Druckverhältnisse in großen Kaplan-Turbinen und deren Auswirkungen auf die Überlebensraten von Fischen

Druckunterschiede werden als eine der wesentlichen Schädigungsursachen von Fischen beim Passieren von Turbinen diskutiert. Bisherige Untersuchungen zeigen allerdings nur für wenige Arten und Lebensstadien hohe Sensibilitäten hinsichtlich Barotrauma. Wenn man davon ausgeht, dass die meisten abwandernden Fische oberflächennah wandern und unter der Berücksichtigung der sehr geringen potenziellen Schädigungsraten durch Barotrauma in großen Kaplan-Turbinen sind Auswirkungen auf potamodrome Fischpopulationen wahrscheinlich ohne Bedeutung bzw. nicht nachweisbar.

Walter Reckendorfer

1 Einleitung

Durch den Kraftwerksbetrieb können Fische, welche die Turbine passieren, geschädigt werden. Neben dem Kontakt mit einer Turbinenschaufel werden Druckunterschiede, wie sie beim Passieren einer Turbine auftreten, als eine der wesentlichen Schädigungsursachen diskutiert.

Studien in den letzten Jahren haben gezeigt, dass die Schädigung durch Barotrauma durch das Verhältnis zwischen dem Druck in der Akklimatisationstiefe (PA) und dem niedrigsten Druck während der Turbinenpassage (PE) bestimmt wird, wobei der Tiefstwert in der Literatur auch als Nadir bezeichnet wird. Hohe Drücke spielen als Schädigungsmechanismus in der Regel keine Rolle [1]. Verschiedene Fischarten und Entwicklungsstadien reagieren dabei sehr unterschiedlich hinsichtlich Änderungen im Druck.

2 Druckverhältnisse in großen Kaplan-Turbinen

Bild 1 zeigt die niedrigsten Drücke, welche an fünf großen Kaplan-Turbinen gemessen wurden. Die Fallhöhe lag zwischen

ca. 15 m und 35 m, der Turbinendurchfluss zwischen 230 m³/s und 576 m³/s.

Die mittleren Nadirwerte schwankten für die einzelnen Versuche zwischen 84 kPa und 194 kPa (Mittelwert = 134 kPa). Je höher der Durchfluss ist, desto geringere Drücke treten in den Turbinen auf, d. h. desto größer ist die Wahrscheinlichkeit einer druckbedingten Schädigung.

Der Median über alle Untersuchungen lag bei 135 kPa, also über dem normalen atmosphärischen Druck von 101 kPa (Luftdruck). Nur bei ca. 15 % der Turbinenpassagen treten überhaupt Nadirwerte unter dem atmosphärischen Druck auf, die theoretisch zu Schädigungen führen können. Bei nur ca. 1 % der Turbinenpassagen traten Drücke von unter 50 kPa auf (**Tabelle 1**).

3 Mortalitäten durch Barotrauma

3.1 Eier

Bei Fischeiern traten bisher bei keiner Untersuchung druckbedingte Schädigungen auf. Eier vom Weißen Stör (*Acipenser trans-*

Kompakt

- Die Schädigung durch Barotrauma ist art- und stadienspezifisch.
- Bei Druckverhältnissen, wie sie in großen Kaplan-Turbinen auftreten, kommt es bei Eiern und Larven in der Regel zu keinen druckbedingten Mortalitäten, weisen Juvenile und Adulte vieler untersuchter Arten eine hohe Widerstandsfähigkeit auf und wurden bisher nur für wenige Arten signifikante Mortalitäten festgestellt.
- Bei großen Kaplan-Turbinen dürften daher druckbedingte Mortalitätsraten nur eine geringe Rolle spielen.

Tabelle 1: Quantile der Nadir-Werte aus den Untersuchungen mit Sensorfischen (Quelle: Reckendorfer, Daten aus Bild 1)

Quantile [%]	Nadir [kPa]
1	46
5	75
10	91
15	101
25	115
50	135
75	158
90	175
95	185
99	203

Bild 1: Nadir-Werte (MW + SD) für verschiedene Turbinen (BPH2 - Bonneville Dam, Powerhouse 2) und Versuche (V01 bis V44); für die jeweilige Turbine sind die Versuche von niedrigem zu hohem Durchfluss geordnet

montanus), vom Australischen Silberbarsch (*Bidyanus bidyanus*), und vom Australischen Goldbarsch (*Macquaria ambigua*) zeigten selbst bei extrem niedrigen Drücken (Nadir von 1 kPa bis 5 kPa), wie sie nur in Extremfällen beim Turbinenbetrieb auftreten können, kein Anzeichen von Schädigung (Tabelle 2).

3.2 Larven

Bei Fischlarven trat beim Großteil der untersuchten Arten keine druckbedingte Mortalität auf. Larven des Weißen Störs (*Acipenser transmontanus*) zeigten am neunten Tag mit Beginn des Fressens eine erhöhte Empfindlichkeit mit Mortalitätsraten von 10 % bis 20 %, alle jüngeren und älteren Larven überlebten selbst Nadirwerte von 5 kPa bzw. Druckreduktionen auf 1/20 des Akklimatisationsdrucks (Tabelle 3). Larven des Silberbarsches

(*Bidyanus bidyanus*), des Goldbarsches und des Murray-Dorssches (*Maccullochella peelii*) überlebten Druckänderungen auf 1/9 des Akklimatisationsdrucks (Nadir = 11 kPa).

3.3 Juvenile und Adulte

Einige Arten (Aale, Neunaugen, Störe) sind gegenüber niedrigen Drücken bzw. Druckänderungen unempfindlich. Aale und Störe überlebten selbst Nadir-Werte von ca. 2 kPa bzw. eine Druckreduktionen auf 1/50 des Akklimatisationsdrucks (Tabelle 4).

Für einige Arten konnte die Mortalitätsrate durch logistische Regressionen in Abhängigkeit von PA/PE dargestellt werden:

$$P_{mort} = \left(\frac{EXP(\beta_0 + \beta_1 \ln(PA/PE))}{(1 + EXP(\beta_0 + \beta_1 \ln(PA/PE)))} \right) \quad (1)$$

Tabelle 2: Überlebensraten von Eiern bei unterschiedlichen Nadir-Werten (Quelle: [4], [5])

Art	PA [kPa]	PE, Nadir [kPa]	PA/PE [-]	Überlebensrate [%]	Quelle
<i>A. transmontanus</i>	101	5-39	20,2-2,6	100	[4]
<i>B. bidyanus</i>	101	11-101	9,2-1,0	100	[5]
<i>M. ambigua</i>	101	11-101	9,2-1,0	100	[5]

Tabelle 3: Überlebensraten von Larven bei unterschiedlichen Nadir-Werten (dph: days post hatching) (Quelle: [4], [5])

Art	Alter, Größe	PA [kPa]	PE, Nadir [kPa]	PA/PE [-]	Überlebensrate [%]	Quelle
<i>A. transmontanus</i>	0-8 dph	101	5-39	20,2-2,6	100	[4]
	9 dph	101	18-39	5,5-2,6	80-90	[4]
	10-75 dph	101	5-39	20,2-2,6	100	[4]
<i>B. bidyanus</i>	10-22 dph	101	11-101	9,2-1,0	100	[5]
<i>M. ambigua</i>	10-18 dph	101	11-101	9,2-1,0	100	[5]
<i>M. peelii</i>	3-25 dph	101	11-101	9,2-1,0	100	[5]

Tabelle 4: Überlebensraten von juvenilen und adulten Fischen bei unterschiedlichen Nadir-Werten (ÜR: Überlebensrate)
(Quelle: [6], [7], [8])

	Art	Größe [mm]	PA [kPa]	PE, Nadir [kPa]	PA/PE [-]	ÜR [%]	Quelle
Amerikanischer Aal	<i>Anguilla rostrata</i> (Silberaal)	216-686	101	1,6-8,4	12,0-63,1	100	[6]
Amerikanischer Aal	<i>Anguilla rostrata</i> (Gelbaal)	230-423	101	1,2-8,1	12,5-84,2	100	[6]
White Sturgeon	<i>Acipenser transmontanus</i> n	145-338	146,2	1,8-10,3	9,8-56,1	100	[7]
Pazifisches Neunauge	<i>Entosphenus tridentatus</i>	127-183	101	14	10,6	100	[8]
Westliches Bachneunauge	<i>Lampetra richardsonii</i>	80-124	101	14	10,6	100	[8]

Tabelle 5: Koeffizienten der logistischen Regression für bisher untersuchte Arten (Quelle: [7], [9], [10])

Name	Art	Typ	Größe [mm]	β_0 [-]	β_1 [-]	Quelle
Königslachs	<i>Oncorhynchus tshawytscha</i>	physostom		-5,56	3,85	[9]
Australian bass	<i>Macquaria novemaculeata</i>	physoclist	73- 26	-5,72	2,68	[10]
Gudgeon	<i>Hypseleotris spp.</i>	physostom	23-50	-5,70	1,99	[10]
Murray-Dorsch	<i>M. peelii</i>	physostom	54-80	-7,33	2,79	[10]
Silver perch	<i>Bidyanus bidyanus</i>	physoclist	45-112	-3,91	1,39	[10]
Sander vitreum	<i>Sander vitreum</i>	physoclist	178-319	-4,96	2,84	[7]
Muskellunge	<i>Esox masquinongy X Esox lucius</i>	physostom	122-259	-3,93	1,96	[7]

In **Tabelle 5** sind die Regressionskoeffizienten für diese Arten angeführt, eine grafische Darstellung des Zusammenhangs zeigt **Bild 2**.

Der Unterschied zwischen physoclisten Arten und physostomen Arten ist nicht so ausgeprägt wie erwartet. Die Unterschiede sind zum Teil auch Methoden bedingt, da sowohl unterschiedliche Endpunkte dokumentiert wurden als auch andere Versuchsbedingungen vorlagen: Von Brown et al. [9] und Pflugrath et al. [10] wurden als Endpunkt nicht die Überlebensraten dokumentiert, sondern artspezifische Parameter, die mit der Überlebensrate bzw. Mortalitätsrate signifikant korreliert waren, es wurde also nicht die tatsächliche Mortalität ermittelt, sondern ein Index („mortally injured“) [11]. Diese

Vorgehensweise kann die tatsächlichen Überlebensrate beträchtlich unterschätzt, da das Auftreten jeder einzelnen Verletzung, die einen signifikanten Zusammenhang mit der Mortalität zeigt, dazu führt, dass ein Fisch als „mortally injured“ bzw. „tot“ klassifiziert wird. Von Brown et al. [7] wurden die Parameter, welche für den Königslachs entwickelt wurden [6], übernommen, d. h. keine artspezifischen Parameter entwickelt. Die Autoren nehmen an, dass dadurch die Mortalitätsraten („mortally injured“) für Muskellunge und Zander im Vergleich zum Königslachs überschätzt wurden. Unterschiedliche Versuchsbedingungen betreffen die Gassättigung. Die Versuche am Königslachs [9] wurden bei Gasübersättigung (113 % bis 128 %) durchgeführt (**Bild 3**). Bei diesen Konzent-

Tabelle 6: Mortalitätsindex („mortally injured“) verschiedener Fischarten (adulte und juvenile, oberflächenadaptiert) bei unterschiedlichen Nadir-Werten (Quantile der beobachteten Nadir-Werte); Berechnungen anhand der Formeln in Tabelle 5 (Quelle: Reckendorfer, Daten: [7], [9], [10])

Quantile [%]	Mortalitätsindex										Kumulierte Mortalität (Nadir < 101 kPa)
	1	5	10	15	25	50	75	90	95	99	
Nadir [kPa]	46	75	91	101	115	135	158	175	185	203	-
Königslachs (112-127 % TDG)	7,1	1,2	0,6	0,4	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,17 %
Australian bass	2,6	0,7	0,4	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,09 %
Gudgeon	1,5	0,6	0,4	0,3	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,07 %
Murray-Dorsch	0,6	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,02 %
Silver perch	5,6	2,9	2,3	2,0	1,6	1,3	1,1	0,9	0,9	0,8	0,39 %
Sander vitreum	6,0	1,6	0,9	0,7	0,5	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1	0,20 %
Muskellunge	8,3	3,4	2,4	2,0	1,5	1,1	0,8	0,7	0,6	0,5	0,44 %

Bild 2: Mortalität (Index) verschiedener Fischarten (oberflächenadaptiert) in Abhängigkeit vom Nadir (grau: physoclist, schwarz: physostom)

Bild 3: Mortalität (Index) des Königlachs (*O. tshawytscha*, oberflächenadaptiert) bei unterschiedlichen Gaskonzentrationen (TDG: total dissolved gas) im Wasser

rationen reagieren die Fische wesentlich empfindlicher auf Druckänderungen als bei normaler Gassättigung ([9], [12]).

Für Oberflächen-adaptierte Fische ergeben sich im Großteil der untersuchten Fälle keine Mortalitäten, da nur bei ca. 15 % der Turbinenpassagen überhaupt Nadir-Werte unter dem nor-

malen atmosphärischen Druck auftraten, die theoretisch zu Schädigungen führen können (**Tabelle 6**). Die in der **Tabelle 6** ausgewiesenen Mortalitäten geben zwar auch oberhalb des atmosphärischen Luftdrucks Mortalitäten an, diese ergeben sich aber Formel bedingt, da die logistischen Regres-

WASSERWIRTSCHAFT

Das Fachmagazin für Wasser und Umwelt.

Alles zu den Themen:

Wasserkraft, Turbinen und Kleinwasserkraft, Trinkwasser, Grundwasser und Gewässer, Ökologie, Boden, Rohre, Pumpen, Armaturen und Behälter, Messtechnik und Hydromechanik, Hydraulik, Wasserbau und Wasserwirtschaft, Hydrologie und Energie.

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

www.meinfachwissen.de/wawi

sionen nicht durch den Ursprung laufen. Bereiche mit niedrigen Drücken, die für Fische letal sein können, sind örtlich eng begrenzt, bei nur ca. 1 % der Turbinenpassagen traten Drücke von unter 50 kPa auf. Integriert man Auftrittshäufigkeiten und Mortalitäten über den relevanten Bereich (<101 kPa), so ergeben sich bei allen bisher untersuchten Arten für oberflächenadaptierte Fische Gesamtmortalitäten von deutlich unter einem Prozent. Wenn man davon ausgeht, dass die Turbinen in der Regel im Bereich der höchsten Effizienz betrieben werden, wären die Mortalitätsraten zwar etwas höher, aber immer noch sehr gering.

Da der Großteil der abwärtswandernden potamodromen Fische Larven und Juvenile sind, die in der Regel oberflächenadaptiert sind, sind Auswirkungen auf potamodrome Fischpopulationen durch Turbinen bedingtes Barotrauma an großen Anlagen wahrscheinlich nicht signifikant bzw. nicht nachweisbar. Einschränkend muss allerdings hinzugefügt werden, dass bisher keine vergleichbaren Untersuchungen an Cypriniden durchgeführt wurden, die den Hauptteil der Fische in großen europäischen Gewässern darstellen. Um auch für diese Arten belastbare Daten zu erhalten, wird derzeit ein Forschungsprojekt von Österreichs Energie Forschung & Innovation „Flussabwärts gerichtete Fischwanderung an mittelgroßen Fließgewässern in Österreich: Populationsbiologische Grundlagen und Implikationen für den Fischschutz und Fischabstieg“ durchgeführt, welches von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) im Rahmen eines Collective Research Projektes (857 801) gefördert wird [13].

Autor

Mag. Dr. Walter Reckendorfer

Verbund Hydro Power GmbH

Europaplatz 2

1150 Wien, Österreich

walter.reckendorfer@verbund.com

Walter Reckendorfer

Pressure conditions in large Kaplan turbines and their impact on the survival rates of fish

Barotrauma is discussed as one of the major causes of damage to fish as they pass turbines. However, previous studies show high sensitivities to barotrauma only for a few species and life stages. Assuming that downstream migrating larvae and juveniles are surface orientated and taking into account the very low rates of barotrauma damage, the impact on potamodromous fish populations is in a range that is undetectable under natural conditions.

Literatur

- [1] Cada, G. F.: A review of studies relating to the effects of propeller-type turbine passage on fish early life stages. In: North American Journal of Fisheries Management 10 (1990), Nr. 4, S. 418-426.
- [2] Carlson, T. J.; Duncan, J. P.; Deng, Z.: Data Overview for Sensor Fish Samples Acquired at Ice Harbor, John Day, and Bonneville II Dams in 2005, 2006, and 2007. Report prepared for the U. S. Army Corps of Engineers, 2008.
- [3] Dauble, D. D.; Deng, Z.; Richmond, M. C. et al.: Biological Assessment of the Advanced Turbine Design at Wanapum Dam, 2005. Report prepared for the U.S. Department of Energy Office of Energy Efficiency and Renewable Energy Wind and Hydropower Technologies, 2007.
- [4] Brown, R. S.; Cook, K. V.; Pflugrath, B. D. et al.: Vulnerability of larval and juvenile white sturgeon to barotrauma: can they handle the pressure? In: Conservation Physiology 1 (2013), Nr. 1.
- [5] Boys, C. A.; Robinson, W.; Miller, B. et al.: How low can they go when going with the flow? Tolerance of egg and larval fishes to rapid decompression. In: Biology Open 5 (2016), Nr. 6, S. 786-793.
- [6] Pflugrath, B. D.; Harnish, R.; Rhode, B. et al.: American eel state of buoyancy and barotrauma susceptibility associated with hydroturbine passage. In: Knowledge & Management of Aquatic Ecosystems 420 (2019), Nr. 20.
- [7] Brown, R. S.; Walker, R. W.; & Stephenson, J. R.: A Preliminary Assessment of Barotrauma Injuries and Acclimation Studies for Three Fish Species (No. PNNL-24720). Pacific Northwest National Lab. (PNNL), Richland, WA (United States), 2015.
- [8] Colotelo, A. H.; Pflugrath, B. D.; Brown, R. S. et al.: The effect of rapid and sustained decompression on barotrauma in juvenile brook lamprey and Pacific lamprey: implications for passage at hydroelectric facilities. In: Fisheries Research 129 (2012), S. 17-20.
- [9] Brown, R. S.; Carlson, T. J.; Gingerich, A. J. et al.: Quantifying mortal injury of juvenile Chinook salmon exposed to simulated hydro-turbine passage. In: Transactions of the American Fisheries Society 141 (2012), Nr. 1, S. 147-157.
- [10] Pflugrath, B. D.; Boys, C. A.; Cathers, B.: Predicting hydraulic structure-induced barotrauma in Australian fish species. In: Marine and Freshwater Research 69 (2018), Nr. 12, S. 1 954-1 961.
- [11] McKinstry, C. A.; Carlson, T. J.; Brown, R. S.: Derivation of mortal injury metric for studies of rapid decompression of depth-acclimated physostomous fish (No. PNNL-17080). Pacific Northwest National Lab. (PNNL), Richland, WA (United States), 2007.
- [12] Colotelo, A.; Brown, R.; Carlson, T. et al.: Injury mechanisms for juvenile Chinook salmon passing through hydropower turbines.
- [13] Schneider, J.; Ratschan, C.; Heisey, P. et al.: Flussabwärts gerichtete Fischwanderung an mittelgroßen Fließgewässern in Österreich. In: WasserWirtschaft 107 (2017), Heft 12, S. 33-38.

SpringerProfessional.de

Turbinenbedingte Schädigungen

Reckendorfer, W.; Loy, G.; Ulrich, J.; et al.: Maßnahmen zum Schutz der Fischpopulation - die Sicht der Betreiber großer Wasserkraftanlagen. In: WasserWirtschaft, Ausgabe 2-3/2017. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017. www.springerprofessional.de/link/12114410

Reckendorfer, W.; Schmalfuß, R.; Frik, G.; et al.: Ökologische Maßnahmen zum Schutz der Fischpopulation. In: WasserWirtschaft, Ausgabe 2-3/2018. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018. www.springerprofessional.de/link/15499166