

Guntram Ebel

# Modellierung der Schwimmfähigkeit europäischer Fischarten – Zielgrößen für die hydraulische Bemessung von Fischschutzsystemen

Die hydraulische Bemessung von Fischschutzsystemen setzt detaillierte Kenntnisse zur Schwimgeschwindigkeit der flussabwärts wandernden Fische voraus. Die Schwimgeschwindigkeit wird maßgeblich durch die Körperlänge, die Schwimdauer sowie die Wassertemperatur bestimmt und kann durch multivariate Modelle quantitativ beschrieben werden. Der vorliegende Beitrag vermittelt einen Kurzüberblick über die diesbezüglich verfügbaren Modelle und gibt auf der Grundlage der Modellergebnisse und verhaltensbiologischer Informationen praktische Empfehlungen für die Auslegung von Fischschutzsystemen.

## 1 Einleitung

Die Mortalität flussabwärts wandernder Fische durch Turbinen und andere technische Einrichtungen gehört zu den schwerwiegendsten biologischen Folgen der Wasserkraftnutzung. Zur Begrenzung derartiger Effekte finden verschiedene Strategien Anwendung, wobei der Einsatz von Fischschutz- und Fischabstiegssystemen die größte praktische Bedeutung be-

sitzt (**Bild 1**). Für die ingenieurbio- logische Auslegung dieser Systeme sind präzise Kenntnisse zu den physischen Voraussetzungen und Verhaltensweisen abwan- dernder Fische erforderlich. Das betrifft u. a. die Schwimmfähigkeit, deren quan- titative Charakterisierung eine obligate Grundlage für die Bemessung der An- strömbedingungen von Fischschutzsys- temen darstellt. Aufgrund des diesbezüglich bislang lückenhaften Wissensstandes

wurden im Rahmen eines Forschungspro- jekts die Möglichkeiten der modellbasier- ten Beschreibung der Schwimmfähigkeit europäischer Fischarten ausführlich un- tersucht [1]. In vorliegender Arbeit werden ausgewählte Projektergebnisse in Kurz- form vorgestellt und zur Ableitung von praktischen Empfehlungen für die hyd- raulische Bemessung von Fischschutzsys- temen genutzt.



**Bild 1:** Die ingenieurbio- logische Auslegung von Fischschutz- und Fischabstiegssys- temen erfordert detaillierte Informationen zu den physischen Voraussetzungen und Verhaltensmustern abwan- dernder Fische; das Foto zeigt eine ingenieurbio- logisch konzipierte Wasserkraftanlage (Rothenburg/Saale, Ausbaudurchfluss 68 m<sup>3</sup>/s) mit Leitrechen-Bypass-System nach Ebel, Gluch & Kehl (2001) [1]

## 2 Grundlagen

### 2.1 Vortrieb beim Schwimmen

Der Vortrieb des schwimmenden Fisches wird durch Druck- und Geschwindig- keitsgradienten erzeugt, die aus den late- ralen Auslenkungen des Fischkörpers re- sultieren. Maßgeblich für die Geschwin- digkeit des Schwimmens sind einerseits die Frequenz und Amplitude der lateralen Körperauslenkungen sowie andererseits die Geometrie der Körperteile, mit denen der Schwimmpuls auf den Wasserkör- per übertragen wird [2], [3].

Wie Untersuchungen von Wardle [4] und Webb et al. [5] zeigen, entspricht die bei einer Oszillation zurückgelegte Weg- strecke dem 0,5- bis 0,8-fachen der Körper- länge. Daher kann die Schwimgeschwin- digkeit als Funktion von Körperlänge und Schwanzschlagfrequenz beschrieben wer- den [3], [6], [7]. Die Schlagfrequenz wird wiederum durch die Zeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Muskelkontrakti- onen bestimmt. Diese als Muskelre-

**Tab. 1: Überblick über die verschiedenen Schwimmlevel**

| Schwimmlevel                       | Schwimmdauer   | Stoffwechselltyp  | beteiligte Muskulatur     |
|------------------------------------|----------------|-------------------|---------------------------|
| Sprintgeschwindigkeit              | ≤20 s          | anaerob           | weiße Muskulatur          |
| gesteigerte Schwimmgeschwindigkeit | 20 s – 200 min | aerob und anaerob | rote und weiße Muskulatur |
| Dauerschwimmgeschwindigkeit        | ≥200 min       | aerob             | rote Muskulatur           |

fraktärzeit bezeichnete Phase stellt einen limitierenden Faktor für die erreichbare Höchstgeschwindigkeit dar. Da die Muskelrefraktärzeit bei kleinen Fischen geringer als bei großen ist, sinkt die erreichbare Schlagfrequenz mit steigender Körperlänge. Die Auswirkungen der Frequenzabnahme auf die Schwimmgeschwindigkeit werden jedoch durch den stärkeren Vortrieb größerer Fische überlagert: So sinkt zwar die relative, auf die Körperlänge bezogene Schwimmgeschwindigkeit [Körperlänge/s] mit steigender Körperlänge, die absolute Schwimmgeschwindigkeit [m/s] nimmt hingegen mit steigender Körperlänge zu. Darüber hinaus wird die Muskelrefraktärzeit auch durch die Wassertemperatur beeinflusst, die im physiologisch geeigneten Intervall mit der Muskelrefraktärzeit negativ und mit der Schwimmgeschwindigkeit positiv korreliert [4].

Neben der Körperlänge und der Wassertemperatur ist die erreichbare Schwimmgeschwindigkeit maßgeblich von der Schwimmdauer abhängig (Abschnitt 2.2). Ferner korreliert die Schwimmgeschwindigkeit mit dem Oberflächenwiderstand des Fisches, der proportional zum Quadrat der Schwimmgeschwindigkeit wächst [2], [3].

**2.2 Schwimmlevel**

Die mit zunehmender Schwimmdauer zu beobachtende Geschwindigkeitsabnahme folgt einer logarithmischen Beziehung, wobei sich bezüglich des physiologischen Hintergrundes drei charakteristische Reaktionsnormen bzw. Schwimmlevel unterscheiden lassen: Sprintgeschwindigkeit, gesteigerte Schwimmgeschwindigkeit, Dauerschwimmgeschwindigkeit (z. B. [8], [9], [10], [11], [12]). In **Tabelle 1** ist der generelle Zusammenhang zwischen Schwimmgeschwindigkeit, Schwimmdauer und Stoffwechselmodus im Überblick dargestellt.

**Sprintgeschwindigkeit**

Die Sprintgeschwindigkeit kennzeichnet die höchste erreichbare Geschwindigkeit. Sie wird in Extremsituationen, wie etwa bei

der Flucht oder beim Beutefang, eingesetzt. Die zum Sprintschwimmen genutzte weiße Muskulatur arbeitet nach dem Prinzip der anaeroben Glycolyse und ist somit unabhängig von der Sauerstoffnachlieferung durch das Kapillarsystem. Da durch den anaeroben Glycogenabbau Milchsäure freigesetzt wird und der Glycogenvorrat schnell erschöpft ist, kann das Sprintschwimmen nur über eine Zeitspanne von maximal 20 s aufrechterhalten werden [10].

**Gesteigerte Schwimmgeschwindigkeit**

Die gesteigerte Schwimmgeschwindigkeit vermittelt zwischen dem nur wenige Sekunden währenden Sprintschwimmen mit sehr hoher Geschwindigkeit und dem Ausdauerschwimmen mit geringer Geschwindigkeit. Da bei dieser Aktivitätsform neben der roten Muskulatur auch die weiße Muskulatur aktiv ist, führt das Schwimmen mit gesteigerter Geschwindigkeit gleichfalls zur Ermüdung des Fisches. Schwimmaktivitäten, die nach 20 s bis 200 min eine Ermüdung des Fisches zur Folge haben, sind dem gesteigerten Schwimmlevel zuzuordnen [10].

Für die Bemessung von Fischleitsystemen wurde bislang häufig die sog. kritische Schwimmgeschwindigkeit verwendet. Diese entspricht der Fließgeschwindigkeit, gegen die ein Fisch über eine bestimmte Zeitspanne anschwimmen kann, ohne abgetrieben zu werden. Da die Zeitspanne bis zur Abdrift im Schrifttum jedoch sehr verschiedenartig definiert wird (30 s bis 60 min, z. B. [10], [12], [13], [14], [15], [16]), sind Befunde zur kritischen Schwimmgeschwindigkeit nur selten miteinander vergleichbar. Aus physiologischer Sicht ist die kritische Schwimmgeschwindigkeit als oberer Level der gesteigerten Schwimmgeschwindigkeit aufzufassen.

**Dauerschwimmgeschwindigkeit**

Die Dauerschwimmgeschwindigkeit, die auch als Kreuzer- oder Optimalgeschwindigkeit bezeichnet wird, kann über viele Stunden oder Tage ermüdungsfrei aufrechterhalten werden. Nach der Begriffsbestimmung von Webb [9] und Beamish [10] werden Schwimmaktivitäten, die sich über mindestens 200 min erstrecken, mit



**Bild 2:** Aufgrund des undulierenden Schwimmstils erreichen Aale (*Anguilla anguilla*) in Relation zu ihrer Körperlänge nur vergleichsweise geringe Schwimmgeschwindigkeiten

der Dauerschwimmgeschwindigkeit ausgeführt. Diese entspricht somit der „normalen“ Schwimmggeschwindigkeit und charakterisiert beispielsweise den bei Langdistanzwanderungen ausgebildeten Schwimmmodus. Beim Dauerschwimmen wird fast ausschließlich die aerob arbeitende rote Muskulatur eingesetzt, so dass die für die Energiegewinnung genutzten Substanzen (Glycogen und Lipide) vollständig oxidiert werden und keine Bildung von Milchsäure erfolgt.

**2.3 Schwimmstile**

Wie Analysen der Schwimmfähigkeit süßwasserresidenter und diadromer Arten mit europäischer Verbreitung zeigen, sind die Schwimmggeschwindigkeiten bei gegebener Körperlänge, Schwimmdauer und Wassertemperatur in vielen Fällen sehr ähnlich [1]. Als Ursache hierfür sind interspezifische Übereinstimmungen im Schwimmstil anzunehmen, der bei den meisten Arten dem subcarangiformen Typ entspricht. Bei dieser Lokomotionsform konzentrieren sich die lateralen Körper-

auslenkungen auf den hinteren Rumpfbereich, wobei der Quotient Körperlänge/Wellenlänge nur geringfügig größer ist als 0,5 und eine schwanzwärts schnell zunehmende Amplitude auftritt [9].

Arten jedoch, die mit undulierenden Bewegungen schwimmen (anguilliformer Schwimmstil) erreichen in Relation zur Körperlänge nur vergleichsweise geringe Schwimmggeschwindigkeiten [16], [17], [18], [19], [20], [21], [22] (**Bild 2**). Das betrifft in der europäischen Süßwasserfauna vor allem den Aal (*Anguilla anguilla*) sowie die Neunaugen (*Petromyzontidae*). Beim anguilliformen Schwimmstil ist der Quotient Körperlänge/Wellenlänge gewöhnlich größer als 1,0 und die Amplitude der lateralen Auslenkung ändert sich entlang der Körperlängsachse nur geringfügig [9].

Auch Störe (*Acipenseridae*) erreichen nur vergleichsweise geringe relative Schwimmggeschwindigkeiten [12], [23], [24], [25]. Kinematische Studien zeigen, dass ihr Schwimmstil zwischen dem subcarangiformen und dem anguilliformen

Typ vermittelt [3]. Darüber hinaus besitzen Störe eine vergleichsweise kleinflächige, heterozerte Schwanzflosse, so dass bei dieser Gruppe zudem die geometrischen Voraussetzungen für die Übertragung des Schwimmpulses auf den Wasserkörper weniger vorteilhaft sind.

**3 Modelle**

Obgleich Daten zur Schwimmggeschwindigkeit und Schwimmdauer entsprechend der im Abschnitt 2.2 dargestellten Klassifizierung bereits erste Anhaltspunkte zur Schwimmfähigkeit liefern, setzt eine quantitative Charakterisierung des physischen Leistungsvermögens abwandernder Fische eine genauere, modellbasierte Betrachtung voraus. Bei den hierbei einsetzbaren Modellen handelt es sich vorwiegend um induktive, empirische Beziehungen, die anhand von experimentell gewonnenen Datensätzen entwickelt wurden, wobei univariate und multivariate Modelle zu unterscheiden sind.

**Tab. 2: Multivariate Modelle zur Charakterisierung der Schwimmggeschwindigkeit (u = Schwimmggeschwindigkeit, TL = Totallänge, t = Schwimmdauer, T = Wassertemperatur)**

| Art/Artengruppe  | Modellgleichung   |
|--|---|
| Allgemeine und gildenspezifische Modelle (nicht für Aale, Neunaugen, Störe, Kelts) |   |
| rheophile + nichtrheophile Gilde   | (1) $\log(u) = 0,5130 + 0,7941 \cdot \log(TL) - 0,0906 \cdot \log(t) + 0,2921 \cdot \log(T)$                      |
| rheophile Gilde  | (2) $\log(u) = 0,5460 + 0,7937 \cdot \log(TL) - 0,0902 \cdot \log(t) + 0,2813 \cdot \log(T)$                      |
| nichtrheophile Gilde   | (3) $\log(u) = 0,3674 + 0,7692 \cdot \log(TL) - 0,0982 \cdot \log(t) + 0,3649 \cdot \log(T)$                      |
| Art- bzw. familienspezifische Modelle  |   |
| Aale ( <i>Anguillidae</i> )  | (4) $\log(u) = 0,4250 + 0,5670 \cdot \log(TL) - 0,1330 \cdot \log(t)$ für T > 10 °C                               |
| Aale ( <i>Anguillidae</i> )  | (5) $\log(u) = 0,2762 + 0,5670 \cdot \log(TL) - 0,1330 \cdot \log(t)$ für T = 5 °C                                |
| Neunaugen ( <i>Petromyzontidae</i> )   | (6) $u = 76,7053 + 13,0921 \cdot \log(0,0013 \cdot TL^{3,052}) - 26,3158 \cdot \log(t) + 0,7737 \cdot T$          |
| Störe ( <i>Acipenseridae</i> )   | (7) $u = (3,1782 + 0,0226 \cdot TL + 0,0547 \cdot T - \log(t)) / (0,0455 + 0,000536 \cdot T - 0,000185 \cdot TL)$ |

**Tab. 2: Multivariate Modelle zur Charakterisierung der Schwimmggeschwindigkeit, Fortsetzung (R<sup>2</sup> = Bestimmtheitsmaß, p = Signifikanzniveau)**

| Art/Artengruppe  | Gl. | R <sup>2</sup> | p        | Einheiten                        | Autor             |
|--|-----|----------------|----------|----------------------------------|-------------------|
| Allgemeine und gildenspezifische Modelle (nicht für Aale, Neunaugen, Störe, Kelts) |     |                |          |                                  |                   |
| rheophile + nichtrheophile Gilde   | (1) | 0,88           | <0,00001 | u [m/s], TL [m], t [s], T [°C]   | Ebel [1]          |
| rheophile Gilde  | (2) | 0,89           | <0,00001 | u [m/s], TL [m], t [s], T [°C]   | Ebel [1]          |
| nichtrheophile Gilde   | (3) | 0,86           | <0,00001 | u [m/s], TL [m], t [s], T [°C]   | Ebel [1]          |
| Art- bzw. familienspezifische Modelle  |     |                |          |                                  |                   |
| Aale ( <i>Anguillidae</i> )  | (4) | 0,62           | <0,00001 | u [m/s], TL [m], t [s], T [°C]   | Ebel [1]          |
| Aale ( <i>Anguillidae</i> )  | (5) | –              | –        | u [m/s], TL [m], t [s], T [°C]   | Ebel [1]          |
| Neunaugen ( <i>Petromyzontidae</i> )   | (6) | 0,70           | –        | u [cm/s], TL [cm], t [s], T [°C] | Beamish [18]      |
| Störe ( <i>Acipenseridae</i> )   | (7) | 0,85           | <0,05    | u [cm/s], TL [cm], t [s], T [°C] | Peake et al. [23] |



### 3.1 Univariate Modelle

Durch univariate Modelle wird die Beziehung zwischen der Schwimmgeschwindigkeit (abhängige Variable bzw. Zielvariable) und einer Einflussgröße (unabhängige Variable bzw. Prädiktorvariable) quantitativ beschrieben. Als Prädiktorvariable in univariaten Modellen findet meist die Körperlänge Verwendung, wogegen die gleichfalls bedeutsamen Einflussgrößen Schwimmdauer und Wassertemperatur unberücksichtigt bleiben. Daher sind derartige Modelle für die Bearbeitung ingenieurbioologischer Fragestellungen von untergeordneter Bedeutung und werden nachstehend nicht behandelt. Weiterführende Informationen

zur Charakterisierung der Schwimmgeschwindigkeit durch univariate Modelle enthalten beispielsweise die Arbeiten von Ebel [1], Videler [3], Wolter & Arlinghaus [14], Booth et al. [26], Booth et al. [27], Booth [28], McDonald et al. [29], Wake-ling et al. [30], Castro-Santos & Haro [31].

### 3.2 Multivariate Modelle

Multivariate Modelle charakterisieren die Beziehung zwischen der Schwimmgeschwindigkeit und mehreren Einflussgrößen. Dabei werden als Prädiktorvariablen ggf. alle wesentlichen Parameter genutzt: Körperlänge, Schwimmdauer und Wassertemperatur. Die vorliegenden multivariaten Modelle lassen sich einerseits in all-

gemeine und gildenspezifische Modelle sowie andererseits in art- und familien-spezifische Modelle untergliedern. Entsprechend dieser Systematik werden nachstehend die verfügbaren multivariaten Modelle in Kurzform vorgestellt. Weiterführende Informationen zum Themengebiet enthält die Arbeit von Ebel [1].

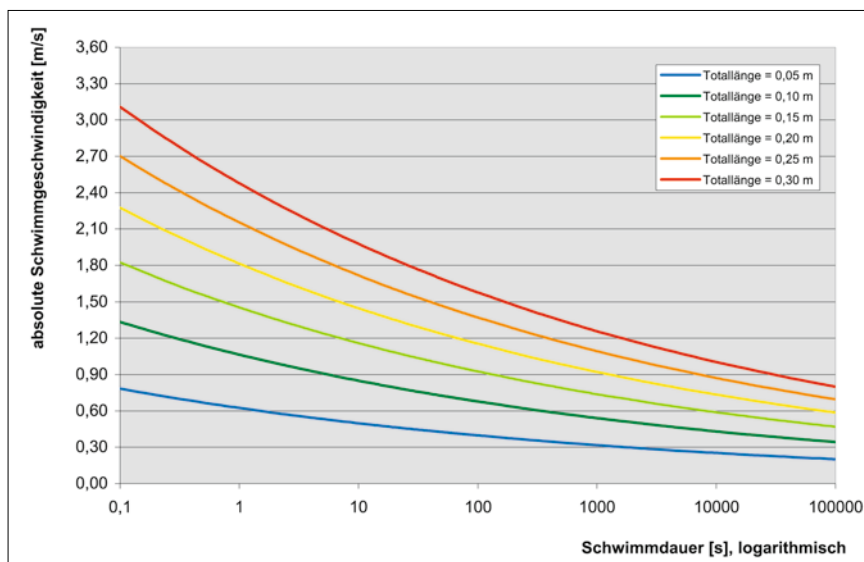
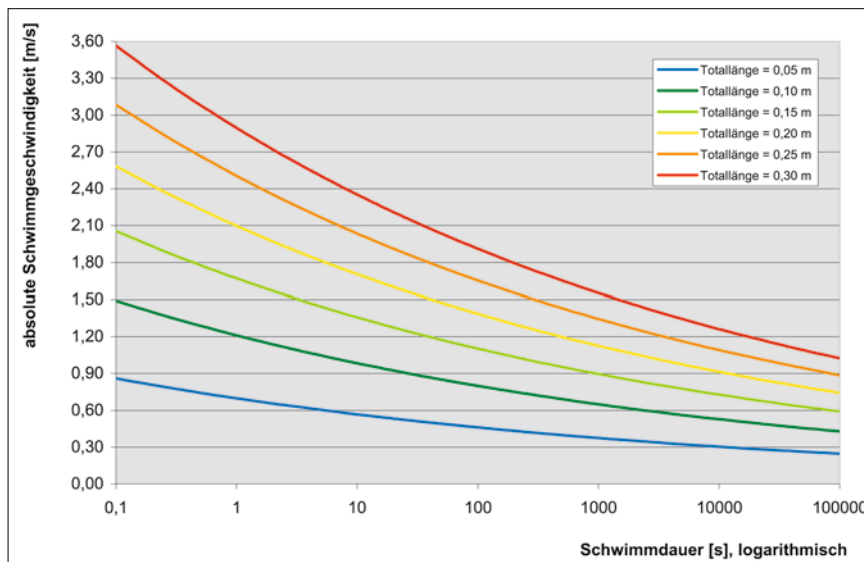
### Allgemeine und gildenspezifische Modelle

Zur Verbesserung des lückenhaften Kenntnisstandes wurden im Rahmen des eingangs benannten Forschungsprojektes [1] die verfügbaren empirischen Datensätze zur Schwimmfähigkeit europäischer Fischarten (n = 409) auf ihre Eignung zur Entwicklung multivariater Modelle geprüft. Hierbei erfolgte zunächst ein Ausschluss von Datensätzen für Arten mit anguilliformem Schwimmstil (n = 43), da sich deren Schwimmgeschwindigkeit deutlich von der anderer Arten unterscheidet (vgl. Abschnitt 2.3). In einem weiteren Bearbeitungsschritt wurden alle Datensätze (n = 121) eliminiert, die keine hinreichenden Angaben zur Körperlänge, Schwimmdauer oder Wassertemperatur enthalten. In der Folge der Datenaufbereitung stehen insgesamt 245 Datensätze für die Modellentwicklung zur Verfügung, bei denen sowohl die Zielvariable (Schwimmgeschwindigkeit) als auch die Prädiktorvariablen (Körperlänge, Schwimmdauer, Wassertemperatur) eindeutig definiert sind (Tabelle der Datensätze und Quellenangaben in [1]). Die Datensätze betreffen 22 Arten aus 9 Familien, wobei die Variablen folgende Intervalle umfassen: Schwimmgeschwindigkeit 0,04 bis 8,17 m/s, Körperlänge 0,6 bis 81 cm, Schwimmdauer 0,1 bis 12 000 s, Wassertemperatur 4,0 bis 22,0 °C.

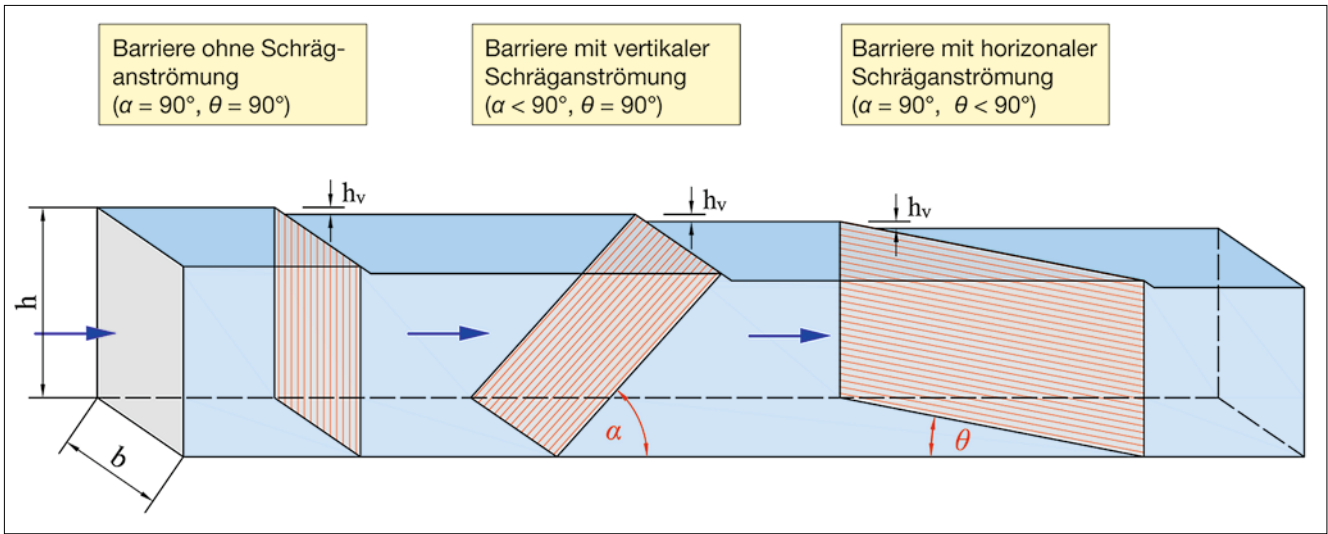
Die Modellentwicklung erfolgte durch lineare multiple Regression, wobei zunächst die univariaten Beziehungen zwischen den jeweiligen Variablen geprüft und logarithmisch transformiert wurden. Im Rahmen der Regressionsanalysen wurden für folgende Artengruppen multivariate Modelle bereitgestellt (n = Anzahl verfügbarer Datensätze):

- (1) Allgemeines Modell (gepoolte Analyse für alle Arten, n = 245)
- (2) Modell für strömungsliebende (rheophile) Arten (n = 164)
- (3) Modell für sonstige (nichtrheophile) Arten (n = 81)

Die vollständig kreuzvalidierten Modelle erreichen mit Bestimmtheitsmaßen von  $R^2 \geq 0,86$  ein hohes Erklärungsvermögen



**Bild 3:** Beziehung zwischen absoluter Schwimmgeschwindigkeit und Schwimmdauer: a) für rheophile Arten bei T = 15 °C errechnet nach Gl. (2); b) für nichtrheophile Arten bei T = 15 °C errechnet nach Gl. (3)



**Bild 4:** Klassifizierung mechanischer Barrieren nach der Exposition zur Strömung (aus [1], nach [39] verändert)

und sind mit  $p < 0,000\ 01$  jeweils höchst signifikant. Das Histogramm der standardisierten Residuen zeigt für alle Modelle eine sehr gute Anpassung an die Normalverteilung. Einen Überblick über die jeweiligen Modellgleichungen vermittelt **Tabelle 2**. Die **Bilder 3a und 3b** veranschaulichen exemplarisch die Ergebnisse der Anwendung von Gl. (2) und (3).

**Art- und familienspezifische Modelle**

Aufgrund des abweichenden Schwimmstils von Aalen, Neunaugen und Stören (Abschnitt 2.3) lässt sich deren Schwimmfähigkeit nicht durch die oben dargestellten allgemeinen und gildenspezifischen Beziehungen, sondern ausschließlich durch art- bzw. familienspezifische Modelle beschreiben.

Die für den Aal (*Anguilla anguilla*) verfügbaren Modelle (Gl. (4), Gl. (5)) wurden von Ebel [1] anhand experimenteller Daten ( $n = 32$ ) unterschiedlicher Autoren entwickelt, wobei die Variablen folgende Intervalle umfassen: Schwimmgeschwindigkeit 0,14 bis 1,51 m/s, Körperlänge 7,2 bis 82 cm, Schwimmdauer 2 bis 8 208 000 s, Wassertemperatur 10,0 bis 25,0 °C. Die Modellentwicklung erfolgte wiederum durch lineare multiple Regression entsprechend der o. g. Methodik. Wie die durchgeführten Analysen belegen, leisten Körperlänge und Schwimmdauer, nicht jedoch die Wassertemperatur einen signifikanten Beitrag zur Varianzaufklärung. Wahrscheinliche Ursache hierfür ist die nur geringe Anzahl von Datensätzen sowie die geringe Streuung der experimentellen Temperaturdaten. Ausgehend hiervon wurde die Wassertemperatur nicht mit in

die Modellbildung einbezogen und stattdessen ein Modell für Wassertemperaturen  $\geq 10\text{ °C}$  ( $R^2 = 0,62$ ,  $p < 0,000\ 01$ ) und ein weiteres, deduktives Modell für eine Wassertemperatur von 5 °C entwickelt (Details in [1]).

Das für Neunaugen durch Gl. (6) gegebene Modell basiert auf empirischen Studien von Beamish [18] am Meerneunauge (*Petromyzon marinus*) und beinhaltet in seiner ursprünglichen Fassung nicht die Körperlänge, sondern das Körpergewicht als Prädiktorvariable. Die Einführung der Körperlänge in die Modellgleichung erfolgte durch Ebel [1] unter Nutzung der von Beamish [32] für die Art publizierten Längen-Gewichts-Regression. Das Gewicht der von Beamish [18] untersuchten Meerneunaugen betrug 2,4 bis 106,9 g. Während sich die kleinsten Tiere in der Endphase der Metamorphose befanden, handelte es sich bei den größten um adulte Individuen. Die Untersuchungen erfolgten bei Wassertemperaturen von 5 bis

15 °C. Das Modell, das durch ein Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,70$  gekennzeichnet ist, sollte aus methodischen Gründen nur für eine Schwimmdauer von 10 bis 1 000 s eingesetzt werden. Für andere Neunaugen-Arten existieren derzeit keine multivariaten Modelle zur Beschreibung der Schwimmfähigkeit. Die vorliegenden experimentellen Daten (Literaturüberblick in [1]) lassen jedoch den vorläufigen Schluss zu, dass das von Beamish [18] für das Meerneunauge entwickelte Modell auch eingesetzt werden kann, um die Schwimmfähigkeit anderer Neunaugenarten zu beschreiben.

Das für Störe dargestellte Modell (Gl. (5)) wurde von Peake et al. [23] aus Befunden zur Schwimmfähigkeit des Seestörs (*Acipenser fulvescens*) abgeleitet ( $R^2 = 0,85$ ,  $p < 0,05$ ). Die der Modellentwicklung zugrunde liegenden Untersuchungen erfolgten an Tieren mit Körperlängen von 12 bis 132 cm bei Wassertemperaturen von 7 bis 21 °C, wobei Schwimmakti-

**Tab. 3: Modelle zur Ermittlung der maximalen Dauerschwimmgeschwindigkeit (u = Schwimmgeschwindigkeit, TL = Totallänge)**

| Art/Artengruppe  | Modellgleichung                                  |
|--|--|
| Allgemeine und gildenspezifische Modelle (nicht für Aale, Neunaugen, Störe, Kelts) |  |
| rheophile Gilde  | (8) $\log(u) = 0,3747 + 0,7937 \cdot \log(TL)$   |
| nichtreheophile Gilde  | (9) $\log(u) = 0,2219 + 0,7692 \cdot \log(TL)$   |
| Art- bzw. familienspezifische Modelle  |  |
| Aale ( <i>Anguillidae</i> )  | (10) $\log(u) = -0,2663 + 0,5670 \cdot \log(TL)$ |
| Neunaugen ( <i>Petromyzontidae</i> )   | (11) $u = 1,0 \cdot TL$                          |
| Störe ( <i>Acipenseridae</i> )   | (12) $u = 1,0 \cdot TL$                          |
| Kelts ( <i>Salmonidae</i> )  | (13) $u = 1,0 \cdot TL$                          |

**Tab. 4: Maximal zulässige Anströmgeschwindigkeit [m/s] von mechanischen Barrieren für ausgewählte Arten und Entwicklungsstadien (TL = Totallänge [m],  $\theta$  = horizontaler Anströmwinkel [°])**

| Art/Artengruppe                      | Entwicklungsstadium | TL   | maximale Anströmgeschwindigkeit             |   | Gl. (vgl. Tab. 3) |
|--------------------------------------|---------------------|------|---|---|-------------------|
|                                      |                     |      | Barrieren ohne horizontale Schräganströmung | Barrieren mit horizontaler Schräganströmung |                   |
| <b>Diadrome Arten</b>                |                     |      |   |   |                   |
| Aale ( <i>Anguillidae</i> )          | Gelbaal             | 0,30 | 0,27  | $0,27/\sin\theta$                           | (10)              |
|                                      | Blankaal            | 0,60 | 0,41  | $0,41/\sin\theta$                           | (10)              |
| Salmoniden ( <i>Salmonidae</i> )     | Smolt               | 0,10 | 0,38  | $0,38/\sin\theta$                           | (8)               |
|                                      | Kelt                | 0,50 | 0,50  | $0,50/\sin\theta$                           | (13)              |
| Neunaugen ( <i>Petromyzontidae</i> ) | Macrophthal.        | 0,10 | 0,10  | $0,10/\sin\theta$                           | (11)              |
|                                      | Macrophthal.        | 0,15 | 0,15  | $0,15/\sin\theta$                           | (11)              |
| Störe ( <i>Acipenseridae</i> )       | juvenil             | 0,10 | 0,10  | $0,10/\sin\theta$                           | (12)              |
|                                      | juvenil             | 0,30 | 0,30  | $0,30/\sin\theta$                           | (12)              |
| <b>Potamodrome Arten</b>             |                     |      |   |   |                   |
| rheophile Gilde                      | juvenil/adult       | 0,10 | 0,38  | $0,38/\sin\theta$                           | (8)               |
|                                      | juvenil/adult       | 0,20 | 0,66  | $0,66/\sin\theta$                           | (8)               |
| nichtrheophile Gilde                 | juvenil/adult       | 0,10 | 0,28  | $0,28/\sin\theta$                           | (9)               |
|                                      | juvenil/adult       | 0,20 | 0,48  | $0,48/\sin\theta$                           | (9)               |

vitäten über einen Zeitraum von etwa 6 s bis 200 min betrachtet wurden. Von einer Modellanwendung für eine Schwimmdauer >200 min sollte nach Peake et al. [23] wegen nicht valider Befunde abgesehen werden. Nach Testberechnungen von Ebel [1] können jedoch bereits bei einer Schwimmdauer >30 min inkonsistente Ergebnisse auftreten. Der bis zu 270 cm große Seestör ist eine in Nordamerika beheimatete, potamodrome Fischart, die Wanderungen von bis zu 1 000 km unternimmt und sowohl berufs- als auch angelfischer-eilich genutzt wird. In Ermangelung spezifischer Modelle schlägt Peake [33] vor, das für den Seestör entwickelte Modell auch zur Charakterisierung der Schwimmfähigkeit anderer Störarten zu nutzen.

#### 4 Bemessungsempfehlungen

##### 4.1 Generelle Aspekte

Die dargestellten Kenntnisse zur Modellierung der Schwimmfähigkeit bieten die Möglichkeit, biologisch begründete Zielgrößen für die hydraulische Bemessung von Fischschutzsystemen abzuleiten. Generell sind die Anströmverhältnisse von mechanischen Barrieren so ausulegen, dass die Zielarten bzw. -stadien den Kontakt mit der Barriere vermeiden und den Bypass erreichen können. Die maximal zulässige Anströmgeschwindigkeit ergibt sich dabei aus der Schwimmfähigkeit der

leistungsschwächsten Zielart. Für die übrigen Arten bzw. Entwicklungsstadien ist zu gewährleisten, dass die hydraulischen Voraussetzungen für die Vermeidung von Fischschäden durch Anpressung an die Barriere gegeben sind [1].

Bei der Ableitung von Bemessungsempfehlungen sind neben den physischen Voraussetzungen der Fische auch deren Verhaltensweisen im Anströmbereich der Barriere zu berücksichtigen. Entsprechend zahlreicher Labor- und Freilandbefunde ist das Fischverhalten maßgeblich vom Anströmwinkel bzw. der Exposition der Barriere abhängig [1], wobei Barrieren ohne horizontale Schräganströmung (z. B. konventionelle Rechen) und mit horizontaler Schräganströmung (z. B. Louver, Leitrechen) zu unterscheiden sind (**Bild 4**). Ausgehend von dieser Differenzierung werden nachstehend die Empfehlungen für die Bemessung von Fischschutzsystemen im Überblick dargestellt.

##### 4.2 Bemessung von Fischschutzsystemen ohne horizontale Schräganströmung

Wie Labor- und Freilandstudien zeigen, kann die Aufenthaltszeit von Fischen im Anströmbereich von Barrieren ohne horizontale Schräganströmung mehrere Stunden betragen [1]. Daher ist die Anströmgeschwindigkeit an derartig exponierten Fischschutzsystemen so zu wählen, dass die maximale Dauerschwimmgeschwindigkeit

der Fische nicht überschritten wird. Die maximale Dauerschwimmgeschwindigkeit entspricht der Geschwindigkeit, die vom Fisch über 200 min aufrechterhalten werden kann (Abschnitt 2.2). Bei noch größerer Schwimmdauer ändert sich die Schwimmgeschwindigkeit nur noch geringfügig (aerober Stoffwechselmodus).

Die maximale Dauerschwimmgeschwindigkeit ergibt sich durch Anwendung von Gl. (2) bzw. (3) und wird entsprechend der Saisonalität flussabwärts gerichteter Migrationen auf eine Wassertemperatur von 5 °C bezogen. Für Aale wird die Anwendung von Gl. (5) empfohlen, die die Schwimmgeschwindigkeit bei einer Wassertemperatur von 5 °C beschreibt. In begründeten Fällen können auch andere Wassertemperaturen für die Modellierung der Schwimmfähigkeit genutzt werden. Für Störe und Neunaugen gestatten die derzeit verfügbaren multivariaten Modellgleichungen keine zuverlässige Prognose der maximalen Dauerschwimmgeschwindigkeit. Daher werden die Bemessungsempfehlungen für diese Artengruppen anhand von Befunden zur Schutzwirkung verschiedenartig angeströmter Barrieren abgeleitet (Details in [1]). Die für Keltis dargestellten Bemessungsempfehlungen basieren auf spezifischen Untersuchungen zur maximalen Dauerschwimmgeschwindigkeit, die von Booth et al. [27] durchgeführt wurden. Einen Überblick über die empfohlenen



Beziehungen zur Charakterisierung der maximalen Dauerschwimmgeschwindigkeit sind in **Tabelle 3**.

Die resultierenden Empfehlungen für die Bemessung der Anströmgeschwindigkeit sind in **Tabelle 4** zusammenfassend dargestellt. Sie gelten entsprechend dem aktuellen Kenntnisstand unabhängig vom vertikalen Anströmwinkel der Barriere, der meist mit dem Neigungswinkel der Barriere zur Sohle gleichzusetzen ist.

#### 4.3 Bemessung von Fischschutzsystemen mit horizontaler Schräganströmung

Zur quantitativen Beschreibung der Beziehung zwischen Schwimffähigkeit, Fischverhalten, Anströmgeschwindigkeit und horizontalem Anströmwinkel wurden durch folgende Autoren Modelle und Bemessungsempfehlungen entwickelt: Pavlov [12], Pakhorukov & Kuragina [34], O'Keeffe & Turnpenny [35], Bates & Vinsonhaler [36].

Wie eine systematische Modellprüfung zeigt, bietet das Modell von O'Keeffe & Turnpenny [35] die günstigsten Voraussetzungen für einen effektiven Fischschutz und stellt aus ingenieurbio- logischer Sicht daher die Vorzugsvariante für die praktische Bemessung der Anströmbedingungen dar [1]. Da die Anwendung des Modells keine iterativen Betrachtungen voraussetzt, ist zudem eine einfache Handhabbarkeit gegeben.

In den Modellen von Pavlov [12] und Pakhorukov & Kuragina [34] werden die Parameter Schwimmggeschwindigkeit, Schwimmdauer, Anströmgeschwindigkeit und horizontaler Anströmwinkel als interkorrelierte Größen behandelt. Daher setzt die Anwendung dieser Modelle iterative Berechnungen voraus. Bei diesen ist nachzuweisen, dass die biologisch-hydraulischen Voraussetzungen für die Vermeidung von Kontakten zwischen Fisch und Barriere gegeben sind (Details und Iterationsschema in [1]). Wie Testberechnungen belegen, unterscheiden sich die Ergebnisse der Modelle von Pavlov [12] sowie Pakhorukov & Kuragina [34] bei gegebenen Randbedingungen nur geringfügig voneinander [1]. Eine praktische Anwendung dieser Modelle ist dann zu empfehlen, wenn die vergleichsweise restriktiven Bemessungsvorgaben, die aus den Modellforderungen von O'Keeffe & Turnpenny [35] resultieren, aufgrund von standörtlichen Zwängen nicht zu realisieren sind.

Das Modell von Bates & Vinsonhaler [36] beschreibt physische und verhaltensbiologische Grenzfälle, die als Grundlage für die ingenieurbio- logische Bemessung mechanischer Barrieren wenig geeignet sind. So besteht bei Anwendung des Modells ein vergleichsweise hohes Risiko, dass der Fisch die Barriere nicht vermeiden kann und durch diese verdriftet oder an diese angepresst wird. Infolgedessen wird das Modell nicht für die praktische Anwendung empfohlen.

Aus den dargestellten Gründen erfolgt die Ableitung der Bemessungsempfehlungen durch Anwendung des Modells von O'Keeffe & Turnpenny [35]. Entsprechend

der Modellforderung ist die orthogonale Geschwindigkeitskomponente an der Barriere (Normalgeschwindigkeit) auf die maximale Dauerschwimmgeschwindigkeit der Fische zu beschränken. Die empfohlenen Modellgleichungen zur Charakterisierung der maximalen Dauerschwimmgeschwindigkeit sind in Tabelle 3 zusammenfassend dargestellt (Erläuterungen Abschnitt 4.2). Einen Überblick über die resultierenden Bemessungsempfehlungen vermittelt Tabelle 4. Wie den Angaben in Tabelle 4 zu entnehmen ist, steigt die zulässige Anströmgeschwindigkeit mit abnehmendem Anströmwinkel bzw. zunehmender Schrägstellung der Barriere.



**Bild 5:** Eine wesentliche Bedeutung für die Fortentwicklung des gegenwärtigen Kenntnisstandes besitzen u. a. Studien zur biologischen Funktion von ausgeführten Fischschutz- und Fischabstiegssystemen mit Bypasshamen (oben) und Turbinenhamen (unten); zur Beschreibung der selektiven Wirkung der Fanggeräte sowie der Effizienz des Fischschutz- und Fischabstiegssystems finden vorzugsweise logistische Regressionsverfahren Anwendung [1]

## 5 Schlussfolgerungen und Ausblick

In vorliegender Arbeit wurden biologisch begründete Zielgrößen für die hydraulische Bemessung von Fischschutzsystemen auf der Grundlage von Modellen zur Schwimmfähigkeit europäischer Fischarten abgeleitet.

Während die für Aal, Lachs und potamodrome Arten benannten Zielgeschwindigkeiten bei geeigneter Exposition des Fischschutzsystems sowohl an Neubaustandorten als auch bei Nachrüstungen an zahlreichen Bestandsanlagen eingehalten werden können, sind die geringen Zielgeschwindigkeiten für Neunaugen und juvenile Störe mit den technischen und ökonomischen Anforderungen der Wasserkraftnutzung kaum vereinbar. Für beide Artengruppen kann jedoch eine Erhöhung der Schutzwirkung dann erwartet werden, wenn das Fischschutzsystem mit einer Sohlenleitwand kombiniert wird [1], [37]. Für Neunaugen ist darüber hinaus auf das vergleichsweise geringe Verletzungsrisiko bei der Turbinenpassage zu verweisen [20], [38].

Die vorgestellten Kenntnisse zur Schwimmfähigkeit europäischer Fischarten belegen zugleich, dass der in Deutschland für die maximale Anströmgeschwindigkeit bislang verschiedentlich genutzte pauschale Grenzwert von 0,50 m/s für eine biologisch begründete Auslegung von mechanischen Barrieren nicht geeignet ist.

Neben den in vorliegender Arbeit abgeleiteten Zielgrößen sind für die ingenieurbiologische Konzeption und Auslegung von Wasserkraftanlagen im Regelfall auch folgende Informationen erforderlich: maximale zulässige lichte Weite des Fischschutzsystems, Möglichkeiten der Positionierung und Gestaltung des Fischschutzsystems, geometrische und hydraulische Zielgrößen für die Bemessung von Bypässen, Möglichkeiten der Positionierung und Gestaltung von Bypässen. Detaillierte Ausführungen zu diesen Themenkomplexen enthält die Arbeit von Ebel [1].

Sofern das betreffende Fischschutz- und Fischabstiegssystem aufgrund von standörtlichen Restriktionen nicht so konzipiert werden kann, dass für alle Zielarten bzw. -stadien ein vollständiger Schutz erreicht wird, ist die zu erwartende Mortalität bei der Triebwerkspassage zu bilanzieren. Hierfür stehen aussagefähige Prognosemodelle zur Verfügung, die gleichfalls in [1] dargestellt und hinsichtlich ihrer Genauigkeit charakterisiert werden.

Um die Weiterentwicklung des aktuellen Kenntnisstandes zu fördern, wäre künftig auch in Deutschland eine systematische, langfristig ausgelegte Forschungstätigkeit zu etablieren, die materiell und institutionell abzusichern ist (**Bild 5**).

### 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. Ingenieurbiologische Grundlagen, Modellierung und Prognose, Bemessung und Gestaltung. In: Mitteilungen aus dem Büro für Gewässerökologie und Fischereibiologie (2013), Bd. 4.
- [2] Bone, Q.; Marshall, N. B.: Biologie der Fische. Stuttgart: Gustav Fischer, 1985.
- [3] Videler, J. J.: Fish Swimming. London: Chapman & Hall, 1993.

- [4] Wardle, C. S.: Limit to fish swimming speed. In: Nature 255 (1975), S. 725-727.
- [5] Webb, P. W.; Kosteki, P. T.; Stevens, E. D.: The effect of size and swimming speed on the locomotor kinematics of rainbow trout. In: J. Exp. Biol. 109 (1984), S. 77-95.
- [6] Videler, J. J.; Wardle, C. S.: Fish swimming stride by stride: speed limits and endurance. In: Rev. Fish Biol. and Fisheries 1 (1991), S. 23-40.
- [7] Svendsen, J. C.; Skov, J.; Bildsoe, M.; Steffensen, J. F.: Intra-school positional preference and reduced tail beat frequency in trailing positions in schooling roach under experimental conditions. In: J. Fish Biol. 62 (2003), S. 834-846.
- [8] Blaxter, J. H. S.: Swimming speed of fish. In: FAO-Report 62 (1969), S. 69-100.
- [9] Webb, P. W.: Hydrodynamics and energetics of fish propulsion. In: Bull. Fish. Res. Board Can. 190 (1975), S. 1-159.
- [10] Beamish, F. W. H.: Swimming capacity. In: Fish Physiology, Bd. VII (Hrsg.: W. S. Hoar; Randall, D. J.), New York: Academic Press (1978), S. 101-187.
- [11] Blake, R. W.: Fish locomotion. London: Cambridge Univ. Press, 1983.
- [12] Pavlov, D. S.: Structures assisting the migrations of non-salmonid fish: USSR. In: FAO Fisheries Technical Paper 308 (1989), S. 1-97.

Quellen [13] bis [39]: auf Anfrage beim Autor

Guntram Ebel

### Modelling the Swimming Ability of European Fish Species – Target Figures for Hydraulic Dimensioning of Fish Protection Systems

Hydraulic dimensioning of fish protection systems requires detailed knowledge of the swimming speed of downstream migrating fish. Swimming speed depends essentially on body length, swimming time and water temperature and can be quantitatively described by multivariate models. This paper provides a short overview of the existing models and, on the basis of modelling results and behavioural data, gives practical recommendations for dimensioning of fish protection systems.

Гунтрам Эбель

### Моделирование плавучести некоторых видов европейских рыб: целевые величины для гидравлического измерения систем рыбозащиты

Гидравлическое измерение систем рыбозащиты предполагает наличие детализированных данных о скорости передвижения мигрирующих вниз по течению рыб. Скорость передвижения рыб в значительной степени зависит от длины тела рыбы, длительности передвижения, а также температуры воды и может быть описана количественно с помощью многомерных моделей. В данной статье дается краткий обзор имеющихся моделей; кроме того – на основе результатов модельных испытаний и данных биологических характеристик – даются практические рекомендации по вопросам планирования систем рыбозащиты.