

Guntram Ebel, Arne Gluch und Martin Kehl

# Einsatz des Leitrechen-Bypass-Systems nach Ebel, Gluch & Kehl an Wasserkraftanlagen – Grundlagen, Erfahrungen und Perspektiven

Leitrechen-Bypass-Systeme sind weltweit im Einsatz, um die Mortalität flussabwärts wandernder Fische bei der Passage von Wasserkraftanlagen zu begrenzen. Im vorliegenden Beitrag wird ein spezielles Leitrechen-Bypass-System vorgestellt, das sich gegenüber den bisherigen Konzepten durch neue bauliche Komponenten und Gestaltungsgrundsätze auszeichnet. Da das System über günstige Voraussetzungen für einen effektiven Fischschutz verfügt sowie vorteilhafte Eigenschaften im praktischen Betrieb aufweist, wird es in Deutschland und anderen Staaten zunehmend angewendet.

## 1 Einleitung

Bei der Passage von Wasserkraftanlagenstandorten unterliegen flussabwärts wandernde Fische vielfältigen Mortalitätsrisiken, die aus den physischen und verhaltensbiologischen Wirkungen von Turbinen und anderen Bauwerkskomponenten resultieren. Die höchste Sterblichkeit tritt im Regelfall in der Turbine auf [1], [2], [3]. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, dass abwandernde Fische bei der Überwindung von Stauanlagen sowie an fehlerhaft bemessenen Rechenanlagen schwerwiegende Schädigungen erleiden [4], [5]. Der internationale Kennt-

nisstand zur wasserkraftbedingten Fischmortalität ist in Ebel [6] zusammenfassend dargestellt.

Zur Begrenzung der dargestellten Effekte finden verschiedene Strategien Anwendung: Installation von Fischschutz- und Fischabstiegssystemen, Einsatz von fischschonenden Turbinen, Etablierung eines fischschonenden Anlagenmanagements oder Einrichtung von Fang- und Transportsystemen [6], [7]. Die größte praktische Bedeutung für die Verminderung der wasserkraftbedingten Fischmortalität und die Umsetzung der diesbezüglichen Rechtsvorgaben besitzen Fischschutz- und Fischabstiegssysteme.

Vorteilhafte Befunde zur biologischen Wirksamkeit liegen dabei vor allem für Leitrechen und Louver vor, die mit geeigneten Bypässen kombiniert sind [6].

Ein spezielles Leitrechen-Bypass-System, das sich gegenüber den bisherigen Konzepten durch neue bauliche Komponenten und Gestaltungsgrundsätze auszeichnet (**Bild 1**), wurde durch die Autoren entwickelt [6], [8], [9], [10]. Da dieses System nicht nur über günstige Voraussetzungen für einen effektiven Fischschutz verfügt, sondern auch Vorteile im praktischen Anlagenbetrieb bedingt, wird es in Deutschland und anderen Staaten zunehmend eingesetzt.

Die vorliegende Arbeit informiert in Kurzform über den Aufbau und das Funktionsprinzip sowie über die ingenieurbio-logische Bemessung und Gestaltung des Systems. Darüber hinaus werden Befunde zur biologischen Wirksamkeit sowie Betriebserfahrungen und Einsatzperspektiven behandelt. Für detaillierte Informationen zum Themengebiet des Fischschutzes und Fischabstiegs an Wasserkraftanlagen wird auf Ebel [6] verwiesen.

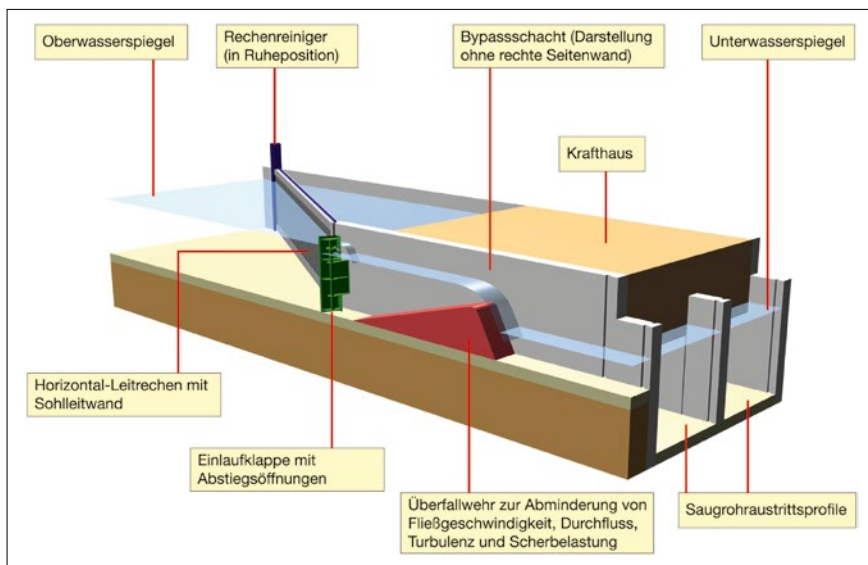
## 2 Aufbau und Funktionsprinzip

### 2.1 Rechen

Das durch horizontale Stabelemente gebildete, der Sohle senkrecht aufstehende Rechenfeld wird in einem horizontalen Winkel schräg angeströmt (**Bilder 2 und 3**). Geeignete Anströmbedingungen werden



**Bild 1:** Das Leitrechen-Bypass-System wurde erstmals an der Pilotanlage Halle-Planena (Saale, Deutschland, Ausbaudurchfluss 50 m<sup>3</sup>/s) praktisch ausgeführt (Quelle: G. Ebel)



**Bild 2:** Prinzipskizze des Leitrechen-Bypass-Systems in Seitenansicht (Bereich zwischen Leitrechen und Krafthaus ohne Abdeckung bzw. Grobrechen dargestellt) (Quelle: [6])

in vielen Fällen durch Anströmwinkel von 20 bis 40° und Anströmgeschwindigkeiten von 0,40 bis 0,80 m/s erzielt; der Anströmwinkel ist dabei der von dem Rechenfeld und der Fließrichtung eingeschlossene Winkel. Die ingenieurbologisch geeignete Kombination von Anströmwinkel und Anströmgeschwindigkeit ist maßgeblich von der Schwimmfähigkeit der jeweils relevanten Arten abhängig und wird durch Anwendung spezieller Prognosemodelle hergeleitet (Abschnitt 3.2).

Die lichte Stabweite des Rechens orientiert sich an den Körperdimensionen der kleinsten Zielart (Abschnitt 3.1). Der Rechen fungiert somit einerseits als physisch undurchlässige Barriere, die das Eindringen von Fischen in die nachgeordneten Triebwerke verhindert. Andererseits zielt der Rechen durch seine spezifische Expo-

sition auch darauf ab, dass die abwandernden Fische ohne Veränderung ihres natürlichen Schwimmhorizontes den Bypass erreichen können (Abschnitt 3.2).

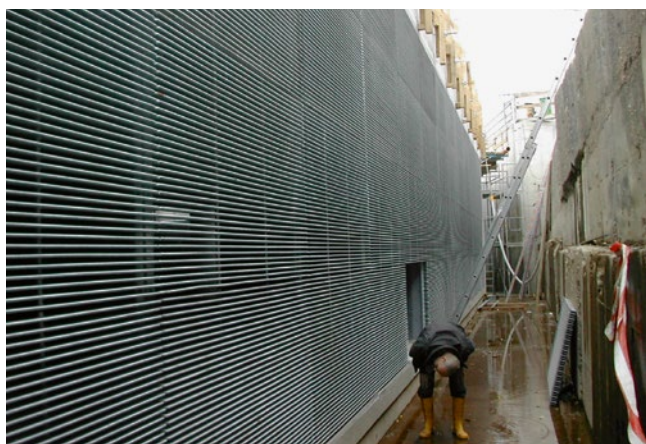
Um die biologische Leitwirkung des Rechens zu verbessern und die Weitergabe von Geschiebe an das Unterwasser zu fördern, wird das Rechenfeld meist mit einer Sohleleitwand kombiniert (Bild 3). Sofern am betreffenden Standort oberflächennah abwandernde Individuen, wie Salmonidensmolts, zu berücksichtigen sind, ist darüber hinaus die Installation einer oberflächennahen Verblendung zu empfehlen. Das gilt insbesondere dann, wenn die Stabweite aufgrund von standörtlichen Zwängen nicht so gering gewählt werden kann, dass der Rechen als physisch undurchlässige Barriere wirkt (Abschnitt 3.1).

## 2.2 Bypass

Der Rechen bildet eine Funktionseinheit mit einem lichtoffenen, schachtartigen Bypass. Dessen Eintrittsprofil befindet sich am unterstromigen Ende des Rechenfeldes und erfasst die gesamte Höhe der Oberwassersäule (Bilder 1 und 2). Die Höhe der Einlaufsohle in den Bypass entspricht somit der Sohlenhöhe vor der Sohleleitwand. Die Breite des Bypassschachtes beträgt in Abhängigkeit von den standörtlichen Bedingungen meist 0,8 bis 2,0 m und der Durchfluss meist 0,2 bis 2,0 m<sup>3</sup>/s.

Der Bypass besitzt einerseits die Aufgabe, den durch das Rechensystem horizontal abgeleiteten Individuen eine schad- und verzögerungsfreie Passage in das Unterwasser bei gleichzeitig geringer Desorientierung zu ermöglichen. Andererseits fungiert der Bypass auch als Ableitungsgerinne für Treibgut. Bedingt durch die tangentielle Strömungskomponente, die sich entlang der schräg exponierten Rechenfläche ausbildet, wird ein Teil des Treibgutaufkommens (vorwiegend Geschwemmel) kontinuierlich in den Bypass weitergeleitet (Selbstreinigung des Rechens). Die übrigen Treibgutbestandteile (vorwiegend Holz) werden durch die horizontal arbeitende Rechenreinigungsanlage periodisch oder episodisch zum Bypasseintrittsprofil transportiert (Bild 4). Aufgrund seiner konstruktiven Eigenschaften kann der Bypass darüber hinaus einen Beitrag zur Verbesserung der Geschiebedynamik im stauregulierten Fließgewässer leisten. Die Geschiebezuführung zum Bypass wird durch die unter dem Rechenfeld angeordnete Sohleleitwand gefördert (Abschnitt 2.1).

Da im Bypassschacht eine erhebliche Wasserspiegeldifferenz abzubauen ist,



**Bild 3:** Leitrechen mit Sohleleitwand an einer Wasserkraftanlage mit einem Ausbaudurchfluss von 88 m<sup>3</sup>/s (links: im Bau, rechts: im Betrieb; Quellen: links: A. Gluch, rechts: G. Ebel)





**Bild 4:** Übergabe des horizontal abgereinigten Treibguts in das Bypassgerinne (Quelle: G. Ebel)

werden hier spezielle Kontrollbauwerke installiert, die Fließgeschwindigkeit, Durchfluss, Turbulenz und Scherbelastung abmindern. Dabei handelt es sich um eine Klappe mit vertikaler Drehachse (Türflügelprinzip) sowie um ein unterhalb angeordnetes Überfallwehr (Bild 2).

Die im oberen Teil des Bypassschachtes installierte Klappe erzeugt durch Einengung der durchströmten Gerinnebreite eine Schlitzstruktur, die sich entweder über die gesamte Höhe der Wassersäule erstreckt oder durch Teilverblendungen in verschiedene fensterartige Öffnungen untergliedert wird. Die Anordnung dieser Öffnungen erfolgt in den bevorzugten Abwanderungshorizonten der jeweils maßgebenden Arten, wobei im Regelfall zumindest im oberflächennahen und im sohlennahen Bereich eine Abstiegsoffnung vorzusehen ist. Im normalen Betriebszustand stehen für die Fischabwanderung ausschließlich der Schlitz bzw. die Abstiegsoffnungen zur Verfügung. Bei Spülvorgängen bzw. Hochwasserereignissen öffnet die Klappe hingegen vollständig und gibt den gesamten Querschnitt des Bypassgerinnes frei.

Das Überfallwehr besitzt einen schrägen Anströmboden (10 bis 30°) und wird in Abhängigkeit von den standörtlichen Gegebenheiten fest oder beweglich ausgeführt. Bewegliche Konstruktionen lassen sich bei Spülvorgängen oder Hochwasserereignissen absenken, so dass die Durchflusskapazität des Bypassgerinnes vergrößert wird. Nachteilige Schwall- und Sunkeffekte sind durch geeignete Auslegung bzw. Steuerung des Bypasses auszuschließen.

### 3 Ingenieurbiologische Bemessung und Gestaltung

Die nachstehenden Ausführungen informieren in Kurzform über die Prinzipien der ingenieurbiologischen Bemessung und Gestaltung des Leitreechen-Bypass-Systems. Orientierungswerte für die geometrische und hydraulische Auslegung sind in **Tabelle 1** zusammenfassend dargestellt. Die anlagenkonkrete Bemessung erfordert stets weiterführende Analysen für die betreffenden Arten und Standortverhältnisse (s. v. a. Ebel [6]).

#### 3.1 Rechen

##### Lichte Stabweite

Ein Eindringen von Fischen in die nachgeordneten Triebwerke kann nur dann sicher ausgeschlossen werden, wenn der Rechen für diese als physisch undurchlässige Barriere wirkt. Daher ist die lichte Stabweite des Rechens möglichst so zu bemessen, dass dieser durch die Zielart mit den geringsten Körperdimensionen nicht passiert werden kann. In der Praxis werden folglich meist lichte Stabweiten  $\leq 15$  mm realisiert. Fischschäden durch Anpressung an den Rechen sind durch Wahl geeigneter Anströmbedingungen zu vermeiden.

Für Fische, deren Körperdimensionen die lichte Stabweite unterschreiten, ergibt sich eine partielle Schutzwirkung, die ausschließlich auf verhaltensbiologischen Mechanismen (Vermeidungsreaktion und Leitwirkung) basiert und hinsichtlich ihres Umfangs vom Durchlässigkeitsindex, den Anströmbedingungen und artspezifischen Aspekten abhängig ist. Die erzielte

Schutzeffizienz bestimmt gemeinsam mit den technischen Eigenschaften des nachgeordneten Triebwerks den Umfang der triebwerksbedingten Mortalität. Eine diesbezügliche Bilanzierung erfordert stets standortspezifische Analysen, bei denen die jeweiligen Eigenschaften von Rechen und Triebwerk sowie ggf. die Längenhäufigkeits-Verteilung der abwandernden Individuen zu berücksichtigen sind. Für die Prognose der turbinenbedingten Fischmortalität stehen aussagefähige Modellgleichungen zur Verfügung [6].

#### Anströmgeschwindigkeit und Anströmwinkel

Anströmgeschwindigkeit und -winkel sind elementare Größen für die biologische Wirksamkeit von Rechensystemen. Generell gilt, dass sich mit abnehmendem Anströmwinkel, also zunehmender Schrägstellung des Rechens, die zulässige Anströmgeschwindigkeit erhöht. Die jeweils geeignete Kombination von Anströmgeschwindigkeit und Anströmwinkel wird durch Anwendung spezifischer Modellgleichungen hergeleitet [11], [12], [13].

Eine entscheidende Voraussetzung für die Auslegung der Anströmbedingungen von Fischschutzsystemen ist die Kenntnis der Schwimmgeschwindigkeit der zu schützenden Arten bzw. Stadien. Die Schwimmgeschwindigkeit ist ihrerseits von Körperlänge, Schwimmdauer und Wassertemperatur abhängig und lässt sich durch Anwendung multivariater Modelle quantitativ beschreiben [6], [14]. Die auf diese Weise modellierten Bemessungsempfehlungen ähneln den Vorgaben amerikanischer Autoren [15], [16], [17], [18], [19], sind jedoch tendenziell weniger restriktiv. Maßgebend für die praktische Bemessung ist die leistungsschwächste Zielart.

#### 3.2 Bypass

##### Geometrische Parameter

Die Auslegung der biologisch erforderlichen Profildimensionen erfolgt durch Anwendung von Regressionsmodellen und ergänzenden Literaturbefunden [6]. Die Regressionsmodelle wurden aus den Ergebnissen von Freilandstudien an Bypässen mit hoher verhaltensbiologischer Akzeptanz abgeleitet und repräsentieren die Mindestanforderungen an die Abmessungen des kleinsten Profils im Bypass. Dieses entspricht den Abstiegsoffnungen in der Bypassklappe bzw. dem Fließquerschnitt auf der Krone des Überfallwehres.

Maßgebend für die Festlegung der Profildimensionen ist die größte bzw. verhaltensbiologisch anspruchsvollste Art. Den Anforderungen vieler Arten kann durch Profilhöhen von 0,30 bis 0,60 m und Profiltiefen bzw. Wassertiefen von 0,45 bis 0,90 m entsprochen werden [6].

Bei der Passage des Bypasses können Fische mit dessen Wandung kollidieren, so dass ggf. Verletzungen durch Aufprall bzw. Abrasion entstehen. Ein diesbezüglich erhöhtes Risiko tritt in gekrümmten Gerinneabschnitten auf. Sofern auf eine gekrümmte Linienführung nicht völlig verzichtet werden kann, wird mit Verweis auf amerikanische Autoren [15], [16], [17], [19] ein Mindestradius empfohlen, der dem 5-fachen der Bypassbreite entspricht. Grundsätzlich sind alle Bypasskomponenten mit glatter Oberfläche und gedich-

teten Spalten auszuführen, um das Verletzungsrisiko zu minimieren [6].

Unterhalb von Überfällen ist durch Gewährleistung einer ausreichenden Wassertiefe dafür Sorge zu tragen, dass der Fisch nach der Passage des Überfalls nicht durch Kollision mit der Gerinnesohle geschädigt wird. Die zu diesem Zweck vorzuhaltende Wassertiefe entspricht mindestens 25 % der Fallhöhe, wobei eine Wassertiefe von 0,9 m in keinem Fall zu unterschreiten ist [20].

### Hydraulische Parameter

Um Vermeidungsreaktionen abwandern der Fische zu minimieren, sollte die Einstromung in den Bypass gerichtet und turbulenzarm mit möglichst gleichförmiger Beschleunigung unter Vermeidung von steilen Geschwindigkeitsgradienten erfol-

gen. Wie eine Aufarbeitung des internationalen Kenntnisstandes zeigt, kann von einer hohen verhaltensbiologischen Akzeptanz dann ausgegangen werden, wenn die Fließgeschwindigkeit im Bypasseeintrittsprofil dem 1,0- bis 2,0-fachen der Anströmgeschwindigkeit des Rechens entspricht und zugleich einen Absolutwert von 0,30 bis 1,50 m/s aufweist [6].

Die hydraulischen Verhältnisse im Bypassgerinne werden maßgeblich durch die Auslegung der hier angeordneten Kontrollbauwerke bestimmt. Die Kronenhöhe des Überfallwehres sollte so bemessen werden, dass sich in der sohlennahen Abtriegsöffnung der Bypassklappe rückgestauter Ausfluss einstellt und an der oberflächennahen Öffnung der Bypassklappe die Ausbildung eines freien Überfallstrahls vermieden wird. Für die sohlennahe Abtriegsöffnung wird aus verhaltensbiologischen Gründen eine Fließgeschwindigkeit von 1 bis 3 m/s empfohlen. Bei Überschreitung einer Fließgeschwindigkeit von 4,5 m/s besteht die Gefahr signifikanter Verletzungen durch Scherkräfte, Druckgradienten bzw. Kollision mit Bauwerkskomponenten. Da die Fließgeschwindigkeiten und Fließhöhen an Bypassklappe und Überfallwehr wechselseitige Abhängigkeiten aufweisen, sind im Regelfall iterative Berechnungen erforderlich, um die Einhaltung der ingenieurbioologischen Zielgrößen nachzuweisen.

Bei der Auslegung der Austrittsgeschwindigkeit des Bypasses sind unterschiedliche Zielstellungen zu berücksichtigen. Einerseits ist der verletzungsfreie Übertritt der durch den Bypass abgewanderten Individuen in das Unterwasser zu gewährleisten. Andererseits gilt es, die verhaltensbiologische Attraktivität des Bypasses für flussaufwärts wandernde Fische zu minimieren. Darüber hinaus sind geeignete hydraulische Bedingungen für die Durchführung von Funktionskontrollen bzw. Monitoringuntersuchungen vorzuhalten. Diesen Anforderungen kann gleichermaßen entsprochen werden, wenn das Bypassaustrittsprofil ohne Überfall mit geringer Fließgeschwindigkeit (<0,50 m/s) in das Unterwasser einbindet.

## 4 Biologische Wirksamkeit

Die bislang vorliegenden Befunde dokumentieren eine vorteilhafte biologische Wirkung des Leitreehen-Bypass-Systems [21], [22], [23], [24]. Quantitative Analysen

**Tab. 1: Orientierungswerte für die ingenieurbioologische Bemessung von Leitreehen-Bypass-Systemen (anlagenkonkrete Bemessung erfordert art- und standortspezifische Analysen)**

Parameter	Orientierungswert	Erläuterungen
<b>Rechen</b>		
lichte Weite	≤15 mm	artspezifische Bemessung nach [6]
horizontaler Anströmwinkel	<45°	artspezifische Bemessung nach [6]
Anströmgeschwindigkeit	≤0,80 m/s	artspezifische Bemessung nach [6]
Normalgeschwindigkeit	≤0,30 m/s	artspezifische Bemessung nach [6]
Tangentialgeschwindigkeit	> Normalgeschwindigkeit	bei Anströmwinkeln < 45° gewährleistet
Höhe Sohlenleitwand	≥0,15 · Oberwassertiefe	für physisch durchläss. Rechen, Mindestwert 0,50 m
Eintauchtiefe Tauchwand	≥0,30 · Oberwassertiefe	für physisch durchläss. Rechen, Mindestwert 1,00 m
<b>Bypass</b>		
lichte Profilhöhe	0,30 ... 0,60 m	artspezifische Bemessung nach [6]
lichte Profilhöhe bzw. Wassertiefe	0,45 ... 0,90 m	artspezifische Bemessung nach [6]
Krümmungsradius	≥5,0 · Gerinnebreite	allgemeiner Bemessungswert
Wassertiefe nach Überfall	≥0,25 · Fallhöhe	allgemeiner Bemessungswert, Mindestwert 0,9 m
spezif. Leistung in Beckenstrukturen	≤500 W/m <sup>3</sup>	allgemeiner Bemessungswert
Geschwindigkeit im Eintrittsprofil	0,30 ... 1,50 m/s	allgemeiner Bemessungswert
relat. Geschwindigkeit im Eintrittsprofil	1,0 ... 2,0 · Anströmgeschwind.	allgemeiner Bemessungswert
Geschwindigkeit im Gerinne	≤4,5 m/s	allgemeiner Bemessungswert
Geschwindigkeit im Überfall	≤8,0 m/s	allgemeiner Bemessungswert
Bypassdurchfluss	0,20 ... 2,00 m <sup>3</sup> /s	abhängig von Rechen- und Bypasseeigenschaften
relativer Bypassdurchfluss	0,02 ... 0,10 · Q <sub>WKA</sub>	abhängig von Rechen- und Bypasseeigenschaften

der biologischen Effizienz erfolgten an der Pilotanlage Rothenburg (Saale, Deutschland) [24]. Die seit dem Jahr 2007 in Betrieb befindliche Wasserkraftanlage ist mit drei baugleichen Kaplan-Turbinen ausgestattet, die einen Abflussanteil von maximal  $68 \text{ m}^3/\text{s}$  nutzen. Der am Standort installierte 50 m lange Leitrechen besitzt eine lichte Stabweite von 20 mm und wird in einem horizontalen Winkel von  $\leq 38^\circ$  schräg angeströmt. Das Rechenfeld steht einer 0,60 m hohen Sohlenleitwand auf. Das 2 m breite und 12 m lange Bypassgerinne wird mit einer Wassermenge von  $1,45 \text{ m}^3/\text{s}$  beaufschlagt. In der Bypassklappe befinden sich eine sohlennahe und eine oberflächennahe Abstiegsöffnung mit einer Breite von jeweils 0,45 m und einer Höhe von jeweils 0,50 m.

Gegenstand der Effizienzuntersuchung waren Aale (*Anguilla anguilla*) während der natürlichen Abwanderung. Um deren quantitative Verteilung auf die relevanten Wanderkorridore zu erfassen, wurde in den Austrittsprofilen der drei Turbinen sowie im Austrittsprofil des Bypasses jeweils eine Fangvorrichtung exponiert. An den Turbinenaustrittsprofilen kamen drei baugleiche Hamen (abgestufte Maschenweite von 40 bis 10 mm; **Bild 5**) und am Bypassaustrittsprofil eine Schwalgreuse (abgestufte Maschenweite von 25 mm bis 10 mm) zum Einsatz.

Da Hamen und Reusen stets größenselektiv arbeiten, repräsentiert die im jeweiligen Fanggerät nachweisbare Individuenzahl grundsätzlich nicht die tatsächlich durch den betreffenden Korridor abgewanderte Individuenzahl. Dieser Sachverhalt ist für Untersuchungen zur biologischen Effizienz von Fischschutz- und Fischabstiegsanlagen von genereller Bedeutung, werden doch bei derartigen Untersuchungen unterschiedlich gestaltete Fanggeräte mit jeweils spezifischer Größenselektivität eingesetzt. Folglich ist eine Quantifizierung der Fischabwanderung durch die jeweiligen Korridore und damit auch eine Charakterisierung der biologischen Effizienz des Fischschutz- und Fischabstiegssystems nur dann mit hoher Genauigkeit möglich, wenn auch die Größenselektivität der jeweiligen Fanggeräte bestimmt und bei der Effizienzberechnung berücksichtigt wird.

Ausgehend hiervon erfolgten am Standort Rothenburg zusätzlich zur regulären Beprobung der o. g. Wanderkorridore (Untersuchungszeitraum: 4 Tage Frühjahr 2011 und 8 Tage Herbst 2011) auch



**Bild 5:** Zur Beprobung der Saugrohraustrittsprofile kamen 3 baugleiche Hamen zum Einsatz (Quelle: G. Ebel)

Markierungs-Wiederfang-Untersuchungen zur Bestimmung der Größenselektivität der eingesetzten Fanggeräte. Aus den Ergebnissen der Markierungs-Wiederfang-Untersuchungen wurden logistische Regressionsmodelle abgeleitet, die sowohl die Fangeffizienz der Turbinenhamen als auch die Fangeffizienz der Bypassreue in Abhängigkeit von der Körperlänge abbilden. In einem weiteren Bearbeitungsschritt wurde das jeweilige Modell zur Fangeffizienz mit dem regulären Fangergebnis aus dem betreffenden Fanggerät verknüpft und hierdurch die tatsächliche Nutzungsfrequenz des beprobten Wanderkorridors prognostiziert. Auf der Grundlage dieser Daten erfolgte sodann die Charakterisierung der biologischen Effizienz des Leitrechen-Bypass-Systems. Um die biologische Wirkung des untersuchten Leitrechen-Bypass-Systems auf abwandernde Aale noch differenzierter beurteilen zu können, wurde ein weiteres logistisches Regressionsmodell entwickelt, das die Abhängigkeit der biologischen Effizienz von der Körperlänge bzw. vom Durchlässigkeitsindex quantitativ beschreibt.

Entsprechend den vorliegenden Befunden wandern 83,3 % der Aale durch den Bypass und 16,7 % durch den Rechen bzw. die Turbinen ab. Für alle beprobten Wanderkorridore ergibt sich eine Gesamtmortalität von 2,5 %. Bei Verzicht auf Maßnahmen zum Fischschutz und Fischabstieg wäre für den untersuchten Standort gemäß Prognoseberechnung nach [3] hin-

gegen eine turbinenbedingte Aalmortalität von mehr als 30 % zu erwarten. Die Ergebnisse dokumentieren somit zugleich, dass durch Leitrechen-Bypass-Systeme mit der untersuchten Ausprägung die turbinenbedingte Aalmortalität deutlich reduziert werden kann (**Bild 6**).

Vorteilhafte Befunde zur biologischen Wirksamkeit des Leitrechen-Bypass-Systems ergaben sich auch bei aktuellen Studien an einer schwedischen Wasserkraftanlage. Der hier installierte Rechen (lichte Stabweite 15 mm) leitet Lachssmolts (*Salmo Salar*) mit hoher Effizienz (89,5 %) ohne Verzögerung dem Bypass zu [25].

Für ingenieurbologisch verbesserte Systeme ist eine weitere Erhöhung der biologischen Wirksamkeit zu erwarten. Diesbezügliche Untersuchungen sind künftig an einschlägigen Pilotanlagen auszuführen. Auf der Grundlage der Freilandbefunde ist die Entwicklung generalisierender Modelle anzustreben, die die biologische Effizienz in Abhängigkeit von biologischen, geometrischen und hydraulischen Einflussgrößen quantitativ abbilden.

## 5 Betriebserfahrungen und Einsatzperspektiven

Das Leitrechen-Bypass-System ist an neuen Wasserkraftanlagen im Regelfall problemlos einsetzbar und kann darüber hinaus an vielen älteren Wasserkraftanlagen nachgerüstet werden. Nach vorliegenden Kenntnissen wurde das System bislang an





**Bild 6:** Durch das Leitrochen-Bypass-System erfolgreich in das Unterwasser abgeleitete Aale (Fang aus einer Kontrollnacht) (Quelle: G. Ebel)

Standorten mit Ausbaudurchflüssen von 7 bis 88 m<sup>3</sup>/s und Fallhöhen von 1,4 bis 4,5 m praktisch ausgeführt. Durch die bisherigen Betriebserfahrungen, die im Falle der Pilotanlage Halle-Planena, Saale, einen 9-jährigen Zeitraum umfassen, sind folgende Eigenschaften belegt:

- (1) geringe Rechenverluste durch horizontale Stabausrichtung;
- (2) partielle Selbstreinigung des Rechens durch tangentialen Strömungsvektor;
- (3) minimale Treibgutentsorgungskosten durch effektive Treibgutweiterleitung ins Unterwasser;
- (4) minimale Aufwendungen zur Bypassunterhaltung durch geringe Verlegungsanfälligkeit des Bypasses (am Eintrittsprofil ist ein Hydraulik-Ladekran, Säulen-Drehkran o. ä. zu betreiben);
- (5) bedarfsabhängige Bypassbeaufschlagung durch bewegliche Kontrollbauwerke (geringe Beaufschlagung bei Normalbetrieb, hohe Beaufschlagung bei notwendiger Spülung oder Hochwasserentlastung);
- (6) vorteilhafte Eigenschaften im Winterbetrieb durch erleichterten Transport von Eisschollen entlang der schräg exponierten Rechenfläche (**Bild 7**).

Da der Rechen aufgrund seiner Länge oftmals nicht mit einem Revisionsverschluss kombiniert werden kann und eine Trockenlegung daher häufig nicht möglich ist, muss dauerhaften Rechenverlegungen durch eine effiziente Reinigung vorgebeugt werden. Zu diesem Zweck wird ein Rechenreiniger mit zahnartigen Elementen eingesetzt, die in die Stabzwischenräu-

me eingreifen und hier vorhandene Verkläusungen beseitigen können. Um ein tiefes Eingreifen der Zähne zu ermöglichen, sollten die Rechenstäbe mit kammartigen Blechen auf der Abströmseite und nicht mit Distanzhülsen auf Zugstangen fixiert werden. Die Rechenreinigung kann auch durch spezielle, von der konventionellen Rechteckform abweichende Stabgeometrien unterstützt werden (z. B. Fischbauchprofil). In diesem Fall wird die Zone mit der höchsten Versatzgefährdung auf der Anströmseite des Rechenfeldes und damit in einem Bereich konzentriert, der für die Reinigungsmaschine gut zu-



**Bild 7:** Durch die schräge Anordnung des Rechenfeldes können Eisschollen in vorteilhafter Weise zum Bypass geleitet werden (Quelle: A. Gluch)

gänglich ist. Ein weiterer Vorteil derartiger Spezialprofile besteht darin, dass die resultierenden Rechenverluste aufgrund des günstigeren Formbeiwertes geringer sind als bei Stabelementen aus herkömmlichem Flachstahl.

Bei der Planung und Ausführung des Bypasses sind nachstehende Aspekte zu berücksichtigen. Am Beginn des Bypassschachtes ist ein Hydraulik-Ladekran oder Säulen-Drehkran mit Sterngreifer (Hublast >3 t) zu installieren, um große Treibgutobjekte, wie Baumstämme, beseitigen zu können. Im Bypassschacht sind Verschlussmöglichkeiten für Revisions- und Reinigungszwecke vorzusehen. Des Weiteren wird empfohlen, bauliche Voraussetzungen für die Durchführung von biologischen Funktionskontrollen bzw. Monitoringuntersuchungen herzustellen. Die Durchflusskapazität des Bypassgerinnes kann bei Nachweisen zur Hochwasserneutralität sowie zum Schwall- und Sunkausgleich angerechnet werden. Zur Vermeidung von Unfällen ist die Zugänglichkeit des Bypassschachtes durch Absperrung zu unterbinden. Um eine Gefährdung von Personen durch die Triebwerke auszuschließen, ist der Bereich zwischen Leitrochen und Triebwerken abzudecken oder vor den Triebwerken ein Grobrechen zu installieren.

Nach derzeitigem Erfahrungsstand ist bei einer lichten Stabweite von 20 mm eine Nutzwassermenge von etwa 90 m<sup>3</sup>/s pro Rechenfeld technisch beherrschbar. Infolgedessen sowie aufgrund der Tatsache,

dass selbst durch eine Stabweite von 20 mm die turbinenbedingte Aalmortalität deutlich reduziert werden kann (Abschnitt 4), erscheint der Einsatz des Leitrechen-Bypass-Systems auch an größeren Wasserkraftanlagen möglich und sinnvoll. Pilotanlagen mit einer Stabweite von 10 mm und einem Durchfluss von 50 m<sup>3</sup>/s pro Rechenfeld sind derzeit in Planung bzw. Bau. Das Leitrechen-Bypass-System kann bei Erfordernis auch mit überströmbar, hochwasserneutralen Kraftwerken kombiniert werden.

Eine entscheidende Voraussetzung für die biologische Funktionsfähigkeit des Leitrechen-Bypass-Systems ist die sachgerechte ingenieurbioologische Planung [6]. Aktuelle Erfahrungen zeigen, dass dieser Bearbeitungskomplex teilweise noch unzureichend berücksichtigt wird. Die Konzeption, Bemessung und Gestaltung von Fischschutz- und Fischabstiegssystemen sollte grundsätzlich von ingenieurbioologisch qualifizierten und erfahrenen Bearbeitern vorgenommen werden. Das gilt auch für die Erarbeitung der Mortalitätsprognosen, die einen wesentlichen Bestandteil bei der behördlichen Prüfung von Wasserkraftvorhaben darstellen.

Ogleich in den vergangenen Jahren ein deutlicher Erkenntniszuwachs auf dem Gebiet des Fischschutzes und Fischabstiegs an Wasserkraftanlagen erzielt werden konnte, sind weitere Forschungsaktivitäten erforderlich, die insbesondere die von Ebel [6] benannten Schwerpunkte betreffen sollten. Darüber hinaus ist eine planmäßige Aufarbeitung, Zusammenfassung und Generalisierung der zahlreichen Einzelergebnisse aus nationalen und internationalen Projekten erforderlich, um eine systematische Fortschreibung des gegenwärtigen Kenntnisstandes zu ermöglichen.

## Autoren

### Dr. Guntram Ebel

Büro für Gewässerökologie und Fischereibiologie Dr. Ebel  
Saalwerderstraße 10, 06118 Halle (Saale)  
info@bgf-halle.de

### Dipl.-Hydr. Arne Gluch

Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt  
Otto-von-Guericke-Straße 5  
39104 Magdeburg  
Arne.Gluch@lhw.mlu.sachsen-anhalt.de

### Dipl.-Ing. Martin Kehl

Wasserkraftanlage Planena GmbH & Co. KG  
Pianoweg 12, 06128 Halle (Saale)  
info@wkw-halle.de

## Literatur

- [1] Monten, E.: Fish and turbines – Fish injuries during passage through power station turbines. Vattenfall, 1985.
- [2] Larinier, M.; Dartiguelongue, J.: La circulation des poissons migrateurs: Le transit a travers des turbines des installations hydroelectriques. In: Bull. Fr. Peche Piscic. 312/313 (1989), S. 1-90.
- [3] Ebel, G.: Turbinenbedingte Schädigung des Aals (*Anguilla anguilla*) – Schädigungsraten an europäischen Wasserkraftanlagenstandorten und Möglichkeiten der Prognose. Mitteilungen aus dem Büro für Gewässerökologie und Fischereibiologie (2008), Bd. 3.
- [4] Ruggles, C. P.; Murray, D. G.: A review of fish response to spillways. In: Can. Techn. Report Fish. Aquat. Sciences 172 (1983), S. 1-29.
- [5] Muir, W. D.; Smith, S. G.; Williams, J. G.; Sandford, B. P.: Survival of juvenile salmonids through bypass systems, turbines and spillways with and without flow deflectors at Snake River dams. In: N. Am. J. Fish. Manag. 21 (2001), S. 135-146.
- [6] Ebel, G.: Fischschutz und Fischabstieg an Wasserkraftanlagen – Handbuch Rechen- und Bypasssysteme. Ingenieurbioologische Grundlagen, Modellierung und Prognose, Bemessung und Gestaltung. Mitteilungen aus dem Büro für Gewässerökologie und Fischereibiologie (2013), Bd. 4.
- [7] ATV-DVWK (Hrsg.): Fischschutz und Fischabstiegsanlagen – Bemessung, Gestaltung, Funktionskontrolle. In: ATV-DVWK-Themen (2004).
- [8] Ebel, G.: Fischereibiologisches Gutachten zum Neubau der Wasserkraftanlage Halle-Planena (Saale) – Teil I: Fischfauna und Fischabstiegsanlage. Gutachten im Rahmen des Planfeststellungsverfahrens, 2001 (unveröffentlicht).
- [9] Kehl, M.: Technische Genehmigungsplanung zum Neubau der Wasserkraftanlage Halle-Planena. Unterlagen zur Planfeststellung, 2001 (unveröffentlicht).
- [10] Gluch, A.: Kombiniertes Fisch- und Treibgutabteiler für Wasserkraftanlagen. In: Wasser und Abfall 9 (2007), S. 38-43.
- [11] O’Keeffe, N.; Turnpenny, A. W. H.: Screening for intake and outfalls: a best practice guide. Report Nr. SC030231, Environment Agency, 2005.
- [12] Pavlov, D. S.: Structures assisting the migrations of non-salmonid fish: USSR. In: FAO Fisheries Technical Paper 308 (1989), S. 1-97.

Die gesamte umfangreiche Literaturliste steht auf der Internet-Seite der WasserWirtschaft unter [www.springerprofessional.de/2840214](http://www.springerprofessional.de/2840214), Ausgabe 07-08/2015, zur Verfügung.

Guntram Ebel, Arne Gluch and Martin Kehl

### Application of the Angled Bar Rack Bypass System of Ebel, Gluch & Kehl at Hydropower Plants – Basic Principles, Experiences and Prospects

Angled bar rack bypass systems are used worldwide in order to limit the mortality rate of downstream migrating fish as they pass hydropower plants. This paper introduces a special angled bar rack bypass system which, compared to other current systems, features novel structural components and design principles. As this new system has promising potential for effective fish protection and demonstrates advantageous characteristics in its practical application it is increasingly used in Germany and elsewhere.

Гунтрам Эбель, Арне Глух и Мартин Кель

### Применение системы обводных каналов и направляющих решеток на гидроэлектростанциях – основы, опыт и перспективы

Системы обводных каналов и направляющих решеток применяются во всем мире для того, чтобы ограничить уровень смертности мигрирующих вниз по течению рыб при прохождении гидроэлектростанций. В данной статье представляется особая система обводных каналов и направляющих решеток, которая – по сравнению с уже существующими концепциями – характеризуется новыми принципами конструкции и конструктивными компонентами. Так как система обладает необходимыми предпосылками для эффективной рыбозащиты, а также рентабельными характеристиками при практическом применении, то она все чаще применяется в Германии и других странах.