

Rita Keuneke und Ulrich Dumont

Vergleich von Prognosemodellen zur Berechnung der Turbinen bedingten Fischmortalität

Grundsätzlich ist an allen Gewässern, in denen flussabwärts wandernde Fische Wasserkraftanlagen passieren müssen, mit Schädigungen der Fische zu rechnen. Für die Ermittlung und Prognose der Mortalitätsrate von Fischen bei der Turbinenpassage steht eine Anzahl an Berechnungsmodellen zur Verfügung. Im Rahmen der Studie „Erarbeitung und Praxiserprobung eines Maßnahmenplans zur ökologisch verträglichen Wasserkraftnutzung an der Mittelweser“ wurden verschiedene empirische Modelle miteinander verglichen und auf ihre Anwendbarkeit bei der Berechnung der Mortalitätsrate einer Kette von Wasserkraftanlagen hin untersucht.

1 Einleitung

Grundsätzlich ist an allen Gewässern, in denen flussabwärts wandernde Fische Wasserkraftanlagen passieren müssen, mit Schädigungen der Fische zu rechnen. Art und Ausmaß der Schädigungen sind von den jeweiligen Standortbedingungen abhängig und können stark variieren.

In ATV-DVWK [1] werden als Schädigungsursachen bei der flussabwärts gerichteten Passage von Wasserkraftanlagen besonders hervorgehoben:

- Schädigung bei der Überwindung von Stauanlagen.
- Schädigung an Wasserentnahmebauwerken und Rechen.
- Schädigung bei der Passage von Turbinen.

Das höchste Mortalitätsrisiko bei der Fischabwanderung besteht bei der Turbinenpassage. Hierzu existiert mittlerweile umfangreiche Literatur, die zunächst entsprechende Befunde beschrieb, alsbald aber auch die Problematik der Verhinderung und Minimierung derartiger Schäden thematisierte. Darüber hinaus wurden Berechnungsmodelle von Ebel [2], Gomes et al. [3], Larinier et al. [4], [5], Montén [6], Pavlov [7], Bell [8], Turnpenny [9] und von Raben [10], [11], [12], aufgestellt, die eine Abschätzung der Mortalitätsrate zulassen. Die meisten Untersuchungen liegen für Kaplan-Turbinen und Lachse vor.

Die Turbinen bedingte Mortalität ist abhängig von der Fischart und deren Körperlänge sowie von Turbinentyp und -größe, der Drehzahl und den jeweiligen

Betriebsbedingungen. Turbinen können über einen weiten Bereich den Abflussbedingungen angepasst werden, wodurch für Fische günstigere oder weniger günstige Situationen resultieren. Dementsprechend weisen die Ergebnisse von Untersuchungen zur Mortalität bei der Turbinenpassage eine erhebliche Schwankungsbreite auf.

Man unterscheidet die physikalischen Modelle, die versuchen, die Wahrscheinlichkeit der Kollision des Fisches mit den Turbinenschaufeln abzubilden, und die empirischen Modelle, die aus gesammelten Versuchsdaten durch Regressionsverfahren Näherungsgleichungen ermitteln.

Den physikalischen Modellen ist gemeinsam, dass sie aus der Turbinengeometrie auf die Mortalitätsrate schließen. Dabei hat der Öffnungswinkel der Turbine großen Einfluss auf das Ergebnis. Weil jedoch häufig nicht alle Randbedingungen bekannt sind, werden vereinfachende Annahmen getroffen. Schädigungen durch Druckunterschiede, Scherkräfte und Kavitation bleiben unberücksichtigt. Die meisten Modelle sind durch den Vergleich mit nur wenigen Freilanduntersuchungen, oft an einem Standort, entwickelt worden.

Die meisten Berechnungsformeln zur Prognose der Turbinen bedingten Mortalität basieren auf physikalischen Model-

Tab. 1: Prognosemodelle zur Berechnung der Turbinen bedingten Mortalität

Modellbezeichnung	Modellgleichung	Bestimmtheitsmaß	Autor
Lachs-unspezifisch	$P = \sin [10,7 + 68,8 \cdot (TL/esp)]^2$	(R ² = 0,92)	Larinier et al. [4]
Lachs-spezifisch	$P = \sin [13,4 + 42,8 \cdot (TL/esp)]^2$	(R ² = 0,35)	Larinier et al. [4]
Aal-unspezifisch	$P = \sin [10,7 + 68,8 \cdot (TL/esp)]^2$	(R ² = 0,92)	Larinier et al. [4]
Aal-spezifisch	$P = \sin [28,6 + 48,7 \cdot (TL/esp)]^2$	(R ² = 0,72)	Larinier et al. [4]
Aal RNL19	$P = 4,67 TL^{1,53} \cdot D^{-0,48} \cdot N^{0,6}$	(R ² = 0,84)	Gomes et al. [3]
Aal RNL25	$P = 6,59 TL^{1,63} \cdot Q^{-0,24} \cdot N^{0,63}$	(R ² = 0,848)	Gomes et al. [3]
Aal RR19	$P = 12,42 TL^{1,36} \cdot Q^{-0,22} \cdot D^{-0,1} \cdot N^{0,49}$	(R ² = 0,73)	Gomes et al. [3]
Aal EBEL 01	$P = -33,5 - 13,54 \cdot s_{max} + 2,9 \cdot u_{max} + 87 \cdot TL$	(R ² = 0,87)	Ebel [2]
Aal EBEL 02	$P = -44,6 - 13,56 \cdot s_{max} + 2,7 \cdot u_{max} + 109 \cdot TL$	(R ² = 0,88)	Ebel [2]
Legende	P Mortalität TL Länge des Fisches [m] esp Distanz zwischen den Laufschaufeln [m] N Umdrehungsgeschwindigkeit [U/min] D Turbinendurchmesser [m] Q Turbinendurchfluss [m ³ /s] s _{max} Schaufelabstand am größten Laufraddurchmesser [m] u _{max} Umfangsgeschwindigkeit am größten Laufraddurchmesser		

len. Lediglich Larinier et al. [4], Ebel [2] und Gomes et al. [3] stellten empirische Näherungsgleichungen auf.

Ebel [2] stellt fest, dass sich bei einigen der physikalischen Modelle gute Übereinstimmungen zwischen berechneten und beobachteten Schädigungsraten ergeben, aber für die Anwendung der Modelle Eingangsgrößen benötigt werden, die nur schwer ermittelbar sind. Diese Modelle kommen daher zum Einsatz, wenn der Einfluss der verschiedenen Betriebsbedingungen an einem Standort auf die Mortalität untersucht wird.

Die empirischen Modelle ermitteln die Schädigungsraten in Abhängigkeit von Schaufelabstand, Fischlänge und Drehzahl. Die Eingangsgrößen sind leichter zu ermitteln.

Im Rahmen der Studie „Erarbeitung und Praxiserprobung eines Maßnahmenplans zur ökologisch verträglichen Wasserkraftnutzung an der Mittelweser“ wurden verschiedene empirische Modelle miteinander verglichen und auf ihre Anwendbarkeit bei der Berechnung der mittleren Mortalitätsrate einer Kette von Wasserkraftanlagen untersucht.

2 Empirische Prognosemodelle

Larinier et al. [4] lieferten schon 1989 mehrere empirische Modelle. Für Kaplan-Turbinen haben sie ein spezifisches Modell für Aale, ein spezifisches Modell für Salmoniden und ein unspezifisches Modell entwickelt. Gomes et al. [3] haben die Arbeiten weitergeführt und auf der Grundlage von 71 Versuchsanordnungen an 15 Kraftwerken drei neue Formeln für die Schädigung von Aalen in Kaplan-Turbinen veröffentlicht. Die Modelle basieren auf Untersuchungen an bestimmten Turbinentypen

(Turbinen mit vier Schaufeln, Leistung ca. 500 kW bis 10 MW, Fallhöhe ca. 3 bis 10 m, Ausbauwassermenge ca. 15 bis 150 m³/s).

Für die Berechnung von Schädigungen in Francis-Turbinen steht nur ein Modell (Larinier et al. [4]) zur Verfügung, das für Lachse entwickelt wurde und auf einer geringen Anzahl von untersuchten Standorten basiert.

Ebel [2] hat verschiedene physikalische und empirische Modelle verglichen und selbst zwei Modelle für die Prognose von Schädigungen an Aalen in Kaplan-Turbinen aufgestellt. Seine Arbeit basiert zum Teil auf den gleichen Untersuchungen wie die von Gomes et al. [3].

Die verschiedenen Modelle sind vergleichend in **Tabelle 1** aufgelistet.

3 Diskussion der Modelle

Für die Prognose von Schädigungen von Lachsen in Kaplan-Turbinen stehen zwei Modelle von Larinier et al. [4] zur Verfügung. Hier sollte das Lachs-spezifische Modell für weitere Berechnungen angewendet werden. Dabei sind folgende Einschränkungen zu berücksichtigen:

- Um bei der Anwendung der Prognosemodelle von Larinier et al. [4] keine Schädigungsraten <0 % oder >100 % zu erhalten, werden die Ergebnisse einer Sinustransformation unterzogen. Das kann zu unlogischen Ergebnissen führen. So wird die Schädigungsrate in einer gegebenen Turbine mit zunehmender Körperlänge kleiner, wenn ein bestimmter Quotient aus Körperlänge und Schaufelabstand überschritten wird.
- Die Drehzahl oder Umfangsgeschwindigkeit der Turbine bleibt unberücksichtigt, weil Larinier et al. [4] Daten von Turbinen mit ähnlicher Umfangs-

geschwindigkeit genutzt haben. Das kann bei Turbinen mit abweichenden Umfangsgeschwindigkeiten zu fehlerhaften Ergebnissen führen.

Larinier arbeitet nach eigenen Angaben heute mit einem anderen Modell, das aber bisher nicht veröffentlicht wurde.

Für die Berechnung von Schädigungen in Francis-Turbinen steht nur ein Modell zur Verfügung, das auf einer geringen Anzahl von untersuchten Standorten basiert. Dieses Modell kann nur mit Einschränkungen verwendet werden. Auf die begrenzte Aussagefähigkeit des Modells muss daher deutlich hingewiesen werden.

Für Kaplan-Turbinen stehen für die Prognose von Schädigungen von Aalen mehrere Modelle zur Verfügung. Die älteren Modelle von Larinier et al. [4] beruhen nur auf einer relativ geringen Anzahl an Untersuchungen, in denen kleine Turbinen überrepräsentiert sind und die Aallänge immer ähnlich war. Daher überschätzt diese Gleichung die Schädigungsrate bei großen Turbinen mit kleiner Fallhöhe und bei kleinen Aalen. Diese älteren Modelle sollten daher nicht mehr eingesetzt werden.

Das aalspezifische Modell für einzelne Versuchsanordnungen von Ebel [2] ist nicht für die Prognose der mittleren Schädigungsrate, sondern für einzelne Versuchsanordnungen konzipiert.

Die drei Modelle von Gomes et al. [3] sowie das Modell für standortbezogene Mittelwerte von Ebel [2] sind für die Prognose der Schädigungsrate von Aalen bei der Bewertung einer Vielzahl von Wasserkraftanlagen grundsätzlich geeignet.

Die Modelle von Gomes et al. [3] berücksichtigen nur solche Betriebszustände, bei denen die Turbine zu mindestens 70 % geöffnet ist, während Ebel [2] alle Betriebszustände unabhängig von der Turbinenöffnung betrachtet. Das führt dazu, dass Gomes et al. [3] niedrigere Mortalitätsraten liefern als Ebel [2], weil die Turbinenmortalität bei nur wenig geöffneten Turbinen größer ist als bei voll geöffneten. Für die gefragte Prognose, die die Turbinenmortalität als Mittelwert über einen längeren Zeitraum abbilden soll, ist das Modell von Ebel [2] eher geeignet, da alle Betriebszustände abgebildet werden.

Das Modell von Ebel [2] basiert auf einer größeren Datenmenge und weist im Vergleich mit den übrigen Modellen die höchste Übereinstimmung mit den Freilandbefunden auf. Es besitzt mit $R^2 = 0,88$ ein hohes Erklärungsvermögen.

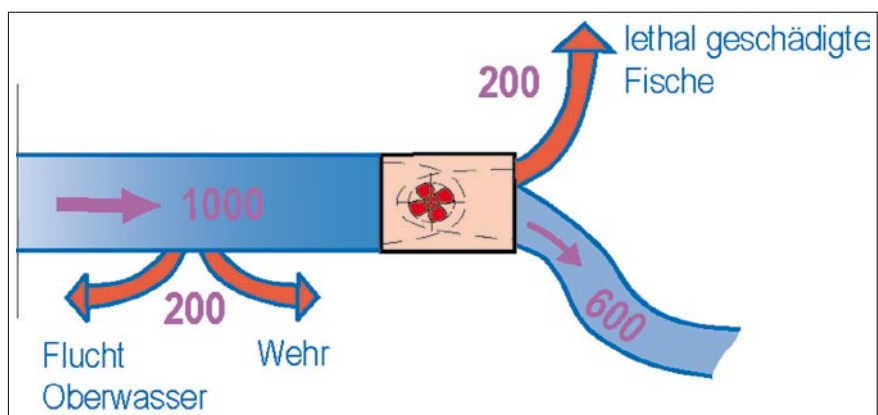


Bild 1: Beispiel für die Berechnung der Mortalitätsrate bei Ebel [2] und Larinier et al. [3], [4], [5]

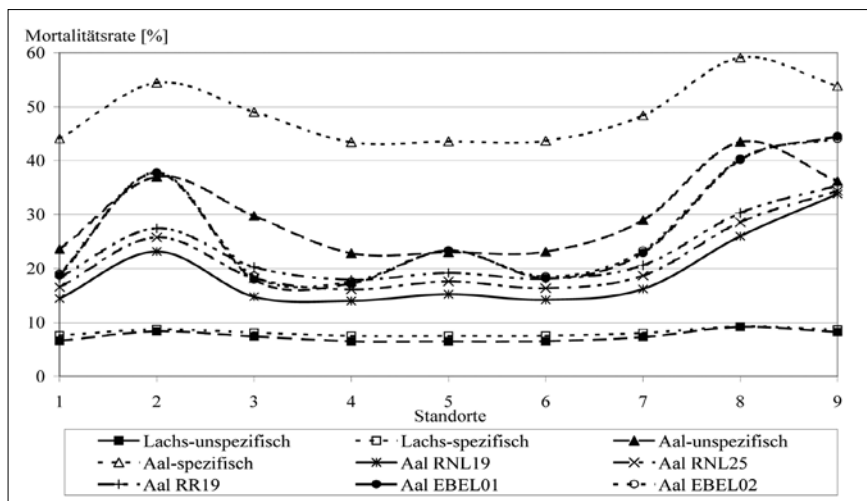


Bild 2: Vergleich der mit den Modellen ermittelten Mortalitätsraten von Blankaalen bei der Passage von verschiedenen Kaplan-Turbinen (Länge Lachs = 0,15 m, Länge Aal = 0,66 m; Diagramm zur Verdeutlichung mit Linien versehen)

Die Bestimmung der Mortalitätsrate in den Versuchen, die der Modellbildung zu Grunde liegen, erfolgt bei Larinier et al. [3], [4], [5] anders als bei Ebel [2]. Larinier berechnet die Mortalitätsrate als Quotient aus den gefangenen toten und verletzten Fischen sowie der Gesamtheit der oberhalb der Turbine eingesetzten Fische. Somit werden auch jene Versuchsfische berücksichtigt, die die Turbine nicht passiert haben und im Oberwasser verbleiben oder über andere Wege ins Unterwasser gelangen. Dadurch ergeben sich Werte, die die tatsächliche Turbinenmortalitätsrate unterschreiten. Larinier begründet dies damit, dass er in vielen Versuchen die Erfahrung gemacht habe, dass diese Versuchsfische, die nicht gefangen werden, überleben.

Ebel berechnet die Mortalitätsrate als Quotient aus den nach Turbinenpassage gefangenen toten und verletzten Fischen und der Gesamtheit der unterhalb der Turbine gefangenen Fische. Es werden also nur die Fische berücksichtigt, die tatsächlich die Turbine passiert haben.

Die verschiedenen Berechnungsansätze für die Bestimmung der Mortalitätsrate führen dazu, dass Larinier et al. in der Regel etwas niedrigere Mortalitätsraten zu Grunde legen als Ebel. Entsprechend fallen auch die Ergebnisse ihrer Prognosemodelle niedriger aus.

In **Bild 1** ist ein Beispiel dargestellt: Von 1 000 eingesetzten Versuchsfischen werden 800 nach der Turbinenpassage wieder gefangen, wobei 200 der 800 Fische lethal geschädigt oder tot sind:

- Larinier: Mortalitätsrate = 200 tote Fische/ 1 000 Fische = 20 %

- Ebel: Mortalitätsrate = 200 tote Fische/ 800 wieder gefangene Fische = 25 %
- Die dem Modell von Ebel zu Grunde liegende Berechnungsmethode der Mortalitätsrate bildet die Turbinenmortalität besser ab als die von Larinier verwendete Methode. Es

wird daher empfohlen, die Mortalitätsraten von Aalen in Kaplan-Turbinen mit dem Modell für standortbezogene Mittelwerte von Ebel zu berechnen.

4 Modellvergleich

Zum Vergleich der verschiedenen Modelle wurden die Mortalitätsraten von verschiedenen Turbinen berechnet. Die Ergebnisse sind in **Bild 2** dargestellt.

Der Vergleich der beiden Modelle für die Berechnung der Schädigungsrate von Lachsen zeigt, dass die Ergebnisse nicht wesentlich voneinander abweichen.

Unter den Modellen zur Berechnung der Schädigungsrate von Aalen liefert das aalspezifische Modell von Larinier et al. [4] die höchsten Werte. Wie erwähnt überschätzt dieses Modell bei bestimmten Turbinengrößen die Schädigungsrate.

Die drei Modelle von Gomes et al. [3] (RNL19, RNL25, RR19) ähneln sich in den Ergebnissen und liefern die niedrigsten Schädigungsraten. Auch die beiden EBEL-Modelle kommen zu ähnlichen Ergebnissen.

ANZEIGE



VEGAS
Kolloquium 2010

In-situ-Sanierung Stand und Entwicklung Nano und ISCO

Donnerstag, 07. Oktober 2010

Universität Stuttgart
Campus Stuttgart-Vaihingen
Ingenieurwissenschaftliches Zentrum IWZ
Pfaffenwaldring 9, Hörsaal V 9.01

mit anschließendem

Young Scientists' Workshop

Nano / Micro-Fe

Thursday-Friday, October 07-08, 2010

VEGAS-Laboratory, Pfaffenwaldring 61

Programm unter:

<http://www.iws.uni-stuttgart.de/institut/vegas/aktuelles/>

Rita Keuneke and Ulrich Dumont

Comparison of Empirical Models to Estimate the Fish Mortality in Hydroelectric Turbines

Whenever a water body passes a hydropower station, damage to the downstream migrating fish must be expected. A number of prognosis models can be employed to assess and estimate the damage rate to the fish population during these turbine passages. A comparison of different types of empirical models has been carried out as part of a research paper regarding the development and testing of measure plans to ensure an ecological compatible implementation of hydro power in the mid-Weser river system. These models have also been evaluated on the basis of their effectiveness to estimate damage rates in a chain of hydro power plants.

Рита Койнеке и Ульрих Дюмо

Сравнение моделей прогнозирования для расчета обусловленной эксплуатацией турбин смертности рыбы

Как правило, на всех водных потоках, где идущая вверх по течению рыба должна пропускаться через электростанции, следует принимать в расчет ущерб, наносимый рыбе. Для определения и прогнозирования коэффициента смертности рыбы при прохождении через турбины имеются несколько моделей расчета. В рамках исследования „Разработка и практическое апробирование плана мероприятий по экологически совместимому использованию гидроэнергии на среднем Везере“ было проведено сравнение различных эмпирических моделей и их применимость при расчете коэффициента смертности рыбы в системе гидроэлектростанций.

Es bleibt zu berücksichtigen, dass alle Modelle die Realität nur in gewissen Grenzen abbilden können.

5 Zusammenfassung

Für die Ermittlung und Prognose der Mortalitätsrate von Fischen bei der Turbinenpassage stehen verschiedene Berechnungsmodelle zur Verfügung.

Man unterscheidet die physikalischen Modelle, die versuchen, die Wahrscheinlichkeit der Kollision des Fisches mit den Turbinenschaufeln abzubilden, und die empirischen Modelle, die aus gesammelten Versuchsdaten durch Regressionsverfahren Näherungsgleichungen ermitteln.

Um den Einfluss einer Kette von Wasserkraftanlagen auf die Überlebensrate von Fischen zu ermitteln, muss für eine Vielzahl von Wasserkraftanlagen eine mittlere Mortalitätsrate prognostiziert werden. Für diesen Anwendungsfall sind die empirischen Modelle am ehesten geeignet. Daher wurden verschiedene empirische Modelle miteinander verglichen und auf ihre Anwendbarkeit hin untersucht.

Für die Berechnung von Schädigungen in Francis-Turbinen steht nur ein Modell (Larinier et al. [4]) zur Verfügung, das für Lachse entwickelt wurde und auf einer geringen Anzahl von untersuchten Standorten basiert. Bei Anwendung dieses Modells muss man sich daher dessen begrenzter Aussagefähigkeit bewusst sein.

Zur Prognose von Schädigungen von Lachsen in Kaplan-Turbinen stehen nur zwei Modelle zur Verfügung. Es wird das von Larinier et al. [4] entwickelte salmoneidenspezifische Modell empfohlen.

Die Ermittlung der Mortalitätsrate von Aalen in Kaplan-Turbinen kann mit verschiedenen Modellen erfolgen. Der Vergleich der Modelle hat gezeigt, dass das von Ebel [2] entwickelte Aal-spezifische Modell für standortbezogene Mittelwerte für Kaplan-Turbinen die plausibelsten Werte liefert.

Danksagung

Die hier dargestellten Ergebnisse wurden im Rahmen der Bearbeitung des Projektes „Erarbeitung und Praxiserprobung eines Maßnahmenplans zur ökologisch verträglichen Wasserkraftnutzung an der Weser“

(FKZ-Nr.: 370 721 200) im Auftrag des Umweltbundesamts gewonnen. Wir bedanken uns bei den Mitgliedern des projektbegleitenden Arbeitskreises, besonders bei Stephan Naumann, sowie bei den externen Experten Dr. Guntram Ebel und Michel Larinier für die bereitwillige und hilfreiche Unterstützung während der Projektbearbeitung.

Autoren

Dipl.-Ing. Rita Keuneke

Dipl.-Ing. Ulrich Dumont

Ingenieurbüro Floecksmühle

Bachstraße 62-64, 52066 Aachen

ib@floecksmuehle.com

Literatur

- [1] ATV-DVWK (Hrsg.): Fischschutz- und Fischabstiegsanlagen – Bemessung, Gestaltung, Funktionskontrolle. In: ATV-DVWK-Themen, Hennef, 2004.
- [2] Ebel, G.: Turbinen bedingte Schädigung des Aales (*Anguilla anguilla*) – Schädigungsraten an europäischen Wasserkraftanlagenstandorten und Möglichkeiten der Prognose. In: Mitteilungen aus dem Büro für Gewässerökologie und Fischereibiologie Dr. Ebel (2008), Heft 3.
- [3] Gomes, P.; Larinier, M.: Dommages subis par les anguilles lors de leur passage au travers des turbines Kaplan – Etablissement de formules prédictives. Anguilles-ouvrages – Programme national de recherche développement 2008-2009, Toulouse.
- [4] Larinier, M.; Dartiguelongue, J.: La circulation des poissons migrateurs et transit à travers les turbines des installations hydroélectriques. In: Bull. Fr. Peche Piscic. (1989), Nr. 312/313.
- [5] Larinier, M.; Travade, F.: La conception des dispositifs de franchissement pour les Aloses. In: Bull. Fr. Pêche Piscic. (1992), Nr. 326/327, S. 125-133.
- [6] Montén: Fish and turbines – Fish injuries during the passage through power station turbines. Vattenfall, Stockholm, 1985.
- [7] Pavlov, D. S.; Lupandin, A. I.; Kostin, V. V.: Downstream migration of fish through dams of hydroelectric power plants. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, 2002.
- [8] Bell, M. C.: Revised Compendium of the Success of Passage of Small Fish Through Turbines. In: Report to the U. S. Army Corps of Engineers, North Pacific Division, Portland, Oregon, 1991.
- [9] Turnpenny, A. W. H.; Clough, S.; Hanson K. P. et al.: Risk Assessment for Fish Passage Through Small, Low-Head Turbines. Final Report. Energy Technical Support Unit, Harwell, Unites Kingdom, 2000.
- [10] Raben, K. von: Kaplanturbinen und Fische. In: Wasserwirtschaft 45 (1955), S.196-200.
- [11] Raben, K. von: Zur Beurteilung der Schädlichkeit der Turbinen für Fische. In: Wasserwirtschaft 47 (1957), S. 60-63.
- [12] Raben, K. von: Zur Frage der Beschädigung von Fischen durch Turbinen. In: Wasserwirtschaft 47 (1957), S. 97-100.