

Fischpassage durch die Turbinen



Expertenbericht im Auftrag des
Bundesamtes für Umwelt BAFU

Oktober 2016

WFN - Wasser Fisch Natur AG
Brunnmattstrasse 15
3007 Bern

Hässig Consulting
Hinterdorf 16
3273 Kappelen

WASSER
FISCH
NATUR

Hässig Consulting
Öko**logische** Wasserkraft

Impressum

Autoren: Arthur Kirchhofer *WFN - Wasser Fisch Natur AG*
Brunnmattstrasse 15
CH-3007 Bern
031 533 50 20
info@wfn.ch

Peter Hässig *Hässig Consulting*
Hinterdorf 16
CH-3273 Kappelen
076 315 53 14
haessig_consulting@bluewin.ch

Auftraggeber: Bundesamt für Umwelt (BAFU)
Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr,
Energie und Kommunikation (UVEK)

Begleitgruppe: Lukas Bammatter, BAFU
Andreas Knutti, BAFU
Martin Huber-Gysi, BAFU
Stefan Vollenweider, Wasser-Agenda 21

Disclaimer: Dieser Expertenbericht wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

Zitiervorschlag: Kirchhofer, A. & P. Hässig 2016: Fischpassage durch die Turbinen. Studie im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt: 42 S.

Bern, Oktober 2016

Titelseite: Im Uhrzeigersinn von oben links: Francisturbine (KW Laufenburg), Pelton-turbine (KW Kap-pelerhof), Kaplanturbine (KW Chancy-Pougny) © WFN - Wasser Fisch Natur AG; KW Chancy-Pougny © Andritz-Hydro AG).

Inhalt

1 Einleitung	1
1.1 Rechtlicher Hintergrund	1
1.2 Problemstellung	1
1.3 Auftrag	3
2 Fischwanderungen	5
2.1 Die Abwärtswanderung der Fische	5
2.2 Abwärtswanderung trotz Kraftwerken	6
3 Wahl des Turbinentyps	7
3.1 Einsatzbereiche der verschiedenen Turbinentypen	7
3.2 Technische Kennwerte klassischer Turbinentypen	8
4 Fischwanderung durch die Turbinen	11
4.1 Welche Schäden erwarten den Fisch?	11
4.3 Passage über mehrere aufeinanderfolgende Anlagen	16
5 Bewertung der Turbinentypen	19
6 Weiterentwicklung zu «fischverträglichen» Turbinen	23
6.1 Ausgangslage	23
6.2 Funktionsprinzip	24
6.5 «Fischverträglicher» Turbinenbetrieb	29
7 Fazit	31
8 Literatur	33
Anhang	
A1: Wasserkraftwerke mit Abfluss >50 m ³ /s und Fallhöhe <20 m	I
A2: Erklärung von Fachbegriffen	II
A3: Praxisbeispiel KW Hagneck	VII

1 Einleitung

1.1 Rechtlicher Hintergrund

Mit der Revision des Gewässerschutzgesetzes (GSchG) und des Energiegesetzes (EnG), die am 1.1.2011 in Kraft getreten ist, hat die Gewährleistung der freien Fischwanderung insbesondere auch bei Kraftwerksanlagen einen grösseren Stellenwert erhalten als bisher. Einerseits müssen ungenügende Einrichtungen für die freie Aufwärtswanderung bei bestehenden Anlagen saniert bzw. neu erstellt werden; andererseits muss die Abwärtswanderung ebenfalls sichergestellt werden. Dies war bereits in der bisherigen Gesetzgebung gefordert, da im Bundesgesetz über die Fischerei (BGF) seit 1991 verlangt wird, dass die freie Fischwanderung sichergestellt werden muss (Art. 9 1b) und verhindert werden muss, dass Fische durch Maschinen getötet oder verletzt werden (Art. 9 1d). Allerdings war dies nach Artikel 10 BGF bis anhin nur soweit möglich als Massnahmen nach Art. 9 BGF wirtschaftlich tragbar sind. Mit der Revision des GSchG im 2011 wurde diese Limitierung aufgehoben: Da die nach Artikel 10 BGF notwendigen Massnahmen bei Wasserkraftwerken dem Konzessionär gemäss Artikel 15abis EnG vollständig von der nationalen Netzgesellschaft entschädigt werden, sind alle zum Schutz der Lebensräume der Wassertiere notwendigen Massnahmen für den Konzessionär wirtschaftlich tragbar. Die Sanierungen sind bis Ende 2030 abzuschliessen.

Im Rahmen der Strategischen Planungen zur Fischgängigkeit, die die Kantone der zuständigen Bundesstelle bis Ende 2014 einreichen mussten, wurde aufgezeigt, dass bei 970 Anlagen in der ganzen Schweiz die Fischwanderung wesentlich beeinträchtigt ist. Davon ist bei über 700 Anlagen insbesondere der Fischabstieg nicht gewährleistet und muss bis 2030 saniert werden [BAMMATTER et al 2015]. Knapp 40 bezüglich Fischabstieg sanierungsbedürftige Anlagen liegen an grösseren Fliessgewässern wie z.B. Hochrhein, Aare und Rhone.

Die Kantone müssen die Sanierungen für jede Anlage verfügen und dem Bund über die Massnahmenplanungen und die Umsetzungsfristen alle vier Jahre Bericht erstatten (GSchG Artf. 83b).

Läuft für eine sanierungspflichtige Anlage die Konzession vor 2030 aus, ist das Problem des Fischabstiegs im Rahmen des Verfahrens zur Konzessionserneuerung zu lösen.

1.2 Problemstellung

Zur Aufwärtswanderung der Fische bestehen umfangreiche Kenntnisse über Verhalten, Orientierung und Leistungsfähigkeit vieler Fischarten und ihrer unterschiedlichen Entwicklungsstadien [PORCHER & TRAVADE 2002; ADAM & LEHMANN 2011; DWA 2014]. Damit sind die Grundlagen vorhanden, um wirkungsvolle und leistungsfähige Aufstiegs-hilfen planen und bauen zu können. Für die Abwärtswanderung dagegen sind die biologischen Kenntnisse erst für wenige Arten und Lebensstadien ausreichend - v.a. für Langdistanzwanderer wie verschiedene Lachsarten, Maifisch oder Aal - um wirkungsvolle Abstiegshilfen planen zu können [DVWK 1997; COUTANT 2001; EBEL 2013]. Für viele weitere Arten fehlen aber nach wie vor die spezifischen Kenntnisse über Orientierung, Wanderverhalten, Wanderkorridor oder Wanderzeiten, um den Abstieg mit technischen Hilfen unterstützen zu können.

Wenn Fische auf ihrer Abwärtswanderung passiv mit dem Strom schwimmen, kann davon ausgegangen werden, dass sie den gesamten zur Verfügung stehenden Wasserkörper benutzen, und die Abwärtswanderung proportional auf die verschiedenen Abflüsse verteilt wird:

⇒ über die Fischaufstiegshilfe wird ein sehr kleiner Teil abwandern (in der Regel <1% gemäss Fischpassdotierung),

- ⇒ bei Wehrüberfall wird ein dem Abfluss entsprechender Anteil Fische übers Wehr abwandern,
- ⇒ der grösste Teil wird mit der Hauptströmung den Weg durch die Turbinen nehmen.

Beim Abstieg durch die Turbinen sind die Fische einem Verletzungsrisiko ausgesetzt, das je nach Turbinentyp und –grösse von gering bis sehr gross variieren kann. Um dieses Risiko zu reduzieren, bestehen mehrere Möglichkeiten: entweder werden die Fische daran gehindert, überhaupt in die Turbinen zu gelangen, oder die Turbinen sind so gestaltet, dass das Risiko minimiert werden kann.

Eine Möglichkeit zur Verhinderung von Schäden durch Turbinenpassage sind Fischschutzanlagen, zwingend in Kombination mit Bypässen zur Abwärtswanderung. Feinrechen mit eng stehenden (horizontalen oder vertikalen) Stäben mit lichtem Abstand von 10 – 15 mm [EBEL 2013] und Ableitung der Fische in einen Bypass oder übers Wehr verhindern das Eindringen des Fisches in die Turbine und erfüllen damit diese Anforderungen, sofern die Anströmgeschwindigkeit des Rechen klein ist (aktueller Grenzwert <0.5 m/s). In der Schweiz sind mehrere solche Anlagen in den letzten Jahren an Aare und Limmat installiert worden, allerdings mit 20 mm Stababstand (Abbildung 1).

Neuere Untersuchungen zeigen, dass sich z.B. Lachs-Smolts sehr präzise orientieren und auf der Abwärtswanderung durch Strukturen, Fliessgeschwindigkeiten, Beschleunigungen und Druckunterschiede leiten lassen [GOODWIN et al. 2014; ARENAS et al. 2015]. Diese Erkenntnisse werden vermehrt auch eingesetzt, um Fischabstiegshilfen zu konzipieren. Es stehen inzwischen verschiedene Leitvorrichtungen (Louvers, Bar-Racks) zur Ver-



Abbildung 1: Horizontalrechen mit 20 mm lichter Stabweite beim Dotier-Kraftwerk des KW Rüchlig (Bild: WFN).

fügung, mit denen abwärts wandernde Fische zu einem Bypass geführt werden können. Entsprechende Forschungsarbeiten haben aufgezeigt, dass Lösungen möglich sind, die relativ geringe Produktionsverluste für das Kraftwerk zur Folge haben und trotzdem eine gute Leitwirkung für wandernde Fische aufweisen [LARINIER & TRAVADE 1999; DWA 2005; LARINIER 2008; Bös et al. 2012; EBEL 2013; KRIEWITZ 2015].

Fischschutzanlagen kombiniert mit Bypässen eignen sich vor allem für kleinere Anlagen mit Turbinen bis zu einer Durchflussmenge von ca. 50 m³/s, nach neuesten Untersuchungen bis ca. 90 m³/s [EBEL 2015]. Für grössere Anlagen sind Feinrechen und vergleichbare Fischschutzanlagen bedeutend schwieriger zu realisieren, da die Verlegung durch Treibgut (Laub, Wasserpflanzen, Schwemmholz etc.) problematisch ist, die Reinigungshäufigkeit zunimmt, die Produktionseinbussen relativ gross sind und damit die wirtschaftlichen Nachteile für die Kraftwerksbetreiber grösser werden.

1.3 Auftrag

Deshalb stellt sich die Frage, ob es akzeptabel sei, dass abwandernden Fischen in grossen Flüssen nach wie vor in den meisten Fällen der rund 55 grossen Flusskraftwerke in der Schweiz nur der Weg durch die Turbinen bleibt und sie dabei einem unterschiedlich grossen Verletzungs- und Mortalitätsrisiko ausgesetzt werden. Die vorliegende Studie behandelt denn auch ausschliesslich den Problemkreis der Abwärtswanderung durch die Turbinen bei grösseren Wasserkraftanlagen, das Thema von Fischschutzanlagen und Leitvorrichtungen oder die Aufwärtswanderung wird in andern Studien ausführlich diskutiert.

Weiter werden aktuelle Entwicklungen sogenannt «fischverträglicher» Turbinen vorgestellt und die Frage diskutiert, ob mit diesen technischen Anpassungen im Turbinenbereich das Verletzungs- und Mortalitätsrisiko für passierende Fische wesentlich verringert werden kann.

Mit der Beschreibung des aktuellen Wissensstandes sollen die Möglichkeiten und Grenzen des Fischabstiegs durch die Turbinen aufgezeigt werden. Diese Zusammenfassung soll den Entscheidungsträgern in Verwaltung, Energiewirtschaft und Ingenieurbüros den aktuellen Stand des Wissens zugänglich machen und so eine zusätzliche Möglichkeit zur Sicherstellung des Fischabstiegs bei «sanierungspflichtigen Anlagen» aufzeigen. Dazu sollen insbesondere die folgenden Fragen beantwortet werden:

- ⇒ Unter welchen Voraussetzungen ist die Sanierung des Fischabstiegs über die Passage durch die Turbine sichergestellt. (biologische Perspektive, Kapitel 2)?
- ⇒ Welche Turbinentypen werden heute an welchen Gewässertypen/Kraftwerken eingesetzt (Kapitel 3, Anhang A1)?
- ⇒ Wo in der Schweiz müssen in den nächsten 20 Jahren Kraftwerke aus ökologischen Gründen saniert werden, die den Einsatz einer fischverträglichen Turbine anbieten (Anhang 1)?
- ⇒ Unter welchen Voraussetzungen ist der Einbau einer «fischverträglichen» Turbine eine Option zur Sicherstellung des Fischabstiegs (technische Perspektive, Kapitel 6)?
- ⇒ Könnten «fischverträgliche» Turbinen an gewissen Standorten anstelle einer Fischschutzeinrichtung die sichere Wanderung stromabwärts ermöglichen (Kapitel 6)?
- ⇒ Wären «fischverträgliche» Turbinen verhältnismässiger als Fischschutzvorrichtungen? Vergleich zwischen fischverträglichen Turbinen und Fischschutzvorrichtungen (Kapitel 6).
- ⇒ Wie ist das wirtschaftliche Potenzial der «fischverträglichen» Turbinen einzuschätzen? Wo liegt der Nutzen für Kraftwerksbetreiber (Kapitel 6)?
- ⇒ Wann genügt der Fischabstieg durch die Turbine den rechtlichen Anforderungen (qualitativ, quantitativ, Kapitel 4 und 7)?



2 Fischwanderungen

2.1 Die Abwärtswanderung der Fische

Fische leben in einer dynamischen Umgebung und sind den physikalischen Gesetzen unterworfen. Als schwimmschwache Jungfische werden sie mit dem fliessenden Wasser flussabwärts verfrachtet und müssen zur Kompensation wieder flussaufwärts wandern. Anadrome Arten (Lachs, Maifisch, Fluss- und Meerneunauge) pflanzen sich im Süsswasser fort und wandern als Jungfische ins Meer, später wandern sie zur Fortpflanzung wieder die Flüsse aufwärts. Katadrome Arten (Aal) landen als Jugendstadien an den Meeresküsten, wandern in die Flüsse auf und müssen nach Erreichen der Geschlechtsreife wieder flussabwärts ins Meer wandern. Potamodrome Arten führen auf- und abwärts gerichtete Wanderungen innerhalb der Flüsse und See aus. Allen gemeinsam ist, dass die Ortsveränderungen zwingend in beide Richtungen möglich sein müssen. Ist nur eine Richtung möglich, wird der Bestand über kurz oder lang unwiderruflich geschädigt werden.

Die Abwanderung der Fische wird durch verschiedene Faktoren gesteuert. Einerseits spielen äussere (exogene) Faktoren wie Lichtintensität, Tageslänge, Wassertemperatur, Abfluss und Fliessgeschwindigkeiten eine grosse Rolle, andererseits sind artspezifische, innere (endogene) Zeitgeber als Auslöser für die Wanderaktivität beteiligt. Zudem wurde bei vielen Arten eine zeitliche Synchronisation der Individuen bei der Abwanderung beobachtet [COUTANT 2001; ADAM & LEHMANN 2011]. Bei vielen Arten erfolgt die Abwanderung hauptsächlich nachts (z.B. Barbe, Hasel, Schmerle, Gründling [EBEL 2013]), zum Teil auch in den Dämmerungszeiten (z.B. Lachs-Smolts). Beim Aal ist bekannt, dass auch der Lunarzyklus eine grosse Rolle spielt und die Abwanderung bevorzugt kurz vor oder nach Neumond

stattfindet [EBEL 2008]. Die jahreszeitliche Dynamik der Abwärtswanderung ist wiederum artspezifisch. Junge Salmoniden nehmen ihren Weg zum Meer grundsätzlich im Frühjahr (April bis anfangs Mai) auf, und die Aktivität ist innerhalb der Population stark synchronisiert. Das bedeutet, dass in relativ kurzer Zeit der grösste Teil der Junglachse abwandert. Aale wie auch viele Cyprinidenarten wandern eher im Spätsommer/Herbst (ab August) bis in den Frühwinter hinein (Dezember/Januar). Eine zeitliche Synchronisation der Abwärtswanderung wurde auch bei Aalen beobachtet.

Bei der Art der Abwärtswanderung wird unterschieden nach Arten, die aktiv und somit schneller als die Strömung, aktiv-passiv und langsamer als die Strömung, häufig gekoppelt mit Suchverhalten und gegen die Strömung gerichtetem Kopf, oder passiv und mit der Strömung gleichgerichtet abwärts wandern. Letztere Wanderart wird bei Larven und häufig bei Jungfischen beobachtet, die mit der Strömung verdriftet werden. Dies dürfte auf das eingeschränkte Schwimmvermögen dieser Entwicklungsstadien zurückzuführen sein. Die meisten Fischarten folgen bei der Abwanderung der Hauptströmung oder dem Stromstrich im Fluss. Dieser verläuft bei gestreckter Linienführung in Flussmitte, in Kurven am Prallhang. Lachse und Jungfische zahlreicher Arten bevorzugen zur Abwanderung dabei eher die oberflächennahen Wasserschichten, Aale, Barben, Gründlinge, Groppen, Schmerlen, aber auch Brachsmen, Trüschchen und Wels dagegen die sohlennahen Schichten. Gemäss neueren Untersuchungen ist aber in allen Wasserschichten mit abwandernden Fischen zu rechnen [EBEL 2013].

2.2 Abwärtswanderung trotz Kraftwerken

Wie bereits in Kapitel 1.2 kurz erwähnt, stehen dem Fisch auf der Abwärtswanderung bei einem Kraftwerk in der Regel mehrere Wege offen. Während der Abstieg über eine Fischaufstiegshilfe gefahrlos möglich ist, lauern beim Abstieg übers Wehr unter Umständen grössere Gefahren. Bei grossen Flusskraftwerken ist die Dimensionierung in der Regel auf ein $Q_{50} - Q_{100}$ ausgelegt, so dass während des grössten Teils des Jahres dieser Weg nicht zur Verfügung steht. Zudem ist insbesondere bei älteren Anlagen stromab des Wehrs häufig eine Struktur zur Energievernichtung vorgelagert. Bei solchen Betonplatten oder Blockriegeln im Tosbecken besteht für die Fische eine erhebliche Verletzungsgefahr. Zudem limitiert die Höhe des Wehrüberfalls den verletzungsfreien Abstieg von Fischen. Im freien Fall nimmt mit zunehmender Fallhöhe und zunehmender Fischlänge die Gefahr von Verletzungen an Augen, Kiemen und inneren Organen zu, wenn

die Aufprallgeschwindigkeit >16 m/s beträgt. Für 18 cm lange Fische ist ab einer Fallhöhe von 30 m mit Verletzungen zu rechnen, bei 60 cm langen Tieren dagegen bereits ab 13 m Fallhöhe. Da Fische <10 cm diese Grenzggeschwindigkeit nicht erreichen, besteht für diese keine maximale Fallhöhe [BELL & DELACY 1972; TRAVADE & LARINIER 1992]. Der Abstieg übers Wehr wird mit diesen Verletzungsrisiken weiter eingeschränkt.

Eine Steuerung der Abwärtswanderung bezüglich Raum und Zeit ist gemäss heutigen Kenntnissen mit verschiedenen Massnahmen möglich, so dass Vorrichtungen zum Fischschutz ihre erwünschte Wirkung zeigen können (Abbildung 2).

Weitere intensive Forschungsarbeiten sind jedoch notwendig, um die Abwärtswanderung der verschiedenen Arten und Lebensstadien besser zu verstehen und entsprechend lenken zu können. In der Folge wird nur die Abwanderung durch die Turbinen näher betrachtet.

Fischschutzsysteme	Abschirmen und Umlenken	Physische Barrieren	Feinrechen Eicher Rechen Trommerlrechen
		Mechanische Verhaltensbarrieren	Grobrechen Louver Bar Racks
		Sensorische Verhaltensbarrieren	Luft-/Lichtvorhänge Niederfrequenter Schall Elektrische Scheuchsysteme
	Durchleiten	Fischschonende Turbinen	Alden Turbine Voith - Minimum Gap Runner Andritz - Fischschonende Kaplan turbine
		Fischschonendes Anlagenmanagement	Frühwarnsysteme Kein Teillastbetrieb Wehrüberfall
		Bypasss-Systeme	Oberflächennahe Sammelrinnen "Trap and Truck" Modifizierte Wehrfelder

Abbildung 2: Verschiedene Massnahmentypen um den Fischschutz auf der Abwärtswanderung bei Kraftwerksanlagen zu gewährleisten (verändert nach [KRIEWITZ et al. 2015]).

Fazit: Die Abwärtswanderung ist artspezifisch und häufig vom Entwicklungsstadium abhängig. Die Abwärtswanderung aller Arten und Lebensstadien bei allen Anlagentypen und -grössen in ungefährliche Bahnen zu lenken, ist nach heutigem Wissen noch nicht möglich.

3 Wahl des Turbinentyps

3.1 Einsatzbereiche der verschiedenen Turbinentypen

Bei der Auslegung eines Wasserkraftwerks sind die technischen Eigenschaften der verschiedenen Turbinentypen unter den örtlichen Gegebenheiten im Einzelfall zu prüfen. Die Wahl des Turbinentyps hängt in erster Linie von der Fallhöhe H ab. In den Überlappungsbereichen spielen weitere Kriterien wie die zur Verfügung stehende Wassermenge Q , die Gleichmässigkeit des Wasserzuflusses, die Regulierungsanforderungen sowie die Erosionsgefährdung («Sandschliff») eine massgebliche Rolle. Trotzdem können Standard-Einsatzbereiche für die klassischen Turbinentypen genannt und in einem Q-H-Diagramm grafisch dargestellt werden (Abbildung 3).

Die verschiedenen Turbinentypen unterscheiden sich in ihren Q-H-Einsatzfeldern recht deutlich und können nur in beschränktem Mass gegeneinander ausgetauscht werden. Die Wahlfreiheit des Kraftwerksbetreibers ist also eingeschränkt.

Im Anhang A1 findet sich eine Zusammenstellung der relevanten Daten zu den grösseren Flusskraftwerken der Schweiz für Fallhöhen bis ca. 25 m und Ausbauwassermengen ab ca. 45 m³/s (Daten nach BFE 2015).

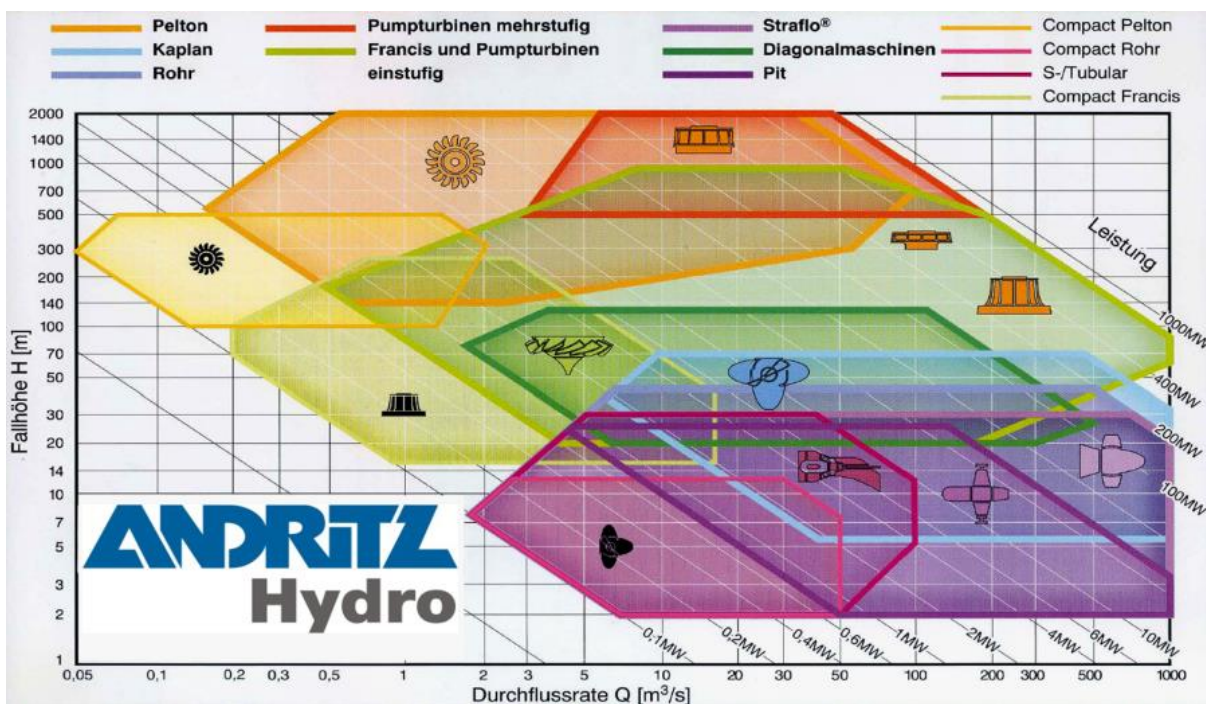


Abbildung 3: Einsatzbereich verschiedener Turbinentypen in Abhängigkeit des Durchflusses Q und der Fallhöhe H (Grafik: © Andritz Hydro AG).

3.2 Technische Kennwerte klassischer Turbinentypen

Pelton turbine (Freistrahlturbine): Die Pelton-turbine wird bei hohen bis sehr hohen Fallhöhen, 300 – 2000 m, und kleinen bis mittleren Wassermengen, 1 – 100 m³/s, eingesetzt. Sie weist im Vergleich zu den anderen Turbinentypen einen tieferen Spitzenwirkungsgrad von 90 – 92 % auf. Dafür bietet sie eine gute Regulierbarkeit (-> Erläuterungen Fachbegriffe Anhang A2) bei variablen Wasserzuflüssen und weist, insbesondere bei mehrdüsigten Turbinen, ansprechende Teillastwirkungsgrade auf (-> Erläuterungen Fachbegriffe Anhang A2). Auch bei hoher Beanspruchung durch Sand-schliff wird sie dank der guten Zugänglichkeit der beanspruchten Laufradbereiche für Schweissreparaturen bevorzugt eingesetzt.

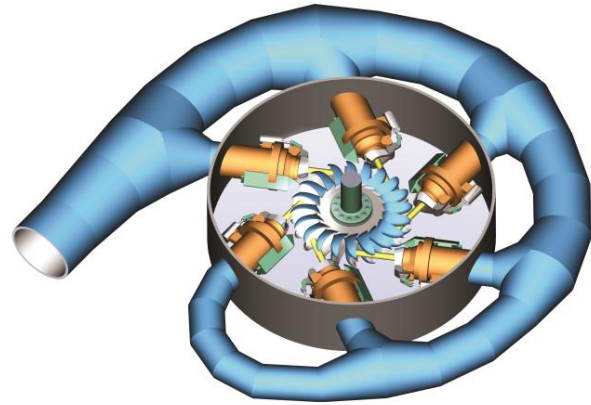


Abbildung 4: Sechsdüsig Pelton turbine, Ansicht von schräg oben (Zeichnung: Andritz Hydro AG).

Francisturbine: Die Francisturbine ist der weltweit am häufigsten verwendete Turbinentyp. Sie wird für mittlere bis grosse Fallhöhen, 30 – 600 m, eingesetzt. In der Schweiz deckt sie den Bereich mittlerer Wassermengen ab, allerdings mit einer grossen Streubreite. Auf dem internationalen Markt wird sie als geschweisste Konstruktion auch für sehr grosse Wassermengen ausgelegt. Sie weist mit 94 – 96 % die höchsten Spitzenwirkungsgrade von allen Turbinentypen auf (-> Erläuterungen Fachbegriffe Anhang A2). Da sie aber nur einfach reguliert ist, hat sie eine sehr spitze Wirkungsgradkurve. Wegen der daraus resultierenden, tiefen Teillastwirkungsgrade, ergibt sich eine schlechte Eignung bei variablen Wasserzuflüssen. Deshalb wird sie eher in Speicher- als in Laufkraftwerken eingesetzt. Weiter ist sie bei starkem Sandschliff wenig geeignet, da beschädigte Laufradbereiche für Reparaturarbeiten schlecht oder gar nicht zugänglich sind.

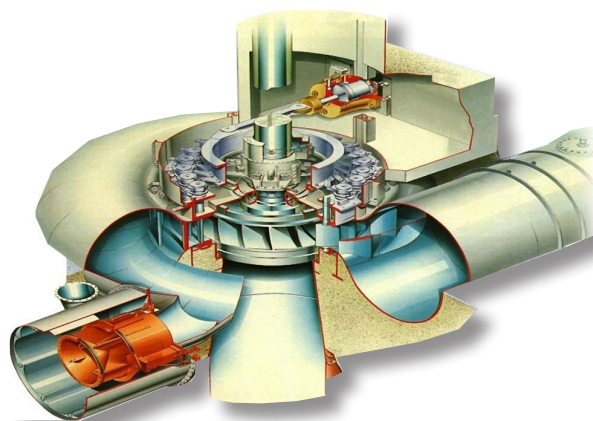


Abbildung 5: Vertikalachsige Francisturbine, aufgeschnittene Ansicht (Zeichnung: Andritz Hydro AG).

Kaplanturbine: Die Kaplan turbine wird bei kleinen bis mittleren Fallhöhen, 3 – 40 m, und mittleren bis grossen Wassermengen, 10 – 1000 m³/s, eingesetzt. Sie weist mittlere Wirkungsgrade von 92 – 94 % auf und verfügt dank der doppelten Regulierbarkeit über eine flache Wirkungsgradkurve mit verhältnismässig hohen Teillastwirkungsgraden. Damit ist sie sehr gut geeignet für variable Wasserzuflüsse, wie sie in Laufkraftwerken auftreten. Sie ist deshalb der typische Turbinentyp bei Laufkraftwerken an mittleren und grossen Flüssen. Dabei wird sie mit vertikaler, geneigter oder horizontaler Turbinenachse eingebaut. Bei grossen Anlagen dominiert heute die sogenannte Rohrturbine.

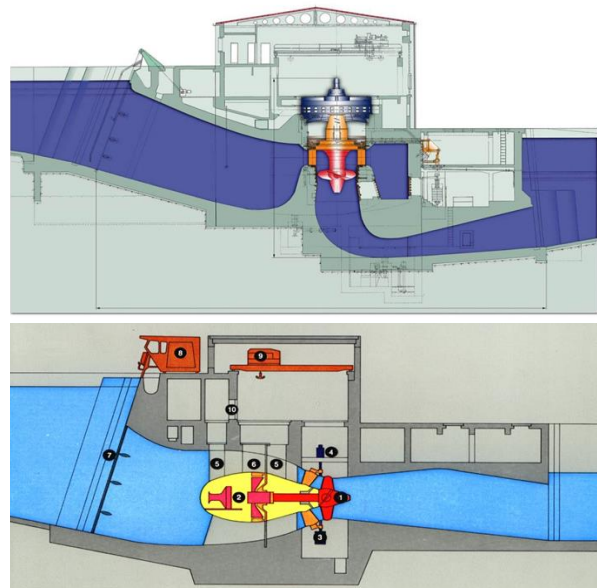


Abbildung 6: Vertikalachsige Kaplan turbine, Schnitt Typische Bauweise der 60er Jahre für Laufkraftwerke an grösseren Mittellandflüssen (oben). Horizontalachsige Rohr-Kaplan turbine, typische Bauweise neuer Laufkraftwerke an grösseren Mittellandflüssen (unten, Zeichnungen: Andritz Hydro AG).

Bei **Kleinwasserkraftwerken** können grundsätzlich die gleichen Turbinentypen eingesetzt werden. Allerdings kommen oftmals Abweichungen von den genannten Einsatzfeldern vor, indem die konstruktiv einfacheren, einfach regulierten Turbinentypen bis in geringere Fallhöhen eingesetzt werden. Ausserdem gibt es für sehr kleine Anlagen und/oder

Fallhöhen spezielle Entwicklungen: Ossberger-Turbine, Wasserschnecke, Wasserwirbel-Kraftwerk, Very-low-head-Turbine (VLH). Die Wirkungsgrade dieser Turbinentypen liegen in der Regel unter denjenigen der klassischen drei Typen. Der Schwerpunkt wird hier eher auf Einfachheit und Kostengünstigkeit gelegt.

Fazit: Bei der Wahl des Turbinentyps entscheiden primär deren technischen Einsatzmöglichkeiten. Nicht alle Turbinentypen sind in jedem Fall einsetzbar. Die Wahl des Turbinentyps ist damit auf die physikalischen Gegebenheiten auszurichten und muss für jeden Einzelfall gesondert geprüft werden.



4 Fischwanderung durch die Turbinen

4.1 Welche Schäden erwarten den Fisch?

Beim Passieren einer Turbine können Fische durch Berührung mit Turbinenteilen verletzt werden, aber auch durch schnelle und grosse Änderungen der Fliessgeschwindigkeit und damit korrelierte Turbulenzen und Scherkräfte, sowie durch schnelle Druckschwankungen (speziell Unterdruck) oder Kavitation ernsthafte Schäden erleiden [CADA et al. 1997; ABERNETHY et al. 2001]. Bei den meisten Verletzungen muss mit einem tödlichen Ausgang gerechnet werden. Zusätzlich sind indirekte Fischverluste dokumentiert, da die Fische nach einem Turbinendurchgang häufig betäubt, desorientiert oder sonst wie angeschlagen sind und so eine leichte Beute für Prädatoren (Vögel, Raubfische) werden. Die verschiedenen Fischarten und -grössen sind unterschiedlich stark betroffen. Folgende Faktoren können generell als ausschlaggebend für das Verletzungsrisiko des Fisches bezeichnet werden:

a) Fischspezifische Faktoren

- ⇒ Fischart: Grosse, lang gewachsene (Aal, Hecht) oder hochrückige Arten (z.B. Brachsen, Karpfen) sind stärker gefährdet als stromlinienförmige Arten (z.B. Forellenartige, Alet).
- ⇒ Schwimmblasen-Typ: Die Schwimmblase im Rückenbereich des Fisches ist ein Organ, welches dem Fisch die Tarierung in der Wassersäule ermöglicht. Arten ohne Verbindungsgang zwischen Schwimmblase und Darmtrakt (Egli, Zander oder Trüsche) sind stärker gefährdet als Arten mit einem Verbindungsgang zum Darmtrakt (z.B. Lachs, Forelle, Hecht und Cypriniden), da ein Druckausgleich nur über das Blut möglich ist und viel länger dauert als bei Arten mit Verbindung Schwimmblase-Darmtrakt.
- ⇒ Fischlänge: mit zunehmender Länge des Fisches nimmt die Kollisionswahrscheinlichkeit mit festen oder beweglichen Teilen des Leitapparates und der Turbine zu. Am stärksten betroffen sind diesbezüglich grosse Salmoniden (Lachs, Meerforelle) und ausgewachsene Aale mit Längen über 50 cm.

b) Turbinenspezifische Faktoren

- ⇒ Turbinentyp: Francisturbinen weisen in vielen Untersuchungen höhere Mortalitätswahrscheinlichkeiten auf als Kaplan-turbinen. Bei verschiedenen Turbinentypen ist ein Überleben passierender Fische unmöglich, z.B. Pelton, Ossberger.
- ⇒ Turbinendrehzahl: Mit höherer Drehzahl nimmt das Kollisionsrisiko für die Fische zu.
- ⇒ Turbinendurchmesser: Je kleiner der Durchmesser der Turbine, desto grösser ist die Kollisionswahrscheinlichkeit für die Fische.
- ⇒ Öffnungswinkel der Turbine: Je kleiner der Anstellwinkel des Leitapparates und der Laufradschaufeln und damit der Abstand zwischen den Schaufeln, desto höher ist die Kollisionswahrscheinlichkeit der Fische bei der Turbinenpassage.
- ⇒ Achsenrichtung: Umlenkungen der Fliessrichtung des Wassers bei vertikal-achsigen Turbinen erhöhen das Verletzungsrisiko für die Fische. Zudem weisen vertikalachsige Turbinen grössere Druckunterschiede beim Turbinendurchgang auf als horizontalachsige.
- ⇒ Spaltmass: Mit der Grösse des Abstandes zwischen Schaufeln und Schaufelmantel bzw. zwischen Schaufel und Nabe nimmt das Verletzungsrisiko zu (Spaltmass).

Wie die Darstellung der Druck- und Geschwindigkeitsverhältnisse bei einem Turbinendurchgang zeigt, tritt sowohl in Francis- als auch in Kaplan turbinen innerhalb von Sekundenbruchteilen eine massive Zunahme der Fließgeschwindigkeit und gleichzeitig ein extremer Druckabfall statt (Abbildung 7). Diesen schnellen Änderungen der Umgebungsvariablen können viele Fischarten kaum

standhalten und erleiden entsprechend gravierende Verletzungen.

Der Vergleich der Druckverhältnisse zwischen vertikal- und horizontalachsigen Kaplan turbinen zeigt, dass bei ersteren der Minimaldruck (Nadir) viel stärker variiert als bei letzteren (Abbildung 8). Dies ist einer der Gründe, warum Rohrturbinen als weniger schädlich gelten.

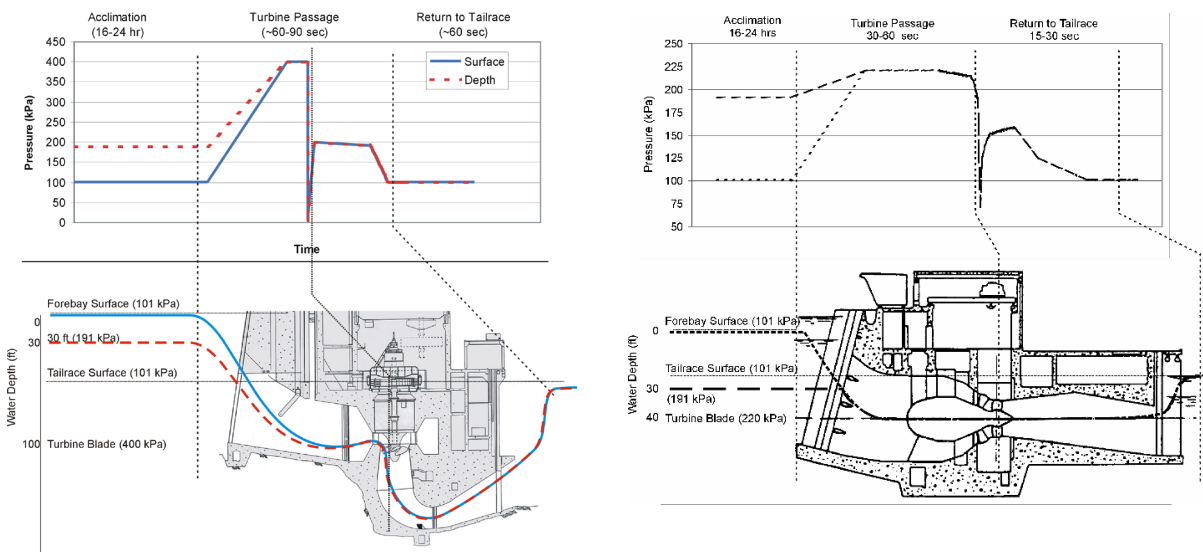


Abbildung 7 Druckveränderungen über die Zeit bei der Passage durch eine vertikale Kaplan turbine (links) und eine horizontale Rohrturbine (rechts) in einer Simulation für Oberflächen- und Tiefenadaptierte Fische (aus: [ABERNETHY et al. 2001, 2003]).

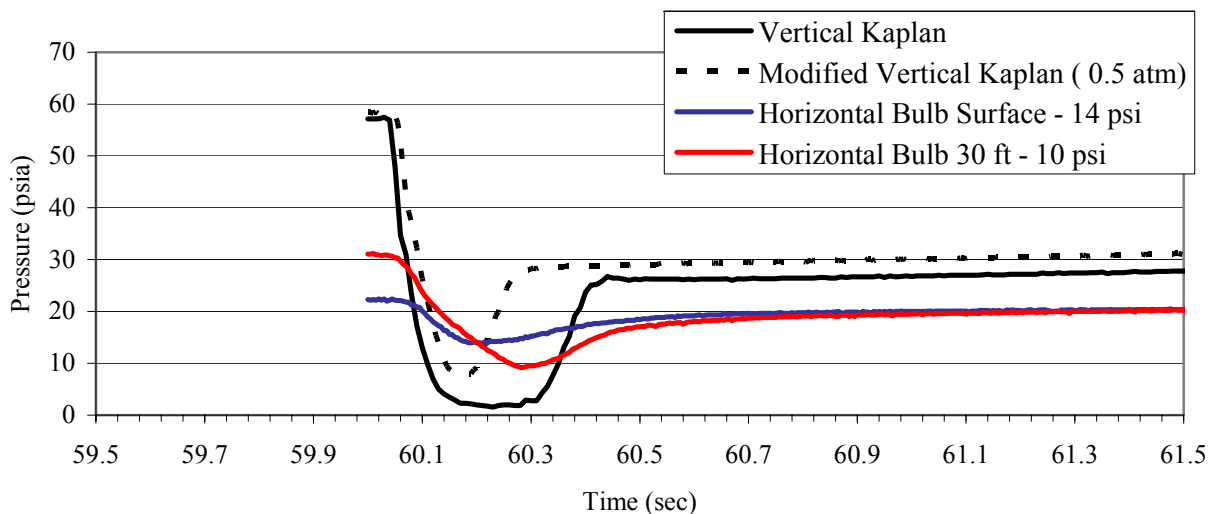


Abbildung 8: Vergleich des Nadirs (Druckminimum) beim Turbinendurchgang bei verschiedenen Typen vertikal- und horizontalachsiger Kaplan turbinen (Bulb = Rohrturbine; aus: [ABERNETHY et al. 2003]).

4.2 Schätzung der Schadenswahrscheinlichkeit

Mit zahlreichen Untersuchungen wird seit über 100 Jahren versucht, die Schädigung von Fischen bei der Turbinenpassage abzuschätzen. Dabei können zwei Typen von Untersuchungen zusammengefasst werden:

- ⇒ Theoretische Modelle, die auf physikalischen Überlegungen zum Turbinendesign und zur Fischpassage abgestützt sind;
- ⇒ Empirische Modelle, die auf konkreten Beobachtungen und Versuchen bei verschiedenen Turbinen abgestützt sind.

Die meisten Modelle unterscheiden zwischen Aalen und mehr oder weniger stromlinienförmigen Arten wie Salmoniden, Cypriniden oder Perciden. Aus diesen Modellen wurden verschiedene Formeln entwickelt, die eine Voraussage der zu erwartenden Schäden für die passierenden Fische erlauben sollen. Eine umfangreiche Zusammenstellung zahlreicher Versuche und Modelle findet sich bei EBEL [2013].

Aus den bei unterschiedlichsten Kraftwerken durchgeführten Untersuchungen wurden verschiedene Formeln entwickelt, die eine Voraussage der zu erwartenden Schäden erlauben sollen. Die Berechnungen der Fischmortalität bauen auf unterschiedlichen Ansätzen auf und berücksichtigen verschiedene Verletzungsrisiken:

- ⇒ **Ansatz 1:** Für die Wahrscheinlichkeit einer Kollision mit festen oder beweglichen Turbinenteilen ist die Länge des Wasserkörpers zentral, der beim Turbinendurchlauf nicht von den Schaufeln «zerschnitten» wird. Mit Hilfe turbinenspezifischer Variablen wie Turbinendurchmesser, Anstellwinkel der Turbinenschaufeln, Anzahl Schaufeln und Umdrehungsgeschwindigkeit in der Mortalitätsschätzung werden diese theoretischen Überlegungen umgesetzt [VON RABEN 1957] (Abbildung 9).

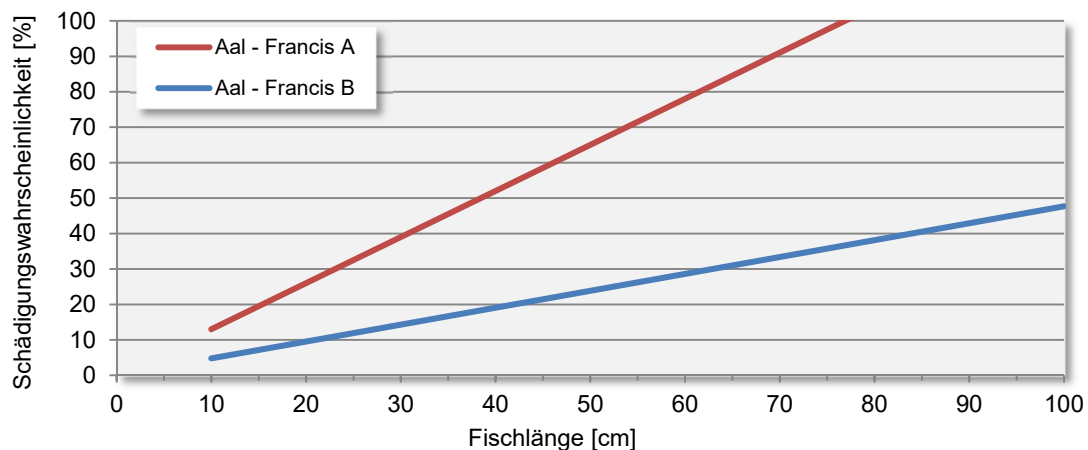


Abbildung 9: Schätzung der Schädigungswahrscheinlichkeit für Aale nach dem Modell von VON RABEN [1957] für eine Francisturbine A mit 15 Schaufeln, einem Laufraddurchmesser von 4.1 m und einem Q_{nutz} von 55 m³/s bzw einer Francisturbine B mit 13 Schaufeln, einem Laufraddurchmesser von 3.8 m und einem Q_{nutz} von 71.4 m³/s (Daten: Musteranlage WFN).

Bei der kleineren Turbine A haben erwachsene Aale keine Chance, einen Turbinendurchgang zu überleben. Eine Reduktion der Anzahl Schaufeln und der Turbinengrösse bei gleichzeitiger Erhöhung der Nutzwassermenge wie bei Turbine B hätte hier eine erhebliche Auswirkung auf die Schädigungsrate.

- ⇒ **Ansatz 2:** Die Geschwindigkeitsverhältnisse beim Turbinendurchgang und der absolute und relative Abstand zwischen den Laufradschaufeln werden stärker gewichtet und stehen als Mass für die Kollisionswahrscheinlichkeit [MONTEN 1985; BELL 1990]. Bei neueren Studien wurde diese Formel überarbeitet und so erweitert, dass unter Zuhilfenahme computergestützter CFD-Modelle (computational flow dynamics) nebst der Kollisionswahrscheinlichkeit auch Wahrscheinlichkeiten für Schäden durch Scherkräfte, Turbulenzen und Druckwechsel mitberücksichtigt werden [TURNPENNY et al. 2000].
- ⇒ **Ansatz 3:** Experimentelle Beobachtungen werden mit statistischen Verfahren (Regressionsanalyse) auf turbinentypische Faktoren mit signifikantem Einfluss auf die Schädigungswahrscheinlichkeit redu-

ziert. Dabei werden der Abstand der Turbinenschaufeln und die Anzahl Schaufeln bei Kaplan turbinen, Gefälle und Turbinendurchmesser bei Francisturbinen als wichtigste Variablen erkannt [LARINIER & DARTIGUELONGUE 1989, LARINIER & TRAVADE 2002].

Mit diesem Ansatz kann in einem Musterbeispiel die Schädigungswahrscheinlichkeit für 20 cm lange Salmoniden geringfügig gesenkt werden, wenn der Turbinendurchmesser leicht vergrössert wird (Abbildung 10).

Der Vergleich der theoretischen mit den beobachteten Schädigungsrate für verschiedene Modelle zeigt, dass sowohl bei physikalischen als auch bei empirischen Modellen die Schäden bei geringen Mortalitäten eher überschätzt, bei grossen Mortalitäten dagegen eher unterschätzt werden (Abbildung 11) [EBEL 2013]. Die geschätzten Grössenordnungen der verschiedenen Modelle scheinen jedoch eine gute Annäherung zu liefern.

Aus allen Untersuchungen lässt sich folgern, dass die geringsten Schäden bei grossen, langsam drehenden, horizontalachsigen Kaplan turbinen mit wenigen Schaufeln zu erwarten sind. Weiter darf angenommen wer-

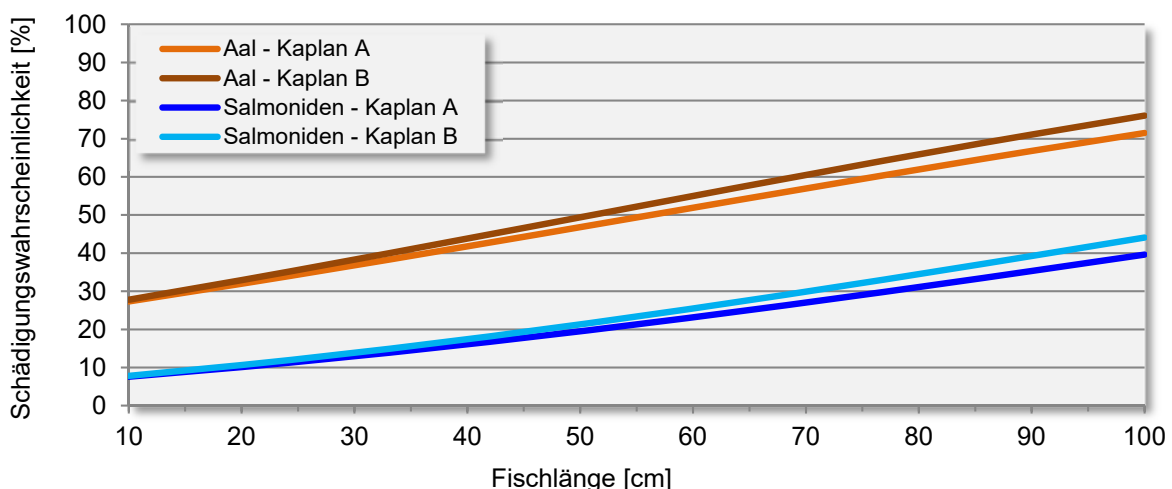


Abbildung 10: Schätzung der Schadenswahrscheinlichkeit für zwei verschieden grosse Kaplan turbinen A (2.8 m, 6 Schaufeln) und B (1.4 m, 5 Schaufeln) für Aale bzw. Salmoniden/Cypriniden nach dem Modell von LARINIER & TRAVADE [2002] (Daten: Musteranlage WFN).

den, dass eine hydrodynamisch optimale Turbine, die im bestmöglichen Regime betrieben wird, die geringsten Fischschäden verursachen wird.

Allen Arbeiten gemeinsam ist die Abhängigkeit der Mortalitätswahrscheinlichkeit von der Fischlänge, sowie – für die meisten Modelle - die separate Berechnung für Kaplan- und Francisturbinen. Die Mortalitätsschätzungen werden zudem in vielen Arbeiten nach Arten oder Artengruppen differenziert und eigene Formeln für stromlinienförmige Arten (Lachse, Forellen, Karpfen- und Barschartige) bzw. für Aale ausgewiesen. Da es kaum möglich ist, zwischen Verletzungen mit direktem Tod und solchen mit späteren Todesfolgen zu unterscheiden, wird in der Regel angenommen, dass eine Schädigung direkte tödliche Folgen haben wird. Ebenfalls nicht berücksichtigt in diesen Schätzungen sind die indirekten Fischverluste nach der Turbinenpassage, z.B. durch Fischprädatoren.

Weiter ist festzuhalten, dass es sich bei allen Berechnungen zur Schadenswahrscheinlichkeit um Verallgemeinerungen handelt, die je nach Turbinenart und –dimensionen, sowie weiteren Umständen mehr oder weniger präzise Schätzungen darstellen. Aus den vorliegenden Theorien, Feld- und Laborexperimenten sowie Simulationsmodellen können jedoch Folgerungen zu Bauart und Dimensionierung «fischschonender» Turbinen gezogen werden.

In verschiedenen neueren Arbeiten werden die Druckveränderungen beim Turbinendurchgang intensiv erforscht, mit dem Ziel das Design der Kaplanturbinen soweit zu verbessern, dass die druckbedingten Schäden reduziert werden können [TRUMBO et al. 2014; RICHMOND et al. 2014].

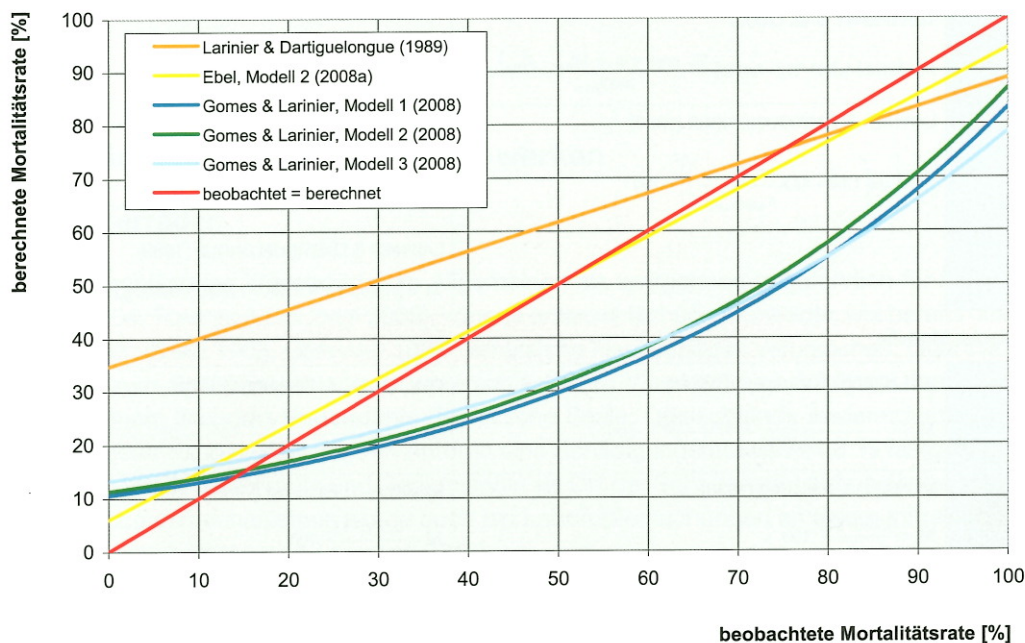


Abbildung 11: Vergleich geschätzte vs. beobachtete Mortalitätsraten für empirische Modelle zur Berechnung der Schadenswahrscheinlichkeit (Grafik aus EBEL [2013]).

4.3 Passage über mehrere aufeinanderfolgende Anlagen

Die im vorangehenden Kapitel dargestellten Schätzmethoden ergeben einen Anhaltspunkt über die Grössenordnung der zu erwartenden Schäden. Dabei stellt sich die Frage «wieviele tote Fische darf es geben?» Die Beantwortung dieser Frage ist auch davon abhängig, welche Art betroffen ist, und wieviele Kraftwerke ein abwandernder Fisch innerhalb seiner Wanderdistanz passieren muss. Für Kurz- und Mitteldistanzwanderer wird deshalb ein anderer Schwellenwert anzusetzen sein als für Langdistanzwanderer.

Für ein Einzelkraftwerk oder eine kurze Kraftwerkskette mit bis zu maximal 3 Kraftwerken und Fischabstieg durch die Turbinen kann eine Mortalitätsrate von 8 bis maximal 10% pro Kraftwerk als akzeptabel gelten. Dies ergibt nach 3 Kraftwerken eine kumulierte Überlebensrate von 75-80% (Abbildung 12).

Schlanke, stromlinienförmige Lachssmolts, die mit ungefähr 20cm Länge ihren Weg Richtung Meer antreten, weisen in modernen Rohrturbinen Mortalitätsraten von <10% auf. Dieser Wert genügt aber nicht für die Bestandserhaltung, wie anhand eines kleinen Rechenbeispiels illustriert werden soll. In einer Literaturstudie zur Populationsdynamik diadromer

Fischarten wurden auch die (natürlichen und fischeilichen) Mortalitäten verschiedener Lebensstadien des Lachses zusammengestellt [THIEL & MAGATH 2011]. Daraus können die Basiswerte für eine Modellrechnung zur Entwicklung einer hypothetischen Lachspopulation entnommen werden. Wir vereinfachen hier stark und nehmen die Medianwerte der absoluten Eizahl pro Lachsweibchen, den Median der Überlebensrate vom Ei bis zum Smolt inklusive Abwanderung bis zum Meer und die Überlebensrate (Median) vom Smolt bis zur Rückkehr ins Laichgewässer, um aus einer Standardpopulation von 100 Laichtieren zu schätzen, wieviele Tiere der nachfolgenden Generation wieder zur Eiablage gelangen (Abbildung 13). Von dieser Standardpopulation müssen theoretisch wiederum 100

Laichtiere	100
Eier/W	6'864
Anzahl Eier total	343'200
Überlebensrate Ei->Smolt	1.24%
Anzahl Smolts total	4'256

Abbildung 13: Anzahl Smolts, die aus 100 Laichtieren (50% Weibchen) entstehen (Fortpflanzungs- und Überlebensraten nach [THIEL & MAGATH 2011]).

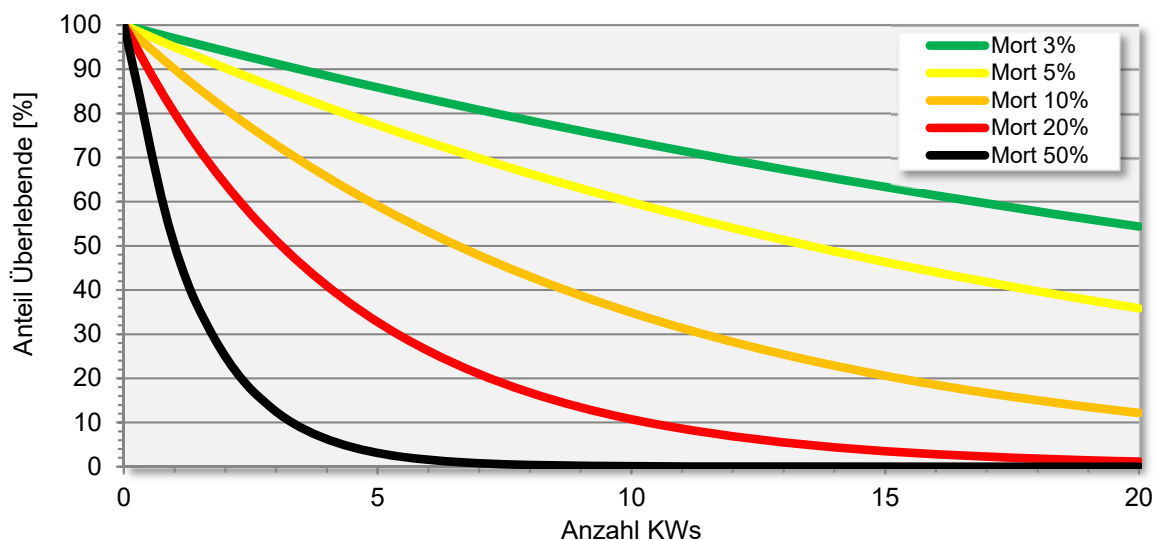


Abbildung 12: Kumulierte Überlebensrate bei der Passage mehrerer Kraftwerke bei unterschiedlichen Mortalitätsraten pro Anlage.

Turbinenpass.	Überlebende / Turbinenpassage			Überlebensrate Smolt->Rückkehrer		
	97%	95%	92%	2.75%		
	M1	M2	M3	M1	M2	M3
0	4'256	4'256	4'256	117	117	117
1	4'128	4'043	3'915	114	111	108
2	4'004	3'841	3'602	110	106	99
3	3'884	3'649	3'314	107	100	91
4	3'768	3'466	3'049	104	95	84
5	3'654	3'293	2'805	100	91	77
6	3'545	3'128	2'580	97	86	71
7	3'439	2'972	2'374	95	82	65
8	3'335	2'823	2'184	92	78	60
9	3'235	2'682	2'009	89	74	55
10	3'138	2'548	1'849	86	70	51
11	3'044	2'421	1'701	84	67	47

Abbildung 14: Anzahl Lachse, die aus 4'526 Smolts als Laichtiere zurückkehren bei Abwärtswanderung ohne und mit einem oder mehreren Kraftwerken bei unterschiedlichen Überlebensraten bei Turbinenpassage (Überlebensraten / Turbinenpassage M1 - M3: Annahmen; Überlebensraten Smolt bis Rückkehrer nach [THIEL & MAGATH 2011]).

Tiere auf die Laichplätze zurückkehren und sich fortpflanzen können, damit die Bestandserhaltung langfristig gesichert ist. Wird nun auch die Mortalität bei der Turbinenpassage in einer Kraftwerkskette mitberücksichtigt, wird schnell klar, dass hier keine hohen Schädigungsraten zulässig sein können. Wie in Abbildung 14 dargestellt, sinkt die Anzahl Rückkehrer bei einer Mortalität von 5% pro Turbinenpassage (M2) bereits nach Passieren von 4 KWs unter die geforderte Mindestzahl. Bei 5 zu überwindenden KWs dürfte die Mortalität durch Turbinen maximal 3% betragen (M1) um das Ziel der nachhaltigen Bestandserhaltung nicht zu gefährden.

Bei längeren Kraftwerksketten, die von Langdistanzwanderern überwunden werden müssen, ist deshalb zwingend eine einzugsgebietsbezogene Beurteilung durchzuführen. Die Kumulierung der Schäden verlangt dabei

eine Reduktion der akzeptablen Mortalitätsrate auf 3 bis maximal 8%. Bei optimaler Turbinenauslegung und sorgfältigem Kraftwerksbetrieb können diese Werte eventuell eingehalten werden. In einer Kette mit 11 Kraftwerken ergibt dies aber erst eine kumulierte Überlebensrate von knapp 50 - 70% und damit einen deutlich zu tiefen Wert. Weitere Massnahmen sind deshalb in so vielen Kraftwerken der Kraftwerkskette vorzusehen, bis der kumulierte Schaden unter dem vertretbaren Schwellenwert liegt. Dazu gehören Schutzeinrichtungen mit Bypass-Systemen und/oder betriebliche Massnahmen, aber auch Massnahmen in den Laich- und Aufwuchsgewässern, um den Fortpflanzungserfolg zu verbessern [KEUNEKE & DUMONT 2013]. Die Stossrichtung der weiteren Entwicklung muss aber klar in Richtung besserer Fischverträglichkeit der Turbinen gehen [FRIES 2016].

Fazit: Die artspezifische Mortalität passierender Fische kann für Kaplan- und Francisturbinen mit verschiedenen Modellrechnungen abgeschätzt werden. Kumulative Effekte von mehreren KW im Lebensraum einer Fischpopulation sind in jedem Fall artspezifisch und einzugsgebietsbezogen zu beurteilen.



5 Bewertung der Turbinentypen

Die verschiedenen Turbinentypen weisen auf flussabwärts wandernde Fische unterschiedliche Auswirkungen auf. Diese werden in den Berechnungsformeln zur Bestimmung der Schädigungsraten berücksichtigt, da bei den meisten Ansätzen zwischen Francis- und Kaplan turbinen unterschieden wird. VON RABEN [1957] hat den Begriff der «sicheren Durchflussschläuche» - eines durchgehenden,

nicht zerschnittenen Wasserkörpers mit geringem Kollisionsrisiko für den passierenden Fisch - eingeführt. Daraus resultieren im Einzelfall klare Aussagen über die Akzeptanz einer Fischwanderung durch die Turbine oder die Verpflichtung zur Erstellung von Schutzvorkehrungen. Grundsätzlich können folgende, allgemeingültige Aussagen vorangestellt werden:

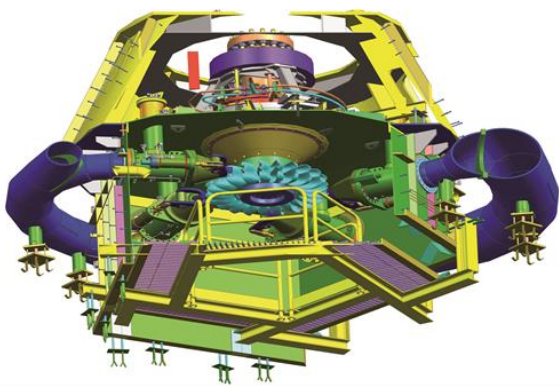


Abbildung 15: Fünf-düsige Pelton turbine, aufgeschnitten, Ansicht von schräg unten (Zeichnung: Andritz Hydro AG)

Pelton turbinen (Aktionsturbinen -> Erläuterungen Fachbegriffe in Anhang A2) bieten keine Überlebenswahrscheinlichkeit für abwandernde Fische. Hier muss zwingend durch mechanische Barrieren verhindert werden, dass Fische ins Kraftwerkssystem einschwimmen. Da bei einem Pelton turbinen-Kraftwerk in der Regel wenig Geschwemmsel anfällt, ist der Einbau von Feinrechen angezeigt.

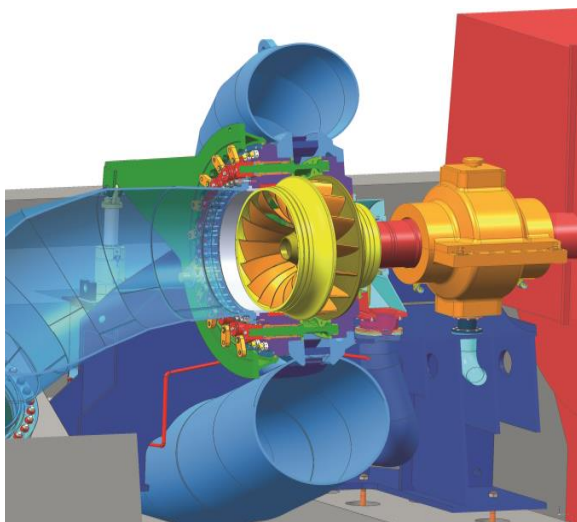


Abbildung 16: Horizontalachsige Francis turbine, aufgeschnitten (Zeichnung: Andritz Hydro AG)

Francis turbinen (Reaktionsturbinen -> Erläuterungen Fachbegriffe in Anhang A2) bieten je nach Grösse und Durchmesser eher eine geringe Überlebenswahrscheinlichkeit für abwandernde Fische, da sie über eine grosse Anzahl von Turbinenschaufeln verfügen. Insbesondere lange Fische haben kaum eine Chance, einen «sicheren Durchflussschlauch» zu erwischen. Deshalb ist in der Regel das Einschwimmen von Fischen ins Kraftwerkssystem durch mechanische Barrieren zu verhindern. Da bei Francis turbinen wegen des geringen Abstands der Turbinenschaufeln ohnehin Einlaufrechen mit geringem Stababstand erforderlich sind, ist zum Schutz der Fische der Einbau von Feinrechen angezeigt. Bei dieser Forderung ist zu berücksichtigen, dass der Einsatz von Francis turbinen in Flusskraftwerken mit deren typischen Schwankungen der zufließenden Wassermenge ohnehin nur noch in Ausnahmefällen vorkommt. Sie sind in diesem Einsatzbereich durch die Kaplan turbinen verdrängt worden.

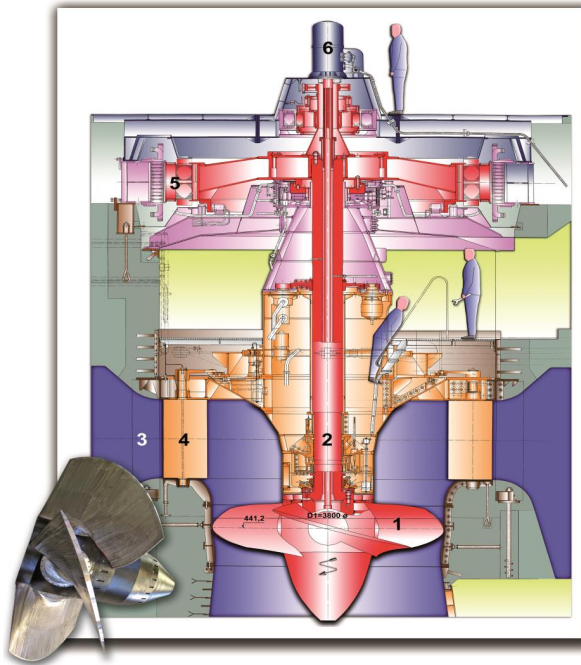


Abbildung 17: Vertikalachsige Kaplanmaschine mit vier Laufradschaufeln (1), Leitapparat (4) zur Regulierung der Durchflusswassermenge (Zeichnung: Andritz Hydro AG)

Kaplanmaschinen (Reaktionsturbinen -> Erläuterungen Fachbegriffe in Anhang 2) weisen für abwandernde Fische eine vergleichsweise hohe Überlebenswahrscheinlichkeit auf. Dies gilt insbesondere für grosse Rohrturbinen, wie sie heute in modernen Flusskraftwerken Stand der Technik sind. Sie sind den früher eingesetzten, vertikal-achsigen Turbinen überlegen, da weniger Strömungsumlenkungen und entsprechend kleinere Druckschwankungen vorhanden sind. Dies wirkt sich positiv auf den Wirkungsgrad der Turbine und gleichzeitig auf die Überlebenswahrscheinlichkeit für passierende Fische aus. Die grossen Durchmesser, die geringe Anzahl Laufradschaufeln und die niedrige Drehzahl lassen grosse, «sichere Durchflussschläuche» frei. Aufgrund der hohen Überlebenswahrscheinlichkeit kann ein eher grosser Rechenstababstand gewählt werden, um das Verklemmungsrisiko am Einlaufrechen zu minimieren. Diese Aussagen sind aufgrund von Berechnungen der Überlebenswahrscheinlichkeit nach den bekannten Formeln von Kapitel 4 auf einen Fallhöhen-Wassermengenbereich von ca. < 20 m und > 50 m³/s zu beschränken. Bei kleinen Kaplanmaschinen, wie sie insbesondere bei Dotierturbinen an Flusskraftwerken zum Einsatz gelangen, und solchen im höheren Fallhöhenbereich stimmt diese Aussage nur bedingt. Hier ist das Einschwimmen von Fischen ins System mit mechanischen Barrieren (Feinrechen) zu verhindern.

Die genannte Beschränkung des Fischabstiegs auf Kaplan-turbinen mit grosser Wassermenge ($> 50 \text{ m}^3/\text{s}$) und geringer Fallhöhe ($< 20 \text{ m}$) lässt sich aus turbinenspezifischen Gesetzmässigkeiten herleiten (Abbildung 18). Die Durchflusswassermenge bestimmt die Abmessungen einer Turbine. Damit liegen die Einflussfaktoren der Berechnungsformeln für die Überlebensrate von abwandernden Fischen in günstigen Grössenordnungen. Für kleinere Laufkraftwerke bis ca. $50 \text{ m}^3/\text{s}$ gibt es heute - je nach Anlagengeometrie - anerkannte Schutzvorkehrungen für abwandernde Fische. Die Fallhöhe wirkt sich bei der Auslegung von Kaplan-turbinen in doppelter Hinsicht aus. Einerseits steigt die Drehzahl der Turbine mit zunehmender Fallhöhe. Andererseits nimmt auch die optimale Anzahl Laufradschaufeln mit steigender Fallhöhe zu. Bei sehr geringen Fallhöhen unter 10 m werden Kaplan-turbinen mit 3 Laufradschaufeln gebaut (z. B. KW Brügg der Bielersee Kraftwerke AG, Rohrturbinen). Bis etwa 20 m Fallhöhe domi-

nieren Turbinen mit 4 Laufradschaufeln (z.B. KW Aarberg der BKW Energie AG, vertikal-achsige Kaplan-turbinen). Im Bereich von 20 m Fallhöhe beginnt das Einsatzfeld von Turbinen mit 5 Laufradschaufeln. Damit steigt das Risiko von Fischschäden.

Der Einsatz der klassischen Turbinentypen bei Kleinwasserkraftwerken bietet keine akzeptable Überlebenswahrscheinlichkeit, da die Abmessungen der Turbinen zu gering sind, um passierenden Fischen eine Überlebenschance zu bieten. Das Einschwimmen von Fischen ist deshalb in jedem Fall mit Fischschutzvorrichtungen zu verhindern. Diese Aussage gilt auch für die Ossberger-Turbine und die gelegentlich eingesetzten, rückwärts laufenden Standard-Pumpen. Andere speziell entwickelte Turbinentypen wie Wasserschnecke oder VLH-Turbinen müssen im Einzelfall beurteilt werden. Generelle Aussagen zu einer akzeptablen Verletzungs- und Mortalitätsrate sind jedoch sehr kritisch zu überprüfen.

Fazit: Die Auswirkungen der verschiedenen Turbinentypen auf abwandernde Fische unterscheiden sich deutlich. Von den klassischen Typen weisen nur grosse Kaplan-turbinen, insbesondere horizontalachsige, akzeptable Überlebensraten auf. Für alle anderen Turbinen sind geeignete Fischschutzeinrichtungen angezeigt.

Abbildung 18: Zusammenfassende Beurteilung der Turbinentypen mit groben Angaben zur Mortalitätsrate.

Turbinentyp	Fallhöhe	Wassermenge	Wirkungsgrad	Mortalitätsrate	Gesamturteil
Pelton	300 – 2000 m	1 – 100 m ³ /s	90 – 92 %	>> 10 %	Keine Überlebenschance, Schutzvorkehrungen nötig
Francis	30 – 600 m	1 – 1000 m ³ /s	94 – 96 %	>10 %	Geringe Überlebenschance, Schutzvorkehrungen nötig
Kaplan, mit vertikaler oder horizontaler Turbinenachse	3 – 40 m	5 – 1000 m ³ /s	92 – 94 %	<10 %	Akzeptable Überlebenschance, Abstieg durch Turbine im Einzelfall prüfen
Kaplan weiterentwickelt (minimum gap, CAT)	3 – 30 m	5 – 1000 m ³ /s	92 – 94 %	<10 %	Akzeptable Überlebenschance, Abstieg durch Turbine im Einzelfall prüfen
Alden	20 – 30 m, in Entwicklung 10 – 40 m	35 – 65 m ³ /s, in Entwicklung 20 – 400 m ³ /s	94%	<<10 %	Gute Überlebenschance, Abstieg durch Turbine im Einzelfall prüfen

6 Weiterentwicklung zu «fischverträglichen» Turbinen

6.1 Ausgangslage

Aufgrund der generellen Beurteilung der Überlebenswahrscheinlichkeit von abwandernden Fischen beim Turbinendurchgang beschränkt sich die Akzeptanz dieses Abwanderungspfads auf grosse Kaplan turbinen. Deshalb kann die Beurteilung des Verbesserungspotentials aus Fischsicht auf diesen Turbinentyp beschränkt werden (Kapitel 6.2).

Bei der Beurteilung sind unterschiedliche Entwicklungen in Amerika und Europa zu berücksichtigen. Nicht alle in Amerika als erfolgreich gepriesenen, technischen Änderungen lassen sich unbesehen auf europäische Verhältnisse übertragen. Die Unterschiede zwischen amerikanischen und europäischen Flusskraftwerken bezüglich der zufließenden Wassermengen und (oftmals auch) der Fallhöhen sind gewaltig. Die (meist) riesigen Stauräume in Amerika erlauben eine Optimierung des Turbineneinsatzes ohne merkliche Auswirkungen im Ober- und/oder Unterwasser. Es ist dank der häufig grösseren Anzahl eingebauter Turbinen möglich, diese mit einer festen Durchflussmenge in der Nähe des Wirkungsgradoptimums zu betreiben und bei Bedarf einzelne Turbinen zu- oder wegzuschalten. Dies ist in den kleineren, europäischen



Abbildung 19: Grosse Kaplan turbine im Wasserkraftwerk Wanapum, USA (Foto: Voith Hydro).

Anlagen nur beschränkt möglich. Hier ist der Turbineneinsatz viel stärker auf die momentanen Zuflüsse auszurichten, weshalb die Turbinen auch häufig in Teillast betrieben werden. Und schliesslich ist zu beachten, dass in Europa die Entwicklung wegen der kleineren Wassermengen viel früher auf hohe Wirkungsgrade und maximale Produktion ausgerichtet wurde. Deshalb lassen sich fischspezifische Verbesserungspotenziale in der Turbinentechnik und im Kraftwerksbetrieb für die Schweiz nicht ohne weiteres mit dem ökonomischen Anreiz verbesserter Wirkungsgrade rechtfertigen.



Abbildung 20: Priest Rapids Dam (Columbia River, USA), (Bericht BioPA Tool, Andritz Hydro).

6.2 Funktionsprinzip

Alle Turbinenfirmen propagieren «fish friendly turbines», allerdings ist dieser Ausdruck nicht eindeutig definiert. Die verschiedenen Anbieter und Autoren legen dafür nicht die gleichen Kriterien zu Grunde. Einigkeit besteht im Verbesserungspotential durch die Entwicklung von Turbinen mit sehr hohen Wirkungsgraden. Hohe Wirkungsgrade basieren auf einer möglichst perfekten Strömung im Turbinenquerschnitt und geringen Spaltverlusten an den Laufradschaufeln (Abbildungen 21 und 22). Das Vermeiden von Verwirbelungen, Strömungsablösungen sowie Kavitation dient dem Turbinenbetrieb und der Langlebigkeit der Maschinen, bewahrt aber gleichzeitig abwandernde Fische vor diesen Gefahren.

Ausserdem wird oft ein empirischer Gefährdungsvergleich zwischen Kaplan- und Rohrturbinen mit vertikaler Turbinenachse und Rohrturbinen mit horizontaler Achse angeführt. In einer qualitativen Beurteilung weist die Rohrturbine deutliche Vorteile auf. Durch den Wegfall mehrerer Strömungsumlenkungen können Verletzungsrisiken für abwandernde Fische reduziert oder vermieden werden (Fliehkräfte, Kavitationszonen, Saugrohrreinbauten). Quantitative Vergleichsmessungen dazu liegen aber nicht vor. Trotzdem darf der Rohrturbine eine grundsätzliche, konstruktionsbedingte Besserstellung zugebilligt werden.

Die Überlebenswahrscheinlichkeit von durch die Turbine abwandernden Fischen hängt nachweislich von verschiedenen Turbinendaten ab (Grösse, Drehzahl, Anzahl Laufradschaufeln). Diese können bei der Planung eines Kraftwerks und bei der Turbinenaus-

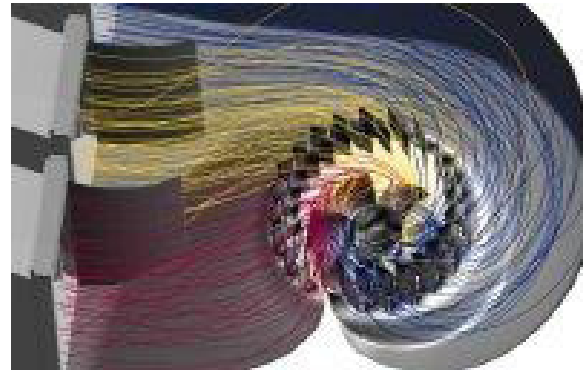


Abbildung 21: Strömungsbild im Zulauf einer grossen Kaplanmaschine (Zeichnung: Voith Hydro).

legung in einem gewissen Rahmen beeinflusst werden (Anzahl Turbinen, Einbauhöhe). Wenige grosse Turbinen mit einer tiefen Einbauhöhe weisen bessere Bedingungen für abwandernde Fische auf als gegenteilige Lösungen. Auch betriebliche Massnahmen können sich positiv auswirken (bei mehreren verfügbaren Turbinen ist deren Einsatz so zu planen, dass diese in der Nähe des Bestpunkts laufen und geringe Teillasten mit stark geschlossenen Leitrad-Stellungen vermieden werden; bei unterschiedlichen Turbinentypen ist der Einsatz der fischverträglicheren Maschinen zu bevorzugen). Solche Massnahmen werden in den USA ausdrücklich angestrebt, indem Betriebs Einschränkungen auf einen Einsatzbereich mit vorgegebenen, maximalen Abweichungen vom Wirkungsgradbestpunkt zur Diskussion gestellt werden.

6.3 Konstruktive Verbesserungen

Schwieriger wird der Vergleich bei konstruktiven Verbesserungsmaßnahmen. Diese sind oft auf einzelne Details ausgerichtet und durch Patente geschützt. Dazu gehört beispielsweise das «**minimum gap**» - Konzept (Abbildung 22).



Abbildung 22: «*minimum gap*»-Turbine, Kugelform am Übergang zu Nabe (4) und aussenliegendem Laufradmantel (3) garantiert bei Laufradverstellung (Drehung) die Einhaltung minimaler Spalte (Modell: Voith Hydro).

Obschon in Modellversuchen mit gezielter Zugabe von Versuchsfischen in den Bereich der Laufradspalte eine lokale Verbesserung nachgewiesen ist, lässt sich diese leider nicht in die bekannten Berechnungsformeln zur Ermittlung der Schädigungsrate übertragen (Abbildung 23). Bezüglich Fischschäden ist somit nur eine Aussage zu einzelnen Turbinenteilen möglich, nicht zum Gesamtsystem.

Weiter ist zu beachten, dass die in verschiedenen Publikationen genannten Verbesserungen des Turbinenwirkungsgrads beim «*minimum gap*»-Konzept vor allem auf nordamerikanische Verhältnisse zutreffen, wo früher zur Vermeidung von Spaltkavitationsrisiken grosse Laufradspalte zugelassen wurden (Abbildung 24). Unter dem früh einsetzenden Wirtschaftlichkeitsdruck wurden diese Spalte in Europa dagegen minimal ausgelegt. Zwar kann die Verhinderung des bei grosser Laufradöffnung entstehenden Eintrittsspalts auch in Europa eine Reduktion des Einklemmriskos für abwandernde Fische bewirken. Es ist aber kaum eine messbare Verbesserung des Wirkungsgrads zu erwarten.



Abbildung 23: Rohrkonstruktion zur Einleitung von Versuchsfischen im Bereich der Laufradspalte (Foto: Versuchsbericht Bonneville, First Powerhouse Rehabilitation Project, Voith Hydro).



Abbildung 24: Kaplan-turbine, Laufradspalte nabenseitig (Foto: Voith Hydro).

Im weiteren ist zu beachten, dass das «minimum gap»-Konzept einen kugeligen Laufradmantel bedingt (Abbildung 25). Damit wird bei vertikalachsigen Kaplanmaschinen, bei denen der Laufradmantel in der Schweiz üblicherweise einbetoniert ist, eine Laufraddemontage nach oben unmöglich. Deshalb ist das «minimum gap»-Konzept hier nur bei Rohrturbinen angezeigt. Nachteile für Betrieb und Stromproduktion sind dort nicht zu befürchten.

Problematisch kann sich der Patentschutz auswirken, der auf diesem Konzept besteht. Die verbindliche Vorschrift des «minimum gap»-Konzepts in Ausschreibungsunterlagen könnte eine Verletzung des Beschaffungsrechts bedeuten. Ein möglicher Lösungsansatz wäre es, die Fischmortalität bei einem Turbinendurchgang als Entscheidungskriterium in die Vergabeentscheidung aufzunehmen.

Eine weitere interessante Entwicklung ist die CAT – Turbine (compact axial turbine), die die Vorteile der Kaplan-Rohrturbinen in eine vertikale Einbaulage umsetzt (Abbildung 26). Die erforderlichen Strömungsumlenkungen wer-

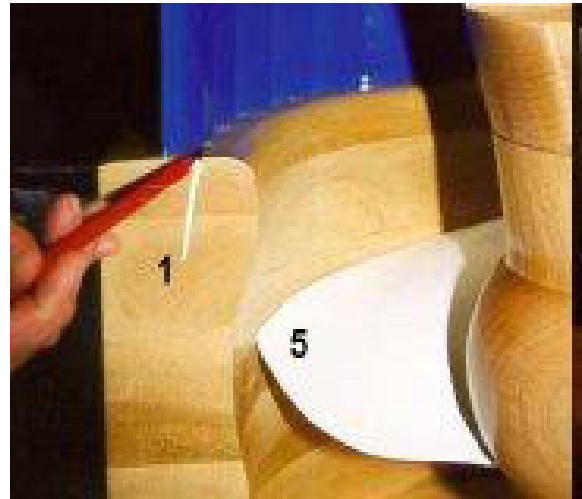


Abbildung 25: Nachteil kugeliger Laufradmäntel bezüglich Turbinendemontage nach oben, Durchmesser am Turbineneintritt (1) kleiner als Laufraddurchmesser (5) (Modell: Voith Hydro).

den auf zwei Richtungsänderungen reduziert und mit grossen Radien realisiert. Die CAT-Turbine stellt damit eine bautechnisch einfachere Variante für Umbauten bestehender Wasserkraftwerke dar.

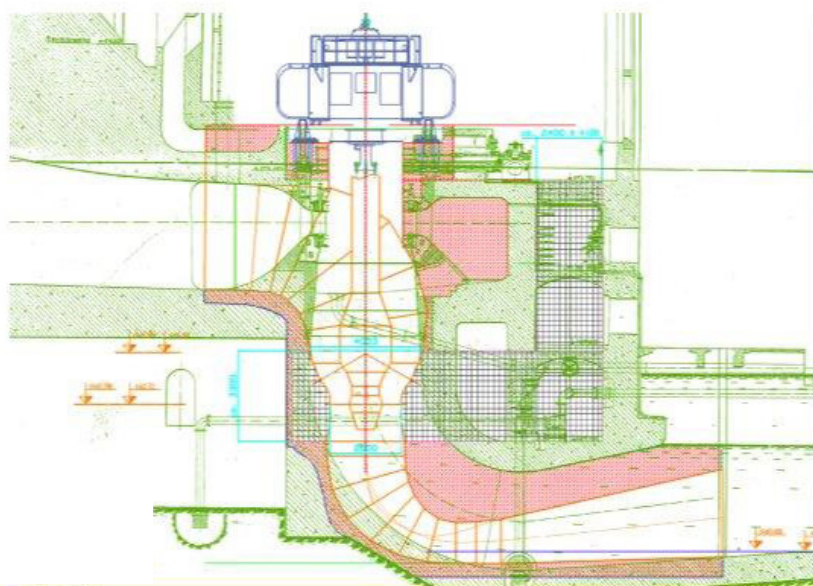


Abbildung 26: Vertikalachsige CAT-Turbine (Konzeptstudie Andritz Hydro).

6.4 Neue Turbinentypen und deren Anwendungspotenzial

Als weiterer Lösungsansatz zur Verbesserung des Fischabstiegs durch die Turbinen wird die Entwicklung komplett neuer Turbinentypen untersucht. Ein bekanntes Beispiel ist die **Aldenturbine** (Abbildung 27). Diese wird insbesondere in den USA sehr positiv beurteilt. Ihre wesentlichen Konstruktionsmerkmale sind eine geringe Anzahl Laufradschaufeln, das Fehlen von Laufradspalten und eine geringe Drehzahl. Neben der guten Fischverträglichkeit wird ihr in verschiedenen Publikationen auch ein hoher Wirkungsgrad nachgesagt. Leider wird dabei aber immer nur der Spitzenwirkungsgrad genannt. Als einfachregulierte Maschine dürfte sie eine spitze Wirkungsgradkurve und entsprechend schlechte Teillastwirkungsgrade aufweisen (ähnlich Francisturbinen). Damit ist sie für Laufkraftwerke an schweizerischen Mittellandflüssen schlecht geeignet.

Ein Einsatz wäre allenfalls bei Kraftwerksanlagen zu prüfen, bei welchen das Wasserdargebot auf mehrere Turbinen aufgeteilt wird. Dort könnten die fischverträglichen Aldenturbinen

analog eingesetzt werden wie Propellerturbinen. Sie werden eingesetzt, um das zufließende Wasser bei festen Durchflussmengen blockweise abzuarbeiten und nur der restliche Zufluss wird mit doppelregulierten Turbinen ausreguliert. Solche Konzepte gab und gibt es im schweizerischen Kraftwerkspark (z.B. im alten KW Hagneck der Bielersee Kraftwerke AG mit ursprünglich 3 Propellerturbinen und 1 Kaplanturbine). Da Aldenturbinen konstruktionsbedingt eine grössere Einbaubreite aufweisen als Kaplanturbinen, sind solchen Lösungen (insbesondere bei Umbauprojekten) bautechnische Grenzen gesetzt. Zudem erfordern unterschiedliche Turbinentypen in einem Wasserkraftwerk erhöhten Aufwand für die Betreiber. Deshalb wurden solche Konzepte in letzter Zeit kaum mehr realisiert. Es ist aber denkbar, dass unter den neuen Gesetzesbestimmungen zum Fischabstieg Kraftwerksauslegungen mit einer Kombination von fischverträgliche(re)n und regulierbaren Turbinen künftig wieder geprüft werden.

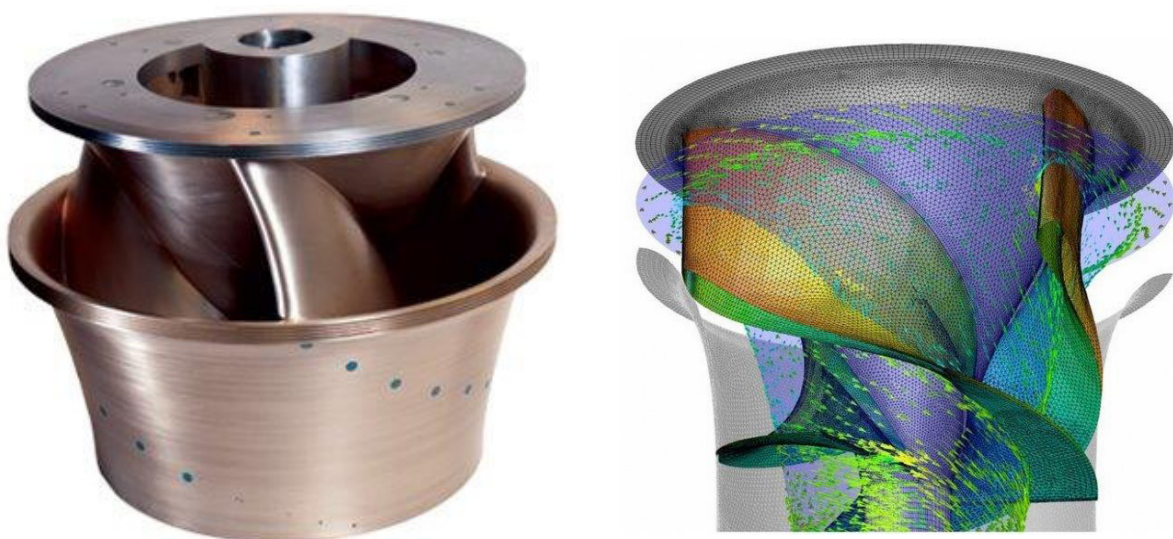


Abbildung 27: Aldenturbine, Laufradschaufeln fest mit Nabe und Ausserring verbunden (links) und Strömungsbild in einer Aldenturbine (rechts). (Foto & Zeichnung: Alden).

Bei den Gestehungskosten der Elektrizität nehmen die Bau- und Ausrüstungskosten einen grossen Anteil ein. Um die Wirtschaftlichkeit einer Aldenturbine einschätzen zu können, kann deshalb ein Vergleich der relativen Kosten mit andern Turbinentypen hilfreich

sein. Alden Lab hat einen Vergleich unterschiedlicher Turbinentypen gleicher Leistung bezüglich Einbaugrösse und Kosten veröffentlicht (Abbildung 28). Die Aldenturbine weist dabei einen grösseren Platzbedarf und deutlich höhere Kosten auf.

	Aldenturbine	Konventionelle Francisturbine	Konventionelle Kaplan turbine
Einheitliche Leistung [MW]	13.6	13.6	13.6
Durchmesser [mm]	3'900	2'150	2'650
Relative Kosten:			
- Turbine	1	0.5	0.55
- Generator	0.8	0.65	0.65
- Installation und Inbetriebnahme	0.25	0.25	0.25
- Automation, elektromech.Ausrüstung	0.25	0.25	0.25
Relative Gesamtkosten	2.3	1.65	1.7

Abbildung 28: Vergleich des Platzbedarfs und der relativen Kosten einer Aldenturbine mit einer Francis- und einer Kaplan turbine gleicher Leistung (© Alden Lab).

Im Bereich der **Kleinwasserkraftwerke** wurde eine Vielzahl von speziellen Turbinentypen entwickelt. Deren Einsatzmöglichkeiten hängen insbesondere von der Fallhöhe ab. Alle Verkleinerungen der klassischen Turbinentypen sind für den Fischabstieg ungeeignet, da die Maschinenabmessungen zu gering werden. Dies wurde in den vorangehenden Kapiteln durch die Beschränkung auf eine Durchflusswassermenge $>50 \text{ m}^3/\text{s}$ berücksichtigt. Vollkommen ungeeignet für einen Fischdurchgang ist weiter die Ossbergerturbi-

ne, die keinerlei Überlebenschance bietet. Im Einzelfall prüfenswert sind VLH-Turbinen (very low head) oder Wasserschnecken. Keinesfalls darf solchen Lösungen aber eine generelle Unschädlichkeit zugesprochen werden. Bauliche und konstruktive Randbedingungen sind im Einzelfall sorgfältig zu beurteilen. Allenfalls sind auch bei solchen Konzepten die gleichen, bewährten Fischschutzmassnahmen wie bei Kaplan turbinen $<50 \text{ m}^3/\text{s}$ vorzusehen.

6.5 «Fischverträglicher» Turbinenbetrieb

Nebst der Beachtung der Fischverträglichkeit als Kriterium für die Turbinenauswahl können zur Sicherstellung der Abwärtswanderung auch betriebliche Massnahmen ins Auge gefasst werden. Bei Aalen findet die Abwanderung Richtung Meer in der ganzen (Teil-)Population weitgehend synchronisiert statt. Aus der Beobachtung gehälterter Aale kann demnach der Zeitpunkt der Wanderung der Mehrzahl der Tiere festgestellt werden. Daraufhin werden die Turbinen für einen bestimmten Zeitraum ausser Betrieb genommen und das Wasser übers Wehr abgeleitet. Dieses Frühwarnsystem zur Vorhersage der Aalwanderung - der sogenannte «Migromat®» – wird in Deutschland bei einzelnen Kraftwerken eingesetzt [<http://www.schwevers.de/Migromat.html>].

Auch während der Hauptwanderzeit der Junglachse im Frühling könnten in den wichtigsten Flüssen zeitweise (z.B. über Nacht oder für mehrere Tage) ein Teil der Turbinen abgeschaltet und die entsprechende Wassermenge übers Wehr abgeleitet werden. Damit kann der Schädigungsgrad für den abwandernden Teil der Fischpopulation wesentlich reduziert werden. Für weitere Arten sind Abwanderungszeitpunkt und -dauer noch zu erforschen.

Da solche betrieblichen Massnahmen im weitesten Sinne als «Systemdienstleistung» zu betrachten sind, müssten die entsprechenden Produktionsausfälle dem Kraftwerksbetreiber von Swissgrid vergütet werden, gleich wie dies für eine Turbinenabschaltung zur Aufrechterhaltung der Netzstabilität heute vorgesehen ist.

Fazit: *Mit der Optimierung bewährter Turbinentypen und neuen Turbinendesigns wird in den letzten Jahren vermehrt versucht, den Anforderungen «fischverträglicher» Turbinen gerecht zu werden. Für deren Einsatz in der Schweiz stellen sich jedoch verschiedenste Hindernisse in den Weg und jeder einzelne Turbinenersatz muss individuell geprüft werden.*

Weiter sind wo immer möglich auch Anpassungen beim Betrieb hin zu einem «fischverträglichen» Turbineneinsatz in Betracht zu ziehen.



7 Fazit

Fische wandern nicht nur flussaufwärts, sondern im Laufe ihrer Lebenszyklen auch flussabwärts. Da die Bundesgesetzgebung verlangt, dass die freie Fischwanderung sicherzustellen ist, betrifft dies beide Wanderrichtungen. Es ist planerisch möglich, bei Wasserkraftwerken an den grossen Mittellandflüssen den Fischabstieg durch die Turbinen über die Gestaltung des Kraftwerkskonzepts und die Turbinenauslegung verantwortungsvoll zu optimieren. Aufgrund von Berechnungen der Überlebenswahrscheinlichkeit nach den bekannten Berechnungsformeln verschiedener Autoren und den bewährten Schutzeinrichtungen wird der Einsatzbereich für solche Abstiegsvarianten auf $>50 \text{ m}^3/\text{s}$ Turbinenwassermenge und $<20 \text{ m}$ Fallhöhe eingeschränkt. Ausserhalb dieses Bereichs sind zwingend Fischschutzmassnahmen und ein sicherer Fischabstieg vorzusehen. Diese Grundsätze gelten sowohl für die Sanierung, wie auch für Neukonzessionierungen bestehender Anlagen. Im Vordergrund stehen im genannten Einsatzbereich grosse Kaplan- und Francis-Turbinen mit geringer Laufschaufelzahl, vorzugsweise direkt angeströmte Rohrturbinen. Die Anzahl Turbinen ist möglichst gering anzusetzen, so dass grosse Wassermengen pro Turbine resultieren. Andererseits ist aber auch zu beachten, dass die Maschinen möglichst häufig im Vollastbetrieb gefahren werden sollten, da dies nicht nur hydraulisch optimal ist, sondern auch die geringsten Fischschäden verursacht.

Weiter kann durch einen tiefen Einbau der Turbine das Kavitationsverhalten und damit dessen schädliche Auswirkungen auf Turbine und abwandernde Fische positiv beeinflusst werden. Technisch steht dieser Forderung im untersuchten Einsatzbereich nichts entgegen. Allerdings können daraus bei Umbauprojekten erhebliche Baukosten entstehen. Deshalb wird es nötig sein, im Einzelfall eine sorgfälti-

ge Abwägung der möglichen Varianten vorzunehmen. Nebst den technischen und finanziellen Aspekten, die im Rahmen von Umbauprojekten bereits bisher kompetent abgeklärt wurden, kommt neu nun die Anforderung dazu, bei diesen Abwägungen auch die ökologischen Gesichtspunkte des Fischabstiegs angemessen einfließen zu lassen.

Bei allen Variantenstudien für sanierungspflichtige Anlagen, aber auch für Um- und Neubauten im Rahmen von Neukonzessionierungen, ist ebenfalls die Wirtschaftlichkeit abzuklären. Dabei sind die Auswirkungen der Anlage auf das Überleben der Fischpopulationen gleichberechtigt zu berücksichtigen.

Die «noch akzeptierbare» Mortalitätsrate ist artspezifisch und unter Berücksichtigung von Lebensweise und Lebenszyklen für jeden einzelnen Fall festzulegen. Dabei sind die Leitartern des betreffenden Gewässersystems speziell zu berücksichtigen. Kann für eine Art, die im Normalfall nur kurze Distanzen wandert und sich bereits nach einer Wandersaison fortplant, eine Mortalitätsrate von 8-10% akzeptiert werden, muss dieser Grenzwert für langlebige Arten, die mehrere Turbinen (und möglicherweise mehrmals im Leben) passieren werden, sicher tiefer angesetzt werden. Für Mittel- und Langdistanzwanderer ist zudem zwingend eine anlagenübergreifende Sichtweise anzuwenden und die Überlebenschancen im gesamten Flusssystem zu berücksichtigen. Dabei dürften Mortalitätsraten von 3 - 8% pro Anlage wohl eine nicht zu überschreitende Obergrenze darstellen, um die Bestandserhaltung nicht in Frage zu stellen. Mit der Optimierung bestehender Konzepte und neuen Designs ist eine Entwicklung hin zu «fischfreundlicheren» Turbinen in Gang, die noch nicht abgeschlossen ist und möglicherweise weitere Verbesserungen bringen wird.

Daneben müssen aber auch betriebliche Einschränkungen während den Hauptwanderzeiten, gerade in langen Kraftwerksketten an Aare und Rhein, zu einer Reduktion der turbinenbedingten Mortalität abwärtswandernder Fischen vermehrt ins Auge gefasst werden. Für Langdistanzwanderer, die zahlreiche Kraftwerke passieren müssen um ins Meer zu gelangen, ist vorläufig keine andere Möglichkeit absehbar, um die nachhaltige Bestandserhaltung zu gewährleisten.

Um die zahlreichen noch bestehenden Wissenslücken zum Wanderverhalten, den Wanderzeiten und Wandertiefen der meisten heimischen Fischarten zu schliessen, sind aber auch noch grosse Forschungsanstrengungen notwendig. Diese Kenntnisse sind Grundvoraussetzung für die Weiterentwicklung von Leitvorrichtungen an grossen Flusskraftwerken, mit denen Fischschutz und Stromgewinnung in Einklang gebracht werden können.

8 Literatur

- ABERNETHY C.S., B.G. AMIDAN & G.F. ČADA 2001: Laboratory studies of the effects of pressure and dissolved gas supersaturation on turbine-passed fish. U.S. Department of Energy, PNNL-13470: 64 S.
- ADAM B. & B. LEHMANN 2011: Ethohydraulik – Grundlagen, Methoden und Erkenntnisse. Springer Verlag Berlin Heidelberg: 351 S.
- ARENAS A., M. POLITANO, L. WEBER & M. TIMKO 2015: Analysis of movements and behavior of smolts swimming in hydropower reservoirs. Ecological Modelling 312: 292-307.
- BAMATTER L., M. BAUMGARTNER, L. GREUTER, S. HAERTEL-BORER, M. HUBER-GYSI, M. NITSCHE & G. THOMAS 2015: Renaturierung der Schweizer Gewässer: Die Sanierungspläne der Kantone ab 2015. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern: 13 S.
- BELL M.C. & A.C. DELACY 1972: A compendium on the survival of fish passing through spillways and conduits. Fish.Eng.Res. Prog. U.S. Army Corps of Eng.: 294 S.
- BFE 2015: Statistik der Wasserkraftanlagen (wasta 2015).
- BKW Energie AG 2013: Wasserkraftwerk Mühleberg, Neukonzession - Vorstudie Variantenwahl und Wirtschaftlichkeit.
- BÖTTCHER H., G. UNFER, B. ZEIRINGER, S. SCHMUTZ & M. AUFLEGER 2015: Fischschutz und Fischabstieg – Kenntnisstand und aktuelle Forschungsprojekte in Österreich. Österr. Wasser- und Abfallwirtschaft (2015) 67: 299–306.
- CADAG F., C.C. COUTANT & R.R. WHITNEY 1997: Development of biological criteria for the design of advanced hydropower turbines. U.S. Dep. Of Energy, Idaho Op. Off. DOE/ID-10578: 97 S.
- COUTANT C.C. (Ed.) 2001: Behavioral Technologies for Fish Guidance. Symposium Proceedings, Am. Fish. Soc. Symposium 26: 193 S.
- DVWK 1997: Fischabstieg – Literaturdokumentation. DVWK Materialien 4/97: 230 S.
- DWA 2005: Fischschutz- und Fischabstiegsanlagen – Bemessung, Gestaltung, Funktionskontrolle. DWA-Themen: 256 S.
- DWA 2014: Fischaufstiegsanlagen und fischpassierbare Bauwerke – Gestaltung, Bemessung, Qualitätssicherung. Merkblatt DWA-M 509: 340 S.
- EBEL G. 2008: Turbinenbedingte Schädigungen des Aals (*Anguilla anguilla*) – Schädigungsraten an europäischen Wasserkraftanlagenstandorten und Möglichkeiten der Prognose. Mitteilungen aus dem Büro für Gewässerökologie und Fischereibiologie Dr. Ebel, Heft 3: 176 S.
- EBEL G. 2013: Fischschutz und Fischabstieg an Wasserkraftanlagen – Handbuch Rechen- und Bypasssysteme, Ingenieurbiologische Grundlagen, Modellierung und Prozesse, Bemessung und Gestaltung. Mitteilungen aus dem Büro für Gewässerökologie und Fischereibiologie Dr. Ebel, Band 4: 483 S.
- EBEL G., A. GLUCH & M. KEHL 2015: Einsatz des Leitrechen-Bypass-Systems nach Ebel, Gluch & Kehl an Wasserkraftanlagen - Grundlagen, Erfahrungen und Perspektiven. Wasserwirtschaft 2015/07-08: 8 S.
- FISCHER R., D. MATHUR, G. HEISEY, R. WITTINGER, R. PETERS, B. RINEHART, S. BROWN & J. SKALSKI 2000: Initial Test Results of the New Kaplan Minimum Gap Runner Design on Improving Turbine Fish Passage Survival for the Bonneville First Powerhouse Rehabilitation Project; Voith Hydro.

- FORMAGGIO M., G. BONFIGLI, M. SICK, J. MICHELCIC, M. COLLINS, M. GAUTHIER & R. GRENIER 2014: Future of Low Head Turbines Concerning Environmental Aspects ; Andritz Hydro
- GOODWIN R.A., M. POLITANO, J.C. GARVIN, J.M. NESTLER, D. HAY, J.J. ANDERSON, A.J. WEBER, E. DIMPERIO, D.L. SMITH, M. TIMKO 2014: Fish navigation of large dams emerges from their modulation of flow field experience. Proc.Nat.Ac.Sc.: 6 S.
- KRIEWITZ C.R. 2015: Leitrechen an Fischabstiegsanlagen: Hydraulik und fischbiologische Effizienz. Mitt. VAW 230: 354 S.
- KRIEWITZ C.R., I. ALBAYRAK, D. FLÜGEL, T. BÖS, A. PETER, R.M. BOES 2015: Massnahmen zur Gewährleistung eines schonenden Fischabstiegs an grösseren mitteleuropäischen Flusskraftwerken. Wasser Energie Luft 107/1: 17-28.
- KEUNEKE R. & U. DUMONT 2013: Wasserkraft und Wasserrahmenrichtlinie - eine Flussgebietsstrategie. Wasserwirtschaft 1/2: 47-51.
- LARINIER M. & F. TRAVADE 2002: Downstream migration : problems and facilities. Bull. fr. pêche et pisciculture 364 : 181-207.
- PORCHER J.P. & F. TRAVADE 2002: Fischways: biological basis, limits and legal considerations. Bull. fr. pêche et pisciculture 364: 9-21.
- RICHMOND M.C., J.A. SERKOWSKI, L.L. EBNER, M. SICK, R.S. BROWN & T.J. CARLSON 2014: Quantifying barotrauma risk to juvenile fish during hydro-turbine passage. Fisheries Reserach 154 : 152-164.
- THIEL R. & V. MAGATH 2011: Populationsdynamik der diadromen Fischarten Atlantischer Lachs, Meerforelle, Meerneunauge, Flussneunauge und Europäischer Aal - Endbericht. Umweltbundesamt, Texte 76: 115 S.
- TRAVADE F. & M. LARINIER 1992: La migration de dévalaison : problèmes et dispositifs. Bull. fr. Pêche Piscic. 326-327 : 165-176.
- TRUMBO B.A., M.L. AHMANN, J.F. RENHOLDS, R.S. BROWN, A.H. COLOTELO & Z.D. DENG 2014: Improving hydroturbine pressures to enhance salmon passage survival and recovery. Rev Fish Biol, Fisheries 24: 955-965.
- VRIESE T. 2016: Maximum admissible mortality of salmonids and silver eel per river stretch by hydropower stations – Dutch approach. Präsentation am Fish Market Roermond NL, 6.-7.10.2016.

Anhang

A1: Wasserkraftwerke mit Abfluss >50 m³/s und Fallhöhe <20 m

BAFU, Fischabstieg durch Turbinen

Quelle BFE, Stand 08.12.2015

I. Wasserkraftwerke Konzessionsablauf vor 2030

BFE-Nummer	Name	Ausbauwassermenge in m ³ /s	Turbinentyp	Anzahl Turbinen	Q _{nutz} pro Turbine in m ³ /s	Konzessionsablauf	Kanton / Staat	Sanierungspflicht
108800	Reckingen	560	Kaplan vertikal	2	280	2020	D	ja
203500	Mühleberg	291	6Francis/1Kaplan vertikal	7	40/51	2017	BE	ja
208000	Wynau 2 (Schwarzhäusern)	200	Propeller	4	50	2003	BE	
208300	Gösgen	380	Kaplan vertikal	5	76	2027	SO	ja
208400	Aarau-Stadt	394	5Kaplan vertikal/4Rohr	9		2014	AG	ja
208600	Rupperswil-Auenstein	492	Kaplan vertikal	2	246	2018	AG	ja
208900	Beznau	418	Propeller	11	38	2022	AG	ja
208850	Beznau (Wehr)	140	Rohr-Kaplan	1	140	2022	AG	ja
209000	Klingnau	810	Kaplan vertikal	3	270	2015	AG	ja
405000	Letten	100	Kaplan vertikal	2	50	2024	ZH	ja
405200	Dietikon	100	Kaplan vertikal	2	50	2012	ZH	ja
405600	Untersiggenthal, Schiffmühl	95	Kaplan vertikal	3	35	2013	AG	
Total 12								

II. Wasserkraftwerke Konzessionsablauf nach 2030

103700	Reichenau	120	Kaplan vertikal	2	60	2042	GR	ja
106500	Rheinau	400	Kaplan vertikal	2	200	2036	ZH	ja
107740	Thurfeld	50	Rohr-Kaplan	2	25	2088	TG	
108700	Eglisau	500	Kaplan vertikal	7	71.5	2046	ZH	ja
108950	Albbruck-Dogern (Wehr)	300	Rohr-Kaplan	1	300	2072	AG	ja
109000	Albbruck-Dogern	1100	Kaplan vertikal	3	366.7	2072	D	
109100	Laufenburg	1355	Straflo-Kaplan	10	135.5	2066	AG	ja
106200	Schaffhausen	500	Kaplan vertikal	2	250	2043	SH	ja
109200	Säckingen	1450	Rohr-Kaplan	4	362.5	2046	D	ja
109300	Ryburg-Schwörstadt	1460	Kaplan vertikal	4	365	2070	D	ja
109400	Rheinfelden	1500	Rohr-Kaplan	4	375	2069	AG	ja
109500	Augst	750	7Straflo-Kaplan/2Francis	9	94/40	2068	BL	ja
109600	Whylen	750	6Straflo-Kaplan/4Francis	10	94/40	2068	D	ja
109700	Birsfelden	1500	Kaplan vertikal	4	375	2034	BL	ja
202900	Thun, Aarewerk 62	125	Kaplan vertikal	2	62.5	2043	BE	
203000	Thun, Aarewerk 94	49.65	Rohr-Kaplan	1	49.65	2038	BE	
203400	Bern, Felsenau	100	Rohr-Kaplan	1	100	2076	BE	
204600	Fribourg, Oelberg	99				2084	FR	
204800	Niederried-Radelfingen	170	Kaplan vertikal	2	85	2043	BE	
204900	Aarberg	170	Kaplan vertikal	2	85	2048	BE	
205000	Kallnach	45	Rohr-Kaplan	1	45	2043	BE	
205150	Hagneck 2 (neu)	280	Rohr-Kaplan	2	140	2095	BE	nein
206950	Brügg	219.4	Rohr-Kaplan	2	109.7	2070	BE	
207700	Flumenthal	350	Rohr-Kaplan	3	116.7	2052	SO	
207800	Bannwil	435	Rohr-Kaplan	3	145	2050	BE	
207900	Wynau 1 (neu)	220	Rohr-Kaplan	1	220	2003 (?)	BE	
208100	Ruppoldingen	475	Rohr-Kaplan	2	237.5	2075	SO	ja
208500	Rüchlig HKW	360	Rohr-Kaplan	4	90	2074	AG	ja
208800	Wildeggen-Brugg	410	Kaplan vertikal	2	205	2033	AG	ja
304150	Luzern, Mühlenplatz	58	Rohr-Kaplan	1	58	2075	LU	ja
304500	Rathausen	45	Rohr-Kaplan	1	45	2060	LU	ja
304600	Perlen 1 (WTA HF)	45				9999	LU	ja
304700	Perlen 2 (WTA PF)	45				9999	LU	ja
305300	Bremgarten-Zufikon	200	Rohr-Kaplan	2	100	2050	AG	ja
305400	Windisch	55	2Kaplan vert/1Propeller	3	18.3	2055	AG	
405100	Höngg	50	Straflo-Kaplan	1	50	2057	ZH	ja
405300	Wettingen	133	Kaplan vertikal	3	44.5	2083	AG	ja
405400	Baden, Aue	110	Rohr-Kaplan	3	36.7	2074	AG	nein
405500	Kappelerhof	140	Rohr-Kaplan	2	70	2056	AG	ja
405650	Turgi	35 (geplant 75)				2066	AG	
509450	Genf, Seujet	405	Rohr-Kaplan	3	135	2056	GE	ja
509600	Verbois	620	Kaplan vertikal	4	155	2033	GE	ja
509700	Chancy-Pougny	620	4Kaplan vertikal/1Francis	5	129/104	2061	GE	ja
Total 43								

A2: Erklärung von Fachbegriffen

Regulierung / einfach-reguliert / doppelt-reguliert

Unter Regulierung wird die Einstellung der turbinierten Wassermenge verstanden. Dies kann der Einstellung einer Durchflussmenge (in erster Linie bei Laufkraftwerken) oder der Einhaltung einer vorgegebenen Leistung (in erster Linie bei Speicherkraftwerken) dienen. Dazu sind spezielle Turbinenbauteile vorhanden («Wasserhahn»). Im Themenbereich Fischabstieg sind nur Francis- und Kaplan-turbine relevant. Beide Turbinentypen haben ausserhalb des Turbinenlaufrads den sog. Leitapparat. Dieser besteht aus drehbar gelagerten Schaufeln, welche bei der Regulierung wie eine Lamellenstore wirken. Die Zwischenräume zwischen den einzelnen Leitschaufeln werden kontinuierlich verstellt und lassen so klar definierte Durchflussöffnungen frei.

Sofern bei einer Turbine bei wechselndem Wasserdurchfluss nur dieser Leitapparat verstellt werden kann, spricht man von einer einfachen Regulierung. Dies ist bei Francisturbinen immer der Fall. Es gibt aber auch Kaplan-ähnliche Turbinen mit fester Laufradstellung.

Diese nennt man Propellerturbinen (ähnlich Schiffspropeller). Eine weitere Entwicklung sind Propellerturbinen mit aussenliegendem Generator. Diese sind unter dem Namen Strafloturbine («straight flow») auf dem Markt. Einfach-regulierte Turbinen haben die Eigenschaft, eine sehr steile Wirkungsgradkurve aufzuweisen. Da die Stellung der fest stehenden Laufradschaufeln auf eine bestimmte Wassermenge optimiert ist, verschlechtern sich die Strömungsverhältnisse im Laufrad bei der Regulierung des Leitapparats ausserhalb dieses Bestbereichs. Dies führt zu Verwirbelungen und Wirkungsgradverlusten. Deshalb sind einfach-regulierte Turbinen, insbesondere Francisturbinen, für Laufkraftwerke mit stark schwankenden Wassermengen schlecht geeignet.

Bei Kaplan-turbinen lassen sich ausser den Leitrad-schaufeln auch die Turbinenschaufeln verstellen (doppelte Regulierung, Abbildung A2-1). Damit kann der Durchflussquerschnitt zwischen den Turbinenschaufeln jederzeit an die vorhandene Wassermenge angepasst

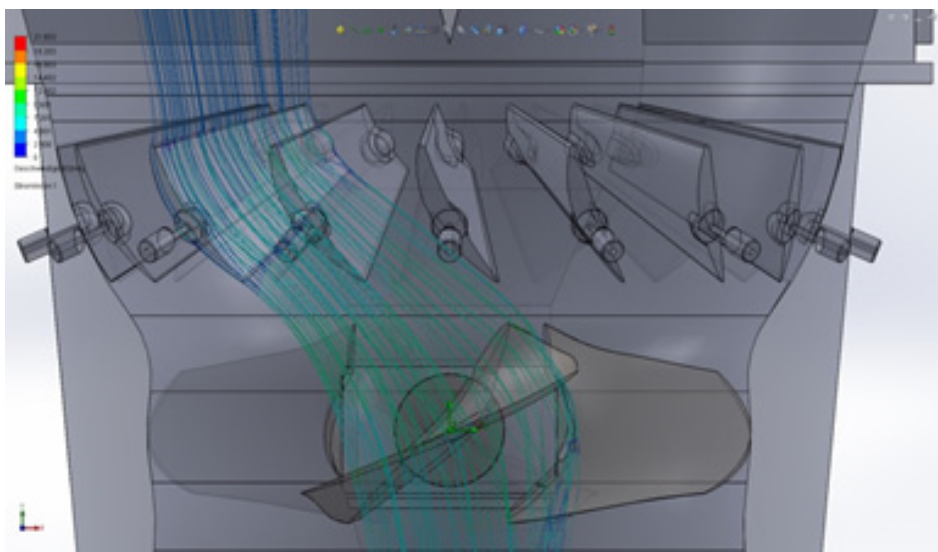


Abbildung A2-1:
*Doppelt-regulierte
Kaplan-turbine (Zeich-
nung: AC-TEC Hyd-
ropower).*

werden. So bleibt die Strömung im Laufrad über einen breiten Wassermengenbereich in gutem Zustand und der Wirkungsgrad bleibt daher gleichmässig hoch. Im Wirkungsgradoptimum erreicht die Kaplan turbine allerdings nicht die gleichen Spitzenwerte wie die Francis turbine, da die Strömung im Laufrad wegen der geringeren Anzahl Laufradschaufeln grundsätzlich weniger gut geleitet ist.

Die Kaplan turbine dominiert im Bereich der Laufkraftwerke an grösseren Mittellandflüssen. Bis in die 60er Jahre wurden diese Turbinen mit vertikaler Achse gebaut, da die damals üblichen Schirmgeneratoren ausserhalb

des Wassers aufgestellt werden mussten. Diese Bauweise wird heute (fast) nur noch bei Umbauten eingesetzt, wo allenfalls notwendige Umbauten an bestehenden Kraftwerksgebäuden finanzielle Zwänge ergeben.

Die Weiterentwicklung der Generatortechnik erlaubte es ab den 70er Jahren, die Generatoren in torpedoähnlichen Gehäusen unter Wasser anzuordnen. Diese Bauweise hat sich heute für neue Laufkraftwerke durchgesetzt, da sie dank des Wegfalls mehrerer Strömungsumlenkungen Vorteile beim Wirkungsgrad (und bei der Fischverträglichkeit) aufweist.

Wirkungsgradkurve

Als Wirkungsgradkurve wird die Darstellung der Wirkungsgrade in Abhängigkeit der Durchflussmenge bezeichnet. Das Wirkungsgradmaximum kann bei der Turbinenauslegung so angeordnet werden, dass das Maximum der häufigsten Durchflusswassermenge entspricht (in der Regel bei Speicherkraftwerken) oder bei wechselnder Wassermenge die grösste Produktion über ein Jahr resultiert (in der Regel bei Laufkraftwerken). Die Wirkungsgradkurve einer Francisturbine ist wegen der einfachen Regulierungen spitz, erreicht aber im Bestpunkt sehr hohe Werte (Abbildung A2-2).

Dies macht sie insbesondere für Speicherkraftwerke interessant. Für Laufkraftwerke an grösseren Mittellandflüssen dominiert die Kaplan-turbine dank ihrer guten Anpassungsmöglichkeiten an wechselnde Wasserzuflüsse. In der Praxis hat es sich eingebürgert, dass das Wirkungsgradmaximum bei 75 – 80% der Volllastwassermenge angesetzt wird. So werden sowohl bei kleinen wie bei grossen Wassermengen akzeptable Wirkungsgrade erreicht.

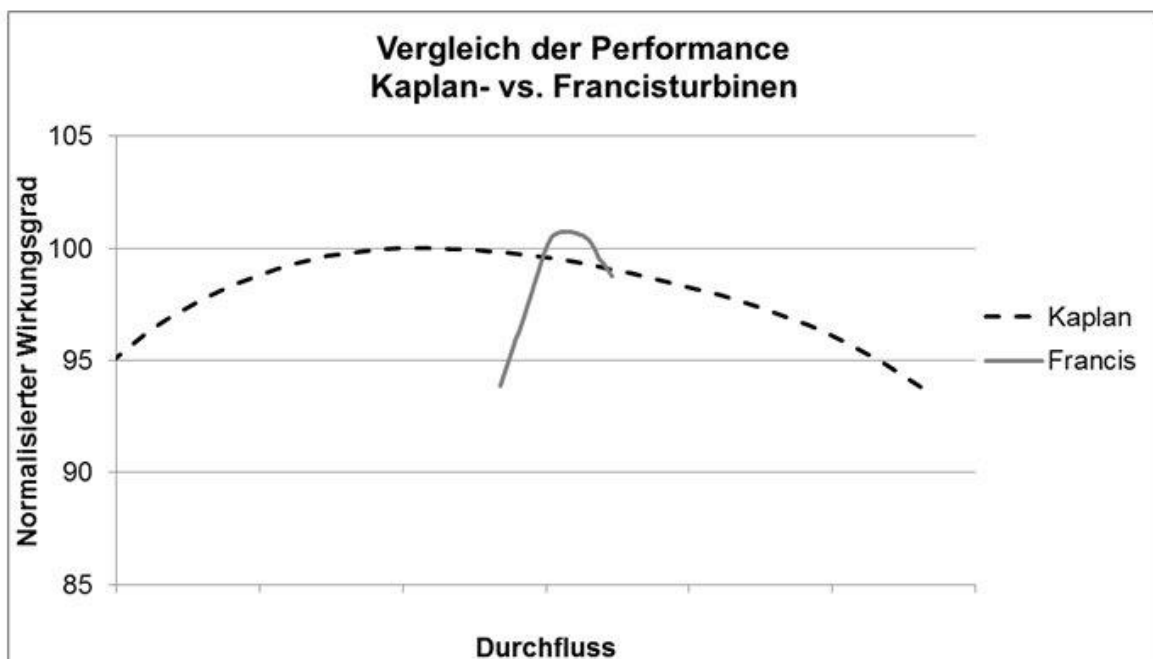


Abbildung A2-2: Vergleich Wirkungsgradkurven Kaplan- versus Francisturbine; Kaplan-turbine breites Einsatzfeld mit flacher Wirkungsgradkurve, gute Eignung für Einsatz bei variablem Durchfluss; Francisturbine schmales Einsatzfeld mit hohem Spitzenwirkungsgrad, aber spitzer Wirkungsgradkurve, gute Eignung bei konstantem Durchfluss.

Aktionsturbine / Reaktionsturbine

Bei einer Aktionsturbine (Peltonsturbine) trifft das Wasser direkt auf das Turbinenrad und überträgt eine Impulskraft. Feststoffe im Wasser werden mit dem Strahl mit grosser Energie auf die Turbinenoberfläche geschleudert. Theoretisch würde dies auch für Fische gelten, die ins Kraftwerkssystem einschwimmen würden.

Bei den Reaktionsturbinen (Francis- und Kaplansturbinen) tritt kein Aufprall des Wassers auf die Turbinenschaufeln auf. Das Wasser wird in paralleler Strömung wie bei einem Flugzeugflügel an den Turbinenschaufeln vorbeigeleitet. Durch eine spezielle Formgebung weist die Strömung auf der Unterwasserseite der Laufradschaufel eine höhere Geschwindigkeit auf als oberhalb. Damit ist der Wasserdruck auf der Oberwasserseite der Schaufel grösser und es resultiert eine nach unten gerichtete Druckkraft. Diese Kraft bringt das Turbinenrad in eine Drehbewegung um die Turbinenachse. Feststoffe und Fische werden mit der Strömung parallel an den Laufradschaufeln vorbeigeleitet.

Kavitation

Fliessgeschwindigkeit und Druck stehen in einer Flüssigkeit nach den Gesetzen des Physikers Daniel Bernoulli in direktem Zusammenhang. Wird die Fliessgeschwindigkeit des Wassers in einer Turbine erhöht, sinkt der Druck entsprechend. Dies wird gezielt an den Turbinenschaufeln von Reaktionsturbinen (oder an Flugzeugflügeln) ausgenutzt. Sofern die Fliessgeschwindigkeit aus konstruktionsbedingten Ursachen aber über ein gewisses Mass erhöht wird, kann der Druck unter den Dampfdruck des Wassers absinken. Das Wasser verdampft in diesem Fall unter Blasenbildung, das Wasser «kavitiert». Die Kavitation wirkt sich in Turbinen in zweierlei Hinsicht negativ aus. Einerseits versperren die entstehenden Dampfblasen einen Teil des Durchflussquerschnitts, was zu Wirkungsgradverlusten führt. Andererseits werden diese Dampfblasen mit der Strömung in Zonen mit höherem Wasserdruck verfrachtet, wo sie unter Freisetzung von sehr hohen Energien implodieren. Erfolgt eine solche Implosion in der Nähe von festen Oberflächen, können kleinste Materialteilchen herausgerissen werden. Diese gefürchtete Kavitationserosion kann zu sehr grossen Zerstörungen führen. Jeder Turbinenkonstrukteur wird deshalb alle konstruktiv möglichen Massnahmen ergreifen, um Übergeschwindigkeiten und Kavitationsbildung zu verhindern.

Spaltkavitation

Damit eine Kaplan turbine innerhalb des feststehenden Laufradmantels rotieren kann, muss dazwischen eine Spalte offen gelassen werden. Durch diesen Zwischenraum wird eine geringe Wassermenge abfliessen. Diese wird in der Spalte massiv beschleunigt, was zu Unterdruck und Kavitation führt. Diese Erscheinung wirkt sich in zweierlei Hinsicht negativ auf den Turbinenbetrieb aus. Einerseits kann dieses Verlustwasser für die Stromproduktion nicht genutzt werden. Je nach Spaltbreite ist dieser Produktionsverlust mehr oder weniger bedeutend. Andererseits bewirkt die auftretende Kavitation Schäden an den Lauf-

radschaufeln und am Laufradmantel (dies erforderte im Wasserkraftwerk Aarberg der BKW Energie AG vor dem Turbinenumbau alle 4 Jahre umfangreiche Schweissreparaturen). Die Gewichtung dieser beiden Einflüsse wurde wie beschrieben in Europa und Nordamerika unterschiedlich vorgenommen. In Europa wurden kleine Spalte realisiert, um einen hohen Wirkungsgrad zu erzielen. Dafür wurden die erforderlichen Reparaturen in Kauf genommen. In Nordamerika wurde der Vermeidung von Reparaturen höheres Gewicht beigemessen, deshalb wurden grössere Spalten und grössere Wasserverluste toleriert.

A3: Praxisbeispiel KW Hagneck

An der Mündung des Hagneckkanals in den Bielersee wurde von der Bielerseekraftwerke AG von 2011 - 2015 ein neues Wasserkraftwerk Hagneck erstellt. Das neue Maschinenhaus beinhaltet 2 grosse Rohrturbinen mit je 4.4 m Flügeldurchmesser (Abbildung A3-1). Im alten Maschinenhaus wurden die drei Propellerturbinen und eine der beiden vertikalachsigen Kaplanmaschinen stillgelegt. Die gesamte Ausbauwassermenge wurde dabei von 175 m³/s (=Q₁₄₀) auf total 320 m³/s (=Q₃₀) erhöht.

Die Schätzung der Mortalitätsraten für 20 cm lange Forellenartige ergab für die alten Kaplanmaschinen Werte von 16.5%, für die neue Rohrturbine 8.5% (Abbildung A3-2). Um zu verhindern, dass weiterhin Fische durch die alte Kaplanmaschine abwärts wandern, wird ein geneigter Vertikalrechen mit 15 mm lichter Stabweite und einem Kronenausschnitt mit Ableitung in einen Bypass eingebaut.



Abbildung A3-1: Oben: das denkmalgeschützte alte KW Hagneck mit 5 Maschinen (3 Propeller- und 2 Kaplanmaschinen vertikalachsig). Unten: Luftaufnahme des Neubaus Wehr und Maschinenhaus an der Mündung des Hagneckkanals (Drohnenaufnahme: BKW Energie AG).

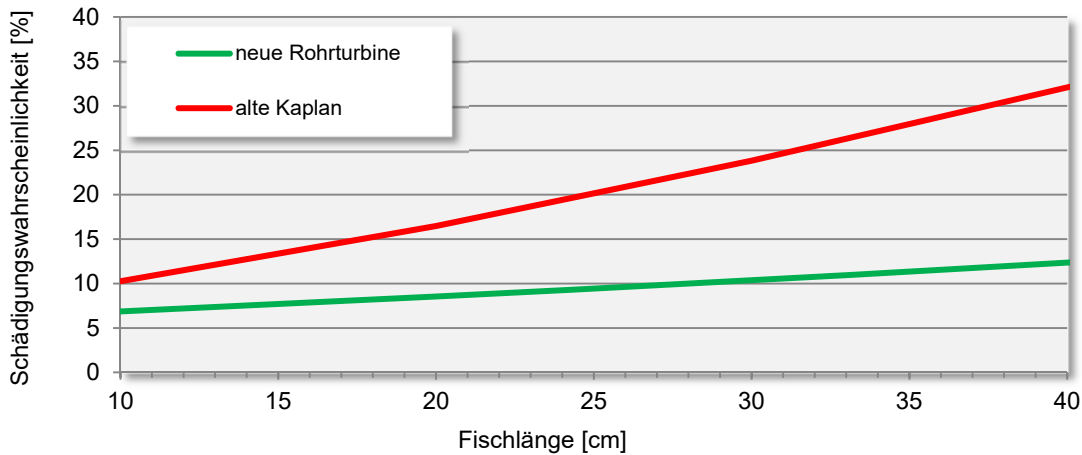


Abbildung A3-2: Mortalitätsraten bei der Fischpassage durch die alten und neuen Turbinen des KW Hagneck für stromlinienförmige Fische nach LARINIER & TRAVADE [2002] (Daten: BKW Energie AG).

Um die Auswirkungen dieses Maschinener-satzes durch einen Neubau auf die gesamt-abwärts wandernde Fischpopulation abzuschätzen, muss nebst den maschinenspezifischen Mortalitäten auch die Verteilung des Abflusses über Maschinen und Wehr in die Berechnungen einbezogen werden. Die entsprechenden Schätzungen zeigen, dass die geringeren Schädigungsraten der neuen Maschinen nur bis zur neuen Ausbauwasser-

menge wirksam werden (Abbildung A3-3). Bei grösseren Abflüssen liegen die beiden Kurven nahe beieinander und ab einem Abfluss von rund 600 m³/s sind sie deckungsgleich. Dabei nicht berücksichtigt sind eventuelle Schädigungen beim Abstieg übers Wehr, da insbesondere beim alten Wehr eine vorgelagerte Betonplatte wahrscheinlich die Abwärtswanderung beeinträchtigte, beim neuen Wehr jedoch ein tiefer Kolk erstellt wurde.

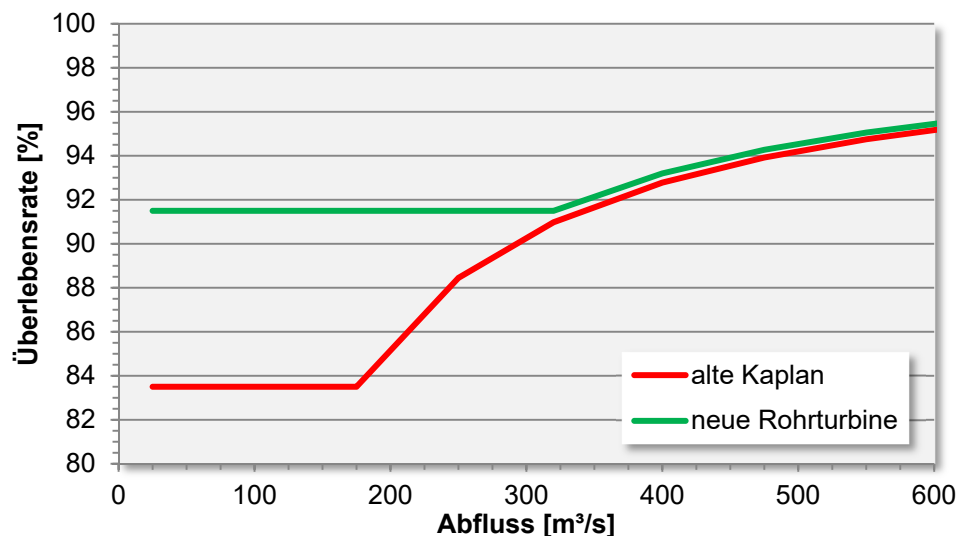


Abbildung A3-3: Überlebensraten für 20 cm lange Salmoniden bei der Abwärtswanderung beim KW Hagneck über die alten bzw. neuen Turbinen unter Berücksichtigung der Ausbauwassermenge (Daten: BKW Energie AG).