

Der Rundbeckenfischpass – eine Alternative zum konventionellen Schlitzpass

Matthias Mende, Werner Dönni, Ulf Helbig, Klaas Rathke

Zusammenfassung

Der Rundbeckenfischpass ist eine Schlitzpassbauweise, die durch die ausschliessliche Verwendung runder und glatter Anlagenteile gekennzeichnet ist. Aufgrund der vom konventionellen Schlitzpass deutlich abweichenden Geometrie und Anordnung der Becken weist er wesentliche hydraulische Unterschiede auf. Der Abfluss wird mittels einer dominanten Hauptströmung entlang der Beckenwände geführt, zum Beckeninneren hin erfährt der Wasserkörper eine starke Strömungsberuhigung mit sehr kleinen Fliessgeschwindigkeiten. Die wenigen durchgeführten Aufstiegskontrollen erlauben bisher keine vollständige Beurteilung der Funktionsfähigkeit. Die teils hohen Aufstiegszahlen und das Fehlen einer Selektivität auf Arten und Kleinfische deuten aber zusammen mit den gestalterischen Vorteilen und den Anpassungsmöglichkeiten nach Bauabschluss auf ein grosses Potenzial hin. Um dieses Potential nutzen zu können, wurden in der vorliegenden Arbeit Bemessungsempfehlungen hergeleitet. Diese orientieren sich hinsichtlich Beckengrösse, Fliestiefe und Schlitzbreite an den Empfehlungen für konventionelle Schlitzpässe (z. B. DWA, 2014). Aufgrund des grossen Potenzials des Rundbeckenpasses sind der Bau einzelner Pilotanlagen an Gewässern mit grosswüchsigen Zielarten und die Durchführung umfassender, methodisch abgesicherter Wirkungskontrollen wünschenswert.

durchgehende vertikale Schlitze. Aufgrund der vom konventionellen Schlitzpass deutlich abweichenden Geometrie und Anordnung der Becken weist er jedoch andere hydraulische Eigenschaften auf. Zudem gibt es Unterschiede bei den Einsatz- und Gestaltungsmöglichkeiten dieser Bauweise. So sind die Linienführung und auch das Längsgefälle sehr variabel. Somit ist der RBP gut an die lokalen Gegebenheiten anpassbar, weshalb die Baukosten oft deutlich geringer als bei konventionellen Schlitzpässen sind. Es muss jedoch festgestellt werden, dass der RBP heute nur noch selten gebaut wird. Dies ist einerseits auf bisher unzureichende Bemessungsansätze und andererseits auf die wegen fehlender Untersuchungen nicht ausreichende Berücksichtigung in den gängigen Regelwerken zurückzuführen. Zudem wurde an den bisherigen Anlagen häufig die relativ kleine Dimensionierung kritisiert, die nicht den geometrischen Grenzwerten gängiger Regelwerke (z. B. DWA, 2014) entspricht.

Im vorliegenden Beitrag wird auf die hydraulische Charakteristik des RBP eingegangen und versucht, diese im Bezug zur Fischwanderung zu beurteilen. Zudem werden die Vor- und Nachteile dieser Bauweise hinsichtlich Gestaltung, Flexibilität der Anordnung und Anpassungsmöglichkeiten nach Bauabschluss dargelegt und wird ein Bemessungsansatz empfohlen.

2. Konstruktion und Gestaltung

2.1 Ausführungsvarianten

Die Konstruktion ist als Beckenpass konzipiert. Sie basiert auf der Anordnung aufeinanderfolgender Rundbecken, deren Montage in einem Rechteckgerinne erfolgt. Die Beckenelemente bestehen i. d. R. aus GFK-Rohrsegmenten (GFK: glasfaserverstärkter Kunststoff).

Es werden die drei typischen Ausführungsvarianten C, J und H unterschieden, die im Folgenden auch als Bautypen bezeichnet werden. Mischbauweisen als

1. Einleitung

Das schweizerische Gewässerschutzgesetz und das Bundesgesetz über die Fischerei fordern die Reduktion der negativen Auswirkungen der Wasserkraftnutzung auf die fliessgewässer. Die zugehörigen Verordnungen verlangen die Sanierung der Bereiche Fischwanderung, Schwall-Sunk und Geschiebehaushalt bis 2030. Die Kosten der Sanierung belaufen sich gemäss heutiger Schätzung insgesamt auf 4–5 Mrd. CHF (SRF, 2018).

Ein grosser Teil dieses Geldes fliesst in die Wiederherstellung der freien Fischwanderung. Im Rahmen der Gesetzesumsetzung sind etwa 1000 Wasserkraftwerke betroffen, wobei der Fischaufstieg und der Fischabstieg an je etwa 700 Anlagen zu sanieren ist (Bammatter et al., 2015). Neben diesen kraftwerksbedingten, bis 2030 zu sanierenden Wanderhindernissen sollen im Rahmen der Revitalisierungsplanung bis ca. 2090 auch nichtkraftwerksbedingte Hindernisse fischgängig umgestaltet werden. Insgesamt beeinträchtigen in der Schweiz über 100 000 künstliche Wanderhindernisse mit einer Fallhöhe über 50 cm die freie Fischwanderung

(Zeh Weissmann et al., 2009). In Anbetracht der grossen bevorstehenden Aufgabe stellt sich die Frage, wie die freie Fischwanderung möglichst wirksam und kosteneffizient wiederhergestellt werden kann.

Zur Wiederherstellung der flussaufwärts gerichteten Wanderung (Fischaufstieg) werden Fischaufstiegshilfen (FAH) gebaut, sofern kein Rückbau des Wanderhindernisses möglich ist. Unter räumlich beengten Verhältnissen, wie sie häufig z. B. im Umfeld von Wasserkraftanlagen vorliegen, kommen vor allem vergleichsweise platzsparende FAH zum Einsatz. Die Standardbauweise ist heute der konventionelle Schlitzpass, für den weltweit ein grosser Erfahrungsschatz besteht. Eine neuere Bauweise ist der Rundbeckenfischpass (RBP, Herstellerbezeichnung Mäanderfischpass®). Er ist seit Mitte der 1990er-Jahre am Markt und wurde seitdem von seinem Entwickler und Hersteller, der Peters Ökofisch GmbH & Co. KG, erfahrungsbasiert weiterentwickelt. Derzeit existieren 66 Anlagen (Helbig et al., 2016). In der Schweiz wurden zwei Anlagen in Forellengewässern gebaut.

Der Rundbeckenfischpass verfügt wie der konventionelle Schlitzpass über



Variantenkombinationen sind ebenfalls möglich. Die Bautypen unterscheiden sich vor allem in der Beckenform und der Beckenlänge sowie der Sohlenneigung des Rechteckgerinnes (Rampengefälle) und dem Fließsgefälle (vgl. *Tabelle 1* und *Bild 1*):

- Der Bautyp C besitzt kreisrunde Becken in C-Form und ist für Rampengefälle zwischen 17 und 30 % entworfen worden. Er soll v. a. die Realisierung von FAH unter beengten Platzverhältnissen ermöglichen.
- Der Bautyp J ist für Rampengefälle zwischen 8 und 17 % vorgesehen. Der wesentliche Unterschied zum Typ C besteht in der Streckung der C-Form zu einem J-förmigen Beckengrundriss.
- Der Bautyp H ist für Rampengefälle zwischen 4 und 8 % ausgelegt und wird als sogenannter «Halbmäander-»

Fischpass» (namensgebend) bezeichnet. Der Typ H besitzt gegenüber den Bautypen C und J einen noch stärker gestreckten Grundriss und somit im Vergleich die längsten Becken und folglich grössten Baulängen.

Die vorherrschenden Strömungsmuster sind von den jeweiligen Bautypen abhängig. Allen Bautypen ist jedoch gemein, dass der Fließweg alternierend («mäandrierend») und durch eine dominante Hauptströmung als Randströmung an den Beckenaussenseiten (definiert als die angeströmte Beckenberandung) geprägt ist (*Bild 1*). Somit stellt sich ein durchgehender Strömungspfad ein.

Zusätzlich zu den in *Tabelle 1* aufgeführten Anlagen existieren vier Sonderkonstruktionen, die als Misch- oder auch als Turmkonstruktion gebaut wurden (*Helbig et al., 2016*).

In Fließgewässern, selbst in Wildbächen, gibt es als Folge des Geschiebeabtriebs keine scharfen Kanten, die für Fische eine Verletzungsgefahr darstellen. Aus diesem Grund ist die ausschliessliche Verwendung ausgerundeter und glatter Bau- bzw. Anlagenteile ein wesentliches Kennzeichen der Beckengestaltung. Der Hersteller verzichtet bewusst auf scharfkantige Schlitze, rechte Winkel und gebrochenes Sohlenmaterial. Dem liegt die Annahme zugrunde, dass Fische wegen einer möglichen Verletzung (z. B. der Schleimhaut oder der Beschuppung) gegenüber scharfen Kanten und rauen Flächen Meidereaktionen zeigen und zu diesen einen grösseren Abstand halten als zu ausgerundeten, glatten Oberflächen.

2.2 Sohlenaufbau und Schlitzgestaltung

Sohlenaufbau

Der Sohlenaufbau besteht aus einer Rundkiesschüttung (i. d. R. Körnung 16/32 mm, Schichtdicke ca. 80 mm), auf die eine ca. 3 cm dicke PE-Wirrgelgematte zur Stabilisierung der Kiesschüttung aufgebracht wird (*Bild 2*). Die Befestigung der Matte und des Rundkieses erfolgt mit «Sohlenhalbschalen» (Kunststoffrohr $D=14$ cm, $L=25$ cm, der Länge nach gedrittelt), die mit durch die Matte und Kiesschicht hindurchgeführte Gewindestangen in der Betonsohle verankert werden. Bei neueren RBP wird der Sohlenaufbau zusätzlich mit einer verzinkten Baustahlmatte fixiert (*Bild 3*). Die Halbschalen dienen neben der Befestigung auch zur Entwicklung strömungsberuhigter sohlennaher Bereiche und als Deckungsstruktur (Unterstand) für bodenorientierte Arten. Sie werden im Schlitzbereich so angeordnet, dass sohlennah schwimmende Fische von Strömungsschatten zu Strömungsschatten schwimmen können, ohne in die «Hauptströmung» eintreten zu müssen.

Im Beckeninneren bilden sich aufgrund der geringen Fließgeschwindigkeit Sedimentationsbereiche, die grosse Teile der Beckensohle einnehmen. Sie sind vielfach mit Wasserpflanzen (z. B. Quellmoose, Wassersellerie) bewachsen, die neben den Halbschalen zusätzliche Unterschlupfmöglichkeiten für Fische und Lebensraum für Wirbellose bieten (*Bild 4*). Der Einfluss der Ablagerungen auf die FAH-Hydraulik ist vernachlässigbar klein, da sie nur im strömungsberuhigten inneren Beckenbereich auftreten. Im Bereich der Hauptströmung entlang der Wände findet keine nennenswerte Sedimentation statt.

Kenngrösse	Ausführungsvarianten		
	C	J	H
Ansicht			
Rampengefälle / [%]	17–30	8–17	4–8
Beckendurchmesser D_B [m]	1.00–2.40	—	—
Beckenlänge L_B [m]	—	1.50–3.50	1.50–3.60
Beckenbreite B_B [m]	—	1.00–2.00	1.00–2.50
Beckenhöhe H_B [m]	0.85–3.00	0.75–3.00	0.75–3.00
Dotation Q [l/s]	80–610	110–610	120–1040
Beckenfallhöhe Δh [m]	0.15–0.24	0.15–0.24	0.08–0.24
Anzahl gebaute Anlagen	42	15	5

Tabelle 1: Kenndaten Ausführungsvarianten C, J und H (Quelle: Hersteller).

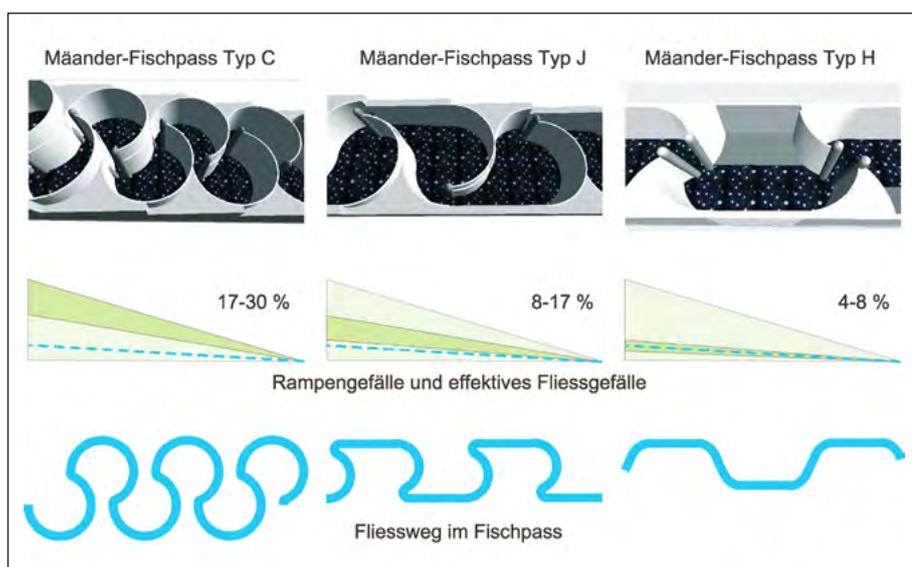


Bild 1: Bautypabhängige Gefälle- und Fließwegausbildung (mittlere Zeile: blau gestrichelt = Fließweggefälle [effektives Fließsgefälle]; dunkelgrün = Rampengefälle, entspricht dem angegebenen Prozentbereich) (Quelle: Hersteller, modifiziert).



Bild 2: Links: Wirrgelegematte vor dem Einbau (Foto: M. Mende), rechts: Steigagal auf Wirrgelegematte in trockengelegtem RBP (Foto: Hersteller).

Der Sohlenaufbau gewährleistet trotz des oft steilen Rampengefälles (Tabelle 1) eine lagestabile Lockermaterialsohle. Ein Vorteil gegenüber einem klassischen Sohlenaufbau aus gebrochenem Material ist, dass

die benötigte Sohlenhöhe klar definiert und beim Einbau exakt herzustellen ist. Dies sichert die gewünschten hydraulischen Verhältnisse in der Anlage.

Schlitzgestaltung

Wie der konventionelle Schlitzpass ist auch der RBP durch durchgehende vertikale Schlitze gekennzeichnet. Der Unterschied liegt darin, dass die Vertikalschlitze beim RBP ausgerundet sind und sich V-förmig in Richtung Sohle verjüngen (Bild 3, rechts). Die Schlitzbreite ist durch verstellbare Kunststoffrohre (Durchmesser 15 cm, längsseitig geschlitzt und auf Beckenelemente aufgeschoben, Bild 3, rechts) variabel einstellbar. Sie kann auch nach Inbetriebnahme um bis zu ± 7 cm reguliert werden. Dies erlaubt neben nachträglichen Anpassungen des Betriebsabflusses auch exakte Angleichungen der Fallhöhen zwischen den Becken, sollten sich diese in seltenen Fällen nicht gleichmässig einstellen.



Bild 3: Links: Beckenanordnung und -gestaltung eines Typs C (im Bau), rechts: Gestaltung Schlitzöffnung (Rat'sches Wehr / Echaz, Reutlingen, Fotos: J. Stork).

2.3 Platzbedarf und Linienführung

Die bisher realisierten RBP wurden i. d. R. mit kleineren Becken gebaut, als es bei konventionellen Schlitzpässen am gleichen Standort üblich wäre. Somit wurden die Empfehlungen für die geometrischen Grenzwerte (z. B. DWA, 2014) nicht eingehalten, und es ergab sich schon dadurch ein verringerter Platzbedarf gegenüber dem konventionellen Schlitzpass. In der folgenden Betrachtung wird davon ausgegangen, dass die lichte Beckenlänge bzw. der Beckendurchmesser und die Fallhöhe von Becken zu Becken denen eines konventionellen Schlitzpasses entsprechen.

Bei Beckenpässen mit rechteckigen Beckenformen wie dem konventionellen Schlitzpass sind für Richtungsänderungen in der Linienführung grössere Becken als die Standardbecken notwendig. So sind z. B. Umlenkbecken (180°-Wendung) doppelt so gross, Becken mit einer Richtungsänderung um 90° um ca. 25% grösser.



Bild 4: Trocken gelegter Typ C mit Wassersellerie im Beckenzentrum (Foto: U. Helbig).

Die Ausführungsvariante des RBP mit der kompaktesten Anordnung ist der Typ C. Zwei Becken sind nebeneinander und ineinander verschlungen angeordnet, wodurch sich ein doppelt so großes Rampengefälle wie beim Typ J ergibt (Tabelle 1). In leicht abgewandelter Form erlaubt der Typ C als «Helix-Turmfischpass» auch spiralförmige Linienführungen (Bild 5).

Bei konventionellen Schlitzpässen werden ähnliche Beckenanordnungen mit steilem Rampengefälle wie beim Typ C nur selten realisiert. Am ehesten vergleichbar sind konventionelle Schlitzpässe mit alternierender Beckenführung (Bild 6). Da die Becken quer zur Rampenneigung angeströmt werden, ist als Beckenbreite (quer zum Rampengefälle) die Beckenlänge L_B (Abstand vom Schlitz zur gegenüberliegenden Wand) anzusetzen. Die Becken sind daher um mindestens ein Drittel breiter als ein Standardbecken, damit

die empfohlene Mindestlänge nach DWA (2014) eingehalten wird. Die Gesamtbreite von zwei nebeneinander angeordneten Becken entspricht somit mindestens der doppelten empfohlenen Beckenlänge. Im Gegensatz dazu beträgt die Gesamtbreite beim Typ C aufgrund der Überlappung nur 1.5 Beckendurchmesser und ist somit um 25 % schmaler. Eine weitere Verringerung der Gesamtbreite ergibt sich beim RBP durch die Verwendung schlanker GFK-Rohrsegmente, die mit ihrer Wandstärke (15–34 mm) wesentlich dünner sind als die i. d. R. aus Beton erstellten Trennwände konventioneller Schlitzpässe. Dank der kompakten Anordnung und des steilen Rampengefalles kann der Typ C bei begrenzten Platzverhältnissen allenfalls realisiert werden, wenn der Bau eines Schlitzpässes nicht mehr möglich ist.

Beim Typ J, der ein ähnliches Breiten-Längen-Verhältnis wie der konven-

tionelle Schlitzpass besitzt, ergibt sich hinsichtlich des Platzbedarfs, abgesehen von den dünneren Trennwänden und den geringeren Beckentiefen durch den niedrigen Sohlenaufbau, kein weiterer Vorteil (vgl. Kap. 2.2; konstruktionsbedingte Dicke des Füllmaterials beim Sohlensubstrat eines konventionellen Schlitzpässes $d_F \geq 30 \text{ cm}$ [DWA, 2014]). Der Typ H besitzt dagegen ein kleineres Breiten-Längen-Verhältnis als der Typ J und kann somit auch in schmalen Korridoren verwendet werden (Bild 7).

Durch die Kombination der drei Ausführungsvarianten können Rundbeckenpässe den zur Verfügung stehenden Raum oft bestmöglich ausnutzen (Bild 7). Zudem erlauben sie eine variable Gestaltung des Längsgefälles. Somit können z. B. Werkleitungen (Kanalisation, Kabelblöcke etc.) und sonstige Einschränkungen häufig umgangen und kostenintensive Anpassungen vermieden werden.

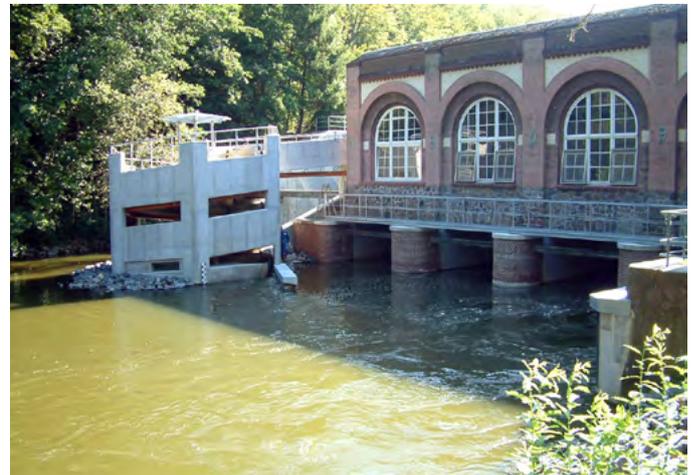


Bild 5: Helix-Turmfischpass an der Schwentine/Schleswig-Holstein (Fotos: E. Kuberski).



Bild 6: Konventioneller Schlitzpass mit alternierender Beckenführung (Foto: www.ib-handrick.de).



Bild 7: RBP an der Weserstaustufe Drakenburg mit einer Kombination von Typ C und Typ H unmittelbar vor der Inbetriebnahme (Foto: Hersteller, modifiziert).



Bild 8: Links: Strömungsmuster in einem RBP Typ C (Beispiel: Birs / Courrendlin JU; Foto: J. Stork), rechts: Strömungsmuster («strömungsdissipierend» – linker Strang und «strömungsstabil» – rechter Strang, nach DWA, 2014) in einem konventionellen Schlitzpass (Beispiel: Mosel / Koblenz, Rheinland-Pfalz; Foto: M. Mende).

3. Hydraulik (Typ C)

Bisher wurden grossmehrheitlich RBP des Typs C realisiert (Tabelle 1). Aus diesem Grund wird im Folgenden verstärkt auf die charakteristischen hydraulischen Verhältnisse dieses Bautyps eingegangen. Die gestreckteren Bautypen J und H sind weniger kompakt als der Typ C und ähneln hinsichtlich der Beckenform einem konventionellen Schlitzpass. Die für RBP typischen Strömungscharakteristika (alternierender Fließweg, dominante Hauptströmung an den Beckenaussenseiten und durchgehender Strömungspfad) treten aber auch bei diesen Bautypen auf (Kap. 2.1).

3.1 Beckenhydraulik

Im Gegensatz zum konventionellen Schlitzpass, bei dem die Strömung unterhalb eines Schlitzes geradlinig in Richtung Beckenzentrum geleitet wird (Bild 8, rechts), erfolgt beim Typ C zwischen oberem und unterem Schlitz eine gerichtete Strömungsführung entlang der Beckenaussenseiten. Dadurch stellt sich eine dominante und stabile Aussenströmung als relativ scharf begrenzter Strahl ein. Aufgrund der permanenten Umlenkung des Strahls in Verbindung mit den Trägheitskräften legt sich dieser Strahl durchgehend an die konkave Aussenwand an, wodurch ein gekrümmter ununterbrochener Strömungskorridor entsteht (Bild 8, links, Bild 9).

Anders als bei einer geradlinigen Strahleinleitung entlang einer Seitenwand bleibt die gekrümmte Aussenströmung deutlich kompakter und stabil. Die Autoren erachten dies gegenüber einer ungeführten bzw. einseitig geradlinig geführten

Einleitung, die mit einer stetigen Aufweitung des Strahles zum freien Beckenraum hin verbunden ist (Rajaratnam, 1976), als vorteilhaft. Ungeführte Strahleinleitungen in freie Beckenvolumina, wie sie z. B. beim konventionellen Schlitzpass auftreten (Bild 8, rechts), neigen aufgrund der instabilen Scherzone zwischen Einleitungsströmung und freiem Wasserkörper zu einer labilen Strahlausbildung. Sie können bereits bei geringen Änderungen der Randbedingungen zu einem vorzeitigen und unkontrollierten Strahlzerfall führen, was sich durch ein unplanmässiges Umschlagen des Strömungsmusters von «strömungs-

stabil» in «strömungsdissipierend» (nach DWA, 2014) oder umgekehrt zeigen kann.

Im Gegensatz zur markanten Randströmung entwickelt sich im Beckenzentrum des RBP eine grossräumige, insgesamt langsam stabil drehende Walzenströmung mit vertikaler Drehachse. Sie wird in der Scherzone durch Schubübertragung von der von Schlitz zu Schlitz verlaufenden Aussenströmung angetrieben («starrer Wirbel»). Charakteristisch ist dabei der ausgeprägte Geschwindigkeitsabfall von aussen nach innen innerhalb der vertikalen Strömungswalze, die im Zentrum Werte von nahezu $v = 0$ m/s aufweist (Bild 8, links, Bild 9).

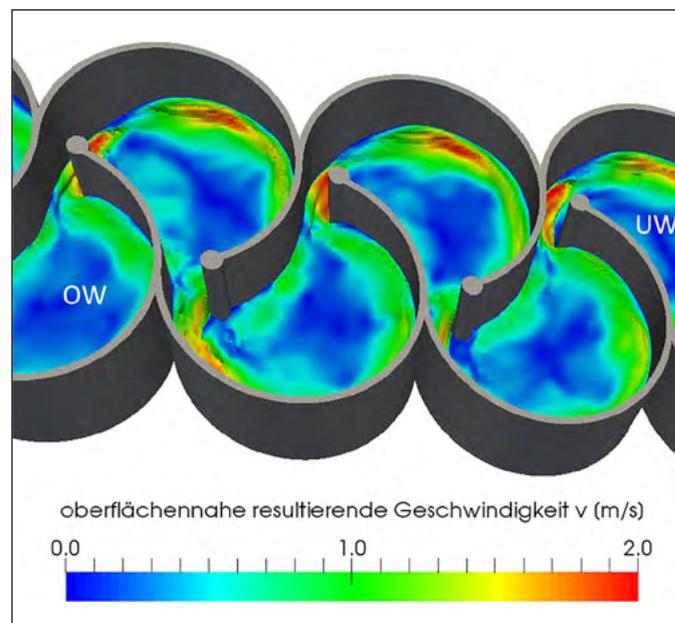


Bild 9: Ausschnitt eines RBP Typ C, 3d-HN-Simulation (OpenFOAM®, LES-Methode, UW = Unterwasser, OW = Oberwasser; Quelle: TU Dresden / IWD).

Analog zu jeder anderen Beckenpassbauweise muss auch im RBP der Grossteil der bei der Schlitzdurchströmung frei werdenden kinetischen Energie umgewandelt werden. Eine relative Konstanz der Beckenfallhöhen in einer RBP-Anlage, bezogen auf den Bemessungswasserstand, ist dabei Ausdruck einer gleichmässigen Energieumwandlung und somit eines quasi-gleichförmigen Strömungszustands in der FAH. Die Energiedissipation der charakteristischen äusseren Strahlströmung erfolgt primär infolge der äusseren Wandreibung zur Beckenberandung sowie in der Scherzone zwischen zentrischem starren Wirbel und äusserer Randströmung. Sowohl die wandnahe Grenzschicht als auch die freie Grenzschicht der Randströmung zum Beckenzentrum hin werden gegenüber dem geradlinigen Fall gestaut (*Guittou, 1964, Rodney, 1972*). Im Gegensatz zur Einleitströmung in einen freien Wasserkörper ist die absolute Energiedissipation in der Summe geringer, da die äussere Wandreibung einen geringeren Dissipationseffekt besitzt als die Scherzone im Fluid. Im Vergleich zum konventionellen Schlitzpass ist daher bei gleicher Beckenfallhöhe Δh und gleichem Fließweg im Becken eine etwas höhere mittlere Fließgeschwindigkeit im Schlitzbereich zu erwarten. Diese könnte im Bedarfsfall durch eine Vergrößerung des Beckendurchmessers und/oder eine Verringerung der Fallhöhe kompensiert werden.

Das vorgenannte typische Strömungsmuster des Typs C, unterteilt in eine dominante beckenäussere Hauptströmung und ein strömungsberuhigtes Beckenzentrum, erlaubt folgende Rückschlüsse:

- Die äussere Beckenrandströmung ist durch hohe und gerichtete Fließgeschwindigkeiten gekennzeichnet sowie kompakt und begrenzt ausgebildet. Wie eigene Messungen zeigten, treten die Geschwindigkeitsmaxima in einem Becken geringfügig unterhalb einer Schlitzöffnung auf (*IWD, 2016, vgl. auch Kap. 3.2*). Die Strömungsbedingungen sind in den Einzelbecken über den Verlauf der Anlage relativ konstant, die Randströmung ist durchgehend und dauerhaft vorhanden.
- Der grösste Teil des Beckenraumes ist durch Strömungen mit geringer Fließgeschwindigkeit und Turbulenz gekennzeichnet und stellt damit einen grosszügigen Raum für das Verweilen von Fischen vor dem Aufstieg ins nächste Becken bereit.
- Mit der langsam drehenden Walzenströmung bzw. dem Übergang in die

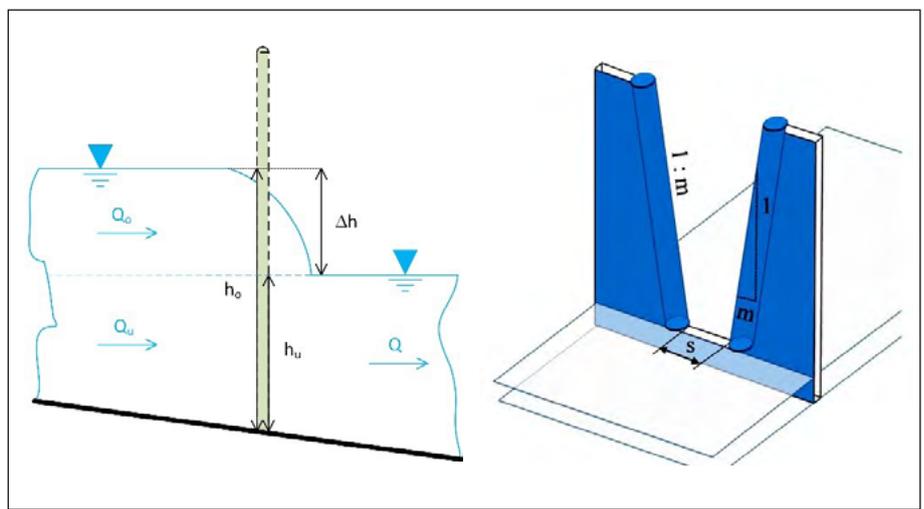


Bild 10: Links: Prinzip der Schlitzdurchströmung als kombinierte Überfall- und Ausflussströmung, rechts: Bezeichnungen am Schlitz (mit Kantenausrundung).

äussere, gerichtete Strahlströmung steht eine ungestörte Richtungsinformation für den Fisch zur Verfügung, die eindeutig auf den nächsten Schlitz hinweist.

3.2 Durchflussbestimmung, maximale Fließgeschwindigkeit

Die sohlengleiche Schlitzöffnung stellt einen Kontrollquerschnitt dar, der abflussbestimmend und somit hydraulisch relevant ist. Vorteilhaft beim RBP ist, dass die Sohlengabe genau erstellt und die Schlitzbreite variiert sowie an die jeweiligen Vor-Ort-Bedingungen angepasst werden kann (*Kap. 2.2*).

Die Schlitzdurchströmung bildet eine Kombination aus rückgestautem Ausfluss (*Torricelli-Ansatz, Q_u*) und Überfallströmung (*Poleni-Ansatz, Q_o , Bild 10, links*). Eine Durchflussbestimmung im Schlitz nach den Gleichungen 8.14, 8.15 a bzw. 8.15 b gemäss aktuellem Merkblatt DWA-M 509 (*DWA, 2014, S. 244*) wird nach jetzigem Kenntnisstand der Autoren nicht empfohlen, da Q-Messungen der TU Dresden Abweichungen von bis zu 30 % ergaben. Nach Untersuchungen der TU Dresden kann mit dem in *Aigner (2016)* beschriebenen Ansatz der Durchfluss gut ermittelt werden. Die dort enthaltene Anströmgeschwindigkeit v_a ist aber unter Praxisbedingungen schwierig und nicht eindeutig bestimmbar. Wie die Messungen zeigen, kann ihr Anteil jedoch nicht vernachlässigt werden, was, wie bereits in *Kap. 3.1* ausgeführt, aus der effektiv geringeren Energiedissipation resultiert.

Vereinfacht wird daher nur die Beckenfallhöhe Δh betrachtet und der kinetische Energieanteil infolge v_a durch einen modifizierten Abflussbeiwert μ_{mod} berücksichtigt, sodass für einen trapezförmigen Schlitz (vgl. *Bild 10, links*) gilt:

Trapezquerschnitt:

$$Q = \mu_{mod} \cdot s \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h} \cdot \left[\left(h_u + m \cdot \frac{h_u^2}{s} \right) + \left(\frac{2}{3} \cdot \Delta h + 0.406 \cdot m \cdot \frac{\Delta h^2}{s} \right) \right] \text{ mit}$$

$$\mu_{mod} = \mu_0 \cdot \mu_1$$

bzw. in der Darstellung für eine Gerinneeingang ohne Fließwechsel

$$Q = \mu_{äqu} \cdot \sqrt{g} \cdot s \cdot h_o^{3/2} \text{ mit}$$

$$\mu_{äqu} = 1.35 \cdot \sqrt{\frac{\Delta h}{h_o^3}} \cdot \left[\left(h_o + m \cdot \frac{h_o - \Delta h_1^2}{s} \right) - \left(\frac{1}{3} \cdot \Delta h - 0.406 \cdot m \cdot \frac{\Delta h^2}{s} \right) \right] \quad (1)$$

wobei μ_0 den Basisbeiwert des Querschnitts gemäss der Euler-Gleichung ($\mu_0 = 0.537$ bis 0.577 für Trapezquerschnitte mit ausgerundeten Kanten, *Aigner & Bollrich, 2015*) und μ_1 den Einfluss der Anströmgeschwindigkeit beschreiben. Der Wert für μ_1 konnte im Rahmen verschiedener Untersuchungen (Natur-/Labormessungen, Simulationen) für die Ausführungsvariante C z. B. zu $\mu_1 \approx 1.715$ bestimmt werden.

In Gl. (1) stellen μ [-] den Abflussbeiwert, s [m] die Schlitzbreite auf Sohlenniveau (*Bild 10, rechts*) und h_o und h_u [m] die Wassertiefe unmittelbar oberhalb bzw. unterhalb des Schlitzes, bezogen auf die mittlere Wasserspiegellage dar. Die Grösse Δh [m] beschreibt die Fallhöhe zwischen den mittleren Wasserspiegellagen zweier benachbarter Becken, m [-] definiert den Mittelwert der Neigung der Schlitzkanten (*Bild 10, rechts*). Für $m=0$ gilt Gl. (1) für Rechteckquerschnitte.

Die maximale Fließgeschwindigkeit in der Anlage tritt wie bei allen Schlitzpassen geringfügig unterhalb eines Schlitzes auf und kann mit guter Näherung nach der erweiterten Torricelli-Gleichung zu an-

$$v_{max} = \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h + v_a^2} \quad (2)$$

gegeben werden. Auch hier gilt, dass der Anteil aus der Anströmgeschwindigkeit v_a aufgrund der geringeren Energie-dissipation im RBP nicht vernachlässigbar ist. Unter Nutzung der Beziehung

$$\mu_1 = \left(1 + \frac{v_a^2}{2 \cdot g \cdot \Delta h} \right)^{1.5} > 1.0$$

(Aigner & Bollrich, 2015, S. 337) lässt sich dann die maximale Fließgeschwindigkeit v_{max} mithilfe von Gl. (3) zu

$$v_{max} = \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h \cdot \mu_1^2} \quad (3)$$

errechnen, die somit im Vergleich zur Betrachtung bei Vernachlässigung der Anströmgeschwindigkeit (d. h. v_a in Gl. (2) = 0; gilt z.B. für konventionelle Schlitzpässe mit «strömungsdissipierendem» Strömungsmuster) um ca. 20 % grösser ist.

Angemerkt wird ergänzend, dass die Fließgeschwindigkeit im Schlitzbereich nicht linear von der Beckenfallhöhe (Δh) abhängt (vgl. Gl. [2]), die Leistungsdichte (p_D) als Ersatzparameter für die Turbulenz hingegen schon. Eine beispielhafte Erhöhung der Beckenfallhöhe von $\Delta h = 0.15$ m auf $\Delta h = 0.20$ m erhöht die Fließgeschwindigkeit unter Vernachlässigung von v_a um nur ca. 15 %, die Leistungsdichte als Ersatzparameter für die Turbulenz nimmt hingegen um 33 % zu. Dies lässt vermuten, dass die Ausprägung der Turbulenz, deren Verteilung innerhalb der Becken des Rundbeckenpasses positiv beurteilt wird (Kap. 3.1), für die Passierbarkeit eine grössere Rolle spielt als die Fließgeschwindigkeit.

4. Biologische Wirkungskontrollen

Die Funktionalität einer Fischaufstiegshilfe kann anhand der Wirksamkeit (Effektivität), der Leistungsfähigkeit (Effizienz) und der Selektivität in Bezug auf die wandernden Fische beurteilt werden (Details vgl. Zaugg et al., 2017). Die Wirksamkeit wird anhand der absoluten Aufstiegszahlen eingeschätzt. Typischerweise werden hierfür Zählmethoden (Reuse, Zählkammern, Video u. a.) eingesetzt. Die Leistungsfähigkeit basiert auf relativen Häufigkeiten. Gemessen wird der Anteil der Fische, der die Aufstiegshilfe findet, in sie ein schwimmt und sie passiert. Zudem wird der Zeitbedarf für das Auffinden und Passieren erfasst. Hierfür werden Markierungsmethoden eingesetzt. Die Selektivität schliesslich beschreibt, ob alle Arten und Längenglassen

wandern können. Geeignet sind Zähl- und Markiermethoden.

Eine Aufstiegskontrolle liefert dann aussagekräftige Resultate, wenn die relevanten Funktionsparameter mit der geeigneten Methodik in den relevanten Jahreszeiten und über eine ausreichend lange Zeitdauer erhoben wurden. Zudem sind Angaben zu Artzusammensetzung und Häufigkeiten der Fische im Unterwasser, der Verlauf von Abfluss und Wassertemperatur, Betriebsdaten zu den Turbinen und Wehrfeldern und allenfalls weitere Daten nötig, um die Aufstiegsresultate interpretieren zu können. Schliesslich gehören eine sorgfältige Datenauswertung und eine objektive Bewertung anhand klar definierter Kriterien dazu.

Insgesamt lagen sieben Aufstiegskontrollen an sechs RBP in Deutschland aus den Jahren 2002 bis 2011 vor (Tabelle 2). Sie wurden unabhängig vom Hersteller durchgeführt. Es handelt sich um je zwei Anlagen der Typen C und H, einen Typ J und einen kombinierten RBP aus den Typen C und H (Bild 7). Sämtliche Kontrollen wurden, wie damals üblich, ausschliesslich mittels Zählmethoden (Reuse oder Zählkammer) durchgeführt.

4.1 Wirksamkeit

Der Standort mit den meisten pro Tag gefangenen Fischen war Bahnitz an der Havel (Typ H). Im Mittel wurden dort während der Erhebung im Mai etwas mehr als 600 Fische pro Fangtag gefangen. An der Weser in Drakenburg (Kombination Typ C und H) und Hameln (Typ C) wurden je während zweier Sommerhalbjahre durchschnittlich etwa 250 bzw. 180 Fische pro Fangtag gefangen. An den anderen Anlagen waren die Fangzahlen deutlich kleiner.

An drei der sechs Standorte wurden Fangeinrichtungen mit Kehlen aus Maschendraht, Kunststoffstäben oder Lochblech eingesetzt. Bei diesen Anlagen verliessen wahrscheinlich viele eingeschwommene Fische die Fanganlage, bevor sie gezählt werden konnten. Die Fangeinrichtungen an den anderen drei Standorten waren mit Kehlen aus Netzmaterial ausgestattet. Sie gewährleisteten einen besseren Rückhalt der Fische, wobei die Konstruktionsart bzgl. Länge, Öffnung und Maschenweite nur teilweise bekannt war und nicht den Empfehlungen nach Wilmsmeier et al., (2018) entsprach. Zusätzlich treten bei Kehlen Scheueffekte auf, was bedeutet, dass nicht alle aufsteigenden Fische in die Fangeinrichtung hineinschwammen.

Bei keiner der Anlagen wurde eine Aussage zur Auffindbarkeit des RBP ge-

macht oder sie wurde als unklar bzw. ungenügend eingestuft. Folglich ist unbekannt, ob die Aufstiegszahlen auch eine ungenügende Auffindbarkeit des RBP widerspiegeln. Hinzu kamen teilweise weitere Einschränkungen wie Bauarbeiten im Gewässer, Vandalismus, technische Probleme usw. Die erfassten Aufstiegszahlen an allen Anlagen sind daher als Minimalwerte für die tatsächlich über den RBP aufgestiegene Anzahl Fische anzusehen. Sie lassen keine Aussage zur Wirksamkeit der Anlagen zu. Folglich ist auch eine vergleichende Auswertung über die verschiedenen RBP-Typen nicht möglich.

4.2 Leistungsfähigkeit

Die eingesetzten Zählmethoden lassen keine Aussagen zur Effizienz zu. Es ist also nicht bekannt, wie viele der Fische, die den Einstieg zum RBP fanden, auch einstiegen, wie viele davon oben ankamen und wie viel Zeit sie für die gesamte Passage benötigten.

4.3 Selektivität

Bezüglich der Artenselektivität liefern die Untersuchungen deutlichere Ergebnisse. Gemäss dem Vergleich der im Unterwasser gefangenen mit denen in der Zählrichtung erfassten Arten wies die Mehrheit der Anlagen keine offensichtliche Artenselektivität auf – zumindest, wenn man die in den Zählrichtungen gefangenen Arten mit lediglich Einzelfunden mit berücksichtigt. Bei drei Anlagen war die im RBP nachgewiesene Artenzahl höher als diejenige im Unterwasser. In Bahnitz betrug der Anteil der nachgewiesenen Arten lediglich gut 60 %. Dort wurde aber nur während eines Monats gezählt. In Rothen, wo nur sehr wenige Fische aufstiegen, lag die Quote 2005 bei 50, 2007 bei 20 %.

Eine negative Selektion auf kleine Fische kann aufgrund der Untersuchungsergebnisse mit hoher Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden. Hinsichtlich der grossen Fische hingegen ist dies aufgrund der naturgemäss eher geringen Fangzahlen derzeit nicht möglich.

4.4 Fazit

Die wenigen durchgeführten Aufstiegskontrollen lassen eine gesicherte Beurteilung der Wirksamkeit und der Leistungsfähigkeit von RBP nicht zu. Die teils hohen Aufstiegszahlen und das Fehlen einer Selektivität auf Art und Kleinfische deuten aber auf ein grosses Potenzial des RBP hin, das jedoch mit umfassenden und standardisierten durchgeführten Wirkungskontrollen noch nachgewiesen werden muss.



Gewässer			Rundbeckenfischpass					Erhebungsmethodik	
Name (Ort)	Fisch-region	Breite am Standort	Typ	Becken-zahl	Inbetrieb-nahme	Detailangaben	Auffindbarkeit	Fangeinrichtung	Maschen-weite
Havel (Bahnitz)	Brachs-menregion	60 m	H	5	2005	Gefälle 4.0 %; Beckenlänge 3.60 m, Beckenbreite 2.50 m, Schlitzbreite 41–60 cm; raue Sohle	Ungenügend: Positionierung Einstieg sehr günstig, aber Leitströmung zu gering	Kombination Kastenreuse/ Zählkammer	8–9 mm
Mildenitz (Borkow)	Brachs-menregion	10 m	J	17	2006	Gesamte Höhen-differenz 2.4 m, Gefälle 8.3 %. Länge 46 m (Teil mit Becken 29.68 m), Becken-breite 1.45–1.5 m; raue Sohle	Keine Angaben	Netzreuse	6–8 mm
Mildenitz (Rothen)	Brachs-menregion	10 m	C	9	2005	Gesamte Höhen-differenz 1.2 m. Schlitzbreite 10–15 cm	Keine Angaben	Netzreuse Netzreuse	6–8 mm 6–8 mm
Weser (Draken-burg)	Barben-region	150 m	C und H kombi-niert	34 (davon 7 als Typ H)	2000	Schlitzbreite unten 12.5 cm, oben 25 cm; Wasser-spiegeldifferenz 15 cm, max. Fliessgeschwin-digkeit 2.2 m/s; raue Sohle	Keine Angaben	Kastenreuse	14–16 mm
Weser (Hameln)	Barben-region	50 m	C	18	2002	Gesamte Höhendif-ferenz 2.0 m. Länge 19 m, Beckenbreite 2.0 m, Schlitzbreite unten 12.5 cm, oben 25 cm, Wasserspie-geldifferenz 19.3–20.0 cm; max. Fliessge-schwindigkeit 2.0 m/s; Bemessungsabfluss 300 l/s; raue Sohle	Keine Angaben	Fangkammer	10 mm (Loch-blech)
Oker (Braun-schweig)	Barben-region	20 m	H	20	2003	Gesamte Höhendif-ferenz 2.1 m, Gefälle 4.4 %. Länge 67 m, Beckenlänge 2.26 m, Beckenbreite 1.4 m, Schlitzbreite unten 12–14 cm, oben 19–24 cm, Was-serspiegeldifferenz 10–15 cm; max. Fliessgeschwindig-keit 1.3 m/s; Bemessungsabfluss 156 l/s	Unklar; bei erhöhten Abflüssen wird zur Verbesse-rung der Leit-strömung eine zusätzlicher Abfluss von ca. 100 l/s dotiert	Fangkammer	10 mm (Loch-blech)

Tabelle 2: Durchgeführte biologische Wirkungskontrollen bei RBP.

			Ergebnisse				Bemerkungen	Literatur
Kehle	Zeitraum	Fangtage	Häufigkeit	Artenselektivität	Längen-selektivität	Unterwasser		
Netzgarn	Mai	30	18 433 Fische	13 Arten, davon 7 Arten mit mehr als 10 Individuen. Fehlende Arten in der Befischung nur als Einzelfunde nachgewiesen (Ausnahme Bitterling).	Nicht auf kleine Fische; auf grosse Fische (bis 60 cm) unklar, da nur wenige gefangen.	18 Arten, davon 11 Arten mit mehr als 10 Individuen	Diverse Verbesserungen der Fangeinrichtung während der erste 10 Tage; danach einsatzfähig, aber nicht voll fangfähig. Bauarbeiten	<i>Wolter und Menzel, 2011</i>
Netzkehle	Anfang April–Mitte Juni, Ende Oktober–Anfang November	23 (alle 2 Wochen während 72 Std.)	1125 Fische	12 Arten, davon 7 Arten mit mehr als 10 Individuen. Keine Selektivität	bis 65 cm	12 Arten, davon 5 Arten mit mehr als 10 Individuen	Funktionsindex nach <i>Ebel et al.</i> , (2006): gut (Klasse B)	<i>Waterstraat et al.</i> , 2007
Netzkehle	2005: Mitte April–Ende Mai, Ende Oktober–Anfang November	16 (alle 2 Wochen während 48 oder 72 Std.)	54 Fische	8 Arten, davon 2 Arten mit mehr als 10 Individuen	bis 25 cm	12 Arten, davon 4 Arten mit mehr als 10 Individuen	Probleme mit der Reuse (Vandalismus)	<i>Waterstraat, 2005</i>
Netzkehle	2007: Mitte April–Ende Mai, Ende Oktober–Anfang November	10 (alle 2 Wochen während 72 Std.)	51 Fische	6 Arten, davon 2 Arten mit mehr als 10 Individuen	bis 22 cm	Keine		<i>Waterstraat, 2007</i>
Maschen-draht, Schlupf-loch 30x30 cm, Länge 1.25 m	2002: Ende Mai–Ende Oktober; 2003: Ende März–Ende Oktober	337	83 897 Fische	24 Arten, davon 24 Arten mit mehr als 10 Individuen	keine detaillierten Angaben, jedoch Hinweis auf 23.6 % Jungfische (< 10 cm)	Keine	Probleme mit der Reuse (zeitweise Diebstahl von Fischen)	<i>Wieland und Nöthlich, 2003</i>
über-lappende 20 mm lange Kunst-stoff-finger	April–November (2 Jahre)	546	100 559 Fische	25 Arten, davon 19 Arten mit mehr als 10 Individuen	über 70 cm (relativ viele grosse Fische)	29 Arten, davon 16 Arten mit mehr als 10 Individuen	Bauarbeiten, vermehrt Abfluss über das Wehr	<i>Rathcke, 2004</i>
Lochblech	Mitte April–Anfang Juli	23	883	17 Arten, davon 7 Arten mit mehr als 10 Individuen; keine offensichtliche Selektivität	bis 51 cm; keine offensichtliche Selektivität	4 Arten, davon 1 Art mit mehr als 10 Individuen	Probleme mit der Reuse (Verstopfung)	<i>NLWK, 2004</i>

5. Bemessungsempfehlung

Die Herleitung einer abschliessenden Bemessungsempfehlung für RBP kann erst gelingen, wenn grundlegende Fragen zur Passierbarkeit in Abhängigkeit der Schlitz- und Beckengestaltung und der damit verbundenen Hydraulik beantwortet sind. Solange dies nicht der Fall ist, sollte eine Dimensionierung auf der sicheren Seite erfolgen.

Schlitzbreite s

In DWA-M 509 (DWA, 2014) werden die geometrischen Grenzwerte i.d.R. über die Masse und Proportionen von Fischen abgeleitet. So soll die Breite eines Schlitzes mindestens der dreifachen maximalen Fischbreite ($s = 3 \times D_{\text{Fisch}}$) entsprechen. Bei bisher realisierten Rundbeckenfischpässen wurde die mittlere Schlitzbreite oft kleiner als $3 \times D_{\text{Fisch}}$ gewählt und somit, als gewünschter «Nebeneffekt», gleichzeitig der Abfluss durch den Pass verringert. Der Wahl der kleineren Schlitzbreite liegt die Annahme zugrunde, dass Fische die ausgerundeten Schlitzlöcher des RBP in kleinerem Abstand zu den Berandungen durchschwimmen als bei eckigen Schlitzlöchern (Kap. 2.1). Solange diese Annahme nicht bestätigt ist, sollte die Schlitzgestaltung so gewählt werden, dass die Empfehlung $s = 3 \times D_{\text{Fisch}}$ eingehalten wird. Während der biologischen Wirkungskontrolle kann dann geprüft werden, ob auch die Einstellung kleinerer Schlitzbreiten ohne selektive Wirkung möglich ist (vgl. Kap. 2.2).

Beckengrössen L_B bzw. D_B

Aus den wenigen vorliegenden biologi-



Bild 11: Meerforelle im Zählbecken der Moselstaustufe Koblenz/Rheinland-Pfalz (Foto: J. Schneider).

schen Wirkungskontrollen lässt sich bei den bisher realisierten RBP mit vergleichsweise kleinen Becken (Beckendurchmesser z. B. in der Barbenregion $D_B = 2.0$ m) eine grössenselektive Wirkung auf grosse Fische weder nachweisen noch ausschliessen (Kap. 4.3). Es wird daher empfohlen, als lichte Beckenlänge vorerst die dreifache Körperlänge der grössten zu berücksichtigenden Fischart $L_B = 3 \times L_{\text{Fisch}}$ zu wählen. Beim Typ C ist für L_B der Beckendurchmesser D_B anzusetzen. Unter Berücksichtigung der Fischgrösse nach Tabelle 15, DWA-M 509 (DWA, 2014), ergeben sich somit z. B. für die Zielarten Bachforelle und Äsche Beckenlängen bzw. -durchmesser von 1.5 m, für die Barbe von 2.1 m und für den Lachs von 3.0 m. Aus fertigungstechnischen Grün-

den ist der Beckendurchmesser beim Typ C momentan auf maximal 2.4 m begrenzt. Somit kann die Empfehlung für den Lachs und vergleichbar grosse Arten nicht eingehalten werden. Da vermutet wird, dass die Beckendimensionen bei entsprechender Turbulenzverteilung nur vergleichsweise wenig Einfluss auf die Passierbarkeit für grosse Fische haben (vgl. Box), sollten zwei bis drei RBP des Typs C auch beim Vorkommen grosswüchsiger Arten als Pilotanlagen realisiert und im Rahmen fundierter biologischer Wirkungskontrollen intensiv überprüft werden. Sollten grössenselektive Wirkungen nachgewiesen werden, müsste die Anwendung des Typs C auf Zielfischarten mit $L_{\text{Fisch}} \leq 80$ cm begrenzt werden.

Fliesstiefe h_u

Für die Fliesstiefe h_u unterhalb der Schlitzlöcher wird empfohlen, die in Tabelle 43 in DWA (2014) für konventionelle Schlitzpässe publizierten Bemessungswerte einzuhalten. Somit ergibt sich z. B. für die Bachforelle eine Mindestwassertiefe H von $h_u = 0.5$ m, für den Lachs von 0.8 m.

Beckenfallhöhe

(Wasserspiegeldifferenz) Δh

Bisher realisierte RBP (Typ C) wiesen meist ein Verhältnis von Fallhöhe Δh zu Beckendurchmesser D_B von $\Delta h/D_B = 1:10$ und damit eine Rampenneigung von 20% auf. Eine Ausnahme bilden die sehr kleinen Rundbeckenfische mit $D_B = 1.0$ m und $\Delta h = 15$ cm (Rampenneigung 30%), die primär in der Forellenregion zum Einsatz kommen. Sie sind aufgrund ihrer kleinen Schlitzbreiten nur dann zu empfehlen, wenn ein häufiger Unterhalt sichergestellt ist. Das Verhältnis von $\Delta h/D_B = 1:10$ gilt auch für

Sind die Empfehlungen zur Beckengeometrie von Schlitzpässen stichhaltig?

Die gängigen Empfehlungen zur Beckengeometrie (z. B. lichte Beckenlänge $L_B = 3 \times L_{\text{Fisch}}$ und lichte Beckenbreite $B_B \approx 0.75 \times L_B$; DWA, 2014) basieren auf Überlegungen zur Fischbiometrie und zu Bewegungsmustern. Hierbei wurde angenommen, dass Fische aufgrund ihrer «relativ starren Körperachse» dazu neigen, ihre Bewegungsrichtung beizubehalten und nur geradlinige Schwimmanöver problemlos vollziehen können (DWA, 2014). Aus diesen Überlegungen und zur Einhaltung der Grenzwerte für die Leistungsdichte (Ersatzparameter für die Turbulenz) resultieren vergleichsweise grosse Becken.

Die Annahme einer relativ starren Körperachse wird an dieser Stelle hinterfragt (s.a. Bild 11). So zeigen z. B. Videoaufnahmen der Universität für Bodenkultur (BOKU), dass z. T. über 1 m grosse Fische in der Lage sind, sich in einem 0.5 m breiten Tunnel umzudrehen, ohne die Tunnelwände zu berühren (Mitteilung Helmut Mader per E-Mail vom 16.05.2019). Dies legt die Vermutung nahe, dass die vergleichsweise grossen Becken primär zur Gewährleistung einer ausreichend geringen Turbulenz und weniger als Manövrierraum notwendig sind. Vor dem Hintergrund dieser Beobachtungen stellt sich die Frage, ob von den Geometrieempfehlungen abgewichen werden kann, wenn die Leistungsdichte in den Becken vergleichsweise niedrig ist (wie z. B. beim E-Nature-Fischpass) oder sich die Turbulenz, deren Verteilung im Becken über die Leistungsdichte nicht abgebildet werden kann, wie beim RBP auf die Beckenrandbereiche konzentriert.

den vergleichsweise gut untersuchten RBP am Standort Pfortmühle in Hameln an der Weser, der der Barbenregion zuzuordnen ist ($D_B=2.0\text{ m}$, $\Delta h=20\text{ cm}$). Trotz der relativ grossen Fallhöhe liegt dort offenbar keine Selektivität auf kleine Fische vor (Kap. 4.3). Mögliche Gründe dafür sind der im Vergleich zur Leistungsdichte geringe Einfluss der Fallhöhe auf die Fliessgeschwindigkeit im Schlitz, die positiv beurteilte Turbulenzverteilung innerhalb der Becken (Kap. 3.1), die systematische Anordnung der «Sohlenhalbschalen» (Kap. 2.2) und die nur kurze Strecke, die Fische beim Durchschwimmen der Schlitz bis zur nächsten Ruhezone gegen hohe Fliessgeschwindigkeiten zurücklegen müssen (Bild 12). Aufgrund des aktuellen Kenntnisstandes wird empfohlen, ein Verhältnis $\Delta h/D_B \leq 1:10$ einzuhalten.

Weicht die Fallhöhe bzw. die daraus resultierende Fliessgeschwindigkeit deutlich von den Empfehlungen z. B. nach DWA-M 509 (2014) ab, ist eine fundierte biologische Wirkungskontrolle durchzuführen, um allfällige negative Effekte zu erkennen und bei zukünftigen Projekten zu vermeiden.

Variantenkombinationen

Um den zur Verfügung stehenden Raum möglichst gut auszunutzen, können die Ausführungsvarianten miteinander kombiniert werden. Da alle Varianten über eine ausgeprägte Randströmung an den Beckenaussenseiten verfügen, bleibt auch der

durchgehende Strömungspfad bei Kombination der Bautypen erhalten – ebenso die grossen strömungsberuhigten Bereiche. Bei bisher realisierten Kombinationen wurden die Schlitzbreiten und die Fliesstiefen bei allen Becken gleich gewählt, womit sich auch an allen Schlitz die gleiche Fliessgeschwindigkeit einstellt. Die Becken wurden so dimensioniert, dass der Fliessweg entlang der Beckenränder bei allen Becken gleich lang (vgl. Bild 1) und somit auch die Energieumwandlung durch Wandreibung und Turbulenz etwa gleich gross ist. Aus diesem Grund besitzt der Typ H eine gestreckte Beckenform, der Typ J ist dagegen kompakter. Die Beckenvolumina wurden unabhängig von der Ausführungsvariante etwa gleich gewählt. Dieses Vorgehen erscheint plausibel und sollte daher auch bei zukünftigen Projekten beibehalten werden.

6. Ausblick und Schlussfolgerungen

Die Linienführung und das Längsgefälle des RBP sind insbesondere wegen der Kombinationsmöglichkeiten der verschiedenen Ausführungsvarianten sehr variabel und an die lokalen Gegebenheiten anpassbar. Zudem sind der Platzbedarf und die Baukosten aufgrund der kompakten Bauweise oft geringer als bei konventionellen Schlitzpässen. Die Strömungsverhältnisse lassen vorteilhafte Bedingungen für die Passierbarkeit des RBP erwarten. Die wenigen bis-

her durchgeführten Aufstiegskontrollen erlauben jedoch noch keine abschliessende Beurteilung der Funktionsfähigkeit. Die teils hohen Aufstiegszahlen und das Fehlen einer Selektivität auf Art und Kleinfische deuten aber zusammen mit den gestalterischen Vorteilen, den vergleichsweise geringen Baukosten und den Anpassungsmöglichkeiten nach Bauabschluss auf ein grosses Potenzial dieser Bauweise hin. Fundierte Bemessungsansätze fehlen aber, und die Bauweise wird in gängigen Regelwerken wegen nur weniger Untersuchungen nicht ausreichend berücksichtigt.

Hauptkritikpunkt an den bisherigen Anlagen war häufig die relativ kleine Dimensionierung, die nicht den geometrischen Grenzwerten gängiger Regelwerke (z. B. DWA, 2014) entspricht. Diese empfehlen als Manövrierraum für grosse Fische und zur Einhaltung der Grenzwerte für die Leistungsdichte (Ersatzparameter für die Turbulenz) vergleichsweise grosse Becken. Da sich die Turbulenz beim RBP auf die Beckenrandbereiche konzentriert und der Grossteil des Beckens sehr turbulenz- und querströmungsarm ist, könnten bei dieser Bauweise auch kleinere Becken grossen Fischen ausreichend Manövrierraum bieten.

Die biologischen Wirkungskontrollen können diese These jedoch aufgrund der naturgemäss eher geringen Fangzahlen grosser Fische nicht abschliessend bestätigen (Kap. 4.3). Es wird daher empfohlen, RBP nach dem beschriebenen Bemessungsansatz zu bauen, der sich an den Empfehlungen für konventionelle Schlitzpässe nach DWA (2014) orientiert. Um die empfohlenen Bemessungsansätze hinsichtlich der Funktionsfähigkeit weiter abzusichern, müssen die Anlagen modular geplant und durch intensive biologische Wirkungskontrollen überprüft werden.

Ergänzend wird empfohlen, zwei bis drei Pilotanlagen des Typs C an Gewässern mit grosswüchsigen Arten (z. B. Seeforelle, Hecht, Wels) zu realisieren. Für derart grosse Fische können die geometrischen Empfehlungen ($D_B=3 \times L_{Fisch}$) bei diesem Typ bisher aus fertigungstechnischen Gründen nicht eingehalten werden (Kap. 5). Solche Anlagen erlauben in Kombination mit einem intensiven biologischen Monitoring, die offenen Fragen hinsichtlich einer möglichen Selektivität auf grosse Fische abschliessend zu beantworten. Bei zeitnah vorliegenden, positiven Ergebnissen könnten die mit dem System verbundenen finanziellen Einsparungen noch im Rahmen der Umsetzung des rev. GSchG bis 2030 nennenswert genutzt werden.

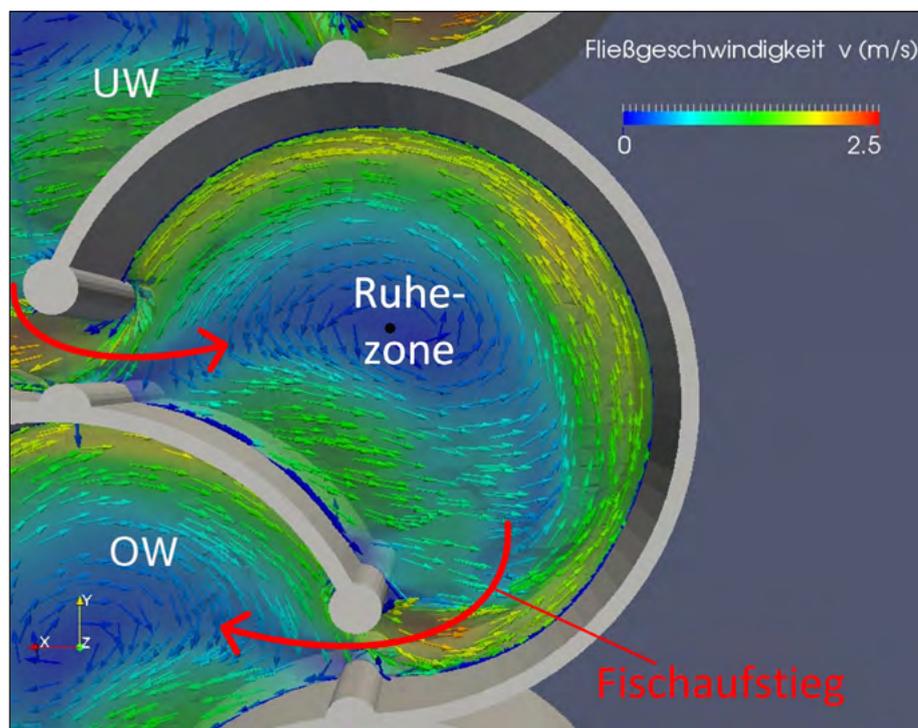


Bild 12: Schwimmweg von Fischen (rote Pfeile) bei der Passage der Schlitz eines Typs C (OpenFOAM®-Simulation LES-Methode, oberflächennahe Geschwindigkeit, UW = Unterwasser, OW = Oberwasser; Quelle: TU Dresden/IWD).

Danksagung:

Die Autoren danken Dr. *Martin Henning* (Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe), Dr. *Carl Robert Kriewitz* (BKW Energie AG, Bern) sowie Dr. *Armin Peter* (FishConsulting, Olten) für die Hinweise und kritischen Anmerkungen.

Literatur:

Aigner, D. (2016): Der Schlitzpass–Ausfluss- oder Überfallströmung. Wasserbauliche Mitteilungen Heft 57, TU Dresden.

Aigner, D., Bollrich, G. (2015): Handbuch der Hydraulik, Beuth, 2015, S. 334 ff, Berlin.

Bammatter, L., Baumgartner, M., Greuter, L., Haertel-Borer, S., Huber Gysi, M., Nitsche, M., Thomas, G. (2015): Renaturierung der Schweizer Gewässer: Die Sanierungspläne der Kantone ab 2015. Bundesamt für Umwelt, BAFU, 13 S.

DWA (2014): Merkblatt DWA-M 509. Fischaufstiegsanlagen und fischpassierbare Bauwerke– Gestaltung, Bemessung, Qualitätssicherung. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.: 334 S. Stand: korrigierte Fassung Februar 2016.

Ebel, G., Fredrich, F., Gluch, A., Lecour, C., Wagner, F. (2006): Methodenstandard für die Funktionskontrolle von Fischaufstiegsanlagen. Bund der Ingenieure für Wasserwirtschaft, Abfallwirtschaft und Kulturbau (BWK) e.V., 115 S.

Guittou, D. E. (1964): Two-dimensional Turbulent Wall Jets over Curved Surfaces, Department of Mechanical Engineering, McGill University, Montreal.

Helbig, U., Aigner, D., Stamm, J. (2016): Hydraulik der Schlitzöffnungen bei beckenartigen Fischaufstiegsanlagen. Bautechnik 93 (2016), Heft 5, Ernst & Sohn, Berlin.

IWD (2016): Hydraulische Untersuchung der Rundbeckenpassanlage Höxter/Godelheim, Forschungsbericht 2014/08 TU Dresden, Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik (IWD), Dresden, 2016, 123 S.

Larinier, M. (1992): Passes à bassins successifs, prébarrages et rivières artificielles. Bull. Fr. Pêche Piscic., 326/327, p. 45–72

NLWK(2004): Funktionskontrolle Mäanderfischpass an der Oker-Mühle in Rothemühle (LK Gifhorn). Aller-Oker-Lachs-Gemeinschaft (AOLG), Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft und Küstenschutz (NLWK)–Betriebs-

stelle Süd, Niedersächsisches Landesamt für Ökologie (NLÖ)–Dezernat Binnenfischerei, 16 S.

Rathke, P.-C. (2004): Überprüfung der Funktionsfähigkeit des Mäanderfischpasses im Wasserkraftwerk Pfortmühle (Hameln). Stadt Hameln, 49 S.

Rajaratnam, N. (1976): Turbulent Jets, Elsevier Science, 1976.

Rodney, J. S. (1972): Flow Patterns in Lakes and Reservoirs–A theoretical and experimental study of several aspects of jet-forced reservoir circulations. University of London, Faculty of Engineering, London.

SRF (2018): Todesfallen für Fische–Sanierung der Kraftwerke kostet bis zu 5 Milliarden. Schweizer Radio und Fernsehen. <https://www.srf.ch/news/schweiz/todesfallen-fuer-fische-sanierung-der-kraftwerke-kostet-bis-zu-5-milliarden-franken>, Download am 21.06.2019.

Waterstraat, A. (2005): Nachweis der Funktionsfähigkeit der Fischaufstiegshilfen Vorbeck/Warnow, Rothen/Mildenitz und Dobbartin/Mildenitz für Fische und Zoobenthos. Staatlichen Amt für Umwelt und Natur Schwerin, 33 S.

Waterstraat, A., Renner, K., Blohm, J. (2007): Effizienzkontrolle am Mäanderfischpass Borkow in der Mildenitz (einschliesslich Zusatzuntersuchung am Mäanderfischpass Rothen). Staatliches Amt für Umwelt und Natur Schwerin, 30 S.

Wieland, S., Nöthlich, I. (2003): Funktionskontrolle Mäanderfischpass Drakenburg/Weser. Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Auftraggeber: Wasser- und Schifffahrtsamt Verden, BfG-1400, 20 S.

Wilmsmeier, L., Schölzel, N., Peter, A. (2018): Fischwanderung: Kontrollinstrument Zählbecken. Die unterschätzte Bedeutung der Reusenkehle. Bundesamt für Umwelt (BAFU), 48 S.

Wolter, C., Menzel, R. (2011): Funktionsüberprüfung der Fischaufstiegsanlagen an den Havel-Staustufen Brandenburg und Bahnitz. Wasser- und Schifffahrtsamt Brandenburg, 22 S.

Zaugg, C., Dönni, W., Boller, L., Guthruf, J. (2017): Massnahmenumsetzung Sanierung Fischgängigkeit. Handbuch Wirkungskontrollen. Bundesamt für Umwelt (BAFU), 82 S.

Zeh Weissmann, H., Könitzer, C., Bertiller, A. (2009): Strukturen der Fliessgewässer in der Schweiz. Zustand von Sohle, Ufer und Umland (Ökomorphologie); Ergebnisse der ökomorphologischen Kartierung. Stand: April 2009. BAFU, Umwelt-Zustand 0926, 100 S.

Verfasser:

Dr.-Ing. *Matthias Mende*
IUB Engineering AG
Belpstrasse 48, CH-3000 Bern 14
E-Mail: matthias.mende@iub-ag.ch

Dr. sc. nat. ETH *Werner Dönni*
Fischwerk
Neustadtstrasse 7, CH-6003 Luzern
E-Mail: werner.doenni@fischwerk.ch

Dr.-Ing. *Ulf Helbig*
Technische Universität Dresden/Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik
D-01062 Dresden
E-Mail: ulf.helbig@tu-dresden.de

Prof. Dr.-Ing. *Klaas Rathke*
Fachgebiet Hydraulik/Quantitative Wasserwirtschaft
Technische Hochschule Ostwestfalen-Lippe
FB 8 – Umweltingenieurwesen und Angewandte Informatik
An der Wilhelmshöhe 44, D-37671 Höxter
E-Mail: klaas.rathke@th-owl.de