BAW
Bundesanstalt für Wasserbau

bfg Bundesanstalt für Gewässerkunde

BAWEmpfehlung

Bewertung der Auswirkung baulicher und betrieblicher Maßnahmen an Stauanlagen auf den Fischabstieg

Ausgabe 2021

BAW-Merkblätter, -Empfehlungen und -Richtlinien
Herausgeber

Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)
Kußmaulstraße 17
76187 Karlsruhe

Postfach 21 02 53
76152 Karlsruhe

Tel.: 0721 9726-0
Fax: 0721 9726-4540

info@baw.de
www.baw.de

Verfasser

Martin Zaschke, Bundesanstalt für Wasserbau
Detlev Ingendahl, Bundesanstalt für Gewässerkunde
Matthias Scholten, Bundesanstalt für Gewässerkunde
Roman Weichert, Bundesanstalt für Wasserbau
Peter Schmitt-Heiderich, Bundesanstalt für Wasserbau

Übersetzung, Nachdruck – auch auszugsweise – nur mit Genehmigung des Herausgebers: © BAW 2021

Karlsruhe · Juni 2021 · ISSN 2192-5380

Inhaltsverzeichnis Seite

1	Problemstellung	3
2	Das fachliche Eckpunktepapier „Fischabstieg an Wehranlagen“	3
3	Modellierung des Fischabstieges an einer Beispielanlage	4
3.1	Vorbemerkung	4
3.2	Fischökologische, hydrologische und betriebstechnische Eingangsdaten	5
3.3	Bedeutung des Wehres für den Fischabstieg	7
3.4	Identifikation der Schädigungsrisiken	7
3.5	Betrachtete Planungsvarianten	8
3.6	Ergebnisse und Bewertung	9
4	Anwendungsgrenzen des Verfahrens und weitere Entwicklung	12
5	Fazit	12
Literatur		13

Bildverzeichnis Seite

Bild 1:	Skizze der Stauanlage des betrachteten Beispielfalls	6
Bild 2:	Definitionsskizze des Schlauchwehres mit Kennzeichnung des Überfallstrahles für verschiedene Abflusszustände	7
Bild 3:	Überfallhöhe hü an den abstiegsrelevanten Wehrfeldern am Schlauchwehr in Abhängigkeit vom Wehrbetrieb A, B und C und Gesamtabfluss für die Bypasskapazitäten 1 m^3/s, 4 m^3/s und 8 m^3/s	9
Bild 4:	Anteil der schädigungsfrei absteigenden Fische am Gesamtaufkommen in Abhängigkeit von der Bypasskapazität für die drei betrachteten Betriebszustände	11
Bild 5:	Fisch- und Korridorabmessungen	20
Bild 6:	Abstieg über Schlauchwehre, Definition der Wasserspiegel und der maßgeblichen Sohlhöhe, die je nach Strahlgeometrie (Fall 1 bzw. Fall 2) anzusetzen ist	24
Bild 7:	Schädigungswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit vom Unterwasserpolster bei Fallhöhen < 3.6 m	25
Bild 8:	Anteil der Fische, die ein über- bzw. unterströmtes Wehr passieren, an der gesamten Fischmenge in Abhängigkeit von der Höhe h des durchschwimmbaren Korridors und der Fischhöhe	26

Tabellenverzeichnis Seite

Tabelle 1:	Abmessungen (*Länge, Höhe und Breite) und Wanderzeiträume der berücksichtigten Arten	5
Tabelle 2:	Abflusskennwerte am Beispielstandort	6
Tabelle 3:	Ergebnis der Nullvariante (kein Schutzrechen vor KW, kein Bypass): Prozentuale Verteilung der Fische, die mit oder ohne Schädigung über das Wehr absteigen, das Kraftwerk mit den Turbinen (mögliches, hier nicht berechnetes Mortalitätsrisiko) durchwandern oder oberstrom verbleiben („Behinderung beim Abstieg“)	10
Tabelle 4:	Ergebnis der fischschützenden Planungsvariante mit Wehrbetrieb C und Bypasskapazität 8 m^3/s: Prozentuale Verteilung der Fische, die mit oder ohne Schädigung über das Wehr absteigen bzw. den Bypass nutzen. Mit einem Verbleib im Oberwasser oder einer Passage des Kraftwerkes ist nicht zu rechnen.	10
Tabelle 5:	Definition der zu Grunde liegenden Ergebnismengen	17

Anlagenverzeichnis

Anlage 1: Statistische Grundbegriffe

Anlage 2: Statistisches Modell für das SMF-Verfahren

Anlage 3: Biologische Eingangsgrößen

Diese **BAW**Empfehlung wurde gemeinschaftlich von den Bundesanstalten für Wasserbau (BAW) und Gewässerkunde (BfG) im Rahmen des Projektes zur Herstellung der ökologischen Durchgängigkeit an Bundeswasserstraßen erarbeitet.

1 Problemstellung

Stauanlagen stellen für wanderwillige Fische sowohl in Aufstiegs- wie auch in Abstiegsrichtung Hindernisse dar. Während den aufstiegswilligen Fischen ein geeigneter Korridor (in der Regel durch den Bau einer Fischaufstiegsanlage) zur Verfügung gestellt werden muss, können absteigende Fische je nach Abflusssituation unterschiedliche Korridore vorfinden. Die Eignung eines potenziellen Korridors für den Fischabstieg macht sich daran fest, ob dieser möglichst verzögerungsfrei auffindbar und ohne weiteren Zeitverzug gefahrlos, d. h. schädigungsfrei, passierbar ist. Stauanlagen bestehen häufig aus verschiedenen Bauwerken, wie z. B. Wasserkraftanlagen, Wehren, Schleusen, Fischaufstiegsanlagen und Bootsgassen. Je nach konstruktiver Gestaltung (Stababstand des Rechens der Wasserkraftanlage, mit/ohne Bypass, Verschlussorgan Wehranlage u.v.m.) und Betrieb (Wehrsteuerung) der Bauwerke ist deren Eignung als Abstiegskorridor unterschiedlich. Auch die sich über die Zeit verändernden Abflussverhältnisse spielen eine wichtige Rolle. Zusätzlich zu den hydrologischen und technischen Variablen hängt das Auftreten kritischer Zustände auch von der jeweiligen Wanderaktivität der Fische ab, die insbesondere im Falle der diadromen Arten jahreszeitlichen Schwankungen unterliegt. Die Bewertung der Fischabstiegssituation an einer bestehenden oder geplanten Stauanlage sollte sich daher nicht auf einer Identifikation möglicher Schadensmechanismen im Extremfall beschränken, sondern die Häufigkeit des Zusammentreffens der möglichen Konstellationen der fischbiologischen, hydrologischen und technischen Variablen einbeziehen.

Da die Möglichkeiten der Fische zum Abstieg an einer Stauanlage durch verschiedene bauliche und betriebliche Maßnahmen beeinflusst werden können, ist es sinnvoll, die Auswirkungen solcher Maßnahmen bereits in einem frühen Planungsstadium zu bewerten und daraus Schlüsse für die weitere Gestaltung der Stauanlage ziehen zu können. Hierfür soll zum einen die Situation an der bestehenden Anlage quantifiziert und zum anderen sollen statistische Prognosen für die Wirkung möglicher Planungsvarianten auf den Fischabstieg erzeugt werden. Insbesondere ist es von Interesse, einzuschätzen, welche Anteile der abstiegswilligen Fische bei der Passage behindert oder geschädigt werden und welche (Abstiegs-) Korridore sich während bestimmter Betriebs- und Abflusskonstellationen als problematisch erweisen. Der Begriff der Schädigung umfasst hierbei sowohl die unmittelbare als auch eine verzögerte Mortalität sowie solche Schädigungen, die den Fischen eine erfolgreiche Fortsetzung der Abwanderung erschweren (siehe Begriffe und Definitionen in UBA 2015).

Zu diesem Zweck wurde von BAW und BfG ein statistisches Verfahren zur Modellierung des Fischabstiegs entwickelt (SMF-Verfahren, Statistische Modellierung des Fischabstiegs an Stauanlagen), das auf fachlichen Grundsätzen basiert, die im Eckpunktepapier „Fischabstieg bei der Wehrplanung“ erläutert sind (BfG/BAW 2020).

Im vorliegenden Dokument wird in einem ersten Schritt der Bezug zum Eckpunktepapier hergestellt. Darauf aufbauend wird das grundlegende Funktions- und Anwendungsprinzip des SMF-Verfahrens anhand eines Beispiels erläutert. Die theoretischen Hintergründe und die dem Verfahren zugrunde liegenden Ansätze und Annahmen werden in den Anlagen 1 bis 3 näher beschrieben.

2 Das fachliche Eckpunktepapier „Fischabstieg an Wehranlagen“

Das fachliche Eckpunktepapier formuliert ein schrittweises Vorgehen zur Berücksichtigung des Fischabstiegs an Wehranlagen (BfG/BAW 2020). Dies beinhaltet die Erfassung rechtlicher und fischökologischer Grundlagen, die Formulierung grundsätzlicher Anforderungen an den Fischabstieg und darauf aufbauend die Durchführung einer standortspezifischen Analyse mit Hilfe des SMF-Verfahrens.

Prüfung der rechtlichen Grundlagen und Festlegung der zu berücksichtigenden Fischarten

Auf Basis der rechtlichen Grundlagen (WHG, BNatschG) sowie der wasserwirtschaftlichen Vorgaben, wie den Bewirtschaftungsplänen und Maßnahmenprogrammen, leiten sich die relevanten Fischarten für den zu betrachtenden Standort ab. Die Kriterien zur Beurteilung des Fischabstiegs an Stauanlagen hängen unter anderem von der Anatomie und vom Wanderverhalten dieser Fischarten ab. Es ist daher für die Nutzung des SMF-Verfahrens wesentlich, die am Standort zu berücksichtigenden Fischarten auf Basis der entsprechenden Referenzfischzönose festzulegen.

Ermittlung fischökologischer Anforderungen

Für die festgelegten Fischarten sind verschiedene fischökologische Anforderungen zu klären. Eine wesentliche Eingangsgröße für die Erstellung statistischer Prognosen sind die Abwanderzeiträume der Fischarten. Auch spielt für die Bewertung eines Standorts nicht nur die Schädigung, sondern auch eine mögliche Verzögerung beim Fischabstieg insbesondere für diadrome Wanderfische eine Rolle. Im SMF-Verfahren können bei Blockade eines Korridors (z. B. Schutzrechen an einer Wasserkraftanlage oder zeitweise nicht ausreichende Überfallhöhe bei Wehren) bei Bedarf andere Wanderkorridore, soweit verfügbar, zugewiesen werden.

Bedeutung des Wehres für den Fischabstieg

Generell wird vermutet, dass die Abwanderung von Fischen schwerpunktmäßig im Bereich der stärksten Strömung oder ihrer benachbarten Zonen und damit im Bereich des größten Abflusses an einer Stauanlage stattfindet. Es kann demnach eine grobe Einschätzung der Bedeutung der einzelnen Bauwerke einer Staustufe für den Fischabstieg auf Basis des jeweiligen Abflussanteils getroffen werden. Um mit dem SMF-Verfahren potenzielle Wanderkorridore und damit die Relevanz des Wehres für den Fischabstieg einschätzen zu können, sind demzufolge Informationen zur Hydrologie des Standorts und zum Betrieb der Bauwerksteile des Standorts sowie zur Beaufschlagung des Wehres bzw. der einzelnen Wehrfelder zusammenzustellen.

Eignung des Wehres als Abstiegskorridor

Mit den vorhandenen fischbiologischen, hydrologischen und betrieblichen Informationen lässt sich mit dem SMF-Verfahren eine standörtliche Analyse durchführen. Neben der Bewertung der Bedeutung des Wehres für den Fischabstieg (d. h. wie groß ist der Anteil der Fische, die den Abstiegskorridor „Wehr“ wählen) ist insbesondere das Schädigungspotenzial beim Abstieg von Interesse. Hierfür sind im SMF-Verfahren Kriterien aus verfügbarer Literatur hinterlegt, die grundsätzlich bei Vorliegen neuer Erkenntnisse anpassbar sind. Das Interesse einer standörtlichen Analyse kann beispielsweise in einer Bewertung des Ist-Zustands der einzelnen Komponenten einer Stauanlage liegen. Weiterhin kann das SMF-Verfahren verschiedene Planungsvarianten hinsichtlich der Auswirkungen auf den Fischabstieg miteinander vergleichen.

3 Modellierung des Fischabstieges an einer Beispielanlage

3.1 Vorbemerkung

Das SMF-Verfahren ist darauf ausgelegt, die an den Bundeswasserstraßen vorhandenen Verhältnisse an Stauanlagen zu untersuchen. Dies trifft sowohl auf die vorhandenen Fischregionen bzw. zu betrachtenden Fischarten, wie auch auf die Konfiguration der Stauanlagen bzw. die vorhandenen Wehrtypen zu.

Das dem SMF-Verfahren zugrunde liegende statistische Modell wird in Anlage 2 beschrieben. Die Möglichkeiten, die das SMF-Verfahren bietet, sollen dem Leser nachfolgend anhand eines Beispiels nähergebracht werden. Die Komplexität des Modells wie auch die standörtlich sehr unterschiedlichen Randbedingungen an den

Stauanlagen machen deutlich, dass mit dem gewählten Beispiel nur ein grundsätzliches Verständnis der Möglichkeiten des SMF-Verfahrens vermittelt werden soll.

Das gewählte Beispiel orientiert sich an einer Situation, wie sie in ähnlicher Art und Weise häufiger an Bundeswasserstraßen vorkommt und aus Gründen der Verständlichkeit auf einfachen Randbedingungen basiert. Grundsätzlich bietet das SMF-Verfahren die Möglichkeit, Standorte mit wesentlich komplexeren Randbedingungen zu betrachten.

Im vorliegenden Beispiel wird von einer Stauanlage mit Wasserkraftwerk ausgegangen (Bild 1), bei der die Wehranlage durch ein neuzubauendes Schlauchwehr ersetzt werden soll. Das Schlauchwehr hat sich in den vergangenen Jahren als ein Standardwehrtyp für die Bundeswasserstraßen etabliert. Gleichzeitig können bei ungünstigen Randbedingungen die Ablagetische von Schlauchwehren ein Schädigungspotenzial für absteigende Fische aufweisen. Neben dem Wehrneubau ist auch die Einrichtung eines Schutzrechen-Bypass-Systems Gegenstand der Planung des Beispiels. Die Anlage befindet sich in der Barbenregion (Gewässertyp der Mittelgebirgsregion mit schnellfließenden Gewässerabschnitten).

Das vorliegende Beispiel zeigt auf, wie trotz ungünstiger Randbedingungen Verbesserungsmöglichkeiten erkannt und bewertet werden können.

3.2 Fischökologische, hydrologische und betriebstechnische Eingangsdaten

Für den Beispielstandort werden aufgrund der rechtlichen Rahmenbedingungen und der zugrunde zu legenden Referenzfischzönose der Lachs als diadromer Wanderfisch und die Barbe als Vertreter der potamodromen Arten betrachtet. Im Sinne einer kompakten Darstellung soll die folgende Bewertung auf diese beiden Arten beschränkt bleiben. Für den Lachs werden mit Smolt [1] und Kelt [2] darüber hinaus verschiedene Lebensstadien berücksichtigt. Körperabmessungen und Wanderzeiträume der betrachteten Arten bzw. Lebensstadien sind in Tabelle 1 aufgelistet. Eine wesentliche Eingangsgröße für die Analyse des Fischabstiegs an Stauanlagen sind langjährige Abflusszeitreihen vom nächstgelegenen für den Standort charakteristischen Pegel. Auf Basis dieser Zeitreihen kann eine gekoppelte Betrachtung von Abfluss- und potenziellen Fischwanderereignissen erfolgen. Da einige Arten nur während bestimmter Zeiträume des Jahres stromab wandern, sind für diese Fälle auch nur die entsprechenden saisonalen hydrologischen Verhältnisse relevant. Diese sind wiederum ausschlaggebend für Abflussaufteilung und Betriebsweise der Anlage während dieser Zeiträume. Tabelle 2 gibt einen Überblick über einige der Abflussparameter der für den vorliegenden Beispielfall zugrunde gelegten Datensätze.

*Tabelle 1: Abmessungen (*Länge, Höhe und Breite) und Wanderzeiträume der berücksichtigten Arten*

Art	Abmessungen*			Wandertyp	Monate der Wanderaktivität											
	L_{Fisch} [m]	H_{Fisch} [m]	D_{Fisch} [m]		Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Lachs (Smolt)	0.12	0.02	0.01	diadrom			x	x	x	x						
Lachs (Kelt)	1.00	0.18	0.10	diadrom	x	x	x	x	x							x
Barbe (adult)	0.70	0.13	0.09	potamodrom	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

[1] Jugendliches Entwicklungsstadium des Lachses bei der ersten Abwanderung aus dem Süßwasser in die marinen Lebensräume

[2] Adulter Lachs nach dem Ablaichen im Süßwasser. Kelts sterben im Süßwasser nach dem Laichen oder wandern als adultes Tier zurück in die marinen Lebensräume.

Tabelle 2: Abflusskennwerte am Beispielstandort

Monat	MQ [m³/s]
Jan	85
Feb	68
Mrz	60
Apr	41
Mai	31
Jun	24

Monat	MQ [m³/s]
Jul	20
Aug	22
Sep	17
Okt	19
Nov	34
Dez	61

Gesamtjahr		
MQ =	40	m³/s
Q_{30} =	11	m³/s
Q_{330} =	90	m³/s

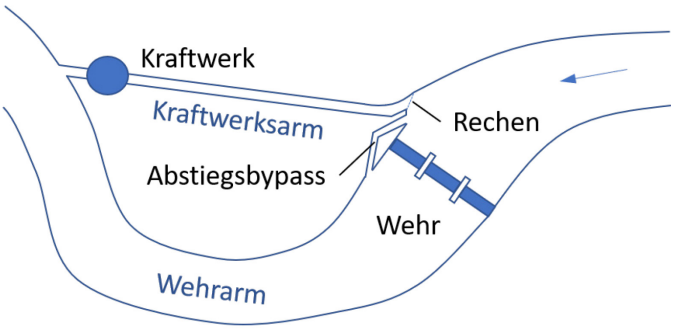


Bild 1: Skizze der Stauanlage des betrachteten Beispielfalls

Bild 1 zeigt eine schematische Darstellung der Stauanlage mit Kennzeichnung der für den Fischabstieg relevanten Korridore. Die Ausbaumenge des Kraftwerkes entspricht dem mittleren Abfluss des Fließgewässers von MQ = 40 m^3/s. Weitere Abflussanteile werden über das Wehr und gegebenenfalls über einen Abstiegsbypass in den Wehrarm geleitet. Eine direkte Streckenführung des Bypasses vom Oberwasser des Wehres in das Unterwasser des Kraftwerkes ist nicht realisierbar. Sonstige Bauwerke, die an Stauanlagen dieser Größenordnung häufig anzutreffen sind, aber aufgrund ihrer schlechten Auffindbarkeit für den Fischabstieg zumeist eine untergeordnete Rolle spielen (Schleuse, Fischaufstiegsanlage), werden im Rahmen des vorliegenden Beispielfalles nicht berücksichtigt. Mögliche Revisions- oder sonstige Zustände mit vermindertem oder eingestelltem Kraftwerksbetrieb werden ebenso vernachlässigt, sind jedoch grundsätzlich mit dem SMF-Verfahren berücksichtigbar. Für die Beispielanlage gelten folgende Randbedingungen:

1. Aus ökologischen Gründen ist ein Mindestabfluss von 8 m^3/s im Wehrarm sicherzustellen. Dieser Abflussanteil besitzt immer Priorität vor dem Kraftwerksbetrieb.
2. Das Kraftwerk benötigt zum Betrieb der Turbinen einen Mindestdurchfluss von 6 m^3/s. Wegen des vorzuhaltenden Mindestabflusses (1) findet der Kraftwerksbetrieb daher erst ab einem Gesamtabfluss von 14 m^3/s statt. Bis zum Erreichen dieses Wertes wird daher der gesamte Abfluss über das Wehr in den Wehrarm geleitet.
3. Als Verschlusstyp kommt ein dreifeldriges Schlauchwehr zum Einsatz. Die Feldbreite beträgt 18 m und der Oberwasserstand bezogen auf die Jamborschwelle liegt bei 3,20 m. Es wird ein Standard-Ablagetisch im Sinne von Gebhardt et al. (2014) verwendet. Ein Schnitt durch das Schlauchwehr ist in Bild 2 skizziert.

Es wird davon ausgegangen, dass die o. g. Randbedingungen fest vorgeschrieben sind und keinerlei Modifikationen zulassen. Planbar und ggf. optimierbar sind dagegen die Einrichtung eines Schutzrechens vor dem Kraftwerkszulauf, die Auslegung eines Abstiegsbypasses und die Gestaltung des Wehrbetriebes. Auf entsprechende Varianten wird in Abschnitt 3.5 eingegangen.

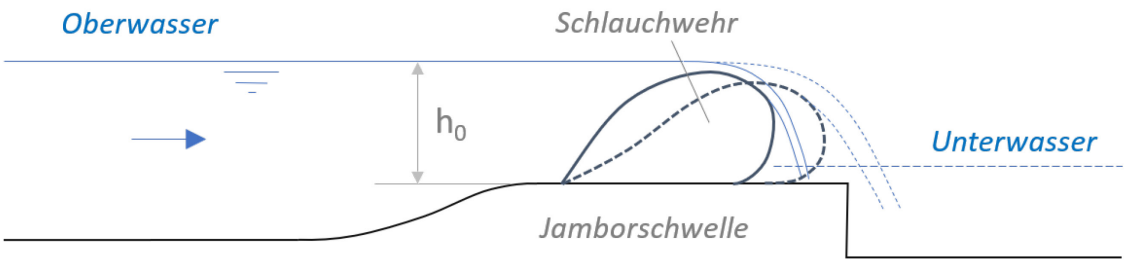


Bild 2: Definitionsskizze des Schlauchwehres mit Kennzeichnung des Überfallstrahles für verschiedene Abflusszustände

3.3 Bedeutung des Wehres für den Fischabstieg

Im ersten Schritt wird eine abflussproportionale Aufteilung der wandernden Fischmenge angenommen. Die Hintergründe hierfür werden in Anlage 1 bzw. Schmitt-Heiderich et al. (2013) erläutert. Dies bedeutet für die hier betrachtete Anlage, dass die Fische sich ohne sonstige behindernde Einbauten oder Einengungen entsprechend den jeweiligen Abflüssen auf Kraftwerk, Schlauchwehr und ggf. Bypass verteilen würden. Mit Abweichungen von dieser Aufteilung ist in dem dargestellten Beispiel nur infolge möglicher Schutzrechen (siehe Abschnitt 3.5) oder aufgrund unzureichender Überfallhöhen am Schlauchwehr zu rechnen. Bezüglich des letzten Punkts wird auf die in Anlage 2 erläuterte Annahme zurückgegriffen, dass Fische nur bei einer im Verhältnis zu ihrer Größe (Körperhöhe) ausreichenden Überfallhöhe am Wehr absteigen. Es wird von einem linearen Verlauf der Passagewahrscheinlichkeit zwischen einer Überfallhöhe von 1 H_{Fisch} (die ersten Fische beginnen abzusteigen) und 3 H_{Fisch} (alle dort eintreffenden Fische steigen über das Wehr ab) ausgegangen (siehe Anlage 3).

Sofern der Abstieg über das Wehr mit keinerlei Schädigung verbunden ist, wird eine ausreichende Überfallhöhe den verzögerungsfreien Abstieg der Fische begünstigen. Führt dagegen die Wehrpassage zu einem erhöhten Schädigungsrisiko der absteigenden Fische z. B. beim Aufprall im Unterwasser, ist eine unzureichende Überfallhöhe gegebenenfalls vorteilhaft: Die Fische werden dann möglicherweise an der schädlichen oder tödlichen Passage des Wehres gehindert und beginnen, nach alternativen Abstiegswegen zu suchen.

In letzterem Fall ist für den weiteren Verlauf entscheidend, ob die Fische dauerhaft am Abstieg gehindert werden und im Oberwasser verbleiben oder in einem vertretbaren Zeitraum einen alternativen Abstiegskorridor auffinden. Grundsätzlich ist diese Auffindbarkeit von der Lage der Korridore und den Strömungsverhältnissen im Oberwasser abhängig und fallspezifisch zu bewerten.

3.4 Identifikation der Schädigungsrisiken

Beim hier betrachteten Beispiel mit einem Schlauchwehr besteht das einzige berücksichtigte Verletzungsrisiko im Aufprall von Fischen auf den Ablagetisch. Dieses Risiko sinkt mit zunehmendem Einstau des Ablagetisches oder infolge einer Verlagerung der Trajektorie des Überfallstrahls in das vom Unterwasser eingestaute Tosbecken bei größeren Abflüssen. Zwei mögliche Verläufe des Überfallstrahles in Abhängigkeit vom Abfluss und

von der Deformation des Schlauchwehres werden Bild 2 angedeutet. Eine allgemeine Definition des Ansatzes für die Schädigungswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von der Unterwasserpolsterhöhe wird im Abschnitt 2 von Anlage 3 angegeben.

Im Folgenden wird von den ungünstigen Annahmen ausgegangen, dass der Unterwasserstand auch bei sehr hohen Abflüssen unterhalb der Höhe des Ablagetisches liegt und artunabhängig mit einer hundertprozentigen Fischschädigung zu rechnen ist, solange der Überfallstrahl auf den Ablagetisch trifft. Bei Verwendung eines Standard-Ablagetisches nach Gebhardt et al. (2014) wäre dies im vorliegenden Beispiel bei Abflüssen von weniger als 64 m^3/s pro Wehrfeld der Fall.

Sekundäre Schädigungen der Fische durch Kollisionen mit Tosbeckeneinbauten, durch Prädation infolge Desorientierung oder durch die Wirkung von Scherkräften auf Fische im Tosbecken werden im Beispiel nicht angenommen, sind aber bei realen Planungen zu berücksichtigen.

3.5 Betrachtete Planungsvarianten

Es wird zunächst eine Nullvariante betrachtet, bei der der geplante Wehrneubau ohne fischschützende Begleitmaßnahmen umgesetzt wird. In diesem Fall wird der Kraftwerkszulauf nicht durch einen Feinrechen geschützt und auf einen Abstiegsbypass verzichtet. Fische, die aufgrund eines zu geringen Abflusses über das Wehr, bzw. unzureichender Überfallhöhen nicht über das Schlauchwehr absteigen können, weichen auf das Kraftwerk aus. Es wird von einer gleichmäßigen Beaufschlagung der drei Wehrfelder ausgegangen.

Neben der Nullvariante werden verschiedene Planungsvarianten betrachtet. Bei sämtlichen Planungsvarianten wird ein Schutzrechen-Bypass-System am Wasserkraftwerk vorgesehen. Der Gitterabstand des Rechens wird derart ausgelegt, dass jegliche Passage durch Individuen der betrachteten Arten bzw. Lebensstadien ausgeschlossen werden kann. Die Rechenanlage wird mit einem ausreichend dotierten und ideal in unmittelbarer Nähe des Rechens positionierten Abstiegsbypass kombiniert, durch den sämtliche Fische, die gemäß abflussproportionaler Aufteilung das Kraftwerk passieren würden, ins Unterwasser des Wehres geleitet werden.

Folgende Parameter werden variiert, um deren Auswirkung auf die Fischabstiegssituation quantifizieren zu können:

1. Die Kapazität des Bypasses: Der Abfluss Q_{Bypass}, mit dem der Bypass beaufschlagt wird, wird im Bereich von 1 m^3/s bis 8 m^3/s variiert. Bei Q_{Bypass} = 8 m^3/s wird der gesamte, für den Wehrarm erforderliche Mindestabfluss über den Bypass geleitet. Das Schlauchwehr wird somit nur bei Gesamtabflüssen knapp unterhalb des für das Kraftwerk notwendigen Mindestdurchflusses (d. h. bei 8 $m^3/s < Q_{ges} < 14$ m^3/s) und nach Erreichen der Schluckmenge (Kraftwerk + Bypass = $Q_{ges} > 48$ m^3/s) überströmt. Die Fischschädigung am Schlauchwehr kann für diesen Fall über ein großes Abflussspektrum (14 $m^3/s < Q_{ges} < 48$ m^3/s) ausgeschlossen werden.

2. Die Betriebsweise des Schlauchwehres. Hier wird zwischen drei Arten von Wehrbetrieb unterschieden.

   Wehrbetrieb A. Es wird stets nur ein einzelnes Wehrfeld beaufschlagt. Auf diese Weise wird erreicht, dass der Überfallstrahl möglichst häufig das Tosbecken direkt erreicht und somit die Schädigung bei hohen Abflüssen minimiert.

   Wehrbetrieb B. Gleichmäßige Beaufschlagung aller drei Wehrfelder. Auf diese Weise wird die Überfallhöhe minimiert, was bei geringen Abflüssen ein Ausweichen der Fische (insbesondere der hochrückigen Arten) auf den Bypass begünstigt.

Wehrbetrieb C. Es werden die Vorteile von Wehrbetrieb A und B kombiniert, indem bis zu einem Wehrabfluss von 64 m^3/s alle drei Felder gleichmäßig beaufschlagt und bei darüberhinausgehenden Abflüssen einzelne Wehrfelder entweder mit einem Mindestabfluss von 64 m^3/s oder nicht überströmt werden.

Die Überfallhöhen am Wehr in Abhängigkeit von Gesamtabfluss, Bypasskapazität und Wehrbetrieb sind in Bild 3 dargestellt. Der Teil des Abflussspektrums zwischen Einsetzen des Kraftwerksbetriebes und Erreichen der Schluckfähigkeit der Turbinen ist anhand des Abschnittes mit konstant bleibendem Wehrabfluss und somit konstant bleibender Überfallhöhe erkennbar.

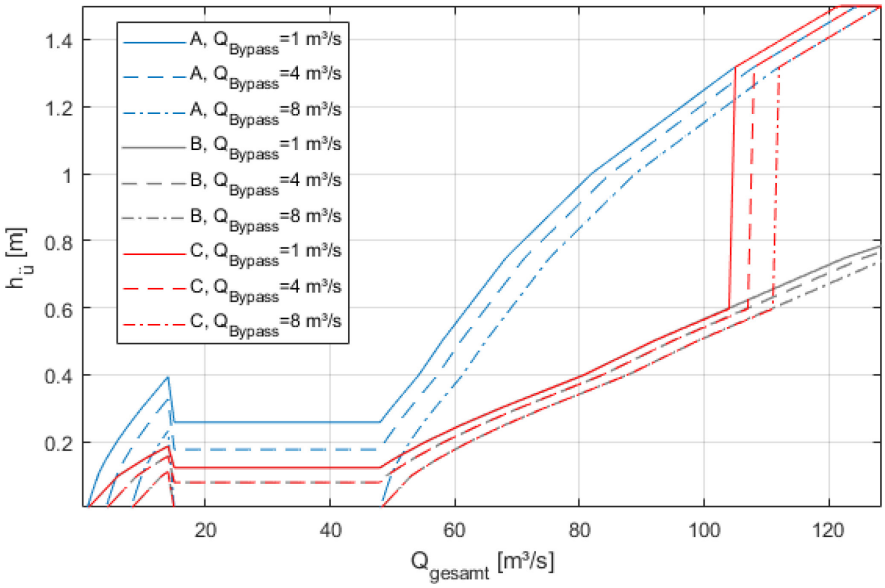


Bild 3: Überfallhöhe $h_ü$ an den abstiegsrelevanten Wehrfeldern am Schlauchwehr in Abhängigkeit vom Wehrbetrieb A, B und C und Gesamtabfluss für die Bypasskapazitäten 1 m^3/s, 4 m^3/s und 8 m^3/s

3.6 Ergebnisse und Bewertung

Sollte entgegen der fischökologischen Empfehlung kein Schutzrechen installiert werden (Nullvariante, siehe Tabelle 3), können nur geringe Fischanteile bei entsprechend hohen Abflüssen schädigungsfrei über das Wehr absteigen. Mehr als die Hälfte der Fische passiert das Kraftwerk, wobei mögliche Schädigungen bei der Turbinenpassage von den technischen Parametern der eingebauten Turbinen abhängen und nicht Gegenstand der vorliegenden Betrachtung sind. Größere Arten (hier Lachskelt und Barbe) würden verstärkt auf das Kraftwerk ausweichen, da sie bei geringen Abflüssen über das Wehr keine ausreichende Überfallhöhe vorfinden. Dieses Ausweichen findet allerdings nur statt, wenn der Mindestdurchfluss für den Kraftwerksbetrieb (Q_{ges} = 14 m^3/s) erreicht ist, da der Kraftwerkskorridor ansonsten nicht zur Verfügung steht und die Fische im Oberwasser verbleiben.

Trotz der geringeren Körperhöhe ist ein Verbleiben im Oberwasser bei der Barbe häufiger der Fall als beim Lachskelt (siehe letzte Spalte in Tabelle 3), da letzterer seinen Abstieg in abflussreichen Monaten durchführt (siehe Tabelle 1 und Tabelle 2) und daher selten Zustände ohne Kraftwerksbetrieb vorfindet. Beim Verbleib im Oberwasser erhöht sich die Wahrscheinlichkeit der Prädation und der Abstieg kann erheblich verzögert werden. Dies hat insbesondere für diadrome Arten (hier: Lachs) erhebliche Auswirkungen auf den Reproduktionserfolg: Die marinen Laich- (Bsp. Aal) oder Aufwuchsgebiete (Lachs) werden nicht mehr rechtzeitig oder überhaupt nicht erreicht.

Tabelle 3: Ergebnis der Nullvariante (kein Schutzrechen vor KW, kein Bypass): Prozentuale Verteilung der Fische, die mit oder ohne Schädigung über das Wehr absteigen, das Kraftwerk mit den Turbinen (mögliches, hier nicht berechnetes Mortalitätsrisiko) durchwandern oder oberstrom verbleiben („Behinderung beim Abstieg")

Nullvariante (kein Rechen, kein Bypass)

Art	Abstieg über Wehr		Abstieg über KW	Behinderung beim Abstieg
	schädigungsfreier Abstieg	Schädigung		
Lachs (Smolt)	4%	42%	54%	0%
Lachs (Kelt)	9%	6%	80%	5%
Barbe	5%	10%	65%	20%

Wie Bild 4 in zusammengefasster Form zeigt, führt die Installation eines Schutzrechens sowie eines Bypasses – sofern dieser tatsächlich von sämtlichen Fischen vor dem Kraftwerksrechen genutzt wird – zu einer deutlichen Verbesserung der Situation. Für die Konfiguration „Wehrbetrieb C und Bypasskapazität 8 m^3/s" werden die Wahrscheinlichkeiten der Korridornutzung und Schädigung zusätzlich in Tabelle 4 angegeben.

Tabelle 4: Ergebnis der fischschützenden Planungsvariante mit Wehrbetrieb C und Bypasskapazität 8 m^3/s: Prozentuale Verteilung der Fische, die mit oder ohne Schädigung über das Wehr absteigen bzw. den Bypass nutzen. Mit einem Verbleib im Oberwasser oder einer Passage des Kraftwerkes ist nicht zu rechnen.

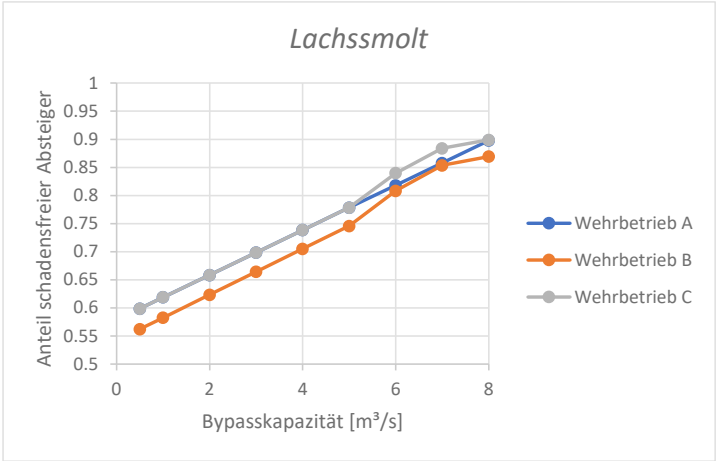
Wehrbetrieb C, $Q_{Bypass} = 8\ m^3/s$

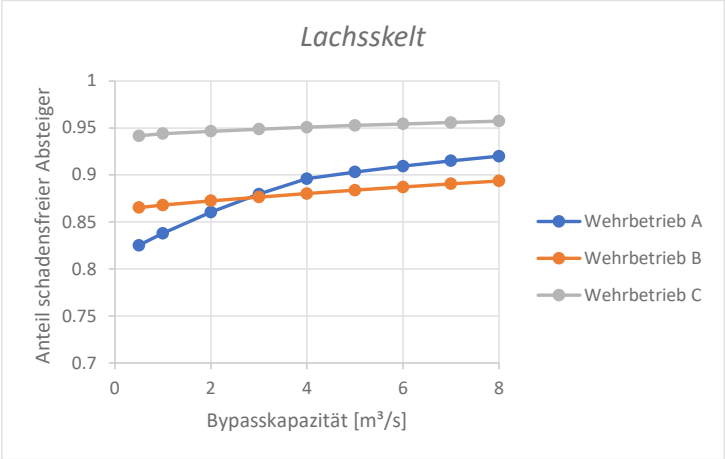
Art	Abstieg über Wehr		Abstieg über KW	Behinderung beim Abstieg	Abstieg über Bypass
	schädigungsfreier Abstieg	Schädigung			
Lachs (Smolt)	3%	10%	0%	0%	87%
Lachs (Kelt)	8%	4%	0%	0%	88%
Barbe	4%	4%	0%	0%	92%

Bild 4 zeigt, dass sich erwartungsgemäß der Anteil schädigungsfreier Absteiger mit zunehmender Beaufschlagung des Bypasses erhöht. Allerdings ist diese Abhängigkeit sehr von der Größe der betrachteten Art abhängig. Im Fall hochrückiger Arten bzw. Lebensstadien führen bereits kleinere Bypasskapazitäten zu einer deutlichen Schadensminderung, da diese Fische das Schlauchwehr bei geringen Überfallhöhen meiden und früher als kleine Fische (Bsp. Lachssmolts) auf den Bypass ausweichen.

Im Fall der Lachssmolts und anderer kleiner Arten oder Lebensstadien wird die Korridorwahl nicht sofort auf diese Weise beeinflusst und aus fischökologischer Sicht wäre es daher erstrebenswert, möglichst viel Abfluss vom Schlauchwehr fern zu halten und über den Bypass abzuleiten.

Wie anhand der Darstellungen in Bild 4 gezeigt wird, ist der in Abschnitt 3.5 definierte Wehrbetrieb C vorteilhaft gegenüber den anderen beiden Betriebsarten. Diese Betriebsweise begünstigt einerseits bei größeren Arten und geringeren Abflüssen das Ausweichen auf den Bypass und ermöglicht andererseits bei höheren Abflüssen ein schnelleres Erreichen des Zustandes, in dem der Überfallstrahl ins Tosbecken trifft. Jedoch ist zu beachten, dass andere Zwänge bei der Wehrsteuerung (bspw. die Vergleichmäßigung des Abflusses zum Erosionsschutz oder die schifffahrtlichen Belange) ebenso berücksichtigt werden müssen.





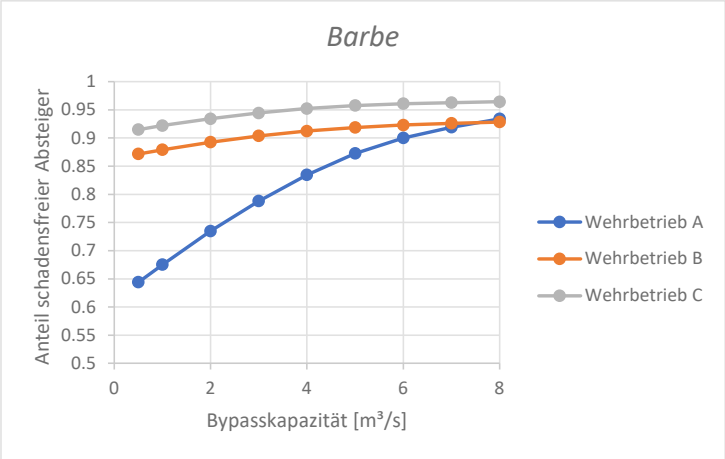


Bild 4: Anteil der schädigungsfrei absteigenden Fische am Gesamtaufkommen in Abhängigkeit von der Bypasskapazität für die drei betrachteten Betriebszustände

Durch die mit der Anwendung des SMF-Verfahrens erreichte quantitative Darstellung der Abstiegssituation wird eine solide und anschauliche Basis für weitere Planungsüberlegungen und Entscheidungen geschaffen. Für den geschilderten Fall können die Ergebnisse hilfreich bei der Findung eines Kompromisses zwischen den Kosten einer erhöhten Bypasskapazität bzw. eines komplexeren Wehrbetriebes und den zu erwartenden ökologischen Auswirkungen sein. Dafür wäre jedoch in einem weiteren Schritt die fischökologische Bewertung der

Ergebnisse des SMF-Verfahrens vor dem Hintergrund der geltenden rechtlichen und populationsbiologischen Anforderungen am Standort durchzuführen.

Zudem ist auf Basis der Ergebnisse eine Priorisierung der verbleibenden Defizite möglich. So stellt sich im Beispielfall die Situation für Lachssmolts bei Umsetzung eines kleineren Bypasses als kritischer dar als für Lachskelt und Barbe. Der Fokus der weiteren Betrachtung könnte somit gezielt auf dieses Lebensstadium gerichtet werden.

4 Anwendungsgrenzen des Verfahrens und weitere Entwicklung

Es ist zu beachten, dass für das SMF-Verfahren (siehe auch Anlage 3) eine Vielzahl von Annahmen getroffen und Vereinfachungen vorgenommen werden, deren Verifikation bzw. mögliche Modifikation Gegenstand aktueller Forschung ist und die längerfristig mit Unsicherheiten behaftet bleiben werden. Das Ziel einer Anwendung der vorgestellten Methode besteht daher weniger im Treffen punktgenauer Aussagen als im Eingrenzen und im Vergleich möglicher Szenarien und in der Erarbeitung relativer Aussagen, durch die die Auswirkungen verschiedener Maßnahmen ermittelt und die Konsequenzen verschiedener Planungsvarianten für den Fischabstieg gegeneinander abgewogen werden können. Um effektiv auf eine fischfreundliche Gestaltung geplanter baulicher Maßnahmen an Stauanlagen hinzuwirken, ist eine frühzeitige Einbindung des SMF-Verfahrens in den Planungsprozess empfehlenswert.

Die für jeden einzelnen Korridor anzusetzenden Schädigungsfunktionen (siehe Anlage 2) können den lokalen Gegebenheiten oder neuen Erkenntnissen entsprechend angepasst werden. In dem Maße, in dem beispielsweise neue Erkenntnisse zur Mortalität von Fischen an Wehranlagen vorliegen, können diese unter Beibehaltung der Methodik berücksichtigt werden. Neben der zunächst im Fokus stehenden Betrachtung einzelner Standorte lässt sich das Verfahren auch auf hintereinander angeordnete Stauanlagen anwenden. Diese Anwendung muss weiterentwickelt werden und dürfte vor allem bei der Bearbeitung von Standorten in Flussgebieten mit weit wandernden diadromen Arten zukünftig an Bedeutung gewinnen.

5 Fazit

Das SMF-Verfahren bietet die Möglichkeit, den Fischabstieg an Wehranlagen auf Basis vorliegender fischbiologischer, hydrologischer und betrieblicher Informationen an einer Stauanlage zu bewerten. Als Ergebnis werden Schädigungs- und Behinderungswahrscheinlichkeiten der betrachteten Fischarten an den einzelnen Anlagenteilen der Staustufe ausgegeben. Die Bewertung dieser Ergebnisse im relativen Vergleich betrieblicher wie auch baulicher Varianten kann mit dem SMF-Verfahren belastbar durchgeführt werden. Die Ergebnisse können somit bei Entscheidungen zur Auslegung der Anlage eine wichtige Grundlage sein.

Eine Einschätzung der populationsbiologischen Wirkung der berechneten Schädigungs- bzw. Behinderungswahrscheinlichkeiten im betrachteten Flussabschnitt kann mit dem SMF-Verfahren nicht erfolgen. Die Ergebnisse können jedoch für eine nachfolgende fischbiologische Bewertung hinzugezogen werden, in die die im SMF-Verfahren hinterlegten fischbiologischen Annahmen und Vereinfachungen Berücksichtigung finden müssen und die mit den Anforderungen der Gewässerbewirtschaftung hinsichtlich der Zielerreichung in der Wasserrahmenrichtlinie oder möglicher naturschutzfachlicher Anforderungen abgeglichen werden muss.

Literatur

Bell, M. C. (1990): Fisheries Handbook of Engineering Requirements and Biological Criteria, Fish Passage Development and Evaluation Program, USACE North Pacific Division. Portland, OR.

BfG/BAW (2020): Fachliches Eckpunktepapier zur Berücksichtigung des Fischabstieges bei der Wehrplanung, Bundesanstalt für Wasserbau / Bundesanstalt für Gewässerkunde.

Castros-Santos, T.; Mulligan, K. B.; Kieffer, M.; Haro, A. (2021): Effects of plunge pool configuration on downstream passage survival of juvenile blueback herring, In: Aquaculture and Fisheries, Vol. 6, S. 135–142.

Cuchet, M.; Hartlieb, A.; Rutschmann, P. (2012): Fischabstieg an Wehren, 44 S. Literaturstudie im Auftrag der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Karlsruhe.

DWA (2005): Fischschutz- und Fischabstiegsanlagen – Bemessung, Gestaltung und Funktionskontrolle. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., ATV-DVWK-Themenband, 256 S.

Ebel, G. (2014): Fischschutz und Fischabstieg an Wasserkraftanlagen – Handbuch Rechen- und Bypasssysteme. Ingenieurbiologische Grundlagen, Modellierung und Prognose, Bemessung und Gestaltung, Mitteilungen aus dem Büro für Gewässerökologie und Fischereibiologie Dr. Ebel.

Gebhardt, M.; Rudolph, T.; Kampke, W.; Eisenhauer, N. (2014): Fischabstieg über Schlauchwehre: Untersuchungen der Strömungsverhältnisse und Identifizierung der Abflussbereiche mit erhöhtem Verletzungsrisiko. In: Wasserwirtschaft Jg.104 (7-8/2014). S. 48-53.

Odeh, M.; Orvis, C. (1998): Downstream Fish Passage Design Considerations and Developments at Hydroelectric Projects in the Northeast USA. In: Fish Migration and fish bypass channels, S. 267–280.

Papula, L. (2011): Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler. Band 3, 6. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag.

Pflugrath, B. D.; Boys, C. A. (2018): Predicting hydraulic structure-induced barotrauma in Australian fish species. In: Marine and Freshwater Research 69 (12), S. 1954-1961.

Pflugrath, B. D.; Boys, C. A.; Cathers, B.; Deng, Z. D. (2019): Over or under? Autonomous sensor fish reveals why overshot weirs may be safer than undershot weirs for fish passage. In: Ecological Engineering 132, S. 41–48.

Schmalz, W.; Wagner, F.; Sonny, D. (2015): Arbeitshilfe zur standörtlichen Evaluierung des Fischschutzes und Fischabstieges, Forum „Fischschutz und Fischabstieg“, Beitrag der Arbeitsgemeinschaft FLUSS (Breitenbach, D), IGF (Jena, D), Profish (Naninne, B).

Schmitt-Heiderich, P.; Gebhardt, M.; Weichert, R. (2013): Klassifizierung der Wanderwege für den Fischabstieg, BAW-Brief 02/2013.

Sonny, D.; Beguin, J. (2020): Downstream fish migration along the low Meuse river: Action D2, Monitoring of the effectiveness of the pilot solutions, Part I: silver eels deliverable report, Life4Fish, Technical Report.

UBA (2015): UBA-Forum „Fischschutz und Fischabstieg“ (2015): Empfehlungen und Ergebnisse des Forums „Fischschutz und Fischabstieg“ – Ergebnispapier des 1. Zyklus.

Anlagen

Anlage 1: Statistische Grundbegriffe

Die statistische Modellierung des Fischabstiegs erfordert das Verständnis einiger statistischer Grundlagen und Begriffe, die im Folgenden definiert werden. Die Definitionen sind angelehnt an Papula (2011).

Ein Experiment, das sich

- bei unveränderten äußeren Randbedingungen beliebig oft wiederholen lässt,
- mehrere sich ausschließende Ergebnisse zulässt und
- dessen Ergebnis sich bei einem konkreten Experiment nicht mit Sicherheit voraussagen lässt,

wird als Zufallsexperiment bezeichnet.

Die möglichen und sich gegenseitig ausschließenden Ergebnisse eines Zufallsexperimentes werden Elementarereignisse oder Ergebnisse genannt und symbolisch mit $\omega_1, \omega_2, \ldots, \omega_n$ bezeichnet. Die Menge aller Ergebnisse ist die Ergebnismenge Ω. Jedem Ergebnis ω lässt sich eine Wahrscheinlichkeit p(ω) zuordnen, wobei gilt:

$$\sum_{\omega \in \Omega} p(\omega) = 1\,,\ 0 \leq p(\omega) \leq 1 \tag{1}$$

Die Wahrscheinlichkeiten eines Elementarereignisses werden in der Regel auf Grundlage beobachteter oder erwarteter Häufigkeiten zugewiesen.

Die Ergebnismenge eines mehrstufigen Zufallsexperimentes (zum Beispiel mehrfaches Würfeln) besteht in sämtlichen möglichen Kombinationen der Ergebnisse der N Einzelexperimente. Die Ergebnismenge des Gesamtexperimentes ist dann die Produktmenge der einzelnen Ergebnismengen:

$$\Omega := \Omega_1 \times \Omega_2 \times \cdots \times \Omega_N \tag{2}$$

Die Ergebnismenge bildet zusammen mit den zugeordneten Wahrscheinlichkeiten den diskreten Wahrscheinlichkeitsraum (Ω,p). Da die beiden kontinuierlichen Größen Q und UW im Modell nur in diskretisierter Form erfasst werden, genügt die Beschränkung auf einen diskreten Wahrscheinlichkeitsraum.

Eine Teilmenge A von Ω (A⊂Ω) heißt Ereignis. Auch das unmögliche Ereignis ∅ (leere Menge) ist eine Teilmenge von Ω. Die Menge aller Ereignisse, die sich aus Ω bilden lassen, heißt Ereignisraum.

Ein Ereignis A kann damit folgende Formen annehmen:

- das unmögliche Ereignis oder
- ein Elementarereignis oder
- die Vereinigung mehrerer Elementarereignisse oder
- das sichere Ereignis Ω, d. h. A enthält alle Elemente von Ω.

Das zu A komplementäre Ereignis „A tritt nicht ein“ enthält die Differenzmenge von Ω und A. Es wird symbolisch mit A^{-} oder A^{C} bezeichnet.

Zwei Ereignisse A und B lassen sich miteinander verknüpfen, wie dies aus der Mengenlehre bekannt ist. Folgende Verknüpfungen sind möglich:

- Vereinigung der Ereignisse A und B, d. h. entweder tritt A ein oder B oder beide gleichzeitig;
  Symbolische Schreibweise: (A∪B) = (A+B)
- Durchschnitt der Ereignisse A und B, d. h. A und B treten gleichzeitig auf;
  Symbolische Schreibweise: (A∩B) = (A×B)
- Schließen sich A und B gegenseitig aus, werden diese als disjunkte Mengen beschrieben.
  Symbolische Schreibweise: (A∩B) = ∅

Für das Arbeiten mit Ereignissen und deren Wahrscheinlichkeiten gilt:

- $P(A) = \sum_{\omega \in A} p(\omega)$
- $0 \leq P(A) \leq 1$
- $P(\Omega) = 1$
- $P(\emptyset) = 0$
- $P(A \cup B) = P(A) + P(B) - P(A \cap B)$; falls A und B disjunkte Ereignisse sind ($A \cap B = \emptyset$) ist somit $P(A \cup B) = P(A) + P(B)$

Wenn Wahrscheinlichkeiten an bestimmte Bedingungen oder Voraussetzungen geknüpft sind, wird von bedingten Wahrscheinlichkeiten gesprochen. So entspricht die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten von B unter der Voraussetzung, dass A bereits eingetreten ist, der bedingten Wahrscheinlichkeit von B unter der Bedingung A. Die symbolische Schreibweise dafür lautet P(B|A). Sie wird durch nachfolgende Gleichung definiert:

$$P(\mathrm{B}|\mathrm{A}) = \frac{P(\mathrm{A} \cap \mathrm{B})}{P(\mathrm{A})} \qquad (P(\mathrm{A}) \neq 0) \tag{3}$$

Die Wahrscheinlichkeit für das gleichzeitige Eintreffen der Ereignisse A und B ist dann gegeben mit

$$P(\mathrm{A} \cap \mathrm{B}) = P(\mathrm{A}) \cdot P(\mathrm{B}|\mathrm{A}) \tag{4}$$

Im Fall der stochastischen Unabhängigkeit ist P(B|A)=P(B) und somit P(A∩B)=P(A)·P(B).

Die oben angegebene Produktregel (Gleichung 4) für den Umgang mit bedingten Wahrscheinlichkeiten kann für den Fall beliebig vieler Ereignisse verallgemeinert werden und ergibt den Multiplikationssatz:

$$P(\mathrm{A}_1 \cap \mathrm{A}_2 \cap \cdots \cap \mathrm{A}_n) = P(\mathrm{A}_1) \cdot P(\mathrm{A}_2|\mathrm{A}_1) \cdot P(\mathrm{A}_3|\mathrm{A}_1 \cap \mathrm{A}_2) \cdot \cdots \cdot P(\mathrm{A}_n|\mathrm{A}_1 \cap \cdots \cap \mathrm{A}_{n-1}) \tag{5}$$

Dieser Satz wird beim SMF-Verfahren genutzt und erlaubt die Berechnung der Wahrscheinlichkeit bestimmter Abstiegsszenarien aus einer Reihe vorgegebener bedingter Wahrscheinlichkeiten (Gleichung 11).

Wenn eine Menge disjunkter Ereignisse A_i angenommen wird, und ein Ereignis B stets nur in Verbindung mit einem der Ereignisse A_i auftritt, so bestimmt sich die totale Wahrscheinlichkeit des Eintretens des Ereignisses B mit

$$P(B) = \sum_{i=1}^{n} P(A_i) \cdot P(B|A_i) \tag{6}$$

Umgekehrt kann auch die Frage gestellt werden, welchen Anteil ein bestimmtes A_i im disjunkten Ereignisraum zu P(B) beigetragen hat. Dies beschriebt die Bayessche Formel:

$$P(A_i|B) = \frac{P(A_i \cap B)}{P(B)} = \frac{P(B|A_i) \cdot P(A_i)}{P(B)} = \frac{P(A_i) \cdot P(B|A_i)}{\sum_{j=1}^{n} P(A_j) \cdot P(B|A_j)} \tag{7}$$

Dieser Zusammenhang wird bei der Berechnung der für den Fischabstieg relevanten Abflussstatistiken (Gleichung 17) verwendet.

Anlage 2: Statistisches Modell für das SMF-Verfahren

A 2.1 Definitionen und Wahrscheinlichkeitsräume

Die Analyse des Fischabstieges wird für einzelne Arten durchgeführt, die stellvertretend für Fische einer bestimmten Größe, Form und eines bestimmten Wanderverhaltens stehen. Hierbei werden die Individuen einer bestimmten Art mit ähnlichen Abmessungen (Länge, Breite, Höhe) und ähnlichem Wanderverhalten, auf die die zu ermittelnden Resultate der Auswertung bezogen werden sollen, in einer Kohorte zusammengefasst.

In einem gedanklichen Feldversuch wird ein zufällig gewählter Vertreter einer Kohorte zu einem zufällig gewählten Zeitpunkt betrachtet. Sein Wander- und Abstiegsverhalten sowie die hydrologisch-technischen Randbedingungen während des Versuches werden zunächst als Ergebnisse eines mehrstufigen Zufallsexperimentes betrachtet. Dieses wird anhand der in Tabelle 5 aufgelisteten diskreten Ergebnismengen beschrieben. Die in Tabelle 1 enthaltene Kategorisierung definiert den hier gewählten Rahmen der Betrachtung. Nicht im Modell enthaltene Parameter, die möglicherweise einen Einfluss auf das Abstiegsgeschehen haben (Wassertemperatur, lunare Phase o.ä.) und sich nicht auf die aufgelisteten Größen zurückführen lassen, werden im hier vorgestellten Verfahren nicht berücksichtigt.

Jedem theoretisch möglichen Versuchsablauf kann eine bestimmte Kombination der Ergebnisse aus Tabelle 5 zugeordnet werden, die im Folgenden als „Abstiegsergebnis“ ω bezeichnet werden soll. Alle möglichen Abstiegsereignisse bilden die Abstiegsergebnismenge Ω:

$$\omega \in \Omega \ , \ \Omega = \{\Omega_s \times \Omega_{bau} \times \Omega_{uw} \times \Omega_{be} \times \Omega_{fw} \times \Omega_Q \times \Omega_m\} \tag{8}$$

Die Wahrscheinlichkeit eines einzelnen Abstiegsergebnisses entspricht der Wahrscheinlichkeit des gleichzeitigen Eintreffens unterschiedlicher Teilergebnisse aus Tabelle 5:

$$P(\omega) = P(\omega_s \cap \omega_{bau} \cap \omega_{uw} \cap \omega_{be} \cap \omega_{Fw} \cap \omega_Q \cap \omega_m) \tag{9}$$

Ein Beispiel für ein potenzielles Abstiegsergebnis ω könnte lauten: „Der Fisch wird im November (ω_m = Nov) bei seinem Abstiegsversuch (ω_{fw} = Fw) über das Wehr (ω_{bau} = Wehr) bei einem Unterwasserstand von 20.5 m NN < UW ≤ 20.6 m ü NN (ω_{uw}) und einem Abfluss von 84 m^3/s < Q ≤ 86 m^3/s (ω_Q) während des Revisionsbetriebes (ω_{be} = Revision) geschädigt (ω_s = s).“ Ein Abstiegsergebnis darf auch scheinbar widersprüchliche Einzelereignisse enthalten, z. B. „Der Fisch wandert nicht (Fw^C) und steigt über das Kraftwerk ab (ω_{bau})“. Die Wahrscheinlichkeit einer solchen Kombination sich ausschließender Ereignisse ist Null.

Bei der Planung und Bewertung der Fischabstiegssituation an einer Stauanlage sind weniger die Wahrscheinlichkeiten sämtlicher denkbarer Abstiegsergebnisse interessant, sondern vielmehr die Wahrscheinlichkeiten bestimmter, vorab definierter Ereignisse (siehe Definition in Anlage 1). Das naheliegendste Beispiel für ein solches „Ereignis“ im Sinne des Fischabstieges ist die Gesamterfolgsquote, also die Wahrscheinlichkeit mit der die Fische einer bestimmten Kohorte unbeeinträchtigt und unbeschädigt über die Stauanlage absteigen. Sollte diese Quote nicht zufriedenstellend sein, wird sich die Frage nach den lokalen Quoten an einzelnen Bauwerken der Stauanlage (Wehr, Kraftwerk etc.) und innerhalb begrenzter Abflussintervalle stellen. Ebenso kann von Interesse sein, wie viele Fische welche Abstiegskorridore bei welchen Betriebszuständen nutzen und wie sich der Wehrbetrieb hierbei auswirkt. In jedem Fall werden im Zusammenhang mit dem Fischabstieg die Wahrscheinlichkeiten verschiedenster Ereignisse von Interesse sein, die je nach Detailgrad der Fragestellung, Beschaffenheit der Anlage und fischökologischen Anforderungen beliebig definiert werden können.

Tabelle 5: Definition der zu Grunde liegenden Ergebnismengen

Ergebnismenge	**Beschreibung**
Gesamtabfluss Ω_Q	$\Omega_Q := (j-1) \cdot \Delta Q \leq Q < j \cdot \Delta Q \quad \text{für } j = 1,2,\dots,n_Q$ Q ist der gesamte Abfluss des Gewässers an der Position der Stauanlage. Das Intervall ΔQ für die Diskretisierung wird vorab gewählt.
Unterwasserstand Ω_{uw}	$\Omega_{uw} := (j-1) \cdot \Delta UW \leq UW < j \cdot \Delta UW \quad \text{für } j = 1,2,\dots,n_{UW}$ UW ist der Wasserstand unterhalb der Stauanlage. Das Intervall ΔUW für die Diskretisierung wird vorab definiert.
Abstieg über Bau Ω_{bau}	$\Omega_{bau} := \{h, Bau\ 1, Bau\ 2, \dots\}$ Fisch steigt über Bauwerk n ab oder aber wird am Abstieg gehindert (h). Das Ergebnis ist unabhängig davon, ob der Fisch beim Abstieg geschädigt wird oder nicht.
Betriebszustand Ω_{be}	$\Omega_{be} := \{Be\ 1, Be\ 2, \dots\}$ Unterscheidung nach Betriebszuständen (Regelbetrieb, Revisionsbetrieb, aalschonender Betrieb usw.)
Fischschädigung Ω_s	$\Omega_s := \{s, u\}$ Fisch wird beim Abstieg geschädigt (s) oder nicht (u).
Monat Ω_m	$\Omega_m := \{Jan, Feb, \dots, Dez\}$ Aktueller Monat. Hiermit werden jahreszeitliche Unterschiede in der Wanderaktivität berücksichtigt.
Wanderaktivität Ω_{fw}	$\Omega_{fw} := \{Fw, Fw^c\}$ Der Fisch ist abstiegswillig und versucht zu wandern (Fw) oder er ist nicht abstiegswillig und unternimmt keinen Versuch (Fw^c).

Sämtliche für die Analyse relevanten Ereignisse werden hierbei nur unter der Bedingung eine Rolle spielen, dass potenziell absteigende Fische vorhanden sind (ω_{fw} = Fw), daher werden stets Wahrscheinlichkeiten vom Typ P(A|Fw) von Interesse sein. Diese Fw-bedingten Wahrscheinlichkeiten sind gleichbedeutend mit dem Anteil der Fische an der Menge abstiegswilliger Vertreter der betrachteten Kohorte, für die das jeweilige Ereignis A eintritt. Für die Prognose dieser bedingten Wahrscheinlichkeiten müssen wiederum die Wahrscheinlichkeiten sämtlicher bedingter Abstiegsergebnisse bekannt sein:

$$P(A|Fw) = \sum_{\omega \in A} P(\omega|Fw) \tag{10}$$

Der Ausdruck P(ω|Fw) kann unter Verwendung der Gleichungen 3, 5 und 9 als Produkt mehrerer bedingter Wahrscheinlichkeiten geschrieben werden:

$$P(\omega|Fw) = P\left(\omega_s \cap \omega_{bau} \cap \omega_{uw} \cap \omega_{be} \cap Fw \cap \omega_Q \cap \omega_m\right) \cdot \frac{1}{P(Fw)} = \tag{11}$$

$$P\left(\omega_s|\omega_{bau} \cap \omega_{uw} \cap \omega_{be} \cap Fw \cap \omega_Q \cap \omega_m\right) \cdot \quad \textit{(Term 1)}$$
$$P\left(\omega_{bau}|\omega_{uw} \cap \omega_{be} \cap Fw \cap \omega_Q \cap \omega_m\right) \cdot \quad \textit{(Term 2)}$$
$$P\left(\omega_{uw}|\omega_{be} \cap Fw \cap \omega_Q \cap \omega_m\right) \cdot \quad \textit{(Term 3)}$$
$$P\left(\omega_{be}|Fw \cap \omega_Q \cap \omega_m\right) \cdot \quad \textit{(Term 4)}$$
$$P\left(Fw|\omega_Q \cap \omega_m\right) \cdot \quad \textit{(Term 5)}$$
$$P\left(\omega_Q|\omega_m\right) \cdot \quad \textit{(Term 6)}$$
$$P(\omega_m) \cdot \quad \textit{(Term 7)}$$
$$\frac{1}{P(Fw)} \quad \textit{(Term 8)}$$

Wie im folgenden Abschnitt A 2.2 erläutert wird, lassen sich die oben aufgelisteten Terme aufgrund statistischer Unabhängigkeiten teilweise vereinfachen und durch Rückführung auf vorhandene biologisch-hydrologische Daten bzw. empirische Modelle ermitteln.

Die Wahrscheinlichkeit eines für die Planung relevanten Ereignisses A unter der Bedingung, dass potenzielle Absteiger vorhanden sind, kann somit durch Ermittlung der rechten Seite von Gleichung 11 und anschließendes Einsetzen in Gleichung 10 bestimmt werden.

A 2.2 Erforderliche Eingabedaten

A 2.2.1 Fischschädigung

Die Schädigung von Fischen (Gleichung 11, Term 1) ist sowohl für den Fall der Turbinenpassage als auch für den Abstieg über Wehranlagen zu quantifizieren. Unabhängig von den Schädigungsmechanismen kann gegenüber Gleichung 11 die Abhängigkeit vom aktuellen Monat vernachlässigt werden, so dass gilt:

$$P\left(\omega_s|\omega_{bau} \cap \omega_{UW} \cap \omega_{Be} \cap Fw \cap \omega_Q \cap \omega_m\right) = P\left(\omega_s|\omega_{bau} \cap \omega_{UW} \cap \omega_{Be} \cap Fw \cap \omega_Q\right) \tag{12}$$

Für den Fall von Wasserkraftanlagen existieren zahlreiche empirische und physikalische Ansätze für die Quantifizierung der turbineninduzierten Mortalität (siehe Übersicht in Ebel 2016), die von den technischen Daten der Turbine und den Abmessungen der Fische als vorzugebende Parameter sowie dem Turbinendurchfluss Q_T als veränderlicher Variable abhängen. Da letzterer vom Betriebszustand Be der Anlage, dem aktuellen Gesamtabfluss Q und unter Umständen vom Unterwasserstand UW abhängt, können die zu erwartenden Mortalitäten beim Turbinendurchgang auf ebendiese Größen zurückgeführt werden, sodass sich die Schädigungswahrscheinlichkeit in Gleichung 12 explizit angeben lässt.

Bei über- oder unterströmten Wehrverschlüssen hängt die Schädigungswahrscheinlichkeit für eine vorgegebene Fischart von den Strömungsverhältnissen (Druckverhältnisse, Wasserspiegellagen, Turbulenzen, ggf. Anwesenheit von Störkörpern, Wasservolumen des Tosbeckens u. a.) am Bauwerk ab, die ebenfalls eine Funktion des aktuellen Betriebszustandes, des Gesamtabflusses und des Unterwasserstandes sind.

Bei unterströmten Verschlüssen kann es je nach Fallhöhe zu Schädigungen absteigender Fische infolge des Druckabfalls beim Durchschwimmen des unteren Durchlasses kommen. Hierzu kann eine quantitative Aussage getroffen werden, indem vorhandene Untersuchungsergebnisse zum Zusammenhang zwischen Abfall des Absolutdruckes und Mortalität (siehe z. B. Pflugrath und Boys 2018 oder Übersicht in Ebel 2016) auf die

prognostizierten Druckverhältnisse im Bereich der Engstelle angewendet werden. Untersuchungen von Pflugrath und Boys (2019) legen allerdings nahe, dass bei geringeren Fallhöhen (hier: <2 m) barotraumatische Schädigungen eine untergeordnete Rolle gegenüber Schädigungen durch Scherung und Turbulenz im Tosbecken spielen.

Für den Fall überströmter Wehre wird ein konkreter Modellansatz in Abschnitt A 3.2 vorgestellt.

A 2.2.2 Wahl des Wanderweges

Der zweite Term in Gleichung 11 beinhaltet die Wahrscheinlichkeit, dass der Fisch über ein bestimmtes Bauwerk absteigt. Ebenso wie bei der Schädigung (Term 1) können Abhängigkeiten vom aktuellen Monat ausgeschlossen werden. Analog zu Schmitt-Heiderich et al. (2013) wird zunächst von einer abflussproportionalen Aufteilung der Fischmengen auf die einzelnen Bauwerke ausgegangen. Diese vereinfachende Annahme ist aufgrund des derzeitigen Mangels an wissenschaftlichen Erkenntnissen über die Korridornutzung absteigender Fische unumgänglich (siehe Anmerkungen in Schmalz et al. 2015).

Im hier vorgestellten Verfahren wird die angenommene Abflussproportionalität der Abstiegswege allerdings nur auf den ersten Abstiegsversuch der Fische bezogen. Dieser Abstiegsversuch kann infolge von Behinderungen durch Rechen oder unzureichende Korridorhöhen misslingen und ggf. auf einen anderen Korridor gerichtet werden.

Hinsichtlich möglicher Behinderungen werden hierbei folgende Annahmen getroffen:

- Eine Passage findet bei Horizontal- bzw. Vertikalrechen nur statt, wenn der lichte Abstand zwischen den Stäben größer als die Fischhöhe bzw. -breite ist (siehe Bild 5).
- Die Bereitschaft zur Passage innerhalb der Vertreter einer Kohorte schwankt bei der Durchquerung horizontaler Durchlässe, die sich aus Fischperspektive bei überströmten Überfallwehren oder unter geöffneten Verschlüssen bilden. Zur Quantifizierung wird die Variable $F_{pv}(h/H_{Fisch})$ eingeführt. Dies ist der Anteil der Fische mit Höhe H_{Fisch} (siehe Bild 5), die bereit sind, einen Durchlass mit Höhe h zu durchqueren, an der Gesamtmenge der abstiegswilligen Fische der Kohorte. Aufgrund von Vermeidungsreaktionen infolge plötzlicher Strömungsbeschleunigungen im Nahbereich von Engstellen ist davon auszugehen, dass auch bei Durchlässen, deren Höhe die Fischhöhe übersteigt, ein Teil der Fische die Passage vermeidet. Die für die aktuelle Praxis empfohlenen Ansätze für F_{pv} werden in Abschnitt 3.3 erläutert.

Basierend auf der o.g. Berücksichtigung von Abstiegsbehinderungen lässt sich eine Matrix M_{ij} angeben, die die Abweichung der Korridorwahl infolge von Versperrungen und Bypässen von der abflussproportionalen Aufteilung beschreibt. Für die Wahrscheinlichkeit der Passage eines bestimmten Bauwerkes ergibt sich somit:

$$P\left(\omega_{Bau,i} | \omega_{uw} \cap \omega_{be} \cap \omega_Q \cap Fw\right) = \sum_{j=1}^{n} \frac{q_j(\omega_{uw},\omega_{be},\omega_Q)}{Q_{ges}(\omega_{uw},\omega_Q)} \cdot M_{ij}\left(\omega_{uw}, \omega_{be}, \omega_Q\right) \tag{13}$$

Hierbei ist n die Anzahl der Bauwerke und qj der lokale Abfluss an Bauwerk j in Abhängigkeit vom aktuellen Unterwasserstand, Abfluss und Betriebszustand. Sollte der Fischabstieg durch keinerlei Hindernisse und Umleitungen beeinträchtigt sein, ist $M_{ij} = 1$ für $i = j$ und $M_{ij} = 0$ für $i \neq j$.

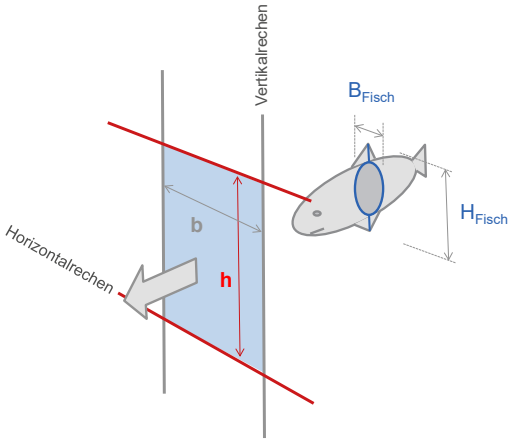


Bild 5: Fisch- und Korridorabmessungen

A 2.2.3 Unterwasser-Abfluss-Beziehung

Für die meisten Standorte kann vereinfachend von einer funktionalen Beziehung zwischen Unterwasserstand und Abfluss ausgegangen werden und es liegt eine klare Unterwasser-Abfluss-Kurve (Schlüsselkurve) vor. In diesem Fall kann der Unterwasserstand als unabhängige Größe im statistischen Modell eliminiert und sämtliche diesbezügliche Abhängigkeiten können auf Q zurückgeführt werden.

An einigen Stauanlagen der WSV sind Unterwasserstand und Abfluss aufgrund hydrologischer oder betrieblicher Gegebenheiten jedoch entkoppelt und es ist die gemeinsame Wahrscheinlichkeitsverteilung von Abfluss und Unterwasserstand zu berücksichtigen. Aus dieser lässt sich wiederum die benötigte bedingte Wahrscheinlichkeit der Unterwasserstände bei vorgegebenen Abflüssen berechnen. Es kann davon ausgegangen werden, dass diese Beziehung unabhängig vom Betriebszustand, der Wanderaktivität und dem aktuellen Monat ist:

$$P\left(\omega_{uw}|\omega_{be} \cap \omega_{Fw} \cap \omega_Q \cap \omega_m\right) \approx P\left(\omega_{uw}|\omega_Q\right) \tag{14}$$

Im Regelfall liegen die Ergebnisse langjähriger simultaner Aufzeichnungen von Abfluss und Unterwasserstand im Unterwasser der Stauanlage vor, aus denen die o.g. Verteilung direkt berechnet werden kann.

A 2.2.4 Berücksichtigung verschiedener Betriebszustände

Die Wahrscheinlichkeit eines bestimmten Betriebszustandes (Normalbetrieb, Revisionsbetrieb, Sonderbetrieb) ist in der Regel eine rein technische Variable, die von der Organisation des Kraftwerksbetriebes abhängt. Sofern langfristige Revisionen von Kraftwerksturbinen nicht ausschließlich bei bestimmten Abflusszuständen oder stets im gleichen Zeitraum des Jahres vorgenommen werden, sollte das Auftreten der verschiedenen Betriebszustände als statistisch unabhängig von den sonstigen Variablen betrachtet werden, so dass gilt:

$$P\left(\omega_{be}|\omega_{Fw} \cap \omega_Q \cap \omega_m\right) \approx P(\omega_{be}) \tag{15}$$

Dieser Ausdruck ist gleichzusetzen mit dem Zeitanteil, während dem der entsprechende Betriebszustand üblicherweise vorliegt. Einen besonderen Fall stellt der aalschonende Betrieb dar. Hier ist der Betriebszustand ω_{be} = "Aalschonender Betrieb" an die Wanderaktivität gekoppelt und die Wahrscheinlichkeit $P(\omega_{be}|Fw)$ ist ein Maß für die Zuverlässigkeit, mit der ein Aalwandereignis detektiert und der Anlagenbetrieb entsprechend umgestellt wird.

A 2.2.5 Wanderaktivität

Term 5 der Gleichung 11 beinhaltet die Wahrscheinlichkeit, dass der Fisch während eines vorgegebenen Monats und eines vorgegebenen Abflusszustandes wandert. Vereinfachend wird hier ein multiplikativer Ansatz verwendet, in dem die vom Abfluss bzw. vom Monat abhängigen Funktionen A und B vorgegeben werden:

$$P(Fw|\omega_Q \cap \omega_m) = A(\omega_Q) \cdot B(\omega_m) \tag{16}$$

Im Regelfall ist es ausreichend, die Werte für die beiden Faktoren A und B in Abhängigkeit vom aktuellen Abfluss bzw. Monat auf 1 (Fisch wandert) bzw. 0 (Fisch wandert nicht) zu setzen. Konkrete Ansätze hierfür werden im ersten Abschnitt der Anlage 3 angegeben.

Term 8 von Gleichung 11 enthält die Gesamtwahrscheinlichkeit P(Fw) des Fischwanderns, die sich aus Gleichung 16 und den monatlichen Abflussstatistiken (siehe A 2.2.6) ergibt.

Im besonderen Fall des Aales kann es zu einer Initiierung der Wanderung durch Niederschlagsereignisse und darauffolgende Abflussanstiege kommen. Sofern standortspezifische Beobachtungen vorliegen, können Aalwanderereignisse daher als Funktion des Abflussanstieges innerhalb bestimmter Zeitfenster prognostiziert werden (Sonny und Beguin 2020). Sofern dieser Zusammenhang bei der Betrachtung berücksichtigt werden soll und entsprechende Angaben vorliegen, ist die abflussabhängige Funktion A durch Einbeziehung der gekoppelten Wahrscheinlichkeitsverteilung von Abfluss Q und Abflussanstieg dQ/dt zu ermitteln.

A 2.2.6 Jahreszeitliche Abflussstatistik

Der Term $P(\omega_Q|\omega_m)$ beinhaltet die nach Monaten getrennten Abflussstatistiken und lässt sich aus langjährigen Abflusszeitreihen berechnen. In staugeregelten Fließgewässer sind diese Zeitreihen am Standort nicht immer vorhanden, daher können diese Zeitreihen dann aus benachbarten Abflussmessstellen auf den Standort übertragen werden unter Beachtung der hydrologischen und wasserwirtschaftlichen Randbedingungen. Je nach Qualität der Daten kann es sinnvoll sein, die entsprechenden Verteilungen mit Hilfe parametrisierter statistischer Verteilungen anzunähern (siehe z. B. Schmitt-Heiderich et al. 2013). Die Sensitivität der Fischabstiegssituation auf Abflussschwankungen kann gegebenenfalls durch Variation der Abflussdaten und Unterscheidung in abflussarme und abflussreiche Jahre erfolgen.

A 2.2.7 Aktueller Monat

Wie zu Beginn von Abschnitt 2.2.1 geschildert wurde, wird das Abstiegsexperiment zu einem zufällig gewählten Zeitpunkt durchgeführt. Die Wahrscheinlichkeit, dass der aktuelle Monat gerade dem Monat „X“ entspricht, ist demnach $P(\omega_m = X) \approx 1/12$.

A 2.2.8 Bedingte Abflussstatistik und hintereinanderliegende Stauanlagen

Das Produkt der Terme 5 bis 8 der Gleichung 11 lässt sich auch schreiben als:

$$\frac{P(Fw|\omega_Q \cap \omega_m) \cdot P(\omega_Q|\omega_m) \cdot P(\omega_m)}{P(Fw)} = \frac{P(Fw \cap \omega_Q \cap \omega_m)}{P(Fw)} = P(\omega_Q \cap \omega_m|Fw) \tag{17}$$

Dieser Zusammenhang entspricht der Bayesschen Formel (Gleichung 7).

Die rechte Seite der Gleichung 17 stellt eine bedingte Monats-Abfluss-Statistik dar, die durch Summierung in eine monatsunabhängige bedingte Abflussstatistik umgewandelt werden kann:

$$P(\omega_Q|Fw) = \sum_{\omega_m \in \Omega_m} P(\omega_Q \cap \omega_m|Fw) \tag{18}$$

Dieser Ausdruck beinhaltet die von den Fischen beim versuchten Abstieg „beobachtete“ Abflussstatistik unabhängig vom aktuellen Monat.

Die in Gleichung 18 enthaltene Umformung erlaubt eine einfache Übertragung des Verfahrens auf den Fischabstieg hintereinanderliegender Stauanlagen. In diesem Fall ist das bedingende Ereignis nicht die biologisch vorgegebene Wanderaktivität Fw des Fisches, sondern der erfolgreiche schadensfreie Abstieg $\omega_s = u$ (siehe Tabelle 5) über die oberstrom gelegene Staustufe. Für die Betrachtung hintereinanderliegender Anlagen ist also die Größe

$$P(\omega_Q \cap \omega_m | u) = \frac{P(\omega_Q \cap \omega_m \cap u)}{P(u)} \tag{19}$$

für jede der einzelnen Anlagen zu berechnen und der folgenden Stauanlage anstelle der Terme 5 bis 8 als Eingabeparameter zu übergeben. Bei diesem vereinfachten Verfahren werden keine sonstigen Mortalitäten berücksichtigt, die bei der Passage der Strecke zwischen zwei Staustufen auftreten.

Anlage 3: Biologische Eingangsgrößen

A 3.1 Auftreten von Wanderereignissen

Bei der (Laich-) Wanderung von Fischarten kann von einer ausgeprägten Saisonalität ausgegangen werden. Im Frühjahr beginnt in der Regel eine Aufwanderung adulter Fische mit dem Ziel, geeignete Reproduktionshabitate aufzusuchen, gefolgt von einer Abwanderung in entsprechende Nahrungshabitate. Anschließend beginnt eine Drift der Jungfische von den Laichhabitaten stromabwärts. Auch die herbstliche Abwanderung von Blankaalen steht im Zusammenhang mit der Reproduktion, die im Meer stattfindet. Demgegenüber steht die Abwanderung juveniler Salmoniden (Lachs- oder Meerforellensmolts) bzw. juveniler Maifische, die zur Nahrungsaufnahme ins Meer abwandern.

In der Regel setzt eine Wanderung bei den Fischen eine entsprechende Bereitschaft voraus, die auf einer inneren (Jahres-) Rhythmik basiert, die z. B. durch eine Hormonausschüttung bewirkt wird. Das individuelle Wanderverhalten wird dann, die innere Bereitschaft vorausgesetzt, durch äußere Taktgeber (z. B. Änderung von Temperatur oder Abflussänderungen) ausgelöst. Da dieses Zusammenspiel auf Art- und Individuenebene äußerst komplex ist, kann eine zuverlässige Vorhersage oder enge zeitliche Eingrenzung von Wandereignissen in der Regel nicht durchgeführt werden. Daher werden im Verfahren Zeiträume, in denen die Abwanderung von Fischarten grundsätzlich zu erwarten ist, hinterlegt. Diese Festlegung beruht zunächst auf den Angaben in Ebel (2016) zu den Wanderzeiträumen ausgewählter Fischarten. Wenn für den jeweils zu betrachtenden Standort und zu einzelnen Fischarten weitergehende Informationen zu Wanderzeiträumen vorliegen, so können diese entsprechend berücksichtigt werden.

$$B(\omega_m) = \begin{matrix} 1 & falls\ \omega_m = Wandermonat \\ 0 & sonst \end{matrix}$$

Darüber hinaus wird für diadrome Arten als obligate Wanderer im biologisch festgelegten Wanderzeitraum angenommen, dass diese eine Wanderung grundsätzlich über das gesamte Abflussspektrum vollziehen können. Bei potamodromen Arten wird dieser Zeitraum auf Abflüsse zwischen Q30 und Q330 eingegrenzt, wobei man sich an der Vorgehensweise für die Bemessung von Fischaufstiegsanlagen orientiert.

$$A(\omega_Q) = 1$$ für alle Q bei diadromen Arten

$$A(\omega_Q) = \begin{matrix} 1 & falls\ Q_{30} < Q \leq Q_{330} \\ 0 & falls\ Q \leq\ Q_{30}\ oder\ Q > Q_{330} \end{matrix}$$ bei potamodromen Arten

A 3.2 Schädigungsmechanismen an überströmten Wehren

Beim Abstieg an überströmten Wehren ist das Szenario einer Kollision der Fische mit der Sohle oder Einbauten und daraus folgenden Schädigungen in Betracht zu ziehen. Dies gilt insbesondere für den Aufprall auf den häufig kaum eingestauten Ablagetisch von Schlauchwehren. In den USA wird empfohlen, auch bei vergleichsweise niedrigen Fallhöhen (< 5 m) ein Unterwasserpolster von einem Viertel der Fallhöhe h_F (siehe Definition in Bild 6) vorzuhalten (Castro-Santos 2021, Odeh und Orvis 1998), wobei zusätzlich eine Mindestwassertiefe von 1.20 m (Castro-Santos 2021) bzw. 0.90 m (Odeh und Orvis 1998) gewährleistet sein sollte. An letzterer Empfehlung orientiert sich auch die DWA (2005), die ebenfalls eine Wassertiefe von $h_{UW} - h_{Sohle} = \max(¼\ h_F, 0.9\ m)$ fordert.

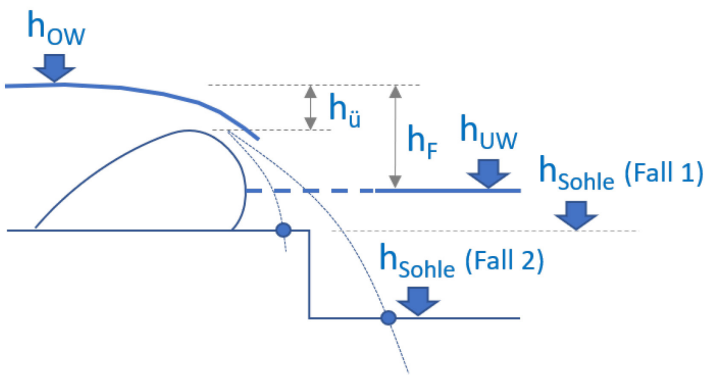


Bild 6: Abstieg über Schlauchwehre, Definition der Wasserspiegel und der maßgeblichen Sohlhöhe, die je nach Strahlgeometrie (Fall 1 bzw. Fall 2) anzusetzen ist

Der aktuell gewählte Ansatz beruht auf der Empfehlung aus DWA (2005), wobei davon ausgegangen wird, dass die Schädigungswahrscheinlichkeit zwischen den Unterwasserpolsterdicken von 90 cm und 60 cm einen linearen Anstieg von 0 auf 1 aufweist (siehe Bild 7). Bei Fallhöhen h_F > 3.6 m werden die beiden Stützwerte entsprechend auf ¼ h_F bzw. 1/6 h_F erhöht. Im Falle von Schlauchwehren wird die Sohlhöhe in Abhängigkeit von der zu erwartenden Trajektorie des Fisches festgelegt (siehe Bild 6). Hierbei wird davon ausgegangen, dass der Fisch das Schlauchwehr eingebettet in den Überfallstrahl passiert. In Fall 1 bewegt sich der Fisch auf den Ablagetisch zu, dessen Oberkante dann maßgeblich ist, während der Fisch in Fall 2 bis ins Tosbecken fällt und die dortige Sohlhöhe anzusetzen ist.

Unter realen Bedingungen variiert die Mortalität in Abhängigkeit von Größe und Empfindlichkeit der betroffenen Fischart. So sind nach Hinweisen in der Literatur juvenile Exemplare anadromer Arten (Lachs, Maifisch) aufgrund veränderter Physiologie (Smoltifizierung) empfindlicher als gleich große Individuen potamodromer Fischarten (beispielsweise durch erhöhte Schuppenverluste). Da jedoch dazu kaum Daten vorliegen erfolgt mit dem gewählten Ansatz keine artspezifische Differenzierung bei der Berechnung der Schädigungsraten. Der gewählte Ansatz lautet somit:

$$P(s|\omega_{Bau} \cap \omega_{UW} \cap \omega_Q \cap \omega_{Be} \cap Fw) = 1 \quad für\ (h_{UW} - h_{Sohle}) \leq max(^1/_6\, h_F, 0.6\, m),$$

$$P(s|\omega_{Bau} \cap \omega_{UW} \cap \omega_Q \cap \omega_{Be} \cap Fw) = 0 \quad für\ (h_{UW} - h_{Sohle}) > max(^1/_4\, h_{OW}, 0.9\, m),$$

$$P(s|\omega_{Bau} \cap \omega_{UW} \cap \omega_Q \cap \omega_{Be} \cap Fw) = 3 \cdot \left(1 - \frac{h_{UW} - h_{Sohle}}{max(1/4 h_F, 0.9\, m)}\right)$$

$$für\ max\ (^1/_6\, h_F, 0.6\, m) < (h_{UW} - h_{Sohle}) \leq max(^1/_4\, h_{OW}, 0.9\, m)$$

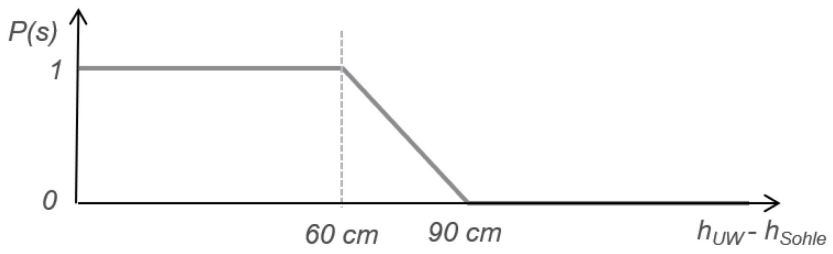


Bild 7: Schädigungswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit vom Unterwasserpolster bei Fallhöhen < 3.6 m

Für Fallhöhen von weniger als 3.6 Meter Höhe wird somit generell der in Bild 7 angegebene Verlauf der Schädigungswahrscheinlichkeit angesetzt.

Für Wehranlagen im Bereich der Bundeswasserstraßen kann der o.g. Ansatz unabhängig vom Betrag der Fallhöhe angewendet werden. Eine Zusammenstellung von Versuchsdaten in Bell (1990) legt nahe, dass erst ab einer Aufprallgeschwindigkeit von ca. 19 m/s mit der Schädigung von Fischen zu rechnen ist. Laut DWA (2005) liegt dieser Schwellwert bei 16 m/s. Da diese Geschwindigkeit erst bei einer Fallhöhe von 13 m erreicht wird, muss dieses Szenario für den Regelfall an Bundeswasserstraßen nicht berücksichtigt werden.

A 3.3. Abstiegsbehinderung

Fischen steht ein nicht beaufschlagtes Wehr als Abstiegskorridor naturgemäß nicht zur Verfügung. Auch im Falle geringer Wehrabflüsse oder großer Wehrbreiten kann die Höhe des durchschwimmbaren Wasserkorridors über der Überfallkante oder unterhalb des gezogenen Schützes zu gering ausfallen, sodass die Fische vor einem Abstieg scheuen und ins Oberwasser umkehren. In diesem Fall kann für obligat abwandernde Fischarten (diadrome Arten) eine Behinderung bzw. Verzögerung der Abwanderung eintreten. Liegen viele Hindernisse auf dem Wanderweg ins Meer, so kann durch die kumulative Verzögerung an einer Kette von Stauanlagen das für die Fische physiologisch günstige Zeitfenster für den Wechsel vom Süßwasser ins Salzwasser verpasst werden. Obwohl nur vergleichsweise wenige Erkenntnisse dazu vorliegen, kann davon ausgegangen werden, dass bei größerer Überfallhöhe und sich sukzessive beschleunigenden Strömungsgeschwindigkeiten Fische motivierter sind, über das Wehr abzusteigen (Ebel 2016, Pflugrath et al. 2019).

Es wird davon ausgegangen, dass Fische ab einer Überfallhöhe von $h_Ü = H_{Fisch}$ (siehe Definition in Bild 6) beginnen, über die Wehrkrone abzusteigen (Bild 8). Mit zunehmender Überfallhöhe steigen anteilig mehr Fische ab. Spätestens ab drei Fischhöhen, so die im Verfahren hinterlegte Annahme, tritt keine Behinderung mehr auf, sodass 100 % der am Wehr eintreffenden abstiegswilligen Individuen ohne nennenswerte Verzögerung über diesen Abstiegskorridor ins Unterwasser gelangen können. Für die in Abschnitt A 2.2.2 definierte Größe F_{pv} wird also angesetzt:

$$F_{pv}\left(\frac{h}{H_{Fisch}}\right) = 0.5 \cdot \left(\frac{h}{H_{Fisch}} - 1\right) \quad für \quad \frac{1}{3}h \leq H_{Fisch} \leq h$$

$$F_{pv}\left(\frac{h}{H_{Fisch}}\right) = 0 \quad für \quad H_{Fisch} > h$$

$$F_{pv}\left(\frac{h}{H_{Fisch}}\right) = 1 \quad für \quad \frac{1}{3}h > H_{Fisch}$$

Hierbei ist h die Höhe des durchschwimmbaren Durchlasses. Bei unterströmten Wehren entspricht h der lichten Öffnungsweite unter dem gezogenen Verschluss. Im Fall überströmter Wehre wird h pauschal mit der Überfallhöhe $h_ü$ im Sinne von Bild 6 gleichgesetzt.

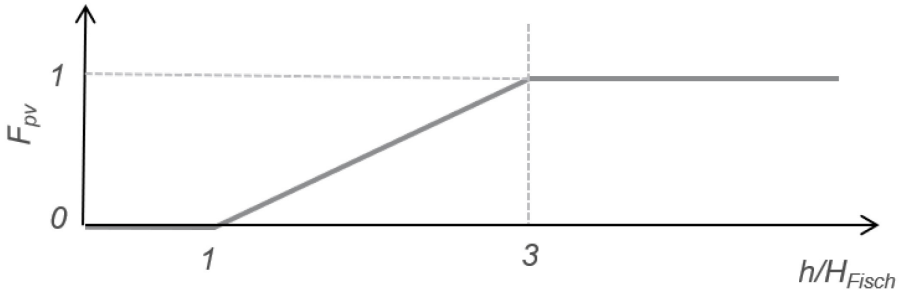


Bild 8: Anteil der Fische, die ein über- bzw. unterströmtes Wehr passieren, an der gesamten Fischmenge in Abhängigkeit von der Höhe h des durchschwimmbaren Korridors und der Fischhöhe

Sofern mit einer Beeinträchtigung des Abstieges an einem Bauwerk zu rechnen ist, weichen die Fische ggf. auf einen oder mehrere Alternativkorridore aus. Im Fall eines funktionsfähigen Rechen-Bypass-Systems kann angenommen werden, dass bis zu 100 % der vom Rechen an der Kraftwerkspassage gehinderten Fische auf den Bypass gelenkt werden. Im Fall einer mehrfeldrigen Wehranlage, bei der der Abstieg über ein Wehrfeld eingeschränkt ist, kann näherungsweise von einer abflussproportionalen Aufteilung der abgewiesenen Fische auf die restlichen Wehrfelder ausgegangen werden.