1D	+	–	(+)	(+)
	2D	+	(+)	(+)	+
	3D	(+)	+	(+)	+

\+ Modelleinsatz geeignet (+) Modelleinsatz bedingt geeignet – Modelleinsatz nicht geeignet

Tabelle 1. Vergleich von verschiedenen Modellen zur Erfassung der Wirkungsweise von Buhnen.

3.2 Eindimensionale Berechnungsmodelle

Abschätzung der Wasserspiegelanhebung

Um die durch den Einbau von Buhnen verursachte Anhebung des Wasserspiegels im Hauptgerinne näherungsweise zu quantifizieren, kann der eindimensionalen hydraulischen Berechnung ein «Ersatzgerinnekonzept» zugrunde gelegt werden (vgl. Bild 9). Dabei wird der Einfluss der Buhnen einerseits durch eine Reduktion der abflusswirksamen Gerinnebreite B_{eff} und andererseits durch eine zusätzliche variable Rauigkeit k_{wand} an den fiktiven seitlichen Trennflächen berücksichtigt. In diesem 2-Parameter-Modell lassen sich dann die abflusswirksame Breite und die Trennflächenrauigkeit in sinnvollen Grenzen variieren. Bei der Wahl der abflusswirksamen Breite wird man in erster Näherung die Gerinnebreite zwischen den Buhnenköpfen annehmen. Je nach Verhältnissen ist es aber sinnvoll, diesen Parameterwert anzupassen.

Die Trennflächenrauigkeiten können durch Eichung ermittelt werden, wenn entsprechende Naturdaten zur Verfügung stehen (z.B. Wasserspiegellagen). Falls diese Daten fehlen, müssen die Trennflächenrauigkeiten mit Hilfe eines analytischen Ansatzes (z.B. Ritzert et al., 1998) abgeschätzt werden.

Abschätzung der Flusssohleneintiefung

Die in Kapitel 2.2 diskutierte Eintiefung der Flusssohle zwischen den Buhnen kann rechnerisch mit Hilfe eines Ansatzes von Spannring, 1999, abgeschätzt werden.

Der Ansatz basiert auf einer modifizierten Einengungskolkformel (1):

$$\Delta Z_{max} = h_0 \left[\left(\frac{\tau_0}{\tau_{crit}} \right)^{\frac{3}{7}} \left(\frac{B_0}{\lambda \cdot B_1} \right)^{\frac{6}{7}} - 1 \right]$$

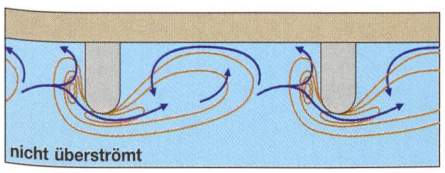

Bild 7. Kolkbildung bei nicht überströmten Buhnen.

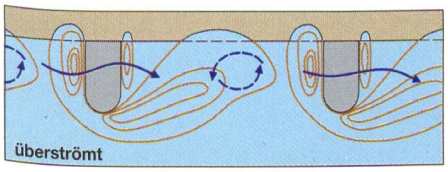

Bild 8. Kolkbildung bei überströmten Buhnen.

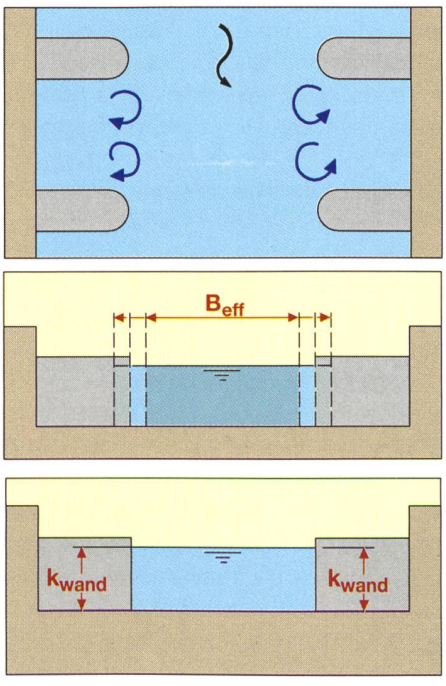

Bild 9. Ersatzgerinnekonzept.

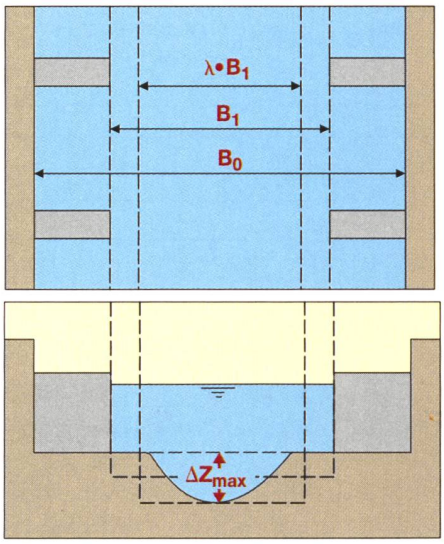

Bild 10. Maximale Eintiefung der Gerinnesohle unter Berücksichtigung des Buhneneffekts.

Die maximale Eintiefung ΔZ_{max} in Flussmitte ist dabei in erster Näherung eine Funktion der mittleren Gerinnebreite B_0, Abflusstiefe h_0 und Sohlenschubspannung τ_0 im unverbauten Querschnitt sowie der Gerinnebreite zwischen den Buhnen B_1 und der Sohlenschubspannung beim Transportbeginn τ_{crit} (vgl. Bild 10).

Der «Buhneneffekt» wird in der Einengungskolkformel durch einen Koeffizienten (λ) berücksichtigt. Dieser Koeffizient ist unter anderem vom Abfluss und den Buhnenabmessungen abhängig. Gemäss den Untersuchungen von Spannring gilt bei üblichen Abmessungen ungefähr $\lambda = 0{,}8$.

Empirische Kolkformeln

In der Literatur findet man eine Vielzahl von empirischen Formeln zur Abschätzung der maximalen Kolktiefe am Buhnenkopf. Die meisten dieser Formeln sind nicht allgemeingültig, und ihre Ergebnisse weisen grosse Unsicherheiten auf. Werden die Berechnungsergebnisse entsprechend interpretiert, so kann die Anwendung dieser Formeln trotzdem sinnvoll sein.

Stellvertretend für andere Ansätze wird nachfolgend die Kolkformel von Melville, 1997, vorgestellt. Es handelt sich dabei um einen klassischen Koeffizientenansatz:

$$\Delta Z_{max} = K_{yL} \cdot K_I \cdot K_d \cdot K_s \cdot K_q \cdot K_G \qquad (2)$$

In dieser Formel ist die maximale Kolktiefe ΔZ_{max} eine Funktion der Koeffizienten K_{yL} für die Abflusstiefe und Buhnenlänge, K_I für die Abflussintensität, K_d für den Korndurchmesser, K_s für die Buhnenform, K_q für den Inklinationswinkel und K_G für die Flussprofilgeometrie. Wie die Koeffizienten im Einzelnen bestimmt werden, kann der Originalliteratur entnommen werden.

Die Formel von Melville gilt primär für nicht überströmte Buhnen. Im Falle einer Überströmung liefert der Ansatz tendenziell zu grosse Kolktiefen; d.h. je nach Verhältnissen wird die Kolktiefe um maximal rund einen Faktor zwei überschätzt.

3.3 Mehrdimensionale Berechnungsmodelle

Die Buhnen führen zu komplexen Strömungsverhältnissen, die mit eindimensionalen Berechnungsansätzen im Detail nur schwer erfassbar sind. Deshalb werden in der Ingenieurpraxis zunehmend auch mehrdimensionale numerische Simulationsmodelle eingesetzt, um die Hydraulik, den Geschiebetransport und die morphologischen Entwicklungen nachzubilden.

Zu den zweidimensionalen Berechnungsansätzen gehört die Lösung der tiefengemittelten Flachwassergleichungen. Mit deren Hilfe kann der Einfluss der Buhnen auf die Hydraulik eines Flussabschnitts in vielen Fällen ausreichend genau abgeschätzt werden, ausser im unmittelbaren Nahbereich des Buhnenkörpers. Wird die Hydraulik mit dem Feststofftransport gekoppelt modelliert, so wird die Nachbildung einer beweglichen Flusssohle möglich.

Dreidimensionale hydraulische Berechnungsansätze gehen auf die Lösung der Navier-Stokes-Gleichungen zurück, wobei der Modellierung der freien Oberfläche, des Wandbereichs und der Turbulenz besondere Bedeutung zukommt. Auch in diesem Fall lässt sich die Hydraulik mit dem Feststofftransport koppeln, was beispielsweise die Nachbildung von Kolkprozessen erlaubt. Dreidimensionale Simulationsmodelle erfordern jedoch einen hohen Aufwand bei der Implementierung und sind relativ rechenintensiv. Sie werden daher nur zur Nachbildung kleinräumiger Gebietsausschnitte eingesetzt.

4. Fallbeispiel Aare

4.1 Perimeter

Die Bundesämter für Wasser und Geologie BWG (früher Bundesamt für Wasserwirtschaft) sowie Umwelt, Wald und Landschaft Buwal haben die Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie VAW beauftragt, eine rund 400 m lange Flussstrecke an der Aare zwischen Thun und Bern (km 20,2 bis 20,6) zu untersuchen. Die Linienführung des Flusslaufs ist gestreckt, das mittlere Sohlengefälle beträgt rund 2,1‰. Die Flussbettbreite von 70 m wird lokal durch gerade bis leicht inklinant ausgerichtete Sporenbuhnen eingeengt. Die Buhnen weisen eine Länge von ungefähr 15 m sowie eine Breite von 10 m auf und stehen in einem Abstand von 75 m auseinander (vgl. Bild 11).

4.2 Untersuchungsmethodik

Mit der Untersuchung wurde exemplarisch gezeigt, wie Buhnen die Hydraulik, die Morphologie und den Geschiebetransport eines Flussabschnitts beeinflussen. Zu diesem Zweck wurden verschiedene Modellansätze angewandt:

- physikalisches Modell im Massstab 1:40;
- zweidimensionale numerische Simulation der Hydraulik;
- Naturmessungen im Nahbereich eines ausgewählten Buhnenkörpers (vgl. Wisselmann, 1998).

Im physikalischen Modell und bei den zweidimensionalen numerischen Simulationen der Hydraulik wird grundsätzlich zwischen einer «Situation mit Buhnen» und einer «Situation ohne Buhnen» unterschieden. Die Situation mit Buhnen repräsentiert den Ist-Zustand der Flussgeometrie, die Situation ohne Buhnen steht für eine modifizierte Topografie, bei der die Buhnenkörper weggelassen werden, die übrige Geometrie aber identisch bleibt. Im folgenden Kapitel 4.3 sind ausgewählte Ergebnisse aus dem Vergleich

Bild 11. Buhnen an der Aare, aufgebaut aus Kies und Blöcken mit Oberflächenschutz aus Beton (Blick in Fliessrichtung).

zwischen diesen beiden Situationen dargelegt.

In Ergänzung dieser Studie wurde in einem Teil des Untersuchungsperimeters eine dreidimensionale numerische Simulation der Hydraulik durchgeführt, um die Praxistauglichkeit dieses Modellansatzes zu überprüfen (vgl. Kapitel 4.4).

4.3 Wasserspiegellage, Geschiebetransport und Kolk

In Bild 12 sind die mittleren Wasserspiegellagen für einen Abfluss von 82 m^3/s (Niederwasserabfluss) im Längenprofil dargestellt. Für die Situation mit Buhnen liegen Resultate aus dem physikalischen Modell, den zweidimensionalen numerischen Simulationen und den Naturmessungen (Wisselmann, 1998) vor. Die Übereinstimmung der Ergebnisse dieser zwei Modellansätze ist zufriedenstellend. Im physikalischen Modell wurden zusätzlich die Abflusstiefen für die Situation ohne Buhnen beobachtet. Daraus geht hervor, dass die Buhnen bei Niederwasserabfluss eine Anhebung des Wasserspiegels von rund 20 bis 30 cm verursachen.

Die physikalischen Modellversuche haben im Weiteren gezeigt, dass der Geschiebetransportbeginn in der Situation mit Buhnen bei kleineren Abflüssen liegt als im Fall ohne Buhnen. Die Geschiebetransportraten wurden durch den Einbau der Buhnen unabhängig vom Abfluss systematisch um rund einen Faktor 1,5 bis 2,0 grösser.

In Bild 13 sind die im physikalischen Modell gemessenen mittleren und maximalen Kolktiefen in Funktion der Abflussmenge aufgetragen. Zusätzlich wurden die Kolktiefen mit dem Ansatz von Melville, 1997, abgeschätzt. Da Melville seine Kolkformel für Dimensionierungsaufgaben entwickelt hat, liefert sie die maximal zu erwartenden Kolktiefen. Es ist somit plausibel, dass die im Modell beobachteten Kolktiefen tendenziell kleiner sind, als die nach Melville abgeschätzten. Bei überströmten Buhnen ist die Differenz zwischen gemessenen und berechneten maximalen Kolktiefen ausgeprägter, was damit erklärt werden kann, dass in der Kolkformel ein Überströmen der Buhnen nicht mitberücksichtigt wird.

Im Weitern zeigt Bild 13 die Bandbreite der in Natur beobachteten Kolktiefen zwischen rund 0,7 und 2,3 m. Dabei ist zu beachten, dass die Kolktiefen bei Niederwasser aufgenommen wurden. Bei Hochwasser treten vermutlich wesentlich tiefere Kolke auf, die beim abklingenden Hochwasser teilweise wieder verfüllt werden.

4.4 Dreidimensionale numerische Simulation der Hydraulik

Auf dem oben beschriebenen Flussabschnitt an der Aare wurde die Hydraulik auch mittels dreidimensionaler Strömungsberechnung untersucht. Das abgebildete Gebiet erstreckt sich in Längsrichtung über zwei Buhnen mit einem dazwischenliegenden Buhnenfeld und in Querrichtung vom linken Ufer bis in Flussmitte. Die Geländeinformation wurde einem schon vorhandenen Geländemodell entnommen und in das numerische Modell eingebaut. Das Berechnungsgitter umfasste $90 \times 40 \times 15$ Zellen, insgesamt also deren 54 000. Oberstrom des eigentlichen Berechnungsgebietes wurden einige Zellen angesetzt, um eine genau zu kontrollierende Randbedingung zu erhalten. Damit konnte ein uniformes Geschwindigkeitsprofil als Randbedingung für die verschiedenen Durchflüsse eingesetzt werden. Die Berechnungen wurden mit dem kommerziell erhältlichen Code «Flow-3D» der Firma Flow-Science durchgeführt. Dieser basiert auf Finiten Differenzen in einem orthogonalen Gitter und eignet sich dank der eingebauten VOF-Methode (Volume Of Fluid) vorzüglich für Berechnungen, wo die freie Oberfläche eine massgebende Rolle spielt. Bild 14 zeigt das Berechnungsgebiet mit der eingebauten Topografie.

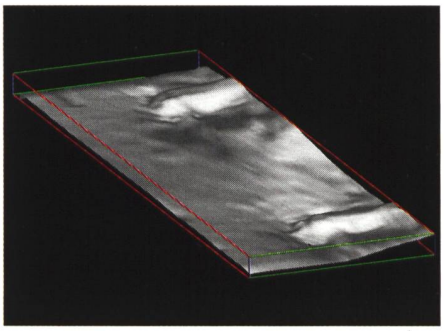

Bild 14. Dreidimensionales Berechnungsgebiet mit der verwendeten Topografie.

Mit Hilfe der dreidimensionalen hydraulischen Berechnungen wurden die Strömungsverhältnisse bei Abflüssen von 82 m^3/s und 300 m^3/s miteinander verglichen. Die dazugehörigen Wasserspiegellagen sind in Bild 15 dargestellt. Beim Abfluss von 82 m^3/s liegen die Buhnenkörper und ein Teil des Buhnenfeldes trocken, was für die Niederwassersituation im Winterhalbjahr typisch ist. Die Wasseroberfläche zeigt kleinere Wellen um die Buhnenköpfe herum und einen weiteren Wellenzug vom Buhnenfeld in Richtung Flussmitte. Dieser Wellenzug wird von topografischen Unregelmässigkeiten im Buhnenfeld verursacht.

Mit der Schnee- und Eisschmelze steigt der Abfluss in der Aare an. Beim Abfluss von 300 m^3/s sind die Buhnenkörper weitgehend überströmt, wie dies im Sommerhalb-

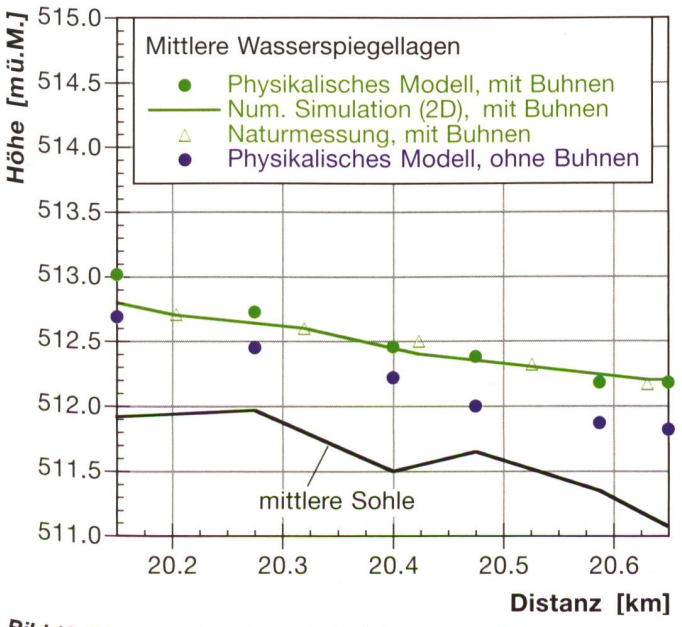

Bild 12. Wasserspiegellagen bei Niederwasserabfluss.

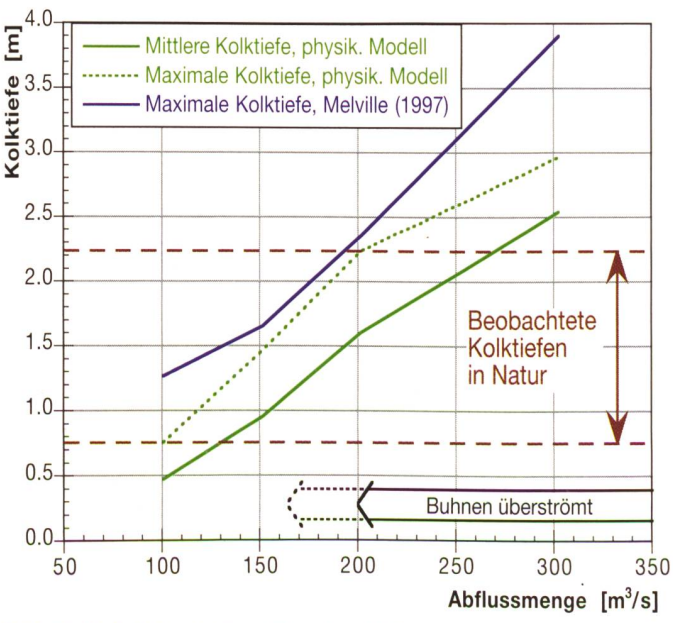

Bild 13. Kolktiefen in Funktion des Abflusses.

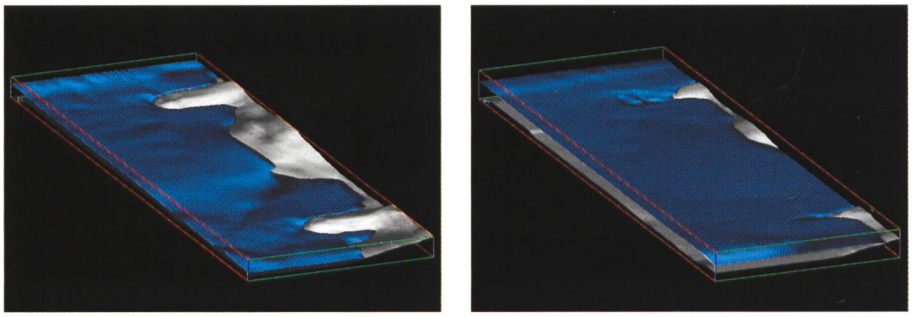

Bild 15. Wasserspiegellagen bei einem Abfluss von 82 m³/s (links) und 300 m³/s (rechts).

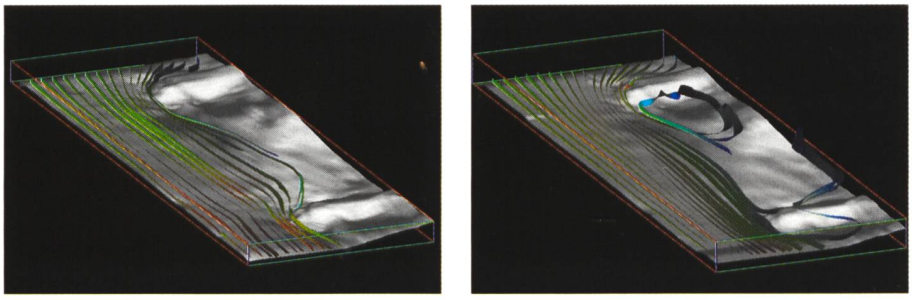

Bild 16. Strombänder bei einem Abfluss von 82 m³/s (links) und 300 m³/s (rechts).

jahr häufig der Fall ist. Dabei bleibt die Wasseroberfläche weitgehend glatt, nur im Nahbereich der Buhnenköpfe treten Wellen auf.

Für die Visualisierung des dreidimensionalen Strömungsfeldes eignen sich die so genannten Strombänder. Dabei werden die Bewegungsbahnen von einzelnen Wasserteilchen im Strömungsfeld dargestellt. Die Strombänder zeigen zusätzlich weitere Eigenschaften des Geschwindigkeitsfeldes an, beispielsweise die Rotation, falls die Bänder verdrillt sind, den Betrag des Geschwindigkeitsvektors mit der Farbe (blau = klein, rot = gross) und die Divergenz des Geschwindigkeitsfeldes in der Änderung der Streifenbreite. In Bild 16 sind diese Strombänder für die oben angegebenen Abflüsse dargestellt.

Es ist auffallend, dass die Strömung in weiterer Entfernung der Buhnen geradlinig und weitgehend ungestört verläuft. In diesen Gebieten liesse sich die Strömung auch mit einer zweidimensionalen, tiefengemittelten hydraulischen Berechnung hinreichend genau erfassen. Demgegenüber zeigen sich im Nahbereich der Buhnen in Abhängigkeit des Abflusses unterschiedliche dreidimensionale Strömungsverhältnisse.

Beim Abfluss von 82 m³/s reichen die Strombänder teilweise ins Buhnenfeld hinein, um dann wieder vor der nächsten Buhne zu passieren. Im Allgemeinen stellt sich bei nicht überströmten Buhnen eine ausgeprägte Rückströmung im Buhnenfeld ein (vgl. Bild 7). Im vorliegenden Fall ist diese Rückströmung aber nur schwach ausgebildet, weil beim Abfluss von 82 m³/s ein Teil des Buhnenfeldes trocken liegt oder nur gering durchströmt wird. Deshalb wird sie von den Strombändern auch nicht angezeigt.

Beim Abfluss von 300 m³/s ändert sich das Strömungsbild. In der Rückströmungszone der oberen Buhne ist ein Stromband erkennbar, das im Nahbereich des Buhnenkörpers stark verdrillt ist und dort auf ausgeprägt dreidimensionale Strömungsverhältnisse hinweist. Das über den Buhnenkörper strömende Wasser führt im Widerwasser zu komplexen, turbulenten Fliesszuständen. Die Rückströmung im Buhnenfeld bleibt aber im Wesentlichen erhalten, weil die Buhnen beim Abfluss von 300 m³/s nur schwach überströmt werden. Bei höheren Abflüssen und stärkerer Buhnenüberströmung wäre zu erwarten, dass die Rückströmung zunehmend aus dem Buhnenfeld gedrängt würde, wie dies in Bild 8 angedeutet ist.

Im Rahmen dieser Studie wurden die dreidimensionalen hydraulischen Berechnungen mit einer festen, unbeweglichen Berandung durchgeführt. In naher Zukunft wird es möglich sein, bei solchen Berechnungen auch die Entwicklung der beweglichen Flusssohle mitzuberücksichtigen.

5. Schlussfolgerungen

Buhnen beeinflussen die Hydraulik, die Morphologie und den Geschiebetransport eines Flusses in vielfältiger Weise. Die quantitative Erfassung der entsprechenden Prozesse ist unter gewissen Einschränkungen möglich, erfordert aber entsprechende Spezialkenntnisse in verschiedenen Fachbereichen und teilweise den Einsatz von numerischen Simulationsmodellen. Im Allgemeinen sind Buhnen schwieriger zu dimensionieren und zu bemessen als Längsverbauungen. Vor allem die Bemessung des Bauwerks auf eine dauerhafte Stabilität ist mit einigen Unsicherheiten behaftet. Im Weitern engen sie den Gewässerquerschnitt ein, was oft unerwünscht ist. Aus flussbaulicher Sicht besteht in den meisten Fällen keine Veranlassung, Buhnen an Stelle von Längsverbauungen als Uferschutz einzusetzen. Dennoch kann der Einsatz von Buhnen gerechtfertigt sein, wenn damit der Zustand des Gewässers, beispielsweise in ökologischer Hinsicht, nachweislich verbessert wird.

Dank

Der vorliegende Beitrag basiert auf den Untersuchungsergebnissen einer interdisziplinären Studie, die von den Bundesämtern für Wasser und Geologie (BWG) sowie Umwelt, Wald und Landschaft (Buwal) in Auftrag gegeben wurde. Die Studie wurde ferner vom Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (Awel) des Kantons Zürich unterstützt. Das Strasseninspektorat Amt Seftigen, Oberingenieurkreis II des Kantons Bern, hat bei der Errichtung der baulichen Infrastruktur für die Naturmessungen an der Aare unentbehrliche Hilfe geleistet. Allen beteiligten Fachleuten sei an dieser Stelle für die Zusammenarbeit bestens gedankt.

Literatur

Melville, B. (1997): «Pier and abutment scour, Integrated approach». Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 125–136.

Ritzert, F.; Söhngen, B.; Nestmann, F. (1998): «Niedrigwasseraufhöhende Wirkung von Buhnen bei fester Sohle». In: Jahrbuch der Hafenbautechnischen Gesellschaft, Band 51, S. 80–84.

Spannring, M. (1999): «Die Wirkung von Buhnen auf Strömung und Sohle eines Fliessgewässers. Parameterstudie an einem numerischen Modell». Bericht Nr. 86 des Lehrstuhls und der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Technischen Universität München.

U.S. Federal Highway Administration (1997): «Bridge Scour and Stream Instability Countermeasures. Experience, Selection and Design Guidance». Hydraulic Engineering Circular No. 23 (HEC 23).

Wisselmann R. (1998): «Mesures de vitesses in situ autour d'un épi de l'Aar». Diplomarbeit an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie und an der Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg.

Adressen der Verfasser

Monika Weber, dipl. Ing. ETH, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, CH-8092 Zürich. E-Mail: mweber@vaw.baug.ethz.ch

Marcel Roth, dipl. Ing. ETH, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, CH-8092 Zürich. E-Mail: mroth@vaw.baug.ethz.ch

Dr. *Felix Hermann,* dipl. Ing. ETH, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, CH-8092 Zürich. E-Mail: hermann@vaw.baug.ethz.ch