

# Biologische Wirksamkeit von Leitrechen-Bypass-Systemen - Aktueller Kenntnisstand

Für den Fischschutz und Fischabstieg an europäischen Wasserkraftanlagen wird zunehmend das Leitrechen-Bypass-System nach Ebel, Gluch & Kehl eingesetzt. Nunmehr sind für verschiedene Standorte detaillierte biologische Funktionsprüfungen des Systems verfügbar. Der vorliegende Beitrag vermittelt einen Überblick über wesentliche Ergebnisse dieser Untersuchungen, wobei auch Studien an ähnlich gestalteten Systemen mit schräg angeströmtem Horizontalrechen Berücksichtigung finden. Auf der Grundlage dieser Daten und der bisherigen Betriebserfahrungen werden praktische Hinweise für den künftigen Einsatz von Leitrechen-Bypass-Systemen abgeleitet.

Guntram Ebel

## 1 Einleitung

Ausgehend von den gravierenden Bestandsrückgängen des Europäischen Aals, den Problemen bei der Wiederansiedlung anadromer Arten und neuen rechtlichen Maßgaben setzte in den beiden vergangenen Jahrzehnten eine verstärkte Forschungstätigkeit zur Entwicklung technischer Lösungen für den Fischschutz und Fischabstieg an Wasserkraftanlagen (WKA) ein. Ein Ergebnis dieser Aktivitäten ist das Leitrechen-Bypass-System nach Ebel, Gluch & Kehl, das im Zeitraum 1999-2001 konzipiert und im Jahr 2006 am Standort Halle-Planena (Saale, Deutschland) erstmals praktisch ausgeführt wurde. Darüber hinaus wurden im Rahmen einer weltweiten Metastudie wissenschaftlich begründete Regeln für die Anordnung, Bemessung und Gestaltung von Fischschutz- und Fischabstiegssystemen erarbeitet [1].

Das zwischenzeitlich weiterentwickelte Leitrechen-Bypass-System gilt heute national und international als Stand der Technik bzw. Best-Practice-Lösung für den Fischschutz und Fischabstieg an WKA mit Ausbaudurchflüssen bis  $100 \text{ m}^3/\text{s}$  und ist an zahlreichen europäischen Standorten im Einsatz. Aufbau und Funktionsprinzip des Systems sind in verschiedenen Veröffentlichungen beschrieben ([1], [2], [3], [4]), so dass auf entspre-

chende Darstellungen nachstehend verzichtet und lediglich eine Prinzipskizze wiedergegeben wird (**Bild 1**).

Während die vorteilhaften betrieblichen Eigenschaften des Systems bereits frühzeitig erkennbar wurden, fehlten quantitative Daten zur biologischen Wirksamkeit bis in die jüngere Vergangenheit weitgehend. Erst in den letzten Jahren hat sich der Fundus der diesbezüglich verfügbaren Untersuchungen sukzessive erhöht. Da deren Ergebnisse für die Fortentwicklung des Fachgebietes von genereller Bedeutung sind, wurden die vorliegenden Studien im Rahmen eines aktuellen Projektes nach einheitlichen Kriterien aufgearbeitet und systematisiert [5]. Hierbei fanden auch Untersuchungen an ähnlich gestalteten Systemen mit schräg angeströmtem Horizontalrechen Berücksichtigung.

Der vorliegende Beitrag vermittelt einen Kurzüberblick über wesentliche Ergebnisse der Projektbearbeitung und gibt auf der Grundlage dieser Daten sowie der bisherigen Betriebserfahrungen praktische Hinweise für den künftigen Einsatz von Leitrechen-Bypass-Systemen.

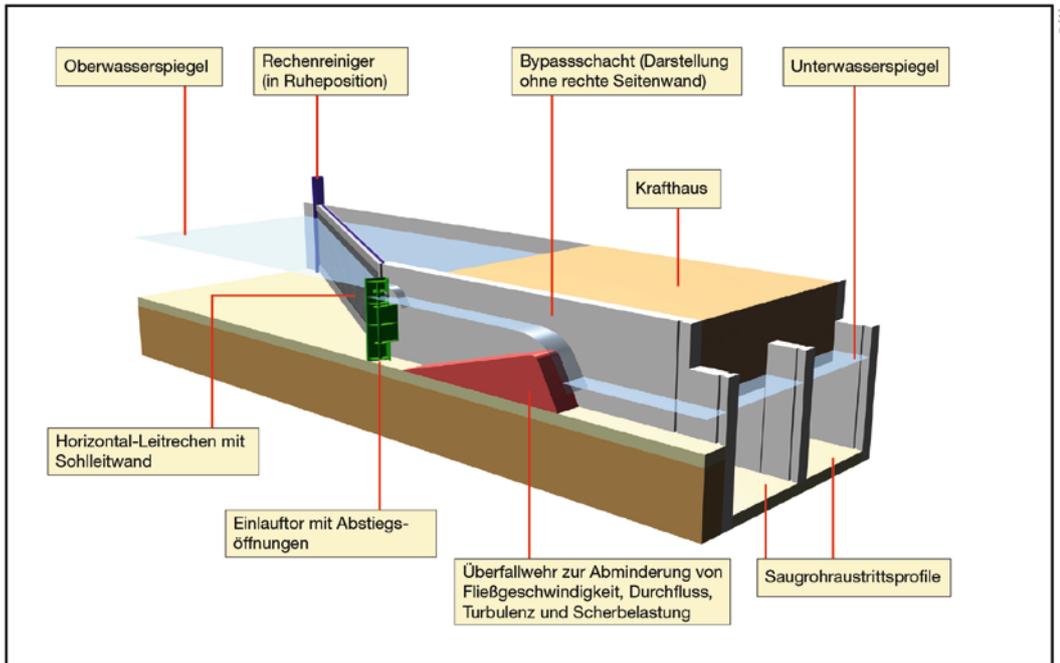
## 2 Kurzcharakterisierung der untersuchten Standorte und Leitrechen-Bypass-Systeme

Die bislang 11 verfügbaren quantitativen Datensätze zur biologischen Wirksamkeit von Leitrechen-Bypass-Systemen wurden an 7 Standorten gewonnen, die sich in Deutschland, Schweden und der Schweiz an überwiegend potamal geprägten Gewässern mit Mittelwasserabflüssen von 7 bis  $101 \text{ m}^3/\text{s}$  befinden. Die Ausbaudurchflüsse der WKA umfassen das Spektrum von 8,5 bis  $68 \text{ m}^3/\text{s}$ , die Nennfallhöhen variieren zwischen 2,3 und 7,5 m (**Tabelle 1** und **Bild 2**).

Die untersuchten Rechen werden durch horizontal ausgerichtete Stabelemente mit lichten Weiten von 12 bis 20 mm gebildet und sind so im Zuströmbereich der betreffenden WKA angeordnet, dass durch den Anströmvektor und das Rechenfeld ein hori-

### Kompakt

- Leitrechen-Bypass-Systeme induzieren vorteilhafte verhaltensbiologische Wirkungen und vermindern die turbinenbedingte Fischmortalität erheblich.
- Für die diadromen Arten Aal und Lachs ist eine Effizienz von 80-100 % erzielbar.
- Bei der Planung von Leitrechen-Bypass-Systemen sind die einschlägigen Regeln für die Anordnung, Bemessung und Gestaltung anzuwenden.



**Bild 1:** Prinzipskizze des Leitreechen-Bypass-Systems nach Ebel, Gluch & Kehl in Seitenansicht (Bereich zwischen Leitreechen und Krafthaus ohne Abdeckung bzw. Grobrechen dargestellt)

zontaler Winkel (Anströmwinkel) von 30 bis 54° eingeschlossen wird. Die Rechenfelder besitzen Längen von 14,5 bis 50,0 m und Höhen von 1,6 bis 2,7 m. Die Anströmgeschwindigkeiten variieren zwischen 0,30 und 0,88 m/s (**Tabelle 2**). Studien an Rechen mit Anströmwinkeln  $\geq 55^\circ$  wurden wegen des geringen Ausmaßes der Schräganströmung im Rahmen der o. g. Projektbearbeitung nicht berücksichtigt.

Die mit den jeweiligen Rechen kombinierten Bypässe unterscheiden sich hinsichtlich ihres prinzipiellen Aufbaus sowie ihrer Anordnung und Betriebsweise teilweise deutlich voneinander.

An vier Standorten (Rothenburg, Falkenberg, Ottenau, Stroppe) sind schachtartige, lichtoffene Bypässe installiert, deren Eintrittsprofil sich jeweils am unterstromigen Ende des Rechen befindet und die gesamte Oberwassersäule erfasst (**Bild 1**). Diese kontinuierlich dotierten Bypässe sind mit speziellen, unterhalb des Eintrittsprofils angeordneten Regelorganen ausgestattet, um

die Ausbildung von zu großen Fließgeschwindigkeiten, Durchflüssen, Turbulenzen und Scherkräften zu vermeiden.

An zwei Standorten (Auer Kotten, Tübingen) wurden Bypässe mit tunnelartigen Eintrittsprofilen ausgeführt. Diese erfassen den oberflächen- und sohlennahen sowie ggf. den mittleren Teil der Oberwassersäule und sind kontinuierlich oder weitgehend kontinuierlich dotiert. An einem Standort (Wehlitz) fungiert ein umgestalteter, permanent beaufschlagter Leerschuss als Bypass, dessen Eintrittsprofil durch eine Schütztafel auf eine sohlennahe Abstiegsoffnung reduziert wird.

An fünf Standorten wurde darüber hinaus die Bedeutung anderer alternativer Passagewege untersucht. Das betrifft episodisch beaufschlagte Leerschüsse (Auer Kotten, Tübingen), Fischaufstiegsanlagen (Wehlitz, Auer Kotten, Ottenau) und Ausleitungswehre (Wehlitz, Falkenberg, Auer Kotten, Ottenau). Für Leerschüsse und Fischaufstiegsanlagen, die in geringer Entfernung zum Rechen angeordnet sind, ist anzu-

**Tabelle 1:** Eigenschaften der untersuchten Wasserkraftanlagen (Quelle: Ebel)

| Standort    | Gewässer      | Staat       | Typ | $Q_{WKA}$ [m³/s] | h [m] | P [kW] | Autor     |
|-------------|---------------|-------------|-----|------------------|-------|--------|-----------|
| Rothenburg  | Saale         | Deutschland | B   | 68               | 2,35  | 1 200  | [1], [6]  |
| Wehlitz     | Weißer Elster | Deutschland | A   | 8,5              | 2,30  | 116    | [7], [8]  |
| Falkenberg  | Ätran         | Schweden    | A   | 40               | –     | –      | [9]-[11]  |
| Auer Kotten | Wupper        | Deutschland | A   | 14               | 3,00  | 340    | [12]-[15] |
| Ottenau     | Murg          | Deutschland | A   | 14,6             | 5,00  | 560    | [16]      |
| Tübingen    | Neckar        | Deutschland | A   | 22               | 7,50  | 1 500  | [17]      |
| Stroppe     | Limmat        | Schweiz     | A   | 33               | 3,20  | 840    | [18]      |

Legende

Typ = B = Buchtenkraftwerk, A = Ausleitungskraftwerk  
 $Q_{WKA}$  = Ausbaudurchfluss der Wasserkraftanlage

h = Nennfallhöhe am Standort  
 P = Nennleistung der Wasserkraftanlage



**Bild 2:** Detaillierte Untersuchungen zur biologischen Wirksamkeit von Leitrechen-Bypass-Systemen wurden beispielsweise an der WKA Falkenberg (Ätran, Schweden) ausgeführt, die einen Ausbaudurchfluss von 40 m³/s besitzt

nehmen, dass die biologische Nutzungsfrequenz durch die Wirkung des Rechen maßgeblich beeinflusst wird. Daher werden die für derartige Gerinne verfügbaren biologischen Daten gleichfalls in die Ergebnisdarstellung einbezogen (Abschnitt 4). Unberücksichtigt bleiben dagegen die Befunde für andere alternative Passagewege, für die in fast allen Fällen von einem sehr geringen Einfluss der Rechenysteme auszugehen ist.

Einen Überblick über die Eigenschaften der in vorliegender Arbeit betrachteten Passagewege vermittelt **Tabelle 3**, wobei die jeweiligen Studien leider nicht in allen Fällen eine diesbezüglich vollständige Dokumentation ermöglichen. Das betrifft auch die verhaltensbiologisch bedeutsamen Geschwindigkeitsverhält-

nisse im Bereich von Bypasseintrittsprofilen, die in der Literatur oftmals nicht angegeben oder nicht einheitlich definiert sind und daher in **Tabelle 3** unberücksichtigt bleiben.

### 3 Methodik

#### 3.1 Kriterien der Funktionsbeurteilung

Die biologische Wirksamkeit von Rechen- und Bypasssystemen kann durch folgende Größen quantitativ beschrieben werden:

- (1) Effizienz der Bypassnutzung,
- (2) Ausmaß der Abwanderungsverzögerung,
- (3) Anteil der am Rechen bzw. im Bypass geschädigten Individuen.

Die Effizienz der Bypassnutzung wird im internationalen Schrifttum auf unterschiedliche Weise definiert. Gemäß der gebräuchlichsten Definition (Gl. (1)) ergibt sich die Effizienz (E) als Quotient aus der Individuenzahl, die den Bypass und ggf. andere alternative Passagewege nutzt ( $N_{BYP}$ ), und der an der WKA insgesamt abwandernden Individuenzahl ( $N_{WKA}$ ). Letztere beinhaltet neben  $N_{BYP}$  auch die den Rechen bzw. die Turbine passierende Individuenzahl ( $N_{TUR}$ ).

$$E = N_{BYP} / N_{WKA} = N_{BYP} / (N_{BYP} + N_{TUR}) \quad (1)$$

Besonders aussagefähig sind die Untersuchungsergebnisse dann, wenn die Effizienz nicht nur zusammenfassend für alle abgewanderten Tiere dargestellt, sondern auch in Abhängigkeit von deren Körperlänge, Körperbreite oder Körperhöhe beschrieben wird. Dies gelingt in vorteilhafter Weise durch logistische Regressionsmodelle, welche die Körpergrößenabhängigkeit der Individuenverteilung auf die jeweiligen Passagewege in Form einer sigmoiden Sättigungsfunktion abbilden. Hierbei werden die Untersuchungsergebnisse als dichotom verzweigte Variablen

**Tabelle 2:** Eigenschaften der untersuchten Leitrechen (Autoren vgl. Tab. 1) (Quelle: Ebel)

| Standort    | s [mm] | G [-] | l [m] | h [m] | h <sub>SLW</sub> [m] | h <sub>TAW</sub> [m] | θ [°] | α [°] | v <sub>ANSTRÖM</sub> [m/s] |
|-------------|--------|-------|-------|-------|----------------------|----------------------|-------|-------|----------------------------|
| Rothenburg  | 20     | R     | 50,00 | 2,50  | 0,60                 | 0,00                 | ≤38   | 90    | 0,58-0,88 (1)              |
| Wehlitz     | 20     | R     | 17,00 | –     | –                    | –                    | 54    | 90    | <0,58 (1)                  |
| Falkenberg  | 15     | S     | 40,00 | 2,00  | –                    | –                    | 30    | 90    | 0,48-0,76 (1)*             |
| Auer Kotten | 12     | –     | 26,25 | –     | –                    | –                    | 30    | 90    | –                          |
| Ottenau     | 18     | R     | 14,46 | 1,60  | 0,25                 | 0,15                 | 44    | 90    | ≤0,47 (1)                  |
| Tübingen    | 15     | –     | 30,00 | 2,20  | ≥1,50                | 0,50                 | 30    | 90    | 0,30-0,40 (1)              |
| Stropfel    | 20     | S     | 25,32 | 2,70  | 0,50                 | –                    | 38    | 90    | 0,78 (2)                   |

**Legende**

- s = lichte Weite der Rechenstäbe
- G = Geometrie der Rechenstäbe: R = Rechteckprofil, S = strömungsgünstiges Profil
- l = Länge des Rechenfeldes, durchströmt
- h = Höhe des Rechenfeldes, durchströmt
- h<sub>SLW</sub> = Höhe der Sohlenleitwand
- h<sub>TAW</sub> = Eintauchtiefe der Rechenbühne
- θ = horizontaler Anströmwinkel des Rechen
- α = vertikaler Anströmwinkel des Rechen
- v<sub>ANSTRÖM</sub> = Anströmgeschwindigkeit des Rechen, querprofilgemittelt: 1 = während der Untersuchung, 2 = bei Ausbaudurchfluss der Wasserkraftanlage; \* Werte gültig für Smolt-Studie (s. Tabelle 4), für Kelt-Studie keine Werte verfügbar

**Tabelle 3:** Eigenschaften der untersuchten Bypässe und sonstigen alternativen Passagewege (Autoren vgl. Tab. 1) (Quelle: Ebel)

| Standort    | Typ, Anordnung und Dimensionierung  | Q <sub>ABS</sub><br>[m <sup>3</sup> /s] | Q <sub>REL</sub><br>[%] |
|-------------|---|---|-------------------------|
| Rothenburg  | schachtartiger, lichtoffener Bypass am unterstromigen Ende des Rechenfeldes gemäß Bild 1, jedoch ohne Überfallwehr unterhalb Einlauftr; Größe der Abstiegsöffnungen im Einlauftr (b x h): 0,45 m x 0,50 m (jeweils oberflächen- und sohlennah)  | 1,45                                    | ≥2,1                    |
| Wehlitz     | schachtartiger, lichtoffener Bypass am unterstromigen Ende des Rechenfeldes mit ausschließlich sohlennaher, durch unterströmte Schütztafel gebildeter Abstiegsöffnung im Eintrittsprofil; Größe der Abstiegsöffnung (b x h): 0,30 m x 0,40 m; hydraulische Kontrolle der Abstiegsöffnung durch nachgeordnete, über- oder unterströmbare Schütztafel | 0,18                                    | 2,6                     |
|             | Fischaufstiegsanlage (Schlitzpass), Anbindung etwa 15 m oberhalb des Bypasses   | 0,30                                    | 4,3                     |
| Falkenberg  | schachtartiger, lichtoffener Bypass am unterstromigen Ende des Rechenfeldes gemäß Bild 1; Größe der Abstiegsöffnungen im Einlauftr (b x h): 0,30 m x 0,65 m (oberflächennah), 0,20 m x 0,20 m (sohlennah)   | 0,60                                    | ≥1,5                    |
| Auer Kotten | Bypass mit tunnelartigem, oberflächennah angeordnetem Eintrittsprofil am unterstromigen Ende des Rechenfeldes; Größe des Eintrittsprofils (b x h): 0,30 m x 0,60 m  | -                                       | -                       |
|             | Bypass mit tunnelartigem, sohlennah angeordnetem Eintrittsprofil am unterstromigen Ende des Rechenfeldes; Größe des Eintrittsprofils (b x h): 0,30 m x 0,30 m   | -                                       | -                       |
|             | Bypass mit tunnelartigem, oberflächennah angeordnetem Eintrittsprofil entlang der Oberkante des Rechenfeldes; Größe des Eintrittsprofils (b x h): 12 m x 0,6 m (Eintrittsprofil mit 35 mm-Horizontalrechen als Verkläusungsschutz ausgestattet)   | -                                       | -                       |
|             | Leerschuss am unterstromigen Ende des Rechenfeldes mit episodisch über- oder unterströmtem Schütz im Eintrittsprofil (Überfallhöhe etwa 0,60 m)   | -                                       | -                       |
|             | Fischaufstiegsanlage (Schlitzpass, Schlitzweite 0,30 m), Anbindung am oberstromigen Ende des Rechenfeldes (Einlaufsohle bis auf WKA-Obergrabensohle verzogen)   | 0,40                                    | ≥2,9                    |
| Ottenau     | schachtartiger, lichtoffener Bypass am unterstromigen Ende des Rechenfeldes mit überströmtem Regelorgan unterhalb des Eintrittsprofils (Überfallhöhe bei Normalbetrieb 0,30 m)  | 0,80                                    | ≥5,5                    |
|             | Fischaufstiegsanlage (Raugerinne-Beckenpass), Anbindung etwa 10 m oberhalb des Bypasses   | 0,50                                    | ≥3,4                    |
| Tübingen    | 2-kammriger, nach dem Schleusenprinzip arbeitender Bypass mit uferseitiger Anordnung neben dem Leerschuss; oberwasserseitige Kammer mit 3 Eintrittsprofilen (oberflächennah, Mitte der Wassersäule, sohlennah); Größe der Eintrittsprofile (b x h): jeweils 0,45 m x 0,45 m   | 0,17                                    | ≥0,8                    |
|             | Leerschuss am unterstromigen Ende des Rechenfeldes mit episodisch überströmtem Schütz im Eintrittsprofil (Überfallhöhe 0,15 m)  | -                                       | -                       |
| Stropfel    | schachtartiger, partiell lichtoffener Bypass am unterstromigen Ende des Rechenfeldes gemäß Bild 1; Größe der Abstiegsöffnungen im Einlauftr (b x h): 0,40 m x 0,40 m (oberflächennah), 0,60 m x 0,40 m (sohlennah)  | 0,69                                    | ≥2,1                    |

*Legende*  
*b* = Profilbreite  
*h* = Profilhöhe  
*Q*<sub>ABS</sub> = Bypassdurchfluss, absolut  
*Q*<sub>REL</sub> = Bypassdurchfluss, relativ (Bezug: WKA-Durchfluss)

aufgefasst, so dass jedem Individuum neben seiner Körpergröße auch die Information „1 = Bypass“ oder „0 = Turbine“ zugeordnet werden kann. Die allgemeine Form eines derartigen Modells lässt sich wie folgt angeben:

$$E = e^{a+b \cdot TL} / (1 + e^{a+b \cdot TL}) \tag{2}$$

E Effizienz  
 TL Körperlänge  
 a bzw. b Modellkonstante

Die Aussagefähigkeit des logistischen Modells kann weiter erhöht werden, indem statt der Körpergröße der Durchlässigkeitsindex (D) als unabhängige Variable verwendet wird, der die lichte Weite des Rechens (s) mit der Körperbreite (b<sub>FISCH</sub>) bzw. der Körperhöhe (h<sub>FISCH</sub>) wie folgt in Beziehung setzt:

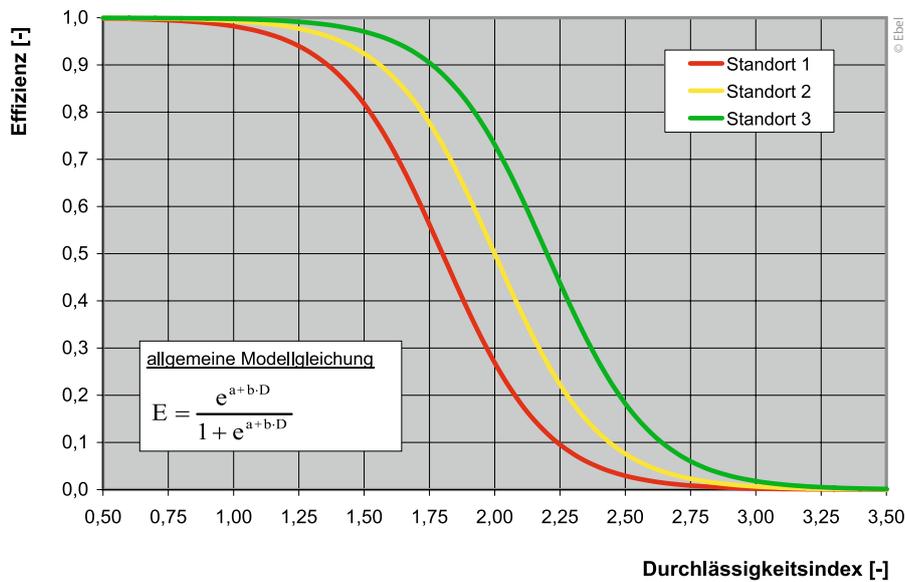
$$D = s/b_{FISCH} \tag{3a}$$

$$D = s/h_{FISCH} \tag{3b}$$

Die hierdurch beschriebene Korrelation zwischen Durchlässigkeitsindex und biologischer Effizienz bietet den Vorteil, dass Untersuchungsergebnisse von unterschiedlichen Standorten direkt miteinander vergleichbar werden (**Bild 3**). Leider enthalten fast alle vorliegenden Arbeiten zur Wirksamkeit von Leitrechen-Bypass-Systemen weder derartige Auswertungen noch gestatten die verfügbaren Primärdaten die nachträgliche Entwicklung logistischer Modelle.

Abwanderungsverzögerungen können sowohl im Ober- als auch im Unterwasser von WKA auftreten. Während erstere durch Vermeidungsreaktionen gegenüber Stauanlagen, Turbinen, Schutzsystemen oder Bypässen sowie durch aufstaubedingte Verminderungen der Fließgeschwindigkeit bedingt werden, sind letztere auf Desorientierungen der abgewanderten Fische infolge von intensiven Turbulenzen zurückzuführen. Abwanderungsverzögerungen erhöhen das Prädationsrisiko und können ggf. die Synchronisation der flussabwärts gerichteten Migration beeinträchtigen.

Verletzungen abwandernder Fische an Rechenanlagen oder in Bypässen werden durch ungeeignete geometrische oder hydraulische Eigenschaften dieser Einrichtungen verursacht.



**Bild 3:** Logistische Modelle zur Beschreibung der Korrelation zwischen Durchlässigkeitsindex (D) und biologischer Effizienz (E), Prinzipdarstellung

Die quantitative Charakterisierung derartiger Effekte bereitet oftmals methodische Schwierigkeiten, da ohne weiterführende Untersuchungen unklar ist, inwieweit Vorschädigungen der abwandernden Fische oder durch das Fanggerät bedingte Verletzungen die nachgewiesene Schädigungsrate beeinflussen.

Da Untersuchungen zur quantitativen Ermittlung sämtlicher eingangs benannter Größen außerordentlich aufwändig sind, konzentrieren sich Studien zur biologischen Wirksamkeit von Fischschutz- und Fischabstiegssystemen im Regelfall auf ausgewählte Teilaspekte. Infolgedessen sowie aufgrund der hohen Standort- und Methodenspezifität der Befunde sollten generalisierende Beurteilungen der für den Fischschutz und Fischabstieg verfügbaren technischen Lösungen grundsätzlich anhand aller verfügbaren Studien und nicht anhand von Einzeluntersuchungen vorgenommen werden. Das gilt in gleicher Weise für die Validierung und Weiterentwicklung der vorliegenden Bemessungs- und Gestaltungsregeln.

### 3.2 Standortliches Vorgehen

Bei den in vorliegender Arbeit zu besprechenden Studien kamen unterschiedliche Untersuchungsmethoden zur Anwendung, die teilweise miteinander kombiniert wurden, um die Aussagefähigkeit der Ergebnisse zu erhöhen. Hamen, Schwalgreusen und andere netzartige Fanggeräte (**Bild 4**) wurden an vier Standorten (Rothenburg, Wehlitz, Tübingen, Stroppel) eingesetzt. Gleichfalls an vier Standorten (Falkenberg, Auer Kotten, Ottenau, Tübingen) erfolgten die Untersuchungen mittels telemetrischer Verfahren (Radiotelemetrie, HDX-Technologie). An zwei Standorten (Wehlitz, Stroppel) lieferten hydroakustische Geräte (Didson-Sonare) Informationen zur biologischen Wirksamkeit. An einem Standort (Stroppel) waren aufgrund der geringen Wassertrübung Beobachtungen mittels Kamerasystemen möglich.

Hinsichtlich der Fragestellung ist allen Studien gemeinsam, dass die Quantifizierung der Nutzungsfrequenz der jeweiligen Passagewege ein wesentliches Ziel der Bearbeitung darstellte. Spezifische Untersuchungen zur verhaltensbiologischen Wirkung von Leitreechen und Bypässen erfolgten an sechs Stand-



**Bild 4:** Netzartige Fanggeräte wurden beispielsweise am Standort Rothenburg für die Ermittlung der biologischen Effizienz eingesetzt: Hamen im Austrittsprofil der Saugrohre (links), Schwalgreuse im Austrittsprofil des Bypasses (rechts)

orten (Wehlitz, Falkenberg, Auer Kotten, Ottenau, Tübingen, Stropfel). Rückschlüsse auf anlagenbedingte Verletzungen ermöglichten Erhebungen an fünf Standorten (Rothenburg, Wehlitz, Falkenberg, Ottenau, Stropfel).

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Effizienz der untersuchten Leitreechen-Bypass-Systeme

Die an den jeweiligen Standorten nachgewiesenen biologischen Effizienzen umfassen das Spektrum von 24,7 bis 100 % (Mittelwert 85,7 %, Medianwert 94,2 %). Für Aale wurden Effizienzen von 83,3 bis 100 %, für Lachssmolts von 86,9 bis 100 %, für Lachskelts von 100 % und für potamodrome Arten von 24,7 bis 90 % verzeichnet (Tabelle 4 und Bild 5).

Die geringe Effizienz, die am Standort Wehlitz für potamodrome Arten nachweisbar war (24,7 %), ist neben dem relativ ungünstigen Verhältnis von lichter Stabweite (20 mm) und Körpergröße der abgewanderten Fische (mittlere Körperlänge ca. 8 cm) vor allem auf die geringe Auffindbarkeit bzw. Akzeptanz des Bypasses (Abschnitt 4.2) zurückzuführen [7], [8]. Des Weiteren ist auf den vergleichsweise großen Anströmwinkel des Rechens zu verweisen (Tabelle 2), der nicht den einschlägigen Bemessungsregeln [1] entspricht.

Für die WKA Falkenberg ist anzumerken, dass der Passageweg nicht für alle abgewanderten Lachssmolts eindeutig identifiziert werden konnte [11], so dass die biologische

Effizienz in Tabelle 4 als Intervall (73,7-100 %) angegeben wird. Da die Körperhöhe aller Versuchsfische jedoch deutlich größer war als die lichte Stabweite des Rechens und Lachssmolts entsprechend vorliegender Laborbefunde Horizontalreechen nur in seltenen Fällen (0,2 % der Individuen) in Seitenlage passieren [16], dürfte die tatsächliche Effizienz des Systems eher im oberen als im unteren Bereich des in Tabelle 4 benannten Intervalls liegen. Für die Bildung des o. g. Mittel- und Medianwertes sowie für die Darstellung in Bild 5 wurde vereinfachend die Mitte des o. g. Intervalls (86,9 %) als zutreffende Ausprägung angenommen. Unabhängig von den methodisch bedingten Unschärfen belegen die Befunde jedoch zweifelsfrei, dass durch die Nachrüstung des Leitreechen-Bypass-Systems die Abwanderungsbedingungen am Standort Falkenberg deutlich verbessert werden konnten. Für das bislang installierte Rechen-Bypass-System war eine Effizienz von lediglich 17 % kennzeichnend [11].

Am Standort Stropfel wurde die den Bypass passierende Individuenzahl mittels Hamen erfasst ( $N_{BYP} = 6\ 239$ ) und die den Rechen passierende Individuenzahl mittels Sonar geschätzt ( $N_{TURB} = 100$  bis 200) [18]. Durch Anwendung von Gl. (1) und konservative Rundung des Ergebnisses resultiert für die Effizienz ein Schätzwert von 90 %, der aus methodischen Gründen ausschließlich für Orientierungszwecke genutzt werden sollte.

Wie die Ergebnisse einer Metastudie für andere Schutz- und Abstiegsysteme zeigen [1], erzielen die in vorliegender Arbeit

**Tabelle 4:** Biologische Effizienz der untersuchten Leitreechen-Bypass-Systeme (Autoren s. Tabelle 1) (Quelle: Ebel)

| Standort (Symbol) | Art / Artengruppe  | $N_{WKA}$ [-] | Körperlänge [cm]                                  |            |            | E [%]             |
|-------------------|--------------------|---------------|---|------------|------------|-------------------|
|                   |                    |               | $TL_{MIN}$  | $TL_{MIT}$ | $TL_{MAX}$ |                   |
| Rothenburg (RO)   | Aal                | 402           | 29  | 71,1       | 104        | 83,3              |
| Wehlitz (WE)      | Potamodrome        | 1 860         | Rechen für nahezu alle Fische physisch passierbar |            |            | 24,7              |
|                   | Aal                | 32            | -   | -          | -          | 94,2              |
| Falkenberg (FA)   | Lachs (Smolt)      | 19            | 13,7  | 14,5       | 16,0       | 73,7-100 (86,9)** |
|                   | Lachs (Kelt)       | 14            | -   | -          | -          | 100               |
| Auer Kotten (AK)  | Aal                | 339*          | 50  | -          | 110        | 100               |
|                   | Lachs (Smolt)      | 1 199*        | 12  | -          | 25         | 100               |
| Ottenau (OT)      | Aal                | 38            | 50  | 71,1       | 103        | 100               |
|                   | Lachs (Smolt)      | 54            | 18  | 20,7       | 28         | 98,1              |
| Tübingen (TÜ)     | überw. Potamodrome | 730           | Rechen für nahezu alle Fische physisch passierbar |            |            | 65,1              |
| Stropfel (ST)     | Potamodrome        | >6 239        | 2 % < 5 cm, 89 % < 10 cm, 100 % < 20 cm           |            |            | 90***             |

**Legende**

$N_{WKA}$  = an der Wasserkraftanlage insgesamt abgewanderte Individuenzahl (Definition vgl. Abschnitt 3.1), \* errechnet nach Daten aus Tab. 28 in [15] zur relativen Nutzungsfrequenz der an der WKA vorhandenen Passagewege

$TL_{MIN}$  = minimale Körperlänge

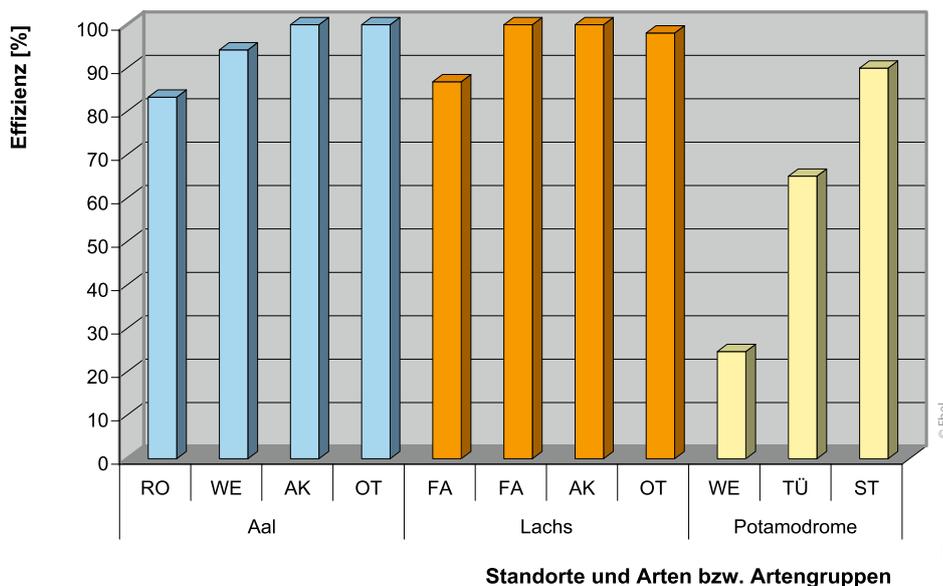
$TL_{MIT}$  = Mittel- oder Medianwert der Körperlänge

$TL_{MAX}$  = maximale Körperlänge

E = Effizienz gemäß Gl. (1), \*\* Erläuterungen s. Text, \*\*\* Schätzwert (Erläuterungen s. Text)

**Hinweis:**

Die angegebenen Körperlängen beziehen sich in verschiedenen Fällen nicht nur auf  $N_{WKA}$ , sondern auch auf Individuen, die über WKA-ferne Passagewege abgewandert oder im Oberwasser verblieben sind.



**Bild 5:** Biologische Effizienz der untersuchten Leitreechen-Bypass-Systeme

behandelten Leitreechen-Bypass-Systeme vergleichsweise hohe biologische Effizienzen. Es ist davon auszugehen, dass durch konsequentere Anwendung der ingenieurbioologischen Vorgaben für die Anordnung, Bemessung und Gestaltung [1] bei einigen Leitreechen-Bypass-Systemen eine noch größere Wirksamkeit erreichbar gewesen wäre.

#### 4.2 Verhalten an Leitreechen und Bypässen

##### Leitreechen

Während die Leitwirkung von schräg angeströmten mechanischen Barrieren bei Laborstudien relativ einfach beobachtet werden kann und entsprechende Befunde zwischenzeitlich auch für Horizontalreechen vorliegen [14], [16], ist der Nachweis derartiger Effekte bei Freilandstudien wesentlich aufwändiger. Für diesbezügliche Beurteilungen sind vor allem die nachgewiesenen Bewegungsrichtungen und Aufenthaltszeiten bzw. Abwanderungsgeschwindigkeiten nutzbar. Nachstehend werden Ergebnisse zu diesen Aspekten in Kurzform dargestellt.

Am Standort Tübingen wurde mittels Radiotelemetrie für potamodrome Arten nachgewiesen, dass sich 81 % der Fische nach ihrem Erstkontakt mit dem Rechen an diesem in abstromiger Richtung bewegen [17]. Für den Standort Wehlitz, an dem der Rechen weniger vorteilhaft exponiert ist (**Tabelle 2**), konnte mittels Sonar ein analoger Effekt bei potamodromen Arten verzeichnet werden, der jedoch offenbar schwächer ausgeprägt war [7], [8].

Eine direkte Beobachtung des Fischverhaltens am Rechen gelang am Standort Stoppel mittels Kamerasystemen, wobei auch hier potamodrome Arten den Gegenstand der Untersuchungen bildeten [18]. Obgleich aufgrund der komplexen Schwarmassoziationen keine exakten Daten zur Aufenthaltsdauer der Tiere im Rechanströmbereich gewonnen werden konnten, deuten die Befunde für Untersuchungsphasen mit hoher Abwanderungsintensität auf nur geringe Verzögerungen hin. So vollzog sich eine Zunahme der Individuenzahl am

Rechen weitgehend synchron mit einer Erhöhung der Fänge in der am Austrittsprofil des Bypasses installierten Fangvorrichtung. Rechenpassagen waren nicht zu beobachten [18].

Die am Standort Falkenberg ausgeführten Untersuchungen an Lachssmolts lassen den Schluss zu, dass die Zeitspanne, die für die Durchwanderung des Oberliegerabschnitts der WKA und für die Bypasspassage benötigt wird, nach der Installation des Leitreechen-Bypass-Systems deutlich kürzer ist (Medianwert 10,5 h) als bei dem ursprünglich vorhandenen Rechen-Bypass-System (Medianwert 35,4 h). Darüber hinaus wurde festgestellt, dass die Abwanderung über den Turbinenobergraben und den Bypass mit höherer Geschwindigkeit (Medianwert 40 m/h) als über das Ausleitungswehr (Medianwert 21 m/h) erfolgt [9], [11]. Smolts, die den Leitreechen erreicht hatten, setzten ihre Abwanderung in den Bypass ohne signifikante Verzögerung fort [9].

Untersuchungen zur Abwanderung von Lachskelts am gleichen Standort indizieren ebenfalls eine beschleunigte Passage nach Installation des Leitreechen-Bypass-Systems. So verringerte sich die Zeitspanne, die für die Durchwanderung des Oberliegerabschnitts der WKA und für die Bypasspassage erforderlich ist, auf einen Medianwert von 30 min und damit auf 15 % jenes Wertes, der für das ursprünglich vorhandene Rechen-Bypass-System kennzeichnend war [10].

An der WKA Ottenau wurde durch radiotelemetrische Untersuchungen nachgewiesen, dass der überwiegende Teil (58 %) der am Leitreechen eintreffenden Aale innerhalb von 20 min durch den Bypass oder die benachbarte Fischaufstiegsanlage abwanderte [16]. Die meisten untersuchten Lachssmolts hielten sich vor der Abwanderung in das Unterwasser über einen Zeitraum von wenigen Minuten bis Stunden am Rechen auf, so dass in der vorgenannten Arbeit auch für Smolts von nur geringen Verzögerungen der Abwanderung ausgegangen wird. Mittel- oder Medianwerte der Aufenthaltszeit sind für den Standort Ottenau nicht dokumentiert.

An der WKA Auer Kotten ist die für die Passage erforderliche Zeit offenbar stark vom jeweiligen Passageweg, dem Modus

seiner Beaufschlagung und dem betreffenden Untersuchungs-jahr abhängig (siehe unten).

Ergänzend wird auf die von Ebel [6] und Wagner et al. [17] erarbeiteten logistischen Regressionsmodelle verwiesen, welche eine ausgeprägte, ausschließlich durch verhaltensbiologische Mechanismen induzierte Schutzwirkung von schräg angeströmten Horizontalrechen quantitativ beschreiben.

### Bypässe

Eine vorteilhafte Funktionsweise ist anhand der vorliegenden Daten für schachtartige, lichtoffene Bypassgerinne belegt, deren Eintrittsprofil sich über die gesamte Oberwassersäule erstreckt.

Am Standort Stropfel beobachteten Zaugg und Mendez [18] keine bypassinduzierten Fluchtreaktionen von potamodromen Individuen und stellten darüber hinaus fest, dass kleinere Fische das Eintrittsprofil häufig in Schwärmen passieren. Für den Standort Falkenberg dokumentieren die geringen Aufenthaltszeiten bzw. hohen Migrationsgeschwindigkeiten eine gute Auffindbarkeit und hohe verhaltensbiologische Akzeptanz des Bypasses durch Lachssmolts und Lachskelts (siehe oben). An beiden Standorten entsprechen die Regelorgane im Bypass dem im **Bild 1** dargestellten Prinzip.

Am Standort Ottenau, an dem die Oberwassertiefe lediglich 2 m beträgt, ermöglicht das Regelorgan im schachtartigen Bypass bei Normalbetrieb ausschließlich eine oberflächennahe Fischpassage (Überfallhöhe 0,30 m). Wie die vorliegenden Befunde zeigen [16], wählen Aale und Lachssmolts für ihre Abwanderung zu einem nennenswerten Teil nicht den Bypass, sondern die Fischaufstiegsanlage, obgleich diese etwa 10 m oberhalb des Bypasses an das Oberwasser anbindet und mit einem geringeren Abflussanteil als dieser dotiert ist (**Tabelle 3**). Die relative Bedeutung der alternativen Passagewege ist wie folgt zu beziffern: Bypass 68 % (Aal 63 %, Smolts 72 %), Fischaufstiegsanlage 32 % (Aal 37 %, Smolts 28 %).

Die WKA Auer Kotten ist mit drei Bypässen ausgestattet, deren tunnelartige, z. T. permanent mit Treibgut verlegte Eintrittsprofile für abwandernde Aale und Lachssmolts offenbar nur bedingt attraktiv sind. So nutzen an dieser WKA etwa 81 % der Aale bzw.

62 % der Smolts andere alternative Passagewege. Das betrifft einerseits einen episodisch dotierten Leerschuss am unterstromigen und andererseits eine Fischaufstiegsanlage am oberstromigen Ende des Leitrechens, deren Sohle bis auf die Sohle des Turbinenobergrabens verzogen ist. Die Medianwerte der Passagedauer variieren in Abhängigkeit vom jeweiligen Passageweg, dem Modus seiner Beaufschlagung und dem jeweiligen Untersuchungsjahr zwischen 1,0 und 23,9 h (Aale) bzw. zwischen 0,7 und 111,0 h (Lachssmolts). Die Passagedauer umfasst im vorliegenden Fall den Zeitraum, der für das Durchschwimmen des etwa 300 m langen Turbinenobergrabens sowie für das Auffinden, die verhaltensbiologische Akzeptanz und das Durchschwimmen des alternativen Passageweges bis zur jeweiligen unterwassernahen Antenne erforderlich ist [12], [13], [14], [15].

Am Standort Wehlitz ist das Eintrittsprofil des Bypasses durch eine unterströmte Schützttafel auf eine kleinflächige, sohlennahe Abstiegsöffnung mit steilem Geschwindigkeitsgradienten reduziert, die keine optimale Lagebeziehung zum Rechen und zur Sohle aufweist. Bei einer 18-stündigen Sonaruntersuchung wurde nachgewiesen, dass von 184 Individuen potamodromer Arten, die in den Nahbereich der Abstiegsöffnung gelangten, lediglich zwei in den Bypass einschwammen [7]. Die ungünstigen Eigenschaften des Bypasses werden auch durch die Tatsache illustriert, dass dessen Nutzungsfrequenz kleiner als die der Fischaufstiegsanlage ist. Letztere bindet etwa 15 m oberhalb des Bypasses an das Oberwasser an, ist jedoch mit einem größeren Abflussanteil als dieser dotiert (**Tabelle 3**).

### 4.3 Verletzungen

Hinweise für Anpressungen von Fischen an Leitrechen wurden bei keiner der diesbezüglich aussagefähigen Studien aufgefunden. Dieser Befund erfüllt zugleich die theoretischen Erwartungen, da die dokumentierten Anströmbedingungen den ingenieurbiologischen Vorgaben für die Vermeidung derartiger Wirkungen bei den untersuchten Fischarten bzw. -größen entsprechen [1].

Verletzungen innerhalb von Bypässen wurden an den Standorten Wehlitz und Stropfel festgestellt. An beiden Stand-



**Bild 6:** Schachtartige Bypässe mit selbstreinigenden Regelorganen ermöglichen bei geringem Unterhaltungsaufwand einen dauerhaft funktionssicheren Betrieb: Bypass im Bau, Blick zum Unterwasser (links), Eintrittsbereich eines Bypasses mit selbstreinigendem Tor im Betrieb, Blick zum Oberwasser (rechts)

orten waren etwa 9 % der Individuen von schwerwiegenden, als letal zu klassifizierenden Schädigungen betroffen [7], [18]. Diese Effekte sind auf ungeeignete Fließgeschwindigkeiten und Krümmungsradien zurückzuführen, welche die zulässigen Grenzwerte [1] über- bzw. unterschreiten. Im Bypass Wehlitz beträgt die Fließgeschwindigkeit an einem unterströmten Kontrollbauwerk etwa 6 m/s [7], im Bypass Stoppel ist in einem Teilabschnitt mit einem Krümmungsradius von 1,5 m und einer Breite von 1,0 m eine Fließgeschwindigkeit von 4 bis 5 m/s ausgebildet [18].

## 5 Schlussfolgerungen und praktische Hinweise

Ogleich die Zahl verfügbarer Studien noch begrenzt ist und verschiedene Detailfragen der weiteren wissenschaftlichen Bearbeitung bedürfen, ermöglichen die vorliegenden Befunde die Ableitung nachstehender genereller Schlussfolgerungen zur biologischen Wirksamkeit von Leitreehen-Bypass-Systemen:

- (1) Rechen mit horizontaler Schräganströmung und horizontaler Stabausrichtung gewährleisten bei geeigneter Bemessung und Gestaltung eine effiziente Schutz- und Leitwirkung. Ein vollständiger Schutz kann jedoch nur durch physisch undurchlässige Rechen zuverlässig erreicht werden.
- (2) Bypässe, deren Eintrittsprofil am unterstromigen Ende des Leitreehens angeordnet ist und die gesamte Oberwassersäule erfasst, werden bei geeigneter Bemessung und Gestaltung sowie kontinuierlicher Dotation gut aufgefunden, verhaltensbiologisch akzeptiert und verletzungsfrei passiert.
- (3) Eine kontinuierliche Dotation von Bypässen vergrößert die standörtliche Überlebensrate, indem sie Abwanderungsverzögerungen und resultierende Prädationseffekte minimiert und die verhaltensbiologische Wirkung physisch permeabler Rechen verbessert.
- (4) Bypässe können im Regelfall nur dann mit vertretbarem Aufwand dauerhaft funktionssicher betrieben werden, wenn sie als schachtartige, lichtoffene Gerinne konzipiert und mit selbstreinigenden Regelorganen ausgestattet sind (**Bild 6**).
- (5) Die in (1) bis (4) benannten Voraussetzungen werden durch das Leitreehen-Bypass-System nach Ebel, Gluch & Kehl erfüllt, sofern dieses entsprechend den standörtlichen Anforderungen [1] korrekt ausgelegt ist. Das System bietet nach derzeitigem Kenntnisstand sehr vorteilhafte Bedingungen für den Fischschutz und Fischabstieg an WKA.

Die vorliegenden Freilandbefunde zeigen darüber hinaus, dass durch Leitreehen-Bypass-Systeme turbinenbedingte Schäden bei den durch Wasserkraftnutzung besonders gefährdeten Arten Aal und Lachs vollständig vermieden oder erheblich reduziert werden können. Damit ergibt sich die Möglichkeit, die Umweltverträglichkeit von WKA künftig deutlich zu verbessern.

Um einen erfolgreichen Einsatz von Leitreehen-Bypass-Systemen in der Praxis sicherzustellen, empfiehlt es sich, die nachstehenden generellen Hinweise zu berücksichtigen:

- (1) Gewährleistung einer hohen biologischen Wirksamkeit durch konsequente Anwendung der einschlägigen Regeln zur Anordnung, Bemessung und Gestaltung der jeweiligen Systemkomponenten [1].

- (2) Gewährleistung geringer Rechenverluste durch Wahl geeigneter Anströmbedingungen, durch horizontale Ausrichtung der Stabelemente und durch Verwendung strömungsgünstiger Stabprofile in Kombination mit zahn- oder bürstenartigem Rechenreiniger [1], [2], [3], [4].
- (3) Gewährleistung der dauerhaften Funktionsfähigkeit der Sohlenleitwand am Rechenfuß durch Ausstattung des Rechenreinigers mit einem Geschieberäumschild [4].
- (4) Gewährleistung der dauerhaften Funktionsfähigkeit des Bypasses durch Ausführung als schachtartiges, lichtoffenes Gerinne mit selbstreinigenden Regelorganen [1], [2], [3], [4].

## Dank

Für wertvolle Hinweise zu den ausgeführten Studien sowie für die Überlassung von Bildmaterial und unveröffentlichten Daten wird folgenden Damen und Herren vielmals gedankt: Marius Heiß (Büro für Naturschutz-, Gewässer- und Fischereifragen, Pähl), Ricardo Mendez (Axpo Power AG, Baden), Claudia Zaugg (Aquarius, Schnottwil), Dr. Falko Wagner (Institut für Gewässerökologie und Fischereibiologie Jena), Wolfgang Schmalz (Fischökologische und Limnologische Untersuchungsstelle Südthüringen, Schleusingen), Prof. Dr. Olle Calles (Universität Karlstad), Mats Hebrand (Fiskevardstenik, Lund).

## Autor

### Dr. Guntram Ebel

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

## Literatur

- [1] Ebel, G.: Fischschutz und Fischabstieg an Wasserkraftanlagen – Handbuch Rechen- und Bypasssysteme. Ingenieurbio-logische Grundlagen, Modellierung und Prognose, Bemessung und Gestaltung. In: Mitteilungen aus dem Büro für Gewässerökologie und Fischereibiologie (2018), Band 4, 3. A.
- [2] Gluch, A.: Leitreehen-Bypass-System Ebel, Gluch & Kehl (Praxisbeispiele WKA 0,05–2 MW). In: Fachtagung „Fischmigration und Fischschutzmaßnahmen“ am 16.-17. Mai 2017, Dessau (<http://forum-fischschutz.de/sites/default/files/Gluch.pdf>; Abruf 27.06.2020).
- [3] Ebel, G.; Gluch, A.; Kehl, M.: Einsatz des Leitreehen-Bypass-Systems nach Ebel, Gluch & Kehl an Wasserkraftanlagen - Grundlagen, Erfahrungen und Perspektiven. In: WasserWirtschaft 105 (2015), Heft 7/8, S. 44-50.
- [4] Ebel, G.; Kehl, M.; Gluch, A.: Fortschritte beim Fischschutz und Fischabstieg: Inbetriebnahme der Pilot-Wasserkraftanlagen Freyburg und Öblitz. In: WasserWirtschaft 108 (2018), Heft 9, S. 54-62.
- [5] Ebel, G.: Biologische Wirksamkeit von Leitreehen-Bypass-Systemen - Aufarbeitung internationaler Literaturbefunde. Manuskript, 2019 (unveröffentlicht).
- [6] Ebel, G.: Untersuchungen zur biologischen Effizienz eines neuartigen Fischschutz- und Fischabstiegssystems - vorläufige Ergebnisse für den Aal (*Anguilla anguilla*). Manuskript, 2011 (unveröffentlicht).

- [7] Wagner, F.; Royan, M.; Mirza, J.; Schubert, A.: Überprüfung der Fischschutz- und Fischabstiegeinrichtungen sowie der Fischschädigung an der WKA Wehlitz/Weiße Elster. Gutachten im Auftrag von A. Knapikowski, 2013. (unveröffentlicht).
- [8] Wagner, F.: Vergleichende Analyse des Fischabstiegs an drei Wasserkraftanlagen einer Kraftwerkskette. In: WasserWirtschaft 106 (2016), Heft 2/3, S. 35-41.
- [9] Heiß, M.: Evaluation of innovative rehabilitation measures targeting downstream migrating Atlantic salmon smolt (*Salmo salar*) at a hydroelectric power plant in southern Sweden. Masterarbeit Ludwig-Maximilians-Universität München, 2015.
- [10] Nyqvist, D.; Nilsson, P. A.; Alenas, I.; Elghagen, J.; Hebrand, M.; Karlsson, S.; Kläppe, S.; Calles, O.: Upstream and downstream passage of migrating adult Atlantic salmon: Remedial measures improve passage performance at a hydropower dam. In: Ecological Engineering 102 (2017), S. 331-343.
- [11] Nyqvist, D.; Elghagen, J.; Heiss, M.; Calles, O.: An angled rack with a bypass and a nature-like fishway pass Atlantic salmon smolts downstream at a hydropower dam. In: Marine and Freshwater Research 69 (2018), S. 1 894-1 904.
- [12] Engler, O.; Adam, B.: HDX-Monitoring Wupper - Untersuchung der Wanderung von Fischen (Untersuchungszeitraum vom 31. Oktober 2013 bis 31. Mai 2014). Studie im Auftrag der Bezirksregierung Düsseldorf und des Wupperverbandes, 2014.
- [13] Engler, O.; Stöhr, V.; Defaweux, C.; Adam, B.: HDX-Monitoring Wupper II - Untersuchung der Wanderung von Fischen (Untersuchungszeitraum September 2014 bis Ende 2015). Studie im Auftrag der Bezirksregierung Düsseldorf, 2016.
- [14] Lehmann, B.; Adam, B.; Engler, O.; Hecht, V.; Schneider, K.: Ethohydraulische Untersuchungen zur Verbesserung des Fischschutzes an Wasserkraftanlagen. In: Naturschutz und Biologische Vielfalt (2016), Heft 151.
- [15] Adam, B.; Engler, O.; Schwevers, U.: HDX-Wupper (Projektendbericht). Studie im Auftrag der Bezirksregierung Düsseldorf, 2018.
- [16] Berger, C.: Rechenverluste und Auslegung von (elektrifizierten) Schräg-rechen anhand ethohydraulischer Studien. Dissertation an der TU Darmstadt, 2018.
- [17] Wagner, F.; Körnig, J.; Warth, P.; Schmalz, W.: Ergebnisse der Methodenkombination bei Untersuchungen eines Fischschutzsystems an einer WKA. In: WasserWirtschaft 109 (2019), Heft 2/3, S. 23-28.
- [18] Zaugg, C.; Mendez, R.: Kleinwasserkraftwerk Stropfel - Wirkungskontrolle Fischabstieg am Horizontalrechen mit Bypass. Bericht der Axpo Kleinwasserkraft AG, 2018.

Guntram Ebel

**Biological effectiveness of angled bar rack bypass systems - current findings**

For protecting fish at their downstream passage of European hydropower plants, operators increasingly use the angled bar rack bypass system of Ebel, Gluch & Kehl. Detailed biological functional data of the system are now available for a variety of sites. The paper provides an overview of the essential findings while also taking into account studies on similar systems where the flow approaches the horizontal bar rack from an acute angle. On the basis of these data and operational experience, the paper derives and renders practical advice on the future application of angled bar rack bypass systems. The general conclusions presented in the paper can be summarized as follows: (1) angled bar rack bypass systems induce beneficial behavioural effects and considerably reduce turbine-related fish mortality. (2) For eel (*Anguilla anguilla*) and salmon (*Salmo salar*), both diadromous species, 80 to 100 % efficiency is achievable. (3) When planning angled bar rack bypass systems, the established rules for position, dimension and design need to be applied.



Leitrechen-Bypass-System



- Boes, R. M.; Albayrak, I. et al.: Fischschutz und Fischabstieg mittels vertikaler Leitrechen-Bypass-Systeme: Rechenverluste und Leit-effizienz. In: WasserWirtschaft, Ausgabe 7-8/2016. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016. [www.springerprofessional.de/link/10603076](http://www.springerprofessional.de/link/10603076)
- Böttcher, H.; Brinkmeier, B. et al.: Verhaltensuntersuchungen zum Fischschutz und Fischabstieg am Seilrechen. In: WasserWirtschaft, Ausgabe 2-3/2019. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2019. [www.springerprofessional.de/link/16528854](http://www.springerprofessional.de/link/16528854)

**WASSERWIRTSCHAFT**

Das Fachmagazin für Wasser und Umwelt.



JETZT  
AUSGABEN  
kostenlos  
TESTEN!

DIGITAL  
INTERAKTIV  
MOBIL

**Fundierte Berichte aus Forschung und Wissenschaft** – WasserWirtschaft bietet hohe technologische Kompetenz durch praxisnahe Fachbeiträge. Nutzen Sie den Vorteil der zehn Printausgaben im Jahr zum Vorzugspreis und exklusiv dem **interaktiven e-magazin** mit der beeindruckenden **Wissensdatenbank des Onlinearchivs** mit pdf-Download.

[www.meinfachwissen.de/wawi](http://www.meinfachwissen.de/wawi)

