

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Article, Published Version

Henning, Martin; Weichert, Roman

Hydraulische Parameter von Schlitzpässen in Bemessung und Bestand

BAWMitteilungen

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/107291>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Henning, Martin; Weichert, Roman (2020): Hydraulische Parameter von Schlitzpässen in Bemessung und Bestand. In: BAWMitteilungen 106. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 7-14.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Hydraulische Parameter von Schlitzpässen in Bemessung und Bestand

Dr.-Ing. Martin Henning, Dr. sc. techn. Roman Weichert,
Bundesanstalt für Wasserbau

Der vorliegende Artikel gibt einen Überblick über die Grundlagen der Hydraulik von Schlitzpässen. Er dient damit als Einführung der weiteren Beiträge der **BAW**-Mitteilungen 106 zu diesem Thema. Hydraulische Bemessungswerte von Schlitzpässen gehen von einem Gleichgewichtszustand aus, der sich an realisierten Anlagen nicht einstellen wird. Die Annahme, dass in jedem Becken identische Werte auftreten, entspricht nicht den tatsächlichen Verhältnissen, da die hydrologischen und geometrischen Randbedingungen sowie zeitliche und räumliche Inkonsistenzen eine Rolle spielen. Somit weichen Bemessungs- und Messwerte voneinander ab. Der vorliegende Artikel stellt auf qualitativer Basis die Unterschiede zwischen Bemessungswerten und tatsächlich auftretenden Werten dar und gibt knappe Empfehlungen zur Beurteilung der Turbulenz in Fischaufstiegsanlagen und zur Vermessung von Bestandsanlagen.

1 Einleitung

Fischaufstiegsanlagen sind gängige Bauwerke, um das Ziel der Wiederherstellung der ökologischen Durchgängigkeit an Querbauwerken zu erreichen. Die Anlagen werden unter der Vorgabe bemessen, dass sie für alle am jeweiligen Standort zu berücksichtigenden Fischarten passierbar sein sollen. Neben den geometrischen Abmessungen spielen für die Bemessung die in der Anlage auftretenden hydraulischen Verhältnisse eine wesentliche Rolle. Die Wahl des Bautyps einer Fischaufstiegsanlage hängt von einer Reihe verschiedener, meist stand-

ortspezifischer Kriterien ab. Insbesondere bei beengten Platzverhältnissen ist der Schlitzpass ein häufig zur Anwendung kommender Bautyp. Das Grundprinzip seiner Konstruktion ist, dass der gesamte Höhenunterschied der Stauanlage zwischen Ober- und Unterwasser in viele kleine Wasserspiegeldifferenzen aufgeteilt wird. Dies geschieht durch eine Aneinanderreihung von Becken, deren Trennwände durch einen Schlitz für Fische passierbar sind.

Die hydraulischen Prozesse in Fischaufstiegsanlagen in Schlitzpassbauweise unterliegen zeitlichen und räumlichen Schwankungen. Diese treten auf, selbst wenn die Randbedingungen, wie z. B. der Ober- und der Unterwasserstand der Stauanlage, und die zeitlichen Mittelwerte konstant sind (dynamisches Gleichgewicht). Das liegt einerseits an der Natur der auftretenden hydraulischen Prozesse, z. B. infolge nicht-periodischer Turbulenz. Andererseits können selbst kleine Unterschiede in der geometrischen Ausbildung der Becken, z. B. infolge von Baulöcherungen im Schlitzbereich, messbare Auswirkungen auf die Beckenhydraulik haben.

Die Bemessung eines Schlitzpasses erfolgt nach hydraulischen und geometrischen Grenzwerten, die sich aus den Anforderungen der Fischfauna ergeben. Zeitliche und räumliche Schwankungen in den Becken werden dabei nicht direkt, sondern durch Sicherheitsbeiwerte berücksichtigt. Es wird daher davon ausgegangen, dass für die größte zu berücksichtigende Gesamtfallhöhe an der Stauanlage (gewöhnlich bei UW_{30}) in allen Becken identische hydraulische Verhältnisse herrschen. Es wird somit vorausgesetzt, dass in der Fischaufstiegsanlage näherungs-

weise Normalabfluss herrscht, welcher in Abgrenzung zur Gerinnehydraulik so definiert ist, dass die zeitlichen Mittelwerte der hydraulischen Parameter an vergleichbaren Punkten in aufeinanderfolgenden Becken gleich sind (siehe auch Rajaratnam et al. 1986). Somit sind Bemessungswerte als stationäre Mittelwerte zu verstehen.

Im Gegensatz zu den Annahmen für die Bemessung sind in der Realität konstante Randbedingungen nicht vorhanden, d. h. Ober- und Unterwasserstände sind ständigen Schwankungen, z. B. infolge veränderter Abflüsse, Kraftwerks- und Wehrsteuerung oder Schleusungen, unterworfen. Ein sich dynamisch verändernder Ober- bzw. Unterwasserstand wirkt in die Anlage hinein. Demzufolge weichen die Wasserspiegeldifferenzen zwischen den Becken innerhalb der Anlage voneinander ab. In der Folge sind auch alle anderen hydraulischen Parameter in der Anlage, wie beispielsweise die Fließgeschwindigkeiten, beeinflusst.

Folgende hydraulische Parameter sind für die Bemessung von zentraler Bedeutung:

- Nominelle Wasserspiegeldifferenz zwischen benachbarten Becken Δh_N , die sich aus der bemessungsrelevanten Gesamtfallhöhe der Stauanlage und der Anzahl der Becken bzw. Schlitzen ergibt (im Folgenden auch als Beckenfallhöhe bezeichnet),
- maximale zeitlich gemittelte Fließgeschwindigkeit v_{\max} ,
- Wassertiefe in den Becken h ,
- Durchfluss der Fischaufstiegsanlage Q .

Dabei sind die Parameter h , Q , v_{\max} keine unabhängigen Variablen, sondern stehen, gemeinsam mit der Schlitzweite s , über die Kontinuitätsgleichung sowie die Parameter Δh_N und v_{\max} durch (z. B. DWA 2014)

$$v_{\max} = \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h_N + v_a^2}; \quad v_a = 0 \quad (1)$$

miteinander in Beziehung, wobei die Anströmgeschwindigkeit v_a in Einklang mit der Bemessungsempfehlung für beckenartige Fischaufstiegsanlagen (DWA 2014) im Weiteren vernachlässigt wird. Die zulässige Beckenfallhöhe Δh_N wird nach Gleichung 1 bestimmt, wobei sich die Bemessungsgeschwindigkeit v_{\max} in einem Schlitzpass an der Fischregion des Gewässers orientiert (DWA 2014). Aus dem Quotienten der bemessungsrelevanten Gesamtfallhöhe und Δh_N ergibt sich die Mindestanzahl der Rie-

gel. Da dieser auf die nächste natürliche Zahl aufgerundet werden muss, sind die nominellen Fallhöhen in der Regel am Ende etwas geringer als nach Gleichung 1.

Um den Bemessungsparametern die tatsächlich in der Fischaufstiegsanlage auftretenden Fließtiefen, Beckenfallhöhen und Fließgeschwindigkeiten gegenüberstellen zu können, werden diese Parameter im folgenden Kapitel 2 charakterisiert. Kapitel 3 gibt Hinweise zur Berücksichtigung von Turbulenz. Hinweise zur hydraulischen Vermessung von Schlitzpässen werden in Kapitel 4 gegeben.

2 Bemessungsrelevante Parameter

2.1 Fließtiefe und Beckenfallhöhe

Für die Bestimmung der Fließtiefe h und der nominellen Beckenfallhöhe Δh_N ist das Wasserspiegelniveau in den Becken relevant. Aus Gründen der Anwendbarkeit bei der Bemessung wird der Wasserspiegel in den Becken als horizontal und eben definiert. Da die Sohle in der Regel ein Gefälle hat, wird von den bemessungsrelevanten Wassertiefen h_{\min} (geringste Fließtiefe) und h_{\max} (größte Wassertiefe) ausgegangen, die sich ebenfalls jeweils auf einen ideal horizontalen Wasserspiegel beziehen. Ein horizontaler Wasserspiegel tritt in Realität nicht auf. Vielmehr zeigen verschiedene Studien, dass die Wasserspiegellagen in einem Becken von einem Minimum unterhalb der oberen Trennwand auf ein Maximum direkt oberhalb der unteren Trennwand ansteigen (z. B. Rajaratnam et al. 1986, Wu et al. 1999, Sokoray-Varga et al. 2015, Bild 1). Somit kommt es, neben den auftretenden temporären Schwankungen, zu räumlichen Unterschieden der tatsächlichen Fließtiefe im Vergleich zum Bemessungswert.

Die Feststellung, dass der für die Bemessung als Vereinfachung angenommene horizontale Wasserspiegel nicht dem realen entspricht, ist besonders für die Bestimmung der Beckenfallhöhen relevant. Wie oben bereits beschrieben, ergibt sich die nominelle Beckenfallhöhe Δh_N mit Gleichung 1 unter Berücksichtigung der fischbiologisch begründeten maximalen Geschwindigkeit, bzw. es wird mit Δh_N und der Differenz der Bemessungswasserstände

des Ober- und Unterwassers die Anzahl erforderlicher Riegel bestimmt. Lokal gesehen ergibt sich die tatsächliche Beckenfallhöhe Δh_R in einem Schlitzpass jedoch aus der Differenz der Wasserspiegel oberhalb und unterhalb einer Trennwand zweier aufeinanderfolgender Becken (Bild 1), wobei wegen der Dreidimensionalität des Wasserspiegels und der Schlitzströmung eine exakte Definition von Δh_R nicht möglich ist.

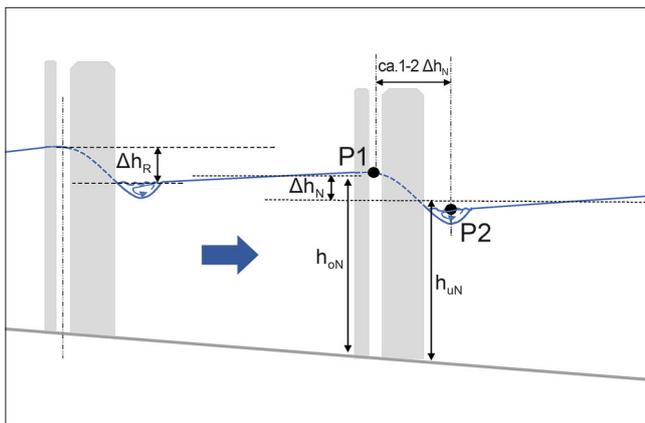


Bild 1: Skizze des Wasserspiegellängsschnitts durch die Becken eines Schlitzpässes

An realisierten Anlagen stellt sich häufig die Aufgabe, anhand von Messungen die Einhaltung der Bemessungswerte zu prüfen. In diesem Kontext ist beispielsweise die Frage der Einhaltung der Beckenfallhöhen aufgrund des Zusammenhangs nach Gleichung 1 von Relevanz. Hierauf wird in Kapitel 4 näher eingegangen.

2.2 Fließgeschwindigkeit und Durchfluss

Die nominelle Beckenfallhöhe Δh_N wird in der Bemessung so gewählt, dass die maximal zulässige Fließgeschwindigkeit v_{\max} nicht überschritten wird (Gleichung 1). Werden die tatsächlich in einem Schlitzpass auftretenden Fließgeschwindigkeiten mit der nach Gleichung 1 ermittelten Geschwindigkeit verglichen, so ergibt sich eine relativ gute Übereinstimmung für den Schlitzquerschnitt (Punkt 1 in Bild 1). Je nach Strömungsmuster können jedoch die Fließgeschwindigkeiten circa ein bis zwei Δh_N unterhalb des Schlitzes noch größere Werte annehmen (Punkt 2 in Bild 1) und dort im zeitlichen Mittel bis zu 20 % höher sein (siehe Beitrag von Höger et al. „Die Variabilität der Fließgeschwindigkeit in Schlitzpässen“ in diesem Heft).

Abweichungen der Ergebnisse von Gleichung 1 können aus der Vernachlässigung der Anströmgeschwindigkeit v_a resultieren. Zudem müsste für eine Betrachtung der tatsächlichen Zusammenhänge auch das am Schlitz auftretende Δh_R herangezogen werden, welches wegen der Auslenkung des Wasserspiegels größer ist als das für die Bemessung zugrunde gelegte Δh_N (Bild 1). Beide Parameter, v_a und Δh_R , interagieren, variieren auch mit dem Strömungsmuster im Schlitzpass (siehe Beitrag von Höger et al. „Auftreten und Ausbildung von Strömungsmustern in Schlitzpässen“ in diesem Heft) und lassen sich wegen der komplexen hydraulischen Randbedingungen nicht eindeutig bestimmen.

Im Beitrag von Höger et al. „Die Variabilität der Fließgeschwindigkeit in Schlitzpässen“ (in diesem Heft) werden weitere Betrachtungen zu den Fließgeschwindigkeiten in den Becken von Fischaufstiegsanlagen in Schlitzpassbauweise angestellt. Grundsätzlich muss beachtet werden, dass es sich bei der vorgestellten Vorgehensweise der Bemessung um ein 1D-Konzept handelt und die Größe und Richtung der maximalen Fließgeschwindigkeiten sowie der Ort ihres Auftretens variieren können.

Bei der Einordnung der Fließgeschwindigkeiten in einen fischökologischen Zusammenhang muss beachtet werden, dass die räumlich über den Schlitzquerschnitt gemittelte Fließgeschwindigkeit definitionsgemäß geringer ist als die lokal auftretende maximale Geschwindigkeit. Die mittleren Fließgeschwindigkeiten im Schlitzquerschnitt bewegen sich meistens in einer Größenordnung von 75 % bis 95 % der maximalen Fließgeschwindigkeit (siehe Beitrag von Höger et al. „Die Variabilität der Fließgeschwindigkeit in Schlitzpässen“ in diesem Heft). Wenn zur Abschätzung der mittleren Fließgeschwindigkeiten im Schlitzquerschnitt (über mehrere Trennwände gemittelt, nicht an jeder einzelnen Trennwand) die Kontinuitätsgleichung verwendet wird, werden gute Ergebnisse erreicht, wenn die Bemessungswassertiefe oberhalb des Schlitzes h_{oN} verwendet wird. Die profilgemittelte Geschwindigkeit wird in Teilen des Schlitzprofils über- bzw. unterschritten, da die Fließgeschwindigkeiten nicht homogen über die Schlitzweite verteilt sind. Dies liegt an den an Schlitzkanten vorhandenen Ablösungen, die im unmittelbaren Nahbereich der Berandung einen Abfall der Fließgeschwindigkeiten zur Folge haben (Bild 2). Strömungsbilösungen an den Schlitzkanten sind wiederum eng verknüpft mit den in den Becken auftretenden

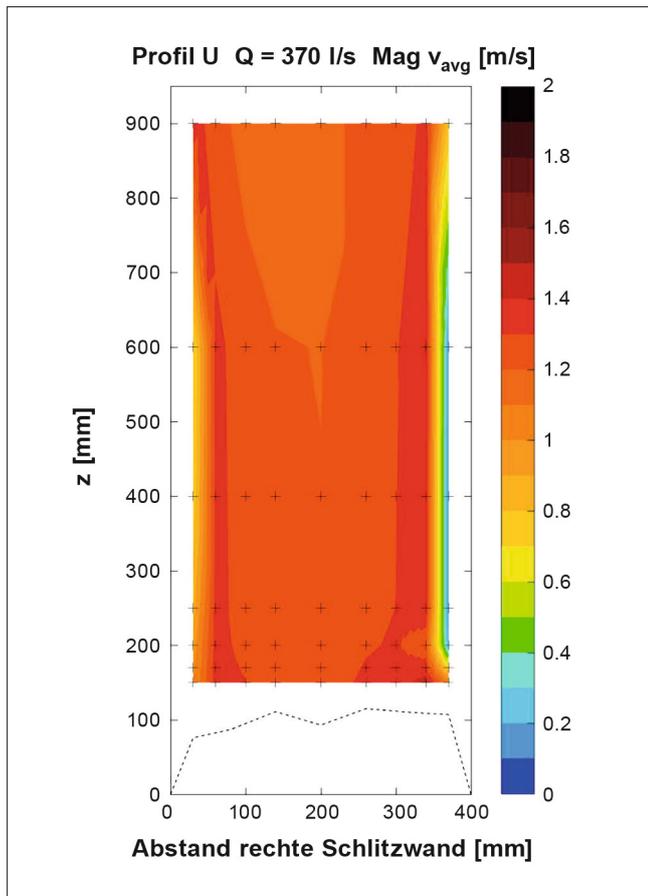


Bild 2: Farbkodierter flächiger Verlauf der zeitlich gemittelten Fließgeschwindigkeiten im Schlitz aus einer ADV-Messung, die Kreuze zeigen den Ort der Messung mittels ADV-Sonde; Messdauer 180 s; die gestrichelte Linie zeigt den Bereich der Sohlrauheit

Strömungsmustern (siehe Beitrag von Höger et al. „Auf-treten und Ausbildung von Strömungsmustern in Schlitz-pässen“ in diesem Heft).

Zu beachten ist, dass sich in den Geschwindigkeitslotrechten im Schlitz durch den druckdominierten Abfluss über die Wassertiefe relativ konstante zeitliche Mittelwerte einstellen (Bild 2). Dies gilt für die gesamte Wassersäule und weitestgehend unabhängig von der im Schlitzbereich vorhandenen Sohlrauheit. Genau genommen zählt auch die Dimensionierung der rauen Sohle (Substrat) in der Fischaufstiegsanlage zu den Bemessungsparametern. Diese hat jedoch insgesamt einen untergeordneten Einfluss auf die Beckenhydraulik (siehe Beitrag Sokoray-Varga et al. „Der Einfluss von Sohl- und Wandrauheit auf die Hydraulik von Schlitzpässen“ in diesem Heft). Die Gestaltung der Sohle muss jedoch zumindest bei der Bestimmung der Wassertiefen berücksichtigt werden.

Die Fließgeschwindigkeiten in den Schlitz der Fischaufstiegsanlage bestimmen auch den Durchfluss der Anlage. Dieser Umstand wird für die Abschätzung des Betriebsdurchflusses in der Dimensionierung durch geeignete Annahmen bezüglich des Durchflussbeiwertes der Schlitzte indirekt berücksichtigt. Hierzu sei auf den Beitrag von Sokoray-Varga et al. „Durchfluss-Fließtiefen-Relation in Schlitzpässen“ (in diesem Heft) verwiesen.

3 Berücksichtigung von Turbulenz

Wie oben ausgeführt, sind Bemessungswerte als Mittelwerte über die Zeit bzw. einen räumlichen Ausschnitt zu verstehen. Geschwindigkeitsschwankungen, die naturgemäß auftreten, werden in der Bemessung nicht berücksichtigt.

Geschwindigkeitsdaten an bestehenden Anlagen werden in der Regel punktuell, beispielsweise mittels Messflügel oder Ultraschallsonden, erfasst, da andere Messverfahren nicht bzw. nur mit großem Aufwand einsetzbar sind. Als Ergebnis einer solchen Messung liegt eine punktuelle Zeitreihe von Geschwindigkeitsdaten vor, von der zu-meist der Mittelwert für die Beschreibung der Strömung herangezogen wird (Bild 3). Es ist wichtig, die Messdauer so zu wählen, dass sich der Mittelwert (und genau genommen die Varianz) der Zeitreihe bzw. deren Verteilungsfunktion mit zunehmender Messdauer nicht mehr nennenswert verändert.

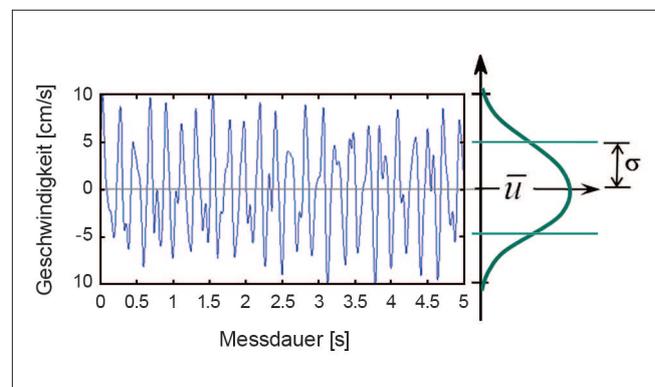


Bild 3: Ausschnitt aus einer Geschwindigkeitszeitreihe in einem gegenständlichen Modell eines Schlitzpasses, Gaußverteilung mit Mittelwert \bar{u} und Standardabweichung σ (nach Sokoray-Varga 2016)

Neben dem Mittelwert der Zeitreihe kann aus den Einzelwerten der Messung die Schwankung der Geschwindigkeit im Messpunkt bestimmt werden. Hierfür können z. B. die Varianz bzw. die Standardabweichung der Zeitreihe oder die turbulente kinetische Energie (TKE) und relative Turbulenz genutzt werden (z. B. Nezu und Nakagawa 1993).

Turbulente Strömungen sind durch interagierende Wirbelstrukturen gekennzeichnet. Demzufolge kann Turbulenz durch nichtsynchrone Punktmessungen nicht hinreichend beschrieben werden (siehe Beitrag von Sokoray-Varga und Weichert „Analyse turbulenter Strömungsprozesse in Schlitzpässen aus Sicht der Fischpassage“ in diesem Heft). Es wird daher zumeist eine statistische Charakterisierung der Intensitätseigenschaften der Turbulenz, wie z. B. in Form der TKE vorgenommen (z. B. Nikora et al. 2003). Der Nutzen dieser statistischen Turbulenzwerte bei der Interpretation bzw. Vorhersage des Fischverhaltens ist weitestgehend unklar. Es liegt die Vermutung nahe, dass das Schwimmverhalten hauptsächlich von der Beschaffenheit des kohärenten, augenblicklich auftretenden Strömungsfeldes abhängt, welches tatsächlich auf den Fisch wirkt (z. B. Odeh et al. 2002, Liao 2007, Tritico und Cotel 2010). Zur vollständigen Beschreibung eines solchen Strömungsfeldes ist zusätzlich die Bestimmung der Eigenschaften Periodizität, Orientierung und Größe der Wirbel erforderlich (z. B. Lacey et al. 2012). Allerdings ist diese Beschreibung nicht trivial, und die notwendige Vermessung kann für gewöhnlich nur unter Laborbedingungen durchgeführt werden.

Somit können in der Praxis momentan nur Intensitätseigenschaften der Turbulenz, wie die TKE, berücksichtigt werden. Deren praktischer Nutzen besteht darin, die Über- bzw. Unterschreitung der mittleren Geschwindigkeit im Verlauf der Zeit abzuschätzen und im Hinblick auf das Leistungsvermögen der Fische bei der Schlitzpassage zu berücksichtigen. Jedoch fehlt hier bisher eine praktisch anwendbare fischökologische Bewertung, selbst wenn allgemein anerkannt ist, dass Fische die Strömungsschwankungen unter bestimmten Umständen zu ihrem Vorteil nutzen können (z. B. Liao 2007). Zudem können Betrachtungen der statistischen Turbulenz aus Zeitreihen von Punktmessungen genutzt werden, um z. B. Bereiche unterschiedlicher Strömungscharakteristik gegeneinander abzugrenzen. Für eine Beurteilung

der tatsächlich auf die Fische wirkenden Turbulenz ist weitere Forschung notwendig.

Weiterhin wird in Merkblatt 509 (DWA 2014) die „Leistungsdichte bei der Energiedissipation“ mit der Gleichung

$$p_D = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot \Delta h}{L_{LB} \cdot h_m \cdot b} \quad (2)$$

berechnet. Da die Dissipation der Strömungsenergie in Wasser überwiegend durch Turbulenz erfolgt, wird dieser Parameter in der Praxis als das „durchschnittliche Turbulenzniveau“ im Becken betrachtet. Dazu ist anzumerken, dass diese 1D-Betrachtung, in der lediglich integrale Größen betrachtet werden, durchaus geeignet ist, um Durchfluss und Beckengröße ins Verhältnis zu setzen und so eine hydraulische Belastung zu bestimmen. Rückschlüsse auf die Turbulenz, die der Fisch beim Durchschwimmen der Becken tatsächlich erfährt, sind jedoch nicht möglich.

4 Hydraulische Vermessung des Bestands

Die hydraulische Vermessung von Fischaufstiegsanlagen kann sehr aufwändig sein, weshalb vor ihrer Durchführung, beispielsweise zur Überprüfung der Grenzwerte, in jedem Fall eine Kontrolle der Geometrie des Schlitzpasses, wie z. B. der Schlitzweite, erfolgen sollte – am besten bereits im Rahmen der Bauabnahme.

Wie bisher vorgestellt, kann es zu natürlichen zeitlichen und räumlichen Abweichungen der hydraulischen Parameter in den Schlitzpassbecken kommen. Zeitliche Abweichungen können normalerweise durch ausreichend lange Messungen ausgeglichen werden. Aber auch bei hinreichend langer Messdauer können in einer Fischaufstiegsanlage unterschiedliche Mittelwerte auftreten. Das gilt sowohl an identischen Orten zu verschiedenen Zeiten als auch zu identischen Zeitpunkten in gleichen Punkten verschiedener Becken. Die zeitlichen und räumlichen Abweichungen der hydraulischen Parameter sind für die hydraulische Vermessung eines Schlitzpasses von Relevanz, da die gemessenen Werte in der Regel von den

Bemessungswerten abweichen werden. Wichtig bei der Beurteilung des gemessenen Wertes ist der Vergleich mit dem entsprechenden Grenzwert, da die Schwankung der hydraulischen Parameter über Sicherheitsbeiwerte bei der Bemessung, zumindest zum Teil, berücksichtigt wird.

Eine genaue Anleitung zur Vermessung abiotischer Parameter in Schlitzpässen kann wegen der Vielzahl standortspezifischer und an die Fragestellung gebundener Faktoren an dieser Stelle nicht erfolgen. Um verwertbare Ergebnisse zu erhalten, ist jedoch zu empfehlen, bei der Planung und Durchführung von Messungen in Schlitzpässen folgende Punkte zu beachten:

- Der Zeitpunkt der Messung muss im Hinblick auf die hydrologischen Randbedingungen so gewählt werden, dass für die Fragestellung repräsentative Werte gemessen werden. Es ist darauf zu achten, dass die Unter- und Oberwasserstände in den für die Bemessung der Fischaufstiegsanlage relevanten Zeiträumen (in der Regel W_{30} – W_{330}) liegen.
- Für die hydraulische Vermessung einer Fischaufstiegsanlage sind der Ort und die Dauer der Messung entscheidend, die wiederum von der Fragestellung abhängen. Die Messungen müssen ausreichend lang sein und an repräsentativen Punkten durchgeführt werden.
- Die notwendige Messdauer hängt von dem Ort der Messung und den Randbedingungen ab und kann pauschal nicht angegeben werden. Als eine Größenordnung kann eine Messdauer von mehreren Minuten betrachtet werden.
- Um eine an einem Schlitz auftretende Beckenfallhöhe zu prüfen, die der nominellen Beckenfallhöhe aus der Bemessung entspricht, müssen die Wasserspiegel an möglichst vielen gleichen Punkten in aufeinanderfolgenden Becken gemessen und zu einem Mittelwert zusammengefasst werden, oder die Messung sollte näherungsweise in Beckenmitte erfolgen. Bei der Bestimmung der Beckenfallhöhen im Bestand muss bedacht werden, dass Abweichungen der Wasserspiegel zwischen einzelnen Becken auch auftreten können, wenn es sich um Sonderbecken, wie z. B. Wendeböden oder lang gezogene kanalartige Strecken, handelt.
- Soll die minimale Fließtiefe in einem Schlitzpass ermittelt werden, so ist in den Becken unterhalb der Trennwände zu messen.

- Beim Vergleich einzelner Becken untereinander müssen die Messungen an gleichen Punkten durchgeführt werden. Dabei ist zu beachten, dass Abweichungen der Messwerte zwischen den einzelnen Becken auch im zeitlichen Mittel in der Größenordnung von 10 % auftreten können, selbst wenn die Anlage korrekt dimensioniert ist.
- Durchflussmessungen sollten in möglichst einfachen Querschnitten, wie z. B. langen Kanalabschnitten oder Zählbecken (ohne Einbau der Fischzähleinrichtung), durchgeführt werden. Wenn im Schlitzpassbecken gemessen werden muss, sollte die Messung der Geschwindigkeiten im Schlitz selbst durch mehrere vertikale Profile zwischen den Schlitzwänden erfolgen. Eine Durchflussmessung in den Becken ist aufgrund der dort auftretenden Rückstrombereiche nicht zu empfehlen.
- Soll statistische Turbulenz ausgewertet werden, muss ein geeignetes Messsystem gewählt werden, welches die Zeitreihe in entsprechender Auflösung aufzeichnet.

Geschwindigkeitsmessungen erfolgen in der Regel mittels Ultraschallpunktsonden (ADV), magnetisch induktiven Verfahren oder Messflügeln. Dabei ist zu beachten, dass systembedingt induktive Verfahren die Strömung nur zweidimensional und Messflügel nur die resultierende Geschwindigkeit erfassen, was für die meisten Anwendungen jedoch ausreichen dürfte. Wasserspiegel können über Schwimmer und Ultraschall- oder Drucksonden erfasst werden. Je nach Anwendungsfall können die Wasserstände in den Becken aber auch mittels Pegellatten hinreichend genau erfasst werden.

Darüber hinaus sind weitere Messmethoden denkbar, für die jedoch nur wenige Erfahrungswerte vorliegen (z. B. ADCP für Geschwindigkeitsmessungen und Durchflussbestimmung, PIV oder PTV zur Bestimmung der Strömungsmuster).

5 Schlussfolgerungen

In Schlitzpässen sind Abweichungen zwischen Bemessungswerten und tatsächlich auftretenden Werten unvermeidbar. Sie können aus verschiedenen Gründen auftreten:

- Bemessung anhand vereinfachter hydraulischer Zusammenhänge: In der Bemessung sind vereinfachende Annahmen bezüglich der Hydraulik notwendig, die in Realität nicht vollständig zutreffen.
- Natürliche Abweichungen von den Bemessungswerten: Der für die Bemessung der Beckenfallhöhen zugrunde gelegte Unterwasserstand UW_{30} tritt als stationäre Randbedingung im Grunde nicht bzw. äußerst selten auf. Das heißt, dass in der Realität in dem maßgeblichen Unterschreitungszeitraum zwischen 30 und 330 Tagen so gut wie immer eingestaute Verhältnisse in der Fischaufstiegsanlage herrschen. Die Beckenfallhöhen sind aus diesem Grund auch bei stationären Randbedingungen nicht homogen über die Anlage verteilt. In der Folge sind auch alle anderen hydraulischen Parameter beeinflusst.
- Abweichungen durch schwankende Randbedingungen: Der angenommene Gleichgewichtszustand der Becken, bei dem in jedem Becken identische Werte auftreten, wird sich in der Anlage nicht einstellen, weil die Ober- und Unterwasserstände ständigen Schwankungen unterliegen, z. B. durch veränderte Abflüsse oder Veränderungen in der Kraftwerks- und Wehrsteuerung oder Schleusungen.
- Abweichungen in Sonderbecken: Die Hydraulik kann bspw. in Ein- und Ausstiegsbecken, Wendebecken, kanalartigen Strecken und Zählbecken und auch in den anschließenden Becken von der eines Standardbeckens abweichen.
- Abweichungen durch Bautoleranzen: Erfahrungen zeigen, dass selbst kleine Abweichungen in der Bauausführung der Becken, vor allem im Schlitzbereich, messbare Veränderungen in hydraulischen Kenngrößen hervorrufen können.

Diese Aspekte sind auch für die Planung und Durchführung hydraulischer Messungen in Bestandsanlagen bzw. bei der Interpretation von Messdaten zu berücksichtigen. Ein besonderes Augenmerk ist dabei auf die Dauer und den Ort der Messung zu legen, um in der turbulenten Strömung den Bemessungswerten entsprechende Mittelwerte zu erhalten. Durch die Wahl geeigneter Messverfahren lassen sich auch Rückschlüsse auf die Turbulenz in den Becken ziehen. Deren Aussagekraft ist jedoch, bedingt durch die Schwierigkeit der Erfassung aller notwendiger Turbulenzparameter und fehlender fischökologischer Hypothesen, derzeit eingeschränkt.

Es ist festzuhalten, dass Abweichungen von den Bemessungswerten an sich keinen Nachteil für die Fische darstellen, solange fischökologisch begründete Grenzwerte nicht überschritten werden. Im Gegenteil: Ein gewisses Maß an Heterogenität und Dynamik der hydraulischen Prozesse in einem Schlitzpass kann sich positiv auf die Fischpassage auswirken.

6 Literatur

DWA (2014): Merkblatt 509, Fischaufstiegsanlagen und fischpassierbare Bauwerke – Gestaltung, Bemessung, Qualitätssicherung. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (Hg.).

Höger, V.; Seidel, F.; Nestmann, F. (2020): Auftreten und Ausbildung von Strömungsmustern in Schlitzpässen. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): BAWMitteilungen Nr. 106, Karlsruhe: BAW, S. 15-22.

Höger, V.; Prinz, F.; von Meltzer, J.; Weichert, R. (2020): Die Variabilität der Fließgeschwindigkeit in Schlitzpässen. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): BAWMitteilungen Nr. 106, Karlsruhe: BAW, S. 23-32.

Lacey, J. R. W.; Neary, V. S.; Liao, J. C.; Enders, E. C.; Tritico, H. M. (2012): The IPOS framework: linking fish swimming performance in altered flows from laboratory experiments to rivers. Special Issue Paper. In: River Res. Applic. 28 (4), S. 429–443. DOI: 10.1002/rra.1584.

Liao, J. C. (2007): A review of fish swimming mechanics and behaviour in altered flows, Philosophical Transactions of the Royal Society B, Vol. 362, pp. 1973–1993.

Nezu, I.; Nakagawa, H. (1993): Turbulence in Open-Channel Flows. In: IAHR Monograph, Balkema Rotterdam, The Netherlands 1993.

Nikora, V. I.; Aberle, J.; Biggs, B. J. F.; Jowett, I. G.; Sykes, J. R. E. (2003): Effects of fish size, time-to-fatigue and turbulence on swimming performance: a case study of *Galaxias maculatus*, J. Fish Biol.; HY63, pp. 1365–1382.

Odeh, M.; Noreika, J. F.; Haro, A.; Maynard, A.; Castro-Santos, T.; Cada, G. F. (2002): Evaluation of the Effects of Turbulence on the Behavior of Migratory Fish, U. S. Department of Energy Bonneville Power Administration Division of Fish and Wildlife, Project Number 2000-057-00.

Rajaratnam, N.; Van der Vinne, G.; Katopodis, C. (1986): Hydraulics of vertical slot fishways, *Journal of Hydraulic Engineering* 112, Nr. 10, S. 909–927.

Sokoray-Varga, B.; Weichert, R.; Nestmann, F. (2015): Untersuchungen zu hydraulischen Berechnungsansätzen von Schlitzpässen, *WasserWirtschaft* 08/08 2015, S. 1–66.

Sokoray-Varga, B. (2016): Detecting flow events in turbulent flow of vertical-slot fish passes. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe. Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG).

Sokoray-Varga, B.; Höger, V.; von Meltzer, J.; Prinz, F.; Weichert, R. (2020): Durchfluss-Fließtiefen-Relation in Schlitzpässen. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): BAWMitteilungen Nr. 106, Karlsruhe: BAW, S. 33-42.

Sokoray-Varga, B.; Kerlin, T.; Prinz, F.; von Meltzer, J.; Musall, M.; Oberle, P.; Weichert, R. (2020): Der Einfluss von Sohl- und Wandrauheit auf die Hydraulik von Schlitzpässen. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): BAWMitteilungen Nr. 106, Karlsruhe: BAW, S. 43-48.

Sokoray-Varga, B.; Weichert, R. (2020): Analyse turbulenter Strömungsprozesse in Schlitzpässen aus Sicht der Fischpassage. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): BAWMitteilungen Nr. 106, Karlsruhe: BAW, S. 59-66.

Tritico, H. M.; Cotel, A. . (2010): The effects of turbulent eddies on the stability and critical swimming speed of creek chub (*Semotilus atromaculatus*), *Journal of Experimental Biology*, Vol. 213(13), pp. 2284–2293.

Wu, S.; Rajaratnam, N.; Katopodis, C. (1999): Structure of flow in a vertical slot fishway, *Journal of Hydraulic Engineering* 125, Nr. 4, S. 351–359.