

~ 15 Sept, 16

# Untersuchungen zur Hydraulik in Rundbeckenpässen

Ulf Helbig, Detlef Aigner, Jürgen Stamm, Rocco Zimmermann

## Zusammenfassung

Der Schlitzpass als Vertreter von beckenartigen Fischeaufstiegsanlagen wird oft beim Bau von Fischeaufstiegsanlagen eingesetzt. Der Rundbeckenpass als Sonderbauweise des Schlitzpasses ist seit Mitte der 1990er Jahre am Markt. Die Technologie des Rundbeckenpasses wurde seitdem erfahrungsbasiert weiterentwickelt. Die für die hydraulische Berechnung zu Grunde gelegten Verfahren entsprachen Standardanwendungen und wurden nun im Rahmen von untersuchungstechnisch begründeten Kriterien verbessert. Typisch sind die mäandrierende Linien- und Strömungsführung mit den charakteristischen Strömungsmustern sowie die Durchströmung der sohlengleichen Schlitzöffnung. Hydraulisch ist eine solche Schlitzdurchströmung eine Einengung des Fließquerschnitts bei gleichzeitigem Rückstau aus dem Unterbecken. Der Beitrag zeigt die Bauformen von Rundbeckenpässen, die aktuellen hydraulischen Untersuchungen sowie die Strömungscharakteristika. Es werden dazu allgemein gültige Ansätze für die Bestimmung der Maximalgeschwindigkeiten sowie des Durchflusses bei Schlitzpässen und somit auch für Rundbeckenpässe angegeben.

## 1 Einleitung

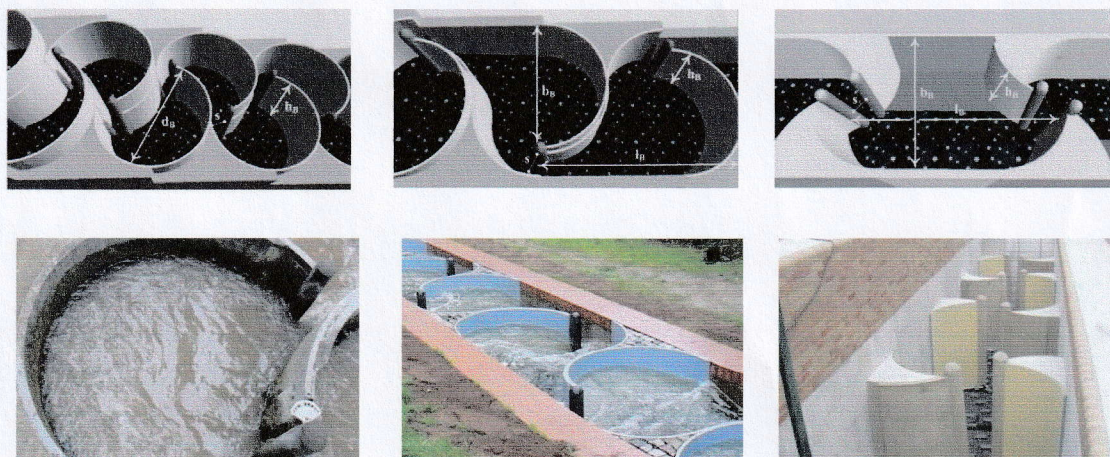
Die ungestörte Durchgängigkeit eines Flusses für aquatische Organismen ist eine der wesentlichen Forderungen der EG-Wasserrahmenrichtlinie (EG-WRRL). Fischeaufstiegsanlagen (FAA) können dazu beitragen, diese Durchgängigkeit wieder herzustellen, wo sie durch menschliche Eingriffe in einem Gewässer unterbrochen wurde. Rundbeckenpassanlagen bieten dabei die Möglichkeit, die Passierbarkeit eines Fließgewässers bei geringem Platzbedarf zu realisieren. Der Rundbeckenpass wird seit Mitte der 1990er Jahre vorrangig in Deutschland und in der Schweiz vertrieben. Derzeit existieren 66 Anlagen, von denen 42 als C-Typ, 15 als J-Typ und 5 als H-Typ (Abb. 1) errichtet worden sind (Stand 03/2016 [Hersteller]). Vier weitere Anlagen bilden Sonderkonstruktionen, die als Misch- oder auch als Turmkonstruktion gebaut wurden (CJ-, Helix-Form, usw.). Auf Grund seiner geometriebedingten mäandrierenden Leitströmungscharakteristik wird er häufig auch als Mäanderfischpass bezeichnet. Die aktuelle Fassung des DWA-Merkblattes DWA-M 509 (2014) führt den Rundbeckenpass unabhängig vom jeweiligen Typ als Sonderbauweise des Schlitzpasses an und weist darauf hin, dass für diese Bauform speziell geeignete Berechnungsverfahren sowie untersuchungstechnisch begründete Bemessungskriterien noch ausstehen (Stand 2014). Seitdem sind durch das Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik der Technischen Universität Dresden zahlreiche Untersuchungen an bestehenden Anlagen in situ, im Labor sowie unter Verwendung von 3d-hydroneumerischen Methoden durchgeführt worden.

## 2 Bauformen

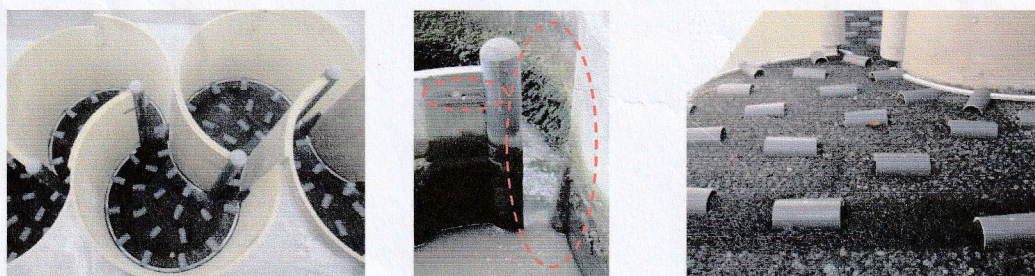
Die Konstruktion basiert auf einer Anordnung aufeinanderfolgender runder Becken, i. d. R. in einem U-förmigen Stahlbetontrog gemäß DIN 1045-2 (2014) bzw. ZTV-W LB 215 (2012). Der Rundbeckenpass kommt hauptsächlich in 3 Bauarten vor, dem C-, J-, und H-Typ (Abb. 1, Tab. 1). Der Typ C ist die am häufigsten umgesetzte Bauart. Er ist für Gefälle zwischen 17 und 30 % entworfen worden und soll v. a. den Bau von Fischeaufstiegsanlagen unter beengten Platzverhältnissen ermöglichen. Der Typ J eignet sich für Gefälle zwischen 8 und 17 %. Der wesentli-



Der Unterschied zum Typ C besteht in der Konstruktion der Becken. Die J-Form ergibt sich aus einer Längsstreckung der C-förmigen Becken. Der Bautyp H ist für Fließgefälle zwischen 4 und 8 % ausgelegt und wird als sogenannter „Halbmäander-Fischpass“ (namensgebend) bezeichnet. Er besitzt eine sehr gestreckte Geometrie und somit die längsten Becken. Die Linienführung ist prinzipiell variabel und an die örtlichen Gegebenheiten anpassbar. Die Beckenelemente bestehen i. d. R. aus GFK-Bauteilen (Abb. 2). Die Verbindung zweier Becken wird mittels sohlengleicher Vertikalschlitzte (Öffnungstyp 3 nach DWA-M 509) hergestellt, die sich bei der aktuellen Bauart trapezartig (V-förmig) zur Sohle hin verjüngen. Die Schlitzbreite kann dabei individuell gestaltet werden.



**Abb. 1** Bauformen des Rundbeckenpasses, links: C-Typ, mittig: J-Typ, rechts: H-Typ



**Abb. 2** Links: Anordnung von GFK-Halbrohren bei einem C-Typ, mittig: „Umlenkrohre“ zur Schlitzweitenregulierung, rechts: Detail Sohlauflaufbau (Hersteller, IWD)

**Tab. 1** Technische Daten des Rundbeckenpasses (Typ C, J und H, Herstellerangaben)

Konstruktionskriterium	C-Typ	J-Typ	H-Typ
Fließgefälle ( $I$ ) [%]	17 – 30	8 – 17	4 – 8
Beckendurchmesser ( $d_B$ ) [m]	1,00 – 2,40	---	---
Beckenlänge ( $l_B$ ) [m]	---	1,50 – 3,50	1,50 – 3,50
Beckenbreite ( $b_B$ ) [m]	---	1,00 – 2,00	1,00 – 2,00
Beckenhöhe ( $h_B$ ) [m]	0,75 – 3,00	0,75 – 3,00	0,75 – 3,00



Dotation (Q) [l/s]	50 – 1.000	50 – 1.000	50 – 1.000
Beckenfallhöhe ( $\Delta h$ ) [m]	0,14 – 0,20	0,14 – 0,20	0,08 – 0,20

Der Sohlenaufbau besteht i. d. R. aus einer Rollkiesschüttung (16/32), auf die eine PE-Wirrelegematte aufgebracht und die mittels Sohlhalbschalen ( $d \approx 10 - 14$  cm) fixiert wird (Abb. 2). Beobachtungen zeigen darüber hinaus, dass dieser Aufbau eine aktive Benthosbesiedlung sowie einen Pflanzenbewuchs ermöglicht.

Insgesamt gelten gemäß DWA-M 509 für den Rundbeckenpass die gleichen geometrischen und hydraulischen Anforderungen wie bei klassischen Schlitzpässen. Dabei wird aber im Regelwerk ausschließlich auf den Rundbeckenpass des Typs C eingegangen.

### 3 Aktuelle hydraulische Untersuchungen

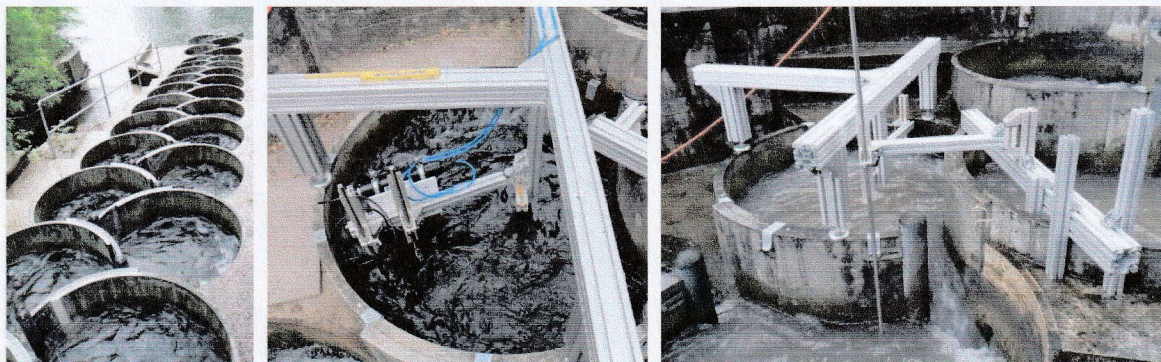
Die aktuellen hydraulischen Untersuchungen konzentrieren sich auf den C-Typ, da dieser in der Praxis bereits am häufigsten vorzufinden ist. Hierzu wurde in der jüngsten Vergangenheit eine Referenzanlage bei Höxter in situ näher betrachtet. Diese FAA befindet sich an der Nethe im Oberweserbergland unweit zur Einmündung in die Weser. Dieser Bereich ist der Äschenregion zugeordnet. Die wichtigsten Anlagengrößen sind in Tab. 2 zusammengestellt.

**Tab. 2** Wichtigste Kenndaten der Referenzanlage Höxter (Typ C)

Parameter	C-Typ Höxter	Bemerkungen
Fließgewässerregion	Äschenregion	
Längsgefälle <sup>(a)</sup> $I$ [%]	20	
Gesamtlänge <sup>(a)</sup> $l_{ges}$ [m]	24	
Gesamtfallhöhe <sup>(a)</sup> $\Delta h_{ges}$ [m]	4,20 – 4,40 <sup>(1)</sup>	*) mittlere Beckenfallhöhe $\Delta h$ als Quotient aus Gesamtfallhöhe $\Delta h_{ges}$ und Schlitzanzahl $k$ : $\Delta h = \Delta h_{ges} / k$
Beckenanzahl <sup>(a)</sup> $k-1$ [-]	27	
Beckendurchmesser <sup>(a)</sup> $d_B$ [m]	1,40	
Beckenhöhe <sup>(a)</sup> $h_B$ [m]	0,80	(a) Hersteller-/Konstruktionsangabe, (b) Gleichung (3)
mittlere Beckenfallhöhe <sup>(*)</sup> $\Delta h$ [m]	0,16 <sup>(1)</sup>	(c) Messwert bzw. aus Messwerten (d) 3d-hydrnumerische Simulation mittels Star-CCM+
Schlitzweite min./max <sup>(a)</sup> $s$	0,07/0,11...0,16	(e) Messwert (f) DWA M 509 mit Sicherheitsbeiwerten und gerundet
mitt. Wassertiefe Becken <sup>(e)</sup> $h_m$ [m]	0,38 <sup>(2)</sup>	(1) bei $\approx$ MW (2) zwischen MW und HW <sub>1</sub> gemessen, nur Schätzwert
Betriebsdurchfluss <sup>(a)</sup> $Q_0$ [l/s]	$\approx 80 - 100$ <sup>(3)</sup>	(3) nur Schätzwert (4) Anlage bei natürlichen Betriebsbedingungen mit Sedimenteintrag und Bewuchs in den Becken
Betriebsdurchfluss <sup>(b)</sup> $Q_0$ [l/s]	34	
vorh. Betriebsdurchfluss <sup>(c)</sup> $Q_0$ [l/s]	50 <sup>(4)</sup> – 58 <sup>(5)</sup>	(5) Sediment und Bewuchs entfernt, entspricht Neuzustand nach Erstinbetriebnahme
Betriebsdurchfluss <sup>(d)</sup> $Q_0$ [l/s]	58	(6) mit minimalem bzw. maximalem Betriebsdurchfluss abhängig von der Ermittlung
max. Fließgeschwindigkeit <sup>(e)</sup> $v_{max}$ [m/s]	2,00	
zul. Fließgeschwindigkeit <sup>(f)</sup> $v_{max}$ [m/s]	1,70	
vorh. Leistungsdichte $p_D$ [W/m <sup>3</sup> ]	102 – 183 <sup>(6)</sup>	
zul. Leistungsdichte <sup>(f)</sup> $p_D$ [W/m <sup>3</sup> ]	180	

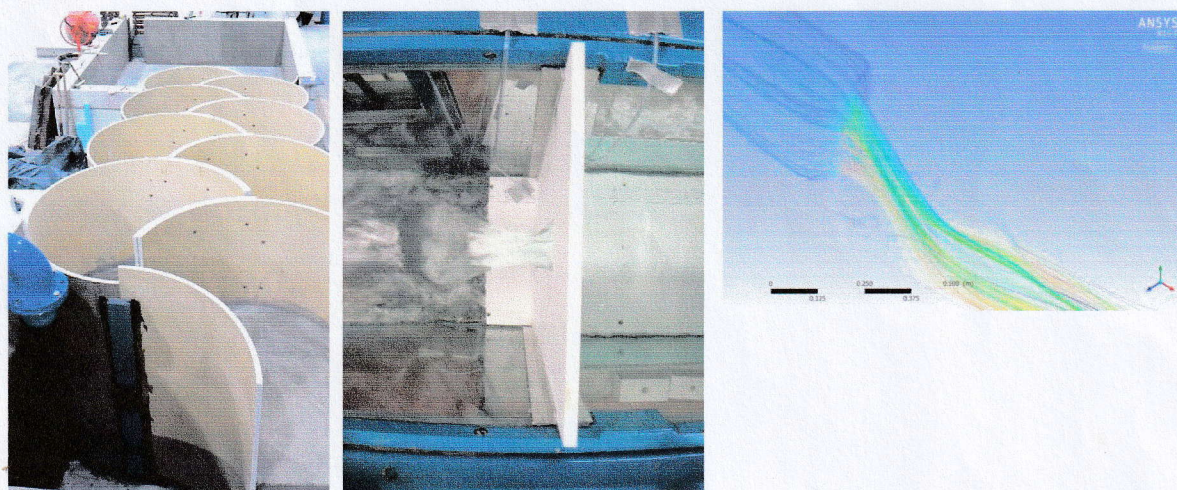


Bei den Vor-Ort-Messungen sind die Betriebsabflussverhältnisse ( $Q_0$ ) sowie die Fließgeschwindigkeiten bei unterschiedlichen Abflüssen ( $Q_0 = 50 \text{ l/s}$ ,  $Q_1 = 38 \text{ l/s}$ ,  $Q_2 = 75 \text{ l/s}$ ) in ausgewählten Becken und Schlitzöffnungen mittels 3d-Vectrinosonde bzw. 1d-Flügeltechnik aufgenommen worden (Abb. 3). Erfahrungen und Hinweise zur Messung sowie zur Messwerterfassung in Rundbeckenpässen können Helbig et al. (2015a) und (2015b) entnommen werden.



**Abb. 3** Anlage C-Pass Höxter, links: Gesamtanlage, mittig: Bestimmung Fließgeschwindigkeiten im Becken (3d-Vectrinosonde, zweifach), rechts: Geschwindigkeitsermittlung im schlitznahen Bereich mittels 1d-Flügel

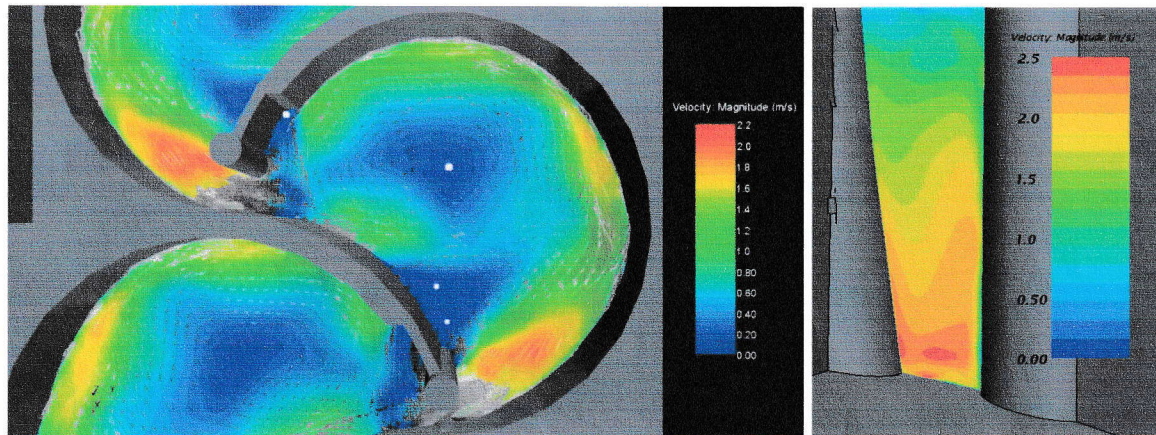
Parallel wurden Laboruntersuchungen vorgenommen. Hierzu wurde im Maßstab 1:1 ein Ausschnitt (8 Becken) der Referenzanlage Höxter errichtet (vgl. Abb. 4, links). Ziel dieser physikalischen Modellierung ist primär die Bestimmung der hydraulischen Strömungsmuster in den Becken und im schlitznahen Bereich bei Variation der Schlitzgeometrien und der individuellen Abflussverhältnisse. Ergänzend werden aktuell rinnenbasierte Laborversuche zur Ermittlung der Auslaufcharakteristik einer sohlgleichen Schlitzöffnung bei Variation der Ober- und Unterwasserverhältnisse sowie der Anströmverhältnisse durchgeführt (vgl. Abb. 4, mittig). Die Versuchsreihen dienen der Modellbildung für eine  $\mu$ -Beiwert-basierte Abflussberechnung für Schlitzpässe (vgl. Abschn. 4). Diese physikalischen Versuche werden zu Validierungszwecken durch 3d-HN-Simulationen der Schlitzdurchströmung mittels ANSYS® CFX (Abb. 4, rechts) ergänzt.



**Abb. 4** Links: 1:1-Modell der C-Pass-Anlage Höxter in der Wasserbauhalle, mittig: Rinnenversuche zur Bestimmung der Abflusscharakteristik in sohlgleichen Schlitz, rechts: 3d-HN-Simulation der Schlitzdurchströmung im Rinnenversuch mittels ANSYS® CFX



Zusätzlich ist eine 3d-HN-Simulation der Gesamtanlage (27 Becken) mittels Star-CCM+ für den Betriebszustand als quasistationärer Fließzustand vorgenommen worden. Die Berechnung basiert auf dem RANS-Ansatz. Es erfolgte eine 2-Phasen-Modellierung (Wasser-Luft) unter Verwendung des SST-Turbulenzmodells ( $k-\omega$ ). Die Sohlrauheiten sind mit  $k = 0,1$  m, die Wandrauheiten mit  $k = 0,01$  m festgelegt worden. Das Berechnungsnetz umfasst 6,75 Mio. Elemente mit Quaderabmessungen von 0,01 – 0,12 m (Hauptmodellgebiet). Zufluss- und Ausflussrand wurden durch Vorgabe des OW- und UW-Standes definiert. Es konnte ein Abfluss von  $Q_{\text{num}} \approx 58$  l/s simuliert werden, der gut mit den Messwerten in der Referenzanlage übereinstimmt (Tab. 2). Generell stellten sich in der Simulation Strömungsmuster ein, die gut mit den Beobachtungen und registrierten Messwerten korrelieren.



**Abb. 5** Links: 3d-HN-Simulation eines Beckens der Referenzanlage Höxter (Star-CCM+), resultierende Fließgeschwindigkeit, ca. 5 – 10 cm unter Wasserspiegellage, rechts: Visualisierung der resultierenden Fließgeschwindigkeiten im Schlitzbereich

#### 4 Strömungsmuster und Berechnungsansatz

Aufgrund des sich an einem Schlitz einstellenden hydraulischen Gradienten kommt es zum Einstromen aus dem oberen in das untere Becken, wobei dieses wiederum bis zum nächsten Schlitz durchströmt wird. Die Strömungsverhältnisse zeigen die typisch alternierenden, strömungsstabilen und dreidimensionalen Eigenschaften auf, wobei diese letztlich vom jeweiligen Bautyp abhängen (C-, J-, H-Typ). Aktuell weist das Regelwerk (DWA-M 509, 2014) dem Rundbeckenpass eine strömungsstabile Abflusscharakteristik zu, bei der gerichtete Primär- und Nebenströmungen erkennbar sind und die Energiedissipation im Becken mittels der Strahltheorie (z. B. Kraatz, 2015) beschrieben werden kann.

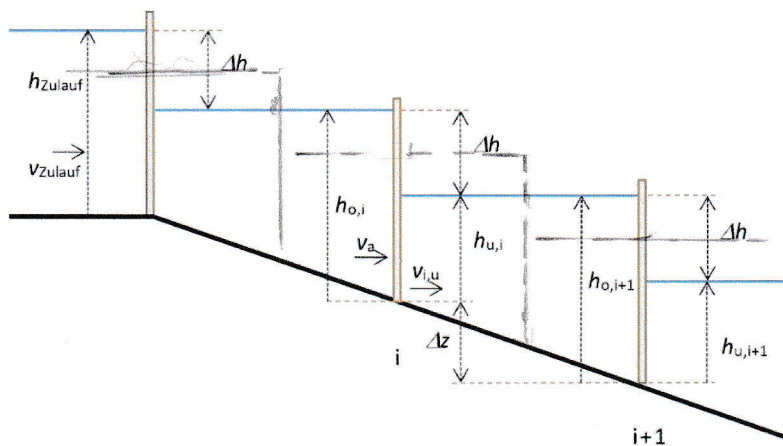
Eine gerichtete, stabile Hauptströmung existiert an der Beckenaußenseite. Diese erzeugt im Becken v. a. eine vertikal stehende Walze mit Rückströmungen auf der Beckeninnenseite (vgl. auch Abb. 5). Eine deutliche Verlagerung der Hauptströmung entlang der Beckenberandung ist in allen Becken erkennbar. Einher geht eine „schüsselförmige“ Anhebung des Beckenwasserstandes in den Randbereichen. Das Maximum der Fließgeschwindigkeit an der Wasseroberfläche zeigt sich in allen Becken kurz unterhalb einer Schlitzöffnung (Abb. 5). In der näheren Umgebung des Beckenmittelpunktes entstehen geschwindigkeitsarme Bereiche (Stillwasserbereiche/Ruhezonen). Im Beckenzentrum herrschen Fließgeschwindigkeiten von bis zu  $v \approx 0$ .

Im Schlitzbereich kommt es zu ausgeprägten, sich überlagernden 3d-Strömungseffekten. Die Schlitzdurchströmung selbst sowie die daraus resultierenden Schlitzverluste sind wiederum von



der vorhandenen Schlitzgeometrie, der Schlitzanströmung bzw. -einschnürung abhängig. Im Schlitz wird eine zur Sohle hin ansteigende Fließgeschwindigkeit deutlich. Das Maximum der Fließgeschwindigkeit im Schlitz tritt an der Innenseite der Hauptströmung auf (Abb. 5). Die betragsmäßig größten Fließgeschwindigkeiten sind jedoch unmittelbar unterhalb eines Schlitzdurchlasses vorhanden (Einschnürungseffekt).

Die vorgenannten Ausführungen zeigen, dass mittels Natur-, physikalischen Labor- sowie 3d-HN-Simulationsuntersuchungen eine breite Datenbasis gewonnen werden kann. Weiteres Ziel ist es, die tatsächlichen hydraulischen Verhältnisse mittels vereinfachter 1d-Ansätze abzubilden, um eine Bemessung sowie eine praxistaugliche Einbindung in Regelwerke zu ermöglichen.



**Abb. 6** Prinzipskizze mit Bezeichnungen an einem i-ten Schlitz eines Rundbeckenpasses

Konstante Beckenfallhöhen ( $\Delta h$ ) zwischen den einzelnen Becken sind nunmehr ein Ausdruck eines stationären, quasi-gleichförmigen Abflusszustandes innerhalb der gesamten Anlage (Abb. 6). Das heißt wiederum, dass Geschwindigkeitszuwächse aufgrund der Umwandlung von Fallhöhenenergie innerhalb der FAA durch die Energiedissipation in den Becken und Schlitz (Becken- und Schlitzverluste) wieder abgebaut werden. Für  $k$  Schlitz und eine konstante Gesamtfallhöhe  $\Delta h_{ges}$  zwischen Bemessungsoberwasserstand (OW) und Bemessungsunterwasserstand (UW) kann eine mittlere Beckenfallhöhe von

$$\Delta h = \frac{\Delta h_{ges}}{k} = \text{konst.} \quad [1]$$

angegeben werden, wenn keine Absenk- bzw. Rückstauwirkungen aus dem UW wirken. Da sich aufgrund der turbulenten Strömungsverhältnisse die Wasserspiegellagen nicht exakt ausspiegeln (Aufstau, Absenke), sollte daher  $\Delta h$  als Differenz der mittleren Wasserspiegellagen mit den geringsten Schwankungen (z. B. Stillwasserbereiche) definiert werden.

UW-Schwankungen gegenüber dem Bemessungsunterwasserstand wirken sich auf die Wasserspiegellagen in der Anlage aus ( $\Delta h \neq \text{konst.}$ ), wobei dieser Effekt nach einer anlagenspezifischen Beckenanzahl ausklingt. Grundsätzlich führen UW-Absenkungen bei Schlitzpässen zu einer zunehmenden Beckenfallhöhe mit einhergehenden Fließgeschwindigkeitserhöhungen nach UW bzw. UW-Erhöhen zu einer abnehmenden Beckenfallhöhe und infolgedessen zu abnehmenden Fließgeschwindigkeiten nach UW. Aigner (2016) bzw. Helbig & Aigner & Stamm



(2016) zeigen mit Hilfe eines Berechnungsansatzes, wie sich bei Änderung der UW-Randbedingung (UW-Absenkung, UW-Anhebung) die Wasserspiegellage in den letzten Becken als Stau- bzw. Senkungslinie ausbildet. Hierzu ist jedoch ein iteratives Vorgehen erforderlich.

Die maximalen Fließgeschwindigkeiten treten wie oben beschrieben kontinuierlich im Schlitzbereich bzw. im schlitznahen Bereich auf, wobei die genaue Lage unterschiedlich verortet wird. Nach DWA-M 509 (2014) wird ein Abstand von ca.  $\Delta h \dots 2 \cdot \Delta h$  unmittelbar unterhalb einer Schlitzöffnung angegeben. Die eigenen Untersuchungen des Typs C zeigen jedoch die Maxima bereits unmittelbar unterhalb am Schlitz, ca. 5 – 10 cm oberhalb der Sohle. Der Betrag an einem i-ten Schlitz lässt sich im Mittel gut mit dem Ansatz von TORRICELLI zu

$$v_{\max} = v_{i,u} \approx \sqrt{v_{\text{Zulauf}}^2 + 2 \cdot g \cdot \Delta h} \quad [\text{m/s}]$$

wenn  $v_{\text{Zulauf}} \approx 0$ , dann

$$v_{\max} = v_{i,u} \approx \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h} \quad [\text{m/s}] \quad [2]$$

abschätzen, wenn die Schlitzverluste ( $h_{V,\text{Schlitz}}$ ) und lokale Aufstau bzw. Absenke vernachlässigt werden (Helbig & Aigner & Stamm, 2016). Diese Gleichung entspricht weitestgehend der in DWA-M 509 (2014) aufgeführten. Dabei lässt sich aber zeigen, dass die dort angegebene Anströmgeschwindigkeit vor einem Schlitz ( $v_a$ ) der Zulaufgeschwindigkeit ( $v_{\text{Zulauf}}$ ) im Oberwasser zum Schlitzpass gleichgesetzt werden kann. Hierbei ist die Zulaufbedingung entscheidend (schmaler Kanal oder breiter Zulauf). Im guten Mittel kann  $v_{\text{Zulauf}}$  aus dem Dotationsabfluss  $Q$  nach Gleichung (4) sowie der Zulaufbreite ( $b_{\text{Zulauf}}$ ) und Zulauftiefe ( $h_{\text{Zulauf}}$ ) bestimmt werden ( $v_{\text{Zulauf}} = Q/[b_{\text{Zulauf}} \cdot h_{\text{Zulauf}}]$ ).

Die Durchströmung eines Schlitzes stellt wiederum eine Kombination aus Überfall und seitlichem Auslauf aus einem Gefäß dar. Für die Bestimmung des Durchflusses wird momentan im Regelwerk die modifizierte POLENI-Formel für einen rechteckigen Schlitz mit der Schlitzweite  $s$  zu

$$Q_{\text{DWA}} = \mu_v \cdot s \cdot \sqrt{g} \cdot h_o^{1,5} \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad [3]$$

vorgeschlagen, die jedoch streng genommen nur für klassische Schlitzpässe und nur unter bestimmten Randbedingungen bestimmt worden ist (DWA-M 509, 2014, Krüger et al., 2010). Dabei definiert  $\mu_v$  einen Abflussbeiwert, der von der Wassertiefe  $h_o$  des Beckens unmittelbar oberhalb sowie von der Wassertiefe  $h_u$  unmittelbar unterhalb des jeweiligen Durchlasses abhängt ( $\mu_v = f[h_u/h_o]$ ). Darüber hinaus wird  $\mu_v$  abhängig vom Strömungsmuster (strömungsstabil, strömungsdissipierend) sowie u. a. bauartabhängig angegeben.

Die in DWA-M 509 angegebenen Beiwerte zur Berechnung des Durchflusses eines Schlitzpasses sind nicht frei von den Einflüssen des Wasserstandes bzw. des Differenzwasserstandes und können deshalb nur schwer eingeschätzt und auf verschiedene Schlitzpasstypen übertragen werden. Dies betrifft auch den Rundbeckenpass als Sonderbauweise des Schlitzpasses. Die Anwendung von Gleichung [3] bei den eigenen o. g. Untersuchungen an Rundbeckenpässen des Typs C zeigte auch, dass die berechneten Abflüsse die gemessenen Werte um mehr als 30 % unterschätzten (Tab. 2). Ein universeller Einsatz von Formel [3] für Rundbeckenpässe scheint somit nicht hinreichend gegeben.



Eine direkte Trennung zwischen wasserstandsabhängigen sowie geometrischen Einflüssen bei der Abflussbestimmung ist daher sinnvoll. Damit würde sich der Abflussbeiwert  $\mu$  hauptsächlich auf Formeffekte reduzieren. Die hydromechanische Fachliteratur verweist derzeit auf keinen konkreten Berechnungsansatz für den Abfluss durch eine sohlengleiche Öffnung. Jedoch können Ähnlichkeiten zu einem partiell rückgestauten Seitenauslass identifiziert werden (Bolrich, 2013). Bei Aigner (2016) bzw. Helbig & Aigner & Stamm (2016) werden daher Abflussformeln für sohlengleiche rechteckige und trapezförmige Schlitzöffnungen vorgestellt, die die Kombination aus oberem Überfall (o) und unterem rückgestautem seitlichen Auslauf (u) berücksichtigen. Es gilt dabei:

für einen rechteckigen Schlitz:

$$Q = Q_o + Q_u = \frac{2}{3} \cdot \mu_o \cdot s \cdot \Delta h \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h} + \mu_u \cdot s \cdot h_u \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h}$$

$$Q = \mu \cdot \left( h_u + \frac{2}{3} \cdot \Delta h \right) \cdot s \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h} \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

für einen trapezförmigen Schlitz mit der Seitenneigung 1:m:

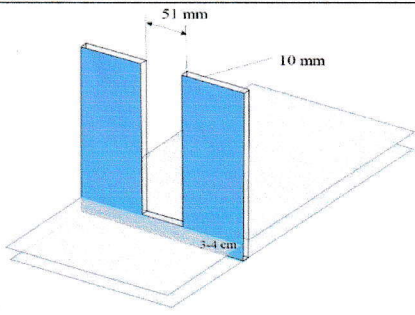
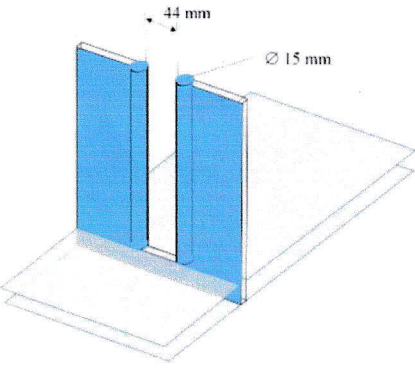
[4]

$$Q = Q_o + Q_u$$

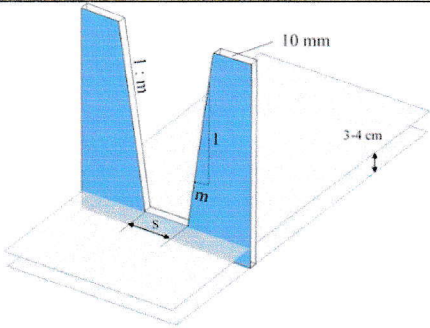
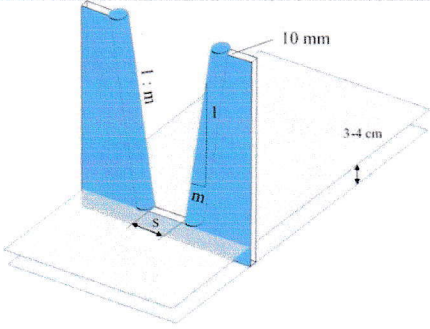
$$Q = \mu \cdot s \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h} \cdot \left[ \Delta h \cdot \left( \frac{2}{3} + 0,406 \cdot \frac{m \cdot \Delta h}{s} \right) + h_u \cdot \left( 1 + \frac{m \cdot h_u}{s} \right) \right] \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

mit  $h_o = h_u + \Delta h$  und  $\mu = \mu_o = \mu_u$ .

**Tab. 3** Abflussbeiwerte  $\mu$  für verschiedene Schlitzgeometrien (vgl. Aigner, 2016)

Schlitzgeometrie	$\mu$ [-]	Anmerkungen
	0,645	rechteckig, scharfkantig, untersucht an einem Schlitz der Breite $s = 51$ mm
	0,8	rechteckig, ausgerundet, untersucht an einem Schlitz der Breite $s = 44$ mm



Schlitzgeometrie	$\mu$ [-]	Anmerkungen
	0,68	trapezförmig, scharfkantig, Schlitzbreite Sohle $s = 51 \text{ mm}$ , $m = 0,06$
	0,84	trapezförmig, ausgerundet, Schlitzbreite Sohle $s = 44 \text{ mm}$ , $m = 0,06$

Der Abflussbeiwert  $\mu$  kann dabei für den Überfall- und Auslaufanteil gleichgroß angesetzt werden, da er nur noch Geometrie- bzw. Strahleinschnüreffekte beschreibt. Auswertungen von Laboruntersuchungen zum Schlitzpass zeigen die effektiven Ausflussbeiwerte für verschiedene Schlitzgeometrien (Tab. 3). Die Schlitzbreite  $s$  ist dabei auf Sohlhöhe definiert,  $h_o$  und  $h_u$  beschreiben den Wasserstand unmittelbar vor (Oberwasser) sowie unmittelbar nach dem Schlitz (Unterwasser) bezogen auf die Sohlhöhe am Schlitz und jeweils auf die mittleren Wasserspiegellagen im oberen bzw. unteren Becken (Abb. 6).

Aufstau, Absunke sowie Anströmungen werden dabei im Nahbereich des Schlitzes vernachlässigt. Für die derzeitigen Ausführungen der Rundbeckenpässe können nach jetzigem Kenntnisstand die  $\mu$ -Beiwerte für die trapezförmig-scharfkantige bzw. den trapezförmig-ausgerundete Schlitzgeometrie in Verbindung mit Gleichung [4] verwendet werden.

## 5 Fazit

Der Rundbeckenpass ist eine Sonderbauweise des Schlitzpasses. Wie die verschiedenen Naturmessungen, physikalischen Versuche und 3d-HN-Simulationen zeigen, weisen die Strömungsverhältnisse in Rundbeckenpässen typisch alternierende, strömungsstabile und dreidimensionale Eigenschaften auf, wobei diese letztlich vom jeweiligen Bautyp abhängen (C-, J-, H-Typ). Eine gerichtete, stabile Hauptströmung existiert an der Beckenaußenseite. Diese erzeugt im Becken v. a. vertikal stehende Walzen mit Rückströmungen auf der Beckeninnenseite. Im Beckenzentrum herrschen hingegen Fließgeschwindigkeiten von bis zu  $v \approx 0$ . Im Schlitzbereich kommt es zu ausgeprägten 3d-Strömungseffekten. Die Maximalgeschwindigkeiten treten wegen der Einschnüreffekte unmittelbar unterhalb eines Schlitzdurchlasses auf.

Eine gesonderte hydraulische Bemessung insbesondere für den Abfluss ist nicht notwendig, da die vorgestellten Abflussgleichungen prinzipiell sowohl für strömungsdissipierende als auch strömungsstabile Bauarten gemäß DWA-M 509 eingesetzt werden können. Bei der vereinfach-



ten Abflussberechnung ist eine möglichst genaue Definition der Abhängigkeiten zwischen Schlitzbreiten, Schlitzformen, Beckengeometrien und Wasserständen erforderlich. Eine wie oben vorgeschlagene Trennung der einzelnen Einflussgrößen beim Durchflussbeiwert ist dabei sinnvoll.

Mit den vorliegenden Untersuchungen ist die hydraulische Bemessung des Rundbeckenpasses physikalisch begründet deutlich über dem Stand von 2014. Auf Grund der mannigfaltigen Optimierungsmöglichkeiten des Rundbeckenpasses werden die Untersuchungen fortgesetzt.

## Literatur

- Aigner, D. (2016). Der Schlitzpass – Ausfluss- oder Überfallströmung, 39. Dresdner Wasserbaukolloquium, in: Wasserbauliche Mitteilungen, Heft 57, Selbstverlag der Technischen Universität Dresden, Dresden.
- Bollrich, G. (2013). Technische Hydromechanik 1, Grundlagen, 7. Auflage, Beuth Verlag GmbH, Berlin-Wien-Zürich.
- DIN 1045-2 (2014). Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Anwendungsregeln zu DIN EN 206 (2014-08).
- DWA-M 509 (2014). Merkblatt DWA-M 509, Fischaufstiegsanlagen und fischpassierbare Bauwerke – Gestaltung, Bemessung, Qualitätssicherung, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hennef.
- Helbig, U. et al. (2015a). U. Helbig, J. Stamm, C. Seidel, H. Martin, Hydraulische Charakteristik von Rundbeckenpässen, in: 45. IWASA, 08. / 09.01.2015, RWTH Aachen, Aachen.
- Helbig, U. et al. (2015b). U. Helbig, J. Stamm, C. Seidel, H. Martin, Hydraulische Messungen in Rundbeckenpässen, in: Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen, Heft 53, Selbstverlag der Technischen Universität Dresden, Dresden.
- Helbig, U.; Aigner, D.; Stamm, J. (2016). Hydraulik der Schlitzöffnungen bei beckenartigen Fischaufstiegsanlagen, in: BAUTECHNIK (93), Heft 5.
- Kraatz, W. (2015). Flüssigkeitsstrahlen, in: Technische Hydromechanik 2, 2. vollst. überarb. Auflage, D. Aigner & D. Carstensen (Hrsg.), Beuth Verlag, Berlin.
- Krüger et al. (2010). F. Krüger, S. Heimerl, F. Seidel, B. Lehmann, Ein Diskussionsbeitrag zur hydraulischen Berechnung von Schlitzpässen, in: Wasserwirtschaft, 100/3, S. 30 – 36.
- ZTV-W LB 215 (2012). Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen – Wasserbau (ZTV-W) für Wasserbauwerke aus Beton und Stahlbeton (Leistungsbereich 215). Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung Abteilung Wasserstraßen, Schifffahrt.



**Anschrift der Verfasser**

Dr.-Ing. Ulf Helbig  
Prof. Dr.-Ing. habil. Detlef Aigner  
Prof. Dr.-Ing. Jürgen Stamm  
Dipl.-Ing. Rocco Zimmermann

Technische Universität Dresden,  
Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik  
01062 Dresden

[Ulf.Helbig@tu-dresden.de](mailto:Ulf.Helbig@tu-dresden.de),  
[Detlef.Aigner@tu-dresden.de](mailto:Detlef.Aigner@tu-dresden.de),  
[Juergen.Stamm@tu-dresden.de](mailto:Juergen.Stamm@tu-dresden.de),  
[Rocco.Zimmermann@tu-dresden.de](mailto:Rocco.Zimmermann@tu-dresden.de)