

HANDREICHUNG

Fischschutz und Fischabstieg an Wasserkraftanlagen

 Fachliche Grundlagen



Baden-Württemberg



HANDREICHUNG

Fischschutz und Fischabstieg an Wasserkraftanlagen

 Fachliche Grundlagen



Baden-Württemberg

HERAUSGEBER

LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg
76231 Karlsruhe, Postfach 100163, www.lubw.baden-wuerttemberg.de

BEARBEITUNG

AG Fischschutz und Fischabstieg
Herr Dehus - Ministerium für Ländlichen Raum und Verbraucherschutz BW
Herr Stelzer - Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft BW
Herr Hartmann, Herr Kappus - Regierungspräsidium Karlsruhe
Herr Hoffmann - Regierungspräsidium Stuttgart
Frau Fleckenstein, Herr Klopfer - Regierungspräsidium Tübingen
Frau Aßmann, Frau Ackermann, Herr Groteklaes, Herr Bartl - Regierungspräsidium Freiburg
Frau Gritsch - Landratsamt Waldshut
Frau Gross - Landratsamt Enzkreis
Frau Schmitz, Frau Weiss - Landratsamt Rastatt
Herr Schneider - Landratsamt Ortenaukreis
Herr Löffler, Herr Karolus - Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz BW

STAND

September 2016

Nachdruck, auch auszugsweise, nur mit Zustimmung des Herausgebers unter Quellenangabe und Überlassung von Belegexemplaren gestattet.



| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | EINFÜHRUNG | 6 |
| <hr/> | | |
| 2 | FISCHÖKOLOGISCHE UND FISCHEREIBIOLOGISCHE GRUNDLAGEN | 7 |
| 2.1 | Fischschutz | 7 |
| 2.2 | Bedeutung der Fischwanderung und Lebensraumvernetzung | 7 |
| 2.3 | Gefährdung und Schädigung von Fischen beim Fischabstieg | 9 |
| <hr/> | | |
| 3 | FACHLICHE ANFORDERUNGEN UND ZIELARTEN | 10 |
| 3.1 | Fischökologische Anforderungen | 10 |
| 3.2 | Anwendung in Abhängigkeit von der Größe der Wasserkraftanlage | 12 |
| <hr/> | | |
| 4 | FISCHSCHUTZ- UND FISCHABSTIEGSANLAGEN | 14 |
| 4.1 | Aufbau und Funktion | 14 |
| 4.2 | Fischschutzanlage und Leitsystem | 19 |
| 4.3 | Einlaufbauwerk | 22 |
| 4.4 | Bypass | 25 |
| 4.5 | Unterwasserbereich | 26 |
| <hr/> | | |
| 5 | UMSETZUNG AN NEUANLAGEN UND BESTEHENDEN WASSERKRAFTANLAGEN | 27 |
| <hr/> | | |
| 6 | GLOSSAR | 29 |
| <hr/> | | |
| 7 | QUELLEN UND ABBILDUNGEN | 30 |
| <hr/> | | |

1 Einführung

Die Entwicklung von Anlagenteilen zum Fischschutz und zum Fischabstieg an Wasserkraftanlagen ist vergleichsweise jung. Vor etwa 15 Jahren wurden in Baden-Württemberg erste Schutzanlagen nach neuen Erkenntnissen errichtet und seitdem anhand der im Praxisbetrieb gewonnenen Erfahrungen kontinuierlich weiterentwickelt. Die Handreichung stellt daher beim Fischschutz und Fischabstieg in Baden-Württemberg den aktuellen Stand des Wissens dar, welcher sich in der Praxis bewährt hat. Die im Zuge der Realisierung von über 100 Fischschutz- und Fischabstiegsanlagen gesammelten Erkenntnisse wurden ergänzt durch die Ergebnisse des 1. Zyklus des Forums Fischschutz und Fischabstieg (2012 - 2014) [Umweltbundesamt 2014] sowie durch einen länderübergreifenden Erfahrungsaustausch und weitere Fachveranstaltungen.

Um eine Kooperation auch von Seiten der Anlagenbetreiber zu ermöglichen, war es zwingend erforderlich, neben den angestrebten ökologischen Zielen auch betriebliche Aspekte zu beachten. Die inzwischen erarbeiteten Bauteile von Fischschutz- und Fischabstiegsanlagen werden daher so in die Anlagen integriert, dass auch betriebliche Vorteile entstehen. Die Erfahrungen zeigen, dass durch die Weiterentwicklung der Rechenanlagen – auch bei den geforderten engen Stababständen – ein reibungsloser, zumeist sogar verbesserter Betrieb der Wasserkraftanlage mit weniger Stillstandstagen im Jahr und damit gesteigerter Energieproduktion erfolgen kann. Das Verklemmen von Treibgut im Rechen wird reduziert. Die hydraulisch optimierten Stäbe der Rechen reduzieren die Einlaufverluste. Die Leitwirkung der Rechenanlagen mit den Leitbauwerken wirkt sich auch positiv auf die Weiterführung des Treibgutes und beim Spülen auf den Abtransport des Sediments aus. Somit können einerseits gewässerökologischer Vorteile erzielt und andererseits auf Betreiberseite auch Kosten für die Entsorgung des Treibguts eingespart werden.

Der vorgestellte modulare Aufbau einer Fischschutz- und Fischabstiegsanlage (FSA) eignet sich aufgrund der Variabilität gut zur Anpassung an die lokalen Gegebenheiten von Bestandsanlagen. Es ist davon auszugehen, dass weitere wissenschaftliche Erkenntnisse, die sowohl durch ethohydraulische Laboruntersuchungen als auch durch Freilandstudien gewonnen werden, zu einer Verbesserung der einzelnen Module führen. Im Forum Fischschutz und Fischabstieg wurde festgestellt, dass die Sammlung weiterer praktischer Erfahrungen beim Bau und Betrieb von Fischschutz- und Fischabstiegsanlagen von zentraler Bedeutung für deren Weiterentwicklung ist. Der Wissenstand ist insbesondere bei größeren Wasserkraftanlagen noch begrenzt und sollte durch Pilotvorhaben an solchen Standorten verbessert werden.

2 Fischökologische und fischereibiologische Grundlagen

2.1 FISCHSCHUTZ

Die Erhaltung und Entwicklung von Fischlebensgemeinschaften in guten Zuständen ist eine wesentliche Anforderung des Fischereirechts, aber auch des Naturschutzrechts und des Wasserrechts. Insbesondere das Fischereigesetz verpflichtet konkret, einen der jeweiligen Größe und Beschaffenheit des Gewässers entsprechenden Fischbestand zu erhalten. Die aktuelle Rote Liste (Baer et al. 2014) zeigt, dass Baden-Württembergs Fische und Neunaugen in sehr starkem Maße in ihren Beständen gefährdet sind.

Aus der Gefährdungsanalyse lassen sich in der Regel mehrere Ursachen dafür ableiten, dass landesweit oder in einzelnen Gewässersystemen die Häufigkeit oder die Verbreitung vieler Arten nach wie vor ungünstig ist oder sogar noch zurückgeht. Neben der Herstellung der Durchgängigkeit ist insbesondere die Verbesserung der Lebensraumfunktionen (Hydromorphologie) erforderlich. Dementsprechend müssen auch Schutzkonzepte zur Erhaltung und Entwicklung der Fischbestände mehrere Gefährdungsursachen berücksichtigen.

Die Rote Liste betont auch, dass, u.a. aufgrund des Übereinkommens der Vereinten Nationen über die biologische Vielfalt (Convention on Biological Diversity, Rio de Janeiro 1992), nicht nur einzelne Arten zu schützen sind, sondern auch die genetische Vielfalt innerhalb einer Art zu erhalten ist. Aufgrund der vielfältigen Anforderungen an einen wirksamen Fischschutz erstreckt sich das Schutzziel hinsichtlich unserer heimischen Fischfauna sowohl auf die einzelnen Arten einschließlich ihrer genetischen Vielfalt als auch auf die Zusammensetzung, Abundanz und Altersstruktur der Fischlebensgemeinschaften.

2.2 BEDEUTUNG DER FISCHWANDERUNG UND LEBENSRAUMVERNETZUNG

Die Kanalisierung und der Querverbau mit Stauregulierung von Fließgewässern zählen zu den schwerwiegendsten Eingriffen in den Lebensraum unserer heimischen Fische und Neunaugen. Sie bedingen neben dem Verlust von Lebens- und Funktionsräumen auch die Einschränkung oder Verhinderung ihrer Erreichbarkeit.

Nahezu alle Arten müssen im Gewässer Ortsbewegungen durchführen, um ihren Lebenszyklus zu schließen und erforderliche Teilhabitatem zu erreichen. Ortsveränderungen betreffen nicht nur Laichwanderungen und die Rückwanderungen nach der Laichzeit, sondern haben vielfältige Gründe. Hierzu zählt das Aufsuchen von spezifischen Funktionsräumen (Aufwuchshabitat der Brut, Nahrungsplatz, Ruheplatz, Winterlager u.a.). Aufgrund ihrer hohen Mobilität kann die Fischfauna der Fließgewässer auf die ständig wechselnden Umwelteinflüsse, wie etwa auf Temperatur- und Abflussveränderungen in einem gewissen Umfang reagieren.

Hinsichtlich der Länge von Wanderstrecken (nicht hinsichtlich der fischökologischen Bedeutung) werden Gewässerabschnitte mit normalem, erhöhtem und hohem Migrationsbedarf unterschieden. Für das WRRL-Fließgewässernetz ist der Migrationsbedarf in einer Karte dargestellt. Für alle anderen Gewässer wird dieser anhand der natürlichen Fischfauna durch die Fischereiverwaltung bestimmt. In Abschnitten mit normalem Migrationsbedarf sind die Habitatwechsel der meisten Arten der natürlichen Fischfauna überwiegend auf dieselbe Fließgewässerregion beschränkt. Dagegen reichen diese Wechsel in Abschnitten mit erhöhtem oder hohem Migrationsbedarf regelmäßig in benachbarte Fließgewässerregionen hinein oder erstrecken sich über mehrere Regionen hinweg. In der Regel nimmt der Anteil der über mittlere oder lange Distanzen wandernden Fische – und damit auch der Migrationsbedarf – im Gewässerverlauf von der Quelle bis zur Mündung zu. Auch in Gewässerstrecken mit „nur“ normalem Migrationsbedarf können Defizite der ökologischen Durchgängigkeit die Nutzbarkeit von Teillebensräumen so weit einschränken, dass ein guter Zustand der Fischlebensgemeinschaft nicht erreicht wird.

Migrationsbedarf der Fischfauna in Baden-Württemberg

Migrationsbedarf

- normaler Migrationsbedarf
- erhöhter Migrationsbedarf
- hoher Migrationsbedarf
- Lachsgewässer; hoher Migrationsbedarf
- Seeforellengewässer, hoher Migrationsbedarf
- derzeit ohne Migrationsbedarfs-Kategorie
- außerhalb BW gelegen
- Stillgewässer u. Altrheine

Bearbeitungsgebiete

- Grenze BG

Teilbearbeitungsgebiete

- Grenze TBG (mit Gebietsnummer)

Sonstiges

- Grenze Regierungsbezirk

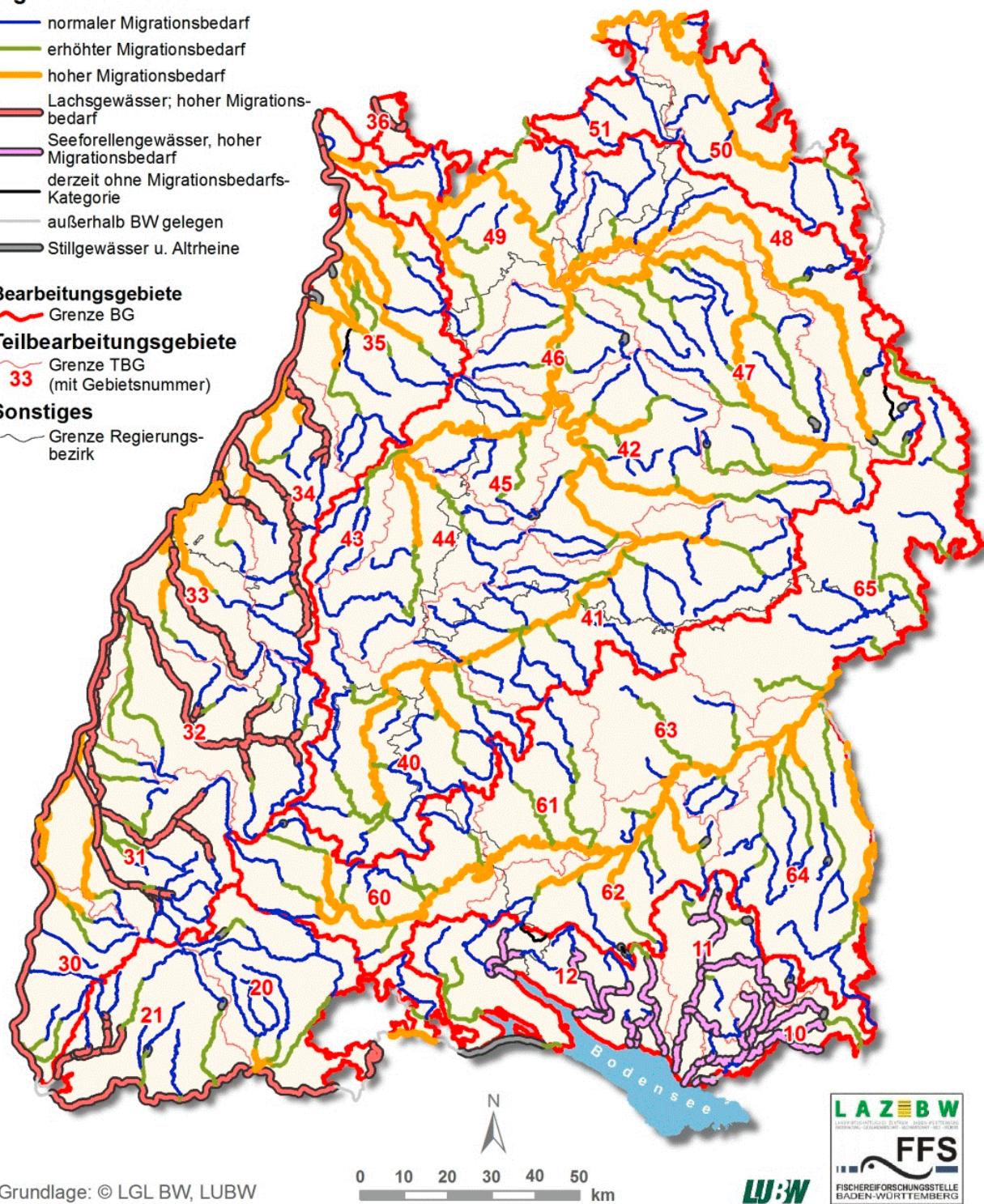


Abb. 2.1: Migrationsbedarf der Fischfauna – WRRL Fließgewässernetz [Bewirtschaftungsplan 2015]

Die Vernetzung von funktionsfähigen Teilhabitaten ist damit eine biologische Grundvoraussetzung für den Erhalt und die Entwicklung naturnaher Fischlebensgemeinschaften. Von Natur aus sind die meisten Fließgewässer sowohl flussaufwärts als auch flussabwärts weitestgehend für Fische frei durchwanderbar. Die gewässerabwärts gerichteten Bewegungen von Fischen erreichen einen ähnlichen Umfang und häufig gleiche Distanzen wie die gewässeraufwärts gerichteten. Die Abwanderungszeiträume überschneiden sich in nahezu allen heimischen Mehrartengesellschaften, so dass, wie beim Fischaufstieg, in unseren Gewässern von ganzjährig stattfindenden Abwärtswanderungen auszugehen ist.

2.3 GEFÄHRDUNG UND SCHÄDIGUNG VON FISCHEN BEIM FISCHABSTIEG

Fische werden bei ihrer Abwanderung im Gewässer sowohl durch Querbauwerke als auch durch Wasserausleitungen und Wasserentnahmen behindert. Diese Behinderungen können nicht nur zu einer Unterbindung notwendiger Ortswechsel führen, sondern auch zur Schädigung und zum Tod von Fischen. Grundsätzlich besteht bei der Abwärtswanderung von Fischen in Gewässern mit Kraftwerksstandorten oder Wasserentnahmeverrichtungen ein hohes Gefährdungspotenzial für die Tiere.

Das Gefährdungspotential ist für die einzelnen Arten aufgrund ihrer Körperform, Lebensweise etc. sehr unterschiedlich. So ist z. B. ein Aal aufgrund seiner langgestreckten Körperform beim Passieren einer Turbine wesentlich gefährdeter als eine kleine Bachforelle. Neben den physischen und verhaltensbiologischen Voraussetzungen der abwandernden Tiere wird das Gefährdungspotenzial jedoch maßgeblich durch die technischen Eigenschaften der jeweiligen Nutzungseinrichtungen bestimmt. Für Turbinen sind dabei vor allem der Laufraddurchmesser, die Anzahl der Laufradschaufeln sowie die Drehzahl bedeutsam [Ebel 2008] [Ebel 2016].

Schädigungen abwandernder Fische treten bereits an einzelnen Kraftwerken auf. Gravierende Auswirkungen auf den Bestand einer Art kann das Zusammenwirken mehrerer Anlagen haben. Dieser kumulative Effekt ist von großer Bedeutung insbesondere in Gewässerabschnitten, in denen Fischwanderungen über längere Strecken stattfinden und die daher als Abschnitte mit einem erhöhten oder hohen Migrationsbedarf ausgewiesen sind. Bei den diadromen Langdistanzwanerfischen (Lachs, Meerforelle, Aal u.a.) kann die kumulative Wirkung dazu führen, dass eine erfolgreiche Abwanderung zum Meer nicht mehr möglich ist.

3 Fachliche Anforderungen und Zielarten

3.1 FISCHÖKOLOGISCHE ANFORDERUNGEN

Aus den biologischen Notwendigkeiten zum Erhalt und zur Entwicklung von Fischlebensgemeinschaften leiten sich die folgenden generellen fachlichen Anforderungen an den Fischschutz und Fischabstieg ab:

- Die abwärts gerichtete Fischwanderung ist aufgrund ihrer gleichrangigen ökologischen Bedeutung mit dem Fischaufstieg ein gleichgestelltes Ziel. Fischaufstieg und Fischabstieg ergeben zusammen die Durchgängigkeit. Nachdem der Fischaufstieg an Querbauwerken vielfach realisiert ist, ist zur Entwicklung eines zusammenhängenden Gewässerlebensraumes grundsätzlich auch die flussabwärts gerichtete Durchgängigkeit zu gewährleisten. Dies gilt qualitativ für sämtliche Arten der natürlichen Fischfauna und quantitativ für eine ausreichende Individuenzahl.
- Der Fischabstieg muss bei Wasserkraft- und Wasserentnahmeanlagen immer mit einem Fischschutz kombiniert sein, um die Funktion der abwärts gerichteten Durchgängigkeit erfüllen zu können. Der Stand der Technik ist anzuwenden.
- Die Priorität der Umsetzung von Maßnahmen zur Gewährleistung von Fischschutz und Fischabstieg orientiert sich an der natürlichen Fischfauna und am Migrationsbedarf im jeweiligen Gewässerbereich. Höchste Umsetzungspriorität haben die Gewässerabschnitte mit hohem Migrationsbedarf. In den Abschnitten mit erhöhtem Migrationsbedarf sind ebenfalls Maßnahmen für den Fischabstieg notwendig. In Gewässern mit normalem Migrationsbedarf sind Umsetzungspriorität und -bedarf von ggf. bestehenden spezifischen Artenschutzanforderungen abhängig.
- Spezifische artenschutzbezogene Anforderungen zur Sicherstellung der abwärts gerichteten Durchgängigkeit an bereits bestehenden Kraftwerken können im Zusammenhang mit dem besonderen Schutzbedürfnis von FFH-Fischarten, von bedrohten oder gefährdeten Fischarten oder bei besonders schützenswerten Fischbeständen vorliegen. An den betroffenen Standorten ist dann auch in Gewässern der oberen Fischregionen, in denen in der Regel ein normaler Wanderbedarf besteht, die Wiederherstellung der abwärts gerichteten Durchgängigkeit erforderlich.
- Bei neuen Wasserentnahmestellen und Wasserkraftanlagen ist eine Fischschutz- und Fischabstiegsanlage nach dem Stand der Technik immer erforderlich.

Auf der generellen fischökologischen und fischereibiologischen Notwendigkeit, die Bestände aller heimischer Fischarten in gesicherten Populationen zu erhalten und zu entwickeln, bauen verschiedene Schutzinstrumente auf. Aus solchen Vorgaben leiten sich für besonders schutzbedürftige Arten spezifische Programme und Maßnahmen ab:

- Im Rahmen des international abgestimmten Wanderfischprogramms der Internationalen Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR) wurden auch in Baden-Württemberg Wiederansiedlungsgewässer für den Atlantischen Lachs definiert. Diese sind gleichzeitig aktuelle oder potenzielle Lebensräume für die Meerforelle.
- Unter der Koordination der Internationalen Bevollmächtigtenkonferenz für die Bodenseefischerei (IBKF) wurden Schutzprogramme für die Seeforelle im Einzugsgebiet des Bodensees entwickelt und Gewässer zu ihrer Erhaltung benannt. Diese wurden von der IKSR in ihr Wanderfischprogramm integriert.

Atlantischer Lachs und Meerforelle haben als anadrome Arten sehr weite Wanderwege. Entsprechend stark ist deren Gefährdung bei der Abwanderung über die mit einer großen Anzahl von Wasserkraftwerken versehenen Gewässer (kumulativer Effekt). Hier ist auch der Schutz der kleineren Individuen im Abwanderungsstadium erforderlich. Diese Tiere haben Körperlängen ab ca. 10 cm und können dann durch Vertikalrechen mit maximal 10 mm lichter Weite oder Horizontalrechen mit maximal 15 mm lichter Weite zuverlässig vor Triebwerken geschützt werden.

Auch abwärts wandernde Seeforellen weisen Körperlängen ab 10 cm auf. Für diese Art gelten wegen ihrer gleichfalls sehr langen Wanderwege bei einem vergleichsweise geringen Reproduktionsareal in Baden-Württemberg und aufgrund der

großen Zahl von Kraftwerken in den Programmgewässern dieselben Anforderungen wie für den Atlantischen Lachs und die Meerforelle.

Der Aal ist eine stark gefährdete katadrome Art, die aufgrund ihres sehr langen Wanderwegs und der großen Zahl von Wasserkraftanlagen sowie ihrer spezifischen Körperproportionen einer besonders starken Gefährdung ausgesetzt ist. In Umsetzung der Verordnung EG Nr. 11/2007 („EU-Aalschutzverordnung“) wurden in Baden-Württemberg Gewässer für das Bestandsmanagement des Aals definiert und an die Europäische Kommission gemeldet. In diesen Gewässerabschnitten gilt ein erhöhter Schutz dieser Art, der auch die Abwanderung betrifft. Um zumindest die größeren abwandernden Tiere ab einer Körperlänge von 50 cm schützen zu können, dürfen an Vertikal- und Horizontalrechen lichte Stabweiten von 15 mm nicht überschritten werden. Mit dieser Stabweite werden jedoch nur die weiblichen Blankaale geschützt, die Körperlängen von meist 50 bis 90 cm aufweisen. Die männlichen Blankaale, die Körperlänge von meist 30 bis 45 cm besitzen, sowie die Gelbaale mit Körperlängen unter 50 cm werden dagegen nicht an dem Eindringen in die Turbinen gehindert. Zum Schutz der männlichen Blankaale und eines großen Teils der Gelbaale ist bei Neuanlagen eine lichte Stabweite von 10 mm erforderlich (siehe Tabelle 2).

Merke

Bei der ökologischen Sanierung vorhandener Wasserkraftanlagen besteht in Programmstrecken für Lachs, Seeforelle und Aal sowie in Gewässerabschnitten mit erhöhtem und hohem Migrationsbedarf höchste Umsetzungspriorität zur Errichtung von Fischschutz- und Fischabstiegsanlagen.

Mit der Fortschreibung der Roten Liste für die Fischfauna in Baden-Württemberg [Baer et al. 2014] musste die potamodrome Fischart Nase eine Gefährdungsstufe höher eingestuft werden; sie wird nun in der Liste als „stark gefährdete Art“ geführt. Die ebenfalls potamodrome Barbe wurde noch in der vorangegangenen Roten Liste in einigen Gewässersystemen als ungefährdet eingestuft. Sie musste nun dort in die Vorwarnliste aufgenommen werden. Landesweit gilt die Barbe als „gefährdete Art“. Auch bei der Äsche hat sich die Situation landesweit verschlechtert, sie ist nun eine in Baden-Württemberg „stark gefährdete Art“. Im Jahr 2012 wurde in Baden-Württemberg das „Artenhilfsprogramm Äsche“ begonnen.

Alle vorgenannten Arten sind in besonderem Maße auf eine abwärts gerichtete Abwanderung im Gewässer angewiesen. Sie stehen damit stellvertretend für zahlreiche weitere Arten im Gewässer. Wenngleich die bestehenden Einschränkungen der abwärts gerichteten Durchgängigkeit an Querbauwerken nicht die einzige Gefährdungsursache für Fischbestände sind, weisen fehlende Abwandermöglichkeiten – insbesondere bei summarischer Wirkung mehrerer Anlagen – einen bedeutenden Anteil am Gesamteinfluss auf. Aus diesem Grund setzen Fischartenschutzprojekte in Baden-Württemberg sowohl an der Wiederherstellung der Durchgängigkeit als auch an der Behebung hydromorphologischer Beeinträchtigungen (d. h. an den Lebensraumdefiziten) an.

Für die meisten anderen Fließgewässerarten besteht aufgrund ihrer überwiegend hohen Ansprüche an den Lebensraum und ihres geringeren Reproduktions- und Rekrutierungspotenzials eine grundsätzlich größere Bestandsgefährdung und damit ein erhöhter Schutzbedarf hinsichtlich der Sicherstellung der Abwanderung und der Vermeidung von Schädigungen im Kraftwerksbereich. Individuen dieser Arten können teilweise bereits als einjährige Tiere, spätestens aber als zweijährige Fische durch 15-mm-Vertikalrechen oder 18-mm-Horizontalrechen vor dem Eindringen in Triebwerke zurückgehalten werden. In der Forellen-, Äschen- und Barbenregion unserer Gewässer weisen die Referenzfischzönosen durchgehend Mitglieder dieser Artengruppe auf. Dort besteht damit ein ökologisch begründeter Bedarf an der Installation von entsprechenden Schutzeinrichtungen in Verbindung mit Abstiegsanlagen.

Bei der Betrachtung des baden-württembergischen Fischartenspektrums fällt auf, dass eine Reihe von Arten auch als adulte Tiere weder durch Schutzrechen von 15 mm noch 10 mm lichter Weite zuverlässig vor dem Einschwimmen in Kraftwerksturbinen zurückgehalten werden können. Bei diesen Arten stößt der Fischschutz derzeit an Grenzen der technischen Machbarkeit. Zu dieser Artengruppe zählen sehr kleinwüchsige Fische, wie Bitterling und Elritze sowie auch Arten mit sehr schlanker Körperform, wie Schmerle, Steinbeißer und die Neunaugenarten im Abwanderstadium (Macrocephalimi).

Merke

Technische Grenzen der Umsetzbarkeit von Maßnahmen bestehen beim Schutz sehr kleiner Individuen (Arten und Jungfische < 10 cm) und schlanker Arten.

3.2 ANWENDUNG IN ABHÄNGIGKEIT VON DER GRÖSSE DER WASSERKRAFTANLAGE

In Baden-Württemberg wird aufbauend auf den vorliegenden Erfahrungen mit Fischschutz- und Fischabstiegsanlagen (FSA) sowie den Ergebnissen des Forums Fischschutz und Fischabstieg [Umweltbundesamt 2014 und 2015] eine Klasseneinteilung der Wasserkraftanlagen mit Bewertung der Umsetzbarkeit vorgenommen. Dabei werden auch die Erfahrungen zu Wasserentnahmen thermischer Kraftwerke in Baden-Württemberg einbezogen.

Die nachfolgende Einteilung in drei Größenklassen, je nach Ausbaudurchfluss der Gesamtanlage, spiegelt die aktuelle Machbarkeit wieder. Sie erleichtert die praktische Umsetzung und zeigt den Handlungs- und Forschungsbedarf auf (Umweltbundesamt – Forum Fischschutz & Fischabstieg, Synthesepapier 2014). Im Forum Fischschutz und Fischabstieg bestand Konsens darüber, dass bei Vertikalrechen (bis ca. 30 m³/s Durchfluss je Rechenfeld) und Horizontalrechen (bis ca. 50 m³/s Durchfluss je Rechenfeld) gegenwärtig ein Stand des Wissens und der Technik besteht, mit dem funktionsfähige, mechanische Fischschutzsysteme einschließlich der erforderlichen Reinigungstechnik für Fische ab 10 cm Größe realisiert werden können [Umweltbundesamt 2015].

Größenklasse I: Anlagen mit einem Ausbaudurchfluss bis 50 m³/s

Kleine Wasserkraftanlagen mit Ausbaugrößen bis zu 50 m³/s sind in Baden-Württemberg am häufigsten. Aus diesem Grund liegen die meisten Erfahrungen und Praxisbeispiele zu Fischschutz- und Fischabstiegsanlagen für Anlagen bis zu dieser Größe vor. Der nachfolgend aufgezeigte Stand des Wissens und der Technik ist an zahlreichen Anlagen dieser Ausbauklasse realisiert. Spezielle Erhebungen zur Funktionsfähigkeit von Fischabstiegsanlagen wurden ebenfalls nahezu ausschließlich an Anlagen bis 50 m³/s durchgeführt. An Anlagen dieser Ausbauklasse werden in Abhängigkeit von der jeweiligen Zielart Rechen mit lichten Stabweiten zwischen 10 und 20 mm betrieben. Anlagen dieser Größenklasse können mit einem Rechenfeld wirtschaftlich und technisch zuverlässig betrieben werden. Hier haben sich moderne Rechentypen und Reinigungsanlagen in der Praxis bewährt.

Fazit

Zur Zeit können Fischschutz- und Fischabstiegsanlagen für Wasserkraftanlagen mit einem Ausbaudurchfluss von bis zu 50 m³/s (Anlagenklasse I) so gebaut werden, dass sie einen hinreichend guten Schutz und eine abwärts gerichtete Durchgängigkeit für die jeweiligen Arten ab einer bestimmten Individuenlänge ermöglichen. Damit ist die praktische Eignung dieser Einrichtungen insgesamt gesichert.

Größenklasse II: Anlagen mit einem Ausbaudurchfluss von 50 bis 150 m³/s

Bei mittelgroßen Anlagen mit Ausbauwassermengen zwischen 50 und 150 m³/s wurden bislang deutlich weniger Schutz- und Abstiegsanlagen als an Kleinanlagen der Klasse I errichtet. Daher sind die Erfahrungen zu dieser Anlagenklasse II geringer. Anlagen dieser Größenklasse werden zumeist mit mehreren Turbinen betrieben. Es besteht die Möglichkeit, mehrere Rechenfelder oder leistungsstärkere Rechenreinigungsanlagen einzusetzen. Mit zunehmender Anlagengröße steigt aufgrund der wachsenden Anforderungen an die Größe, hydrostatische Belastbarkeit und Reinigung des Rechens der Aufwand für die Umsetzung.

Fazit

FSA sind für Anlagen mit Ausbauwassermengen zwischen 50 m³/s und 150 m³/s nach dem vorherrschenden Stand der Technik, zum Beispiel durch einen modularen Aufbau, realisierbar. Die Umsetzung ist jedoch mit einem höheren Aufwand verbunden.

Größenklasse III: Anlagen mit einem Ausbaudurchfluss über 150 m³/s

Für Anlagen mit Ausbauwassermengen über 150 m³/s und insbesondere für die großen Wasserkraftanlagen am Hochrhein und Oberrhein ist bislang kein Stand der Technik definiert. Zuverlässige FSA bei Anlagen dieser Größenordnung sind mit den bekannten und wirksamen Bauteilen nicht oder nur mit einem verhältnismäßig hohen Aufwand umsetzbar. In dieser Anlagenklasse besteht weiterhin ein hoher Forschungs- und Entwicklungsbedarf.

Fazit

FSA sind für bestehende Anlagen in der Anlagenklasse ab 150 m³/s nach dem Stand der Technik nur mit sehr großem Aufwand realisierbar, wobei die Funktionsfähigkeit nicht gesichert ist. Hier ist es von großer Bedeutung, zielgerichtet an der Thematik zu forschen und entsprechende Pilotanlagen zu realisieren. In wasserrechtlichen Entscheidungen zu solchen Anlagen kann es daher zielführend sein, eine entsprechende Nebenbestimmung aufzunehmen, die vorsieht, eine Fischabstiegsanlage nachzurüsten, sobald auch für diese Anlagengröße ein Standard vorliegt.

4 Fischschutz- und Fischabstiegsanlagen

4.1 AUFBAU UND FUNKTION

Auch wenn Fischschutz und Fischabstieg in einigen rechtlichen Grundlagen getrennt voneinander und mit unterschiedlichen Vorgaben, aber derselben Zielrichtung behandelt werden (FischG §§ 39 und 40, WHG §§ 35 und 34), besteht ein enger funktionaler Zusammenhang zwischen beiden Faktoren. Wenn Fische durch eine Schutzeinrichtung vor dem Eindringen in Triebwerke zurückgehalten und gleichzeitig zu einer Abstiegseinrichtung geleitet werden, kann am Anlagenstandort eine hohe Schutzrate erzielt sowie eine abwärts gerichtete Durchgängigkeit zumindest teilweise wieder hergestellt werden.

Die an einem spezifischen Standort erforderliche Funktion der Fischschutz- und Fischabstiegsanlage (FSA) leitet sich von der Art und Größe der Wasserkraftanlage bzw. des Wasserentnahmehauwerks sowie von den fischökologischen und fischereiologischen Zielen ab. Aus den biologischen Anforderungen und den jeweils vorliegenden technischen Rahmenbedingungen ergeben sich unterschiedliche Anlagenkonstellationen für eine FSA.

Eine FSA besteht aus vier Hauptkomponenten, die standortbezogen gestaltet und kombiniert werden. Alle vier Komponenten stehen in einem räumlichen, hydraulischen und funktionalen Zusammenhang:

- Fischschutzanlage und Leitsystem am Kraftwerkszulauf
- Einlaufbauwerk(e) zur Abstiegshilfe (Bypass)
- Bypass in Richtung Unterwasserbereich
- Unterwasserbereich

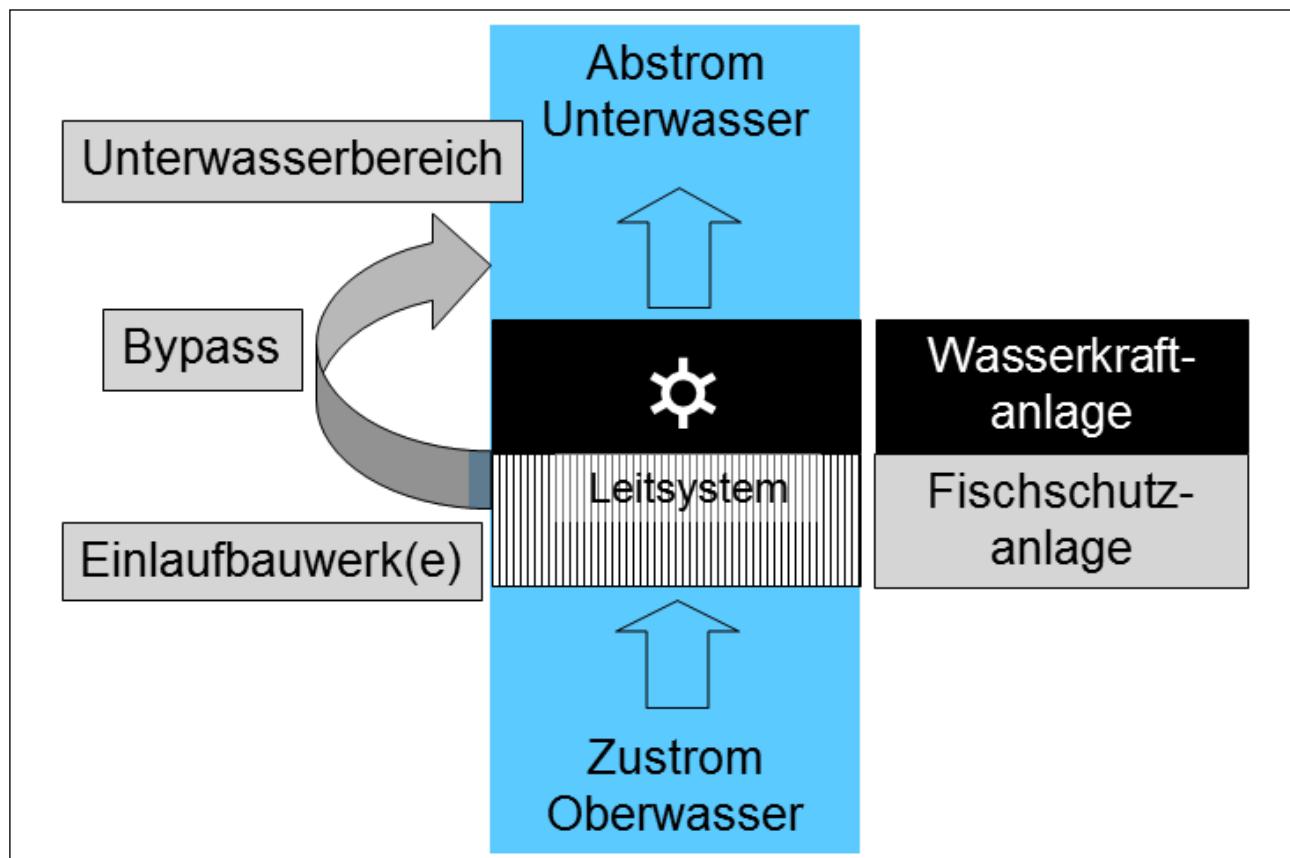


Abb. 4.1: Prinzipskizze zu den Komponenten einer FSA

Der Leitgedanke bei der Gestaltung von Fischschutz- und Fischabstiegsanlagen besteht darin, einen durchgehenden, von Fischen weitgehend verzögerungsfrei nutzbaren Fließkorridor vom Oberwasser ins Unterwasser einzurichten. Hierbei muss beachtet werden, dass Fische oberflächennah und sohlorientiert abwandern.

Grundsätzlich entspricht die Planung einer FSA der Vorgehensweise bei der Planung einer Fischaufstiegshilfe, wie sie im Merkblatt M-509 [DWA 2014] beschrieben wird. Dabei werden die Lage des Einstiegs, der Bautyp mit den geometrischen und hydraulischen Bemessungswerten sowie der Abstiegskorridor modular aufgebaut und aufeinander abgestimmt. Die für die Planung einer FSA notwendigen Eingangsdaten, die Abfolge der Planungsschritte sowie die Zielgrößen und Methoden für die Bemessung der jeweiligen Komponenten sind im Handbuch Rechen- und Bypassysteme [Ebel2016] ausführlich dargestellt. Wie die Fischaufstiegsanlagen weisen auch die FSA aufgrund der örtlich verschiedenen Rahmenbedingungen zwangsläufig unterschiedliche Ausprägungen auf.

In den nachfolgenden Abbildungen werden drei in Baden-Württemberg realisierte Fischschutz- und Fischabstiegsanlagen in Prinzipskizzen dargestellt. Die bisher realisierten FSA variieren im Detail. Die einzelnen Variationen werden bei der Beschreibung der jeweiligen Komponenten (Kapitel 4.2 bis 4.5) dargestellt.

Die Auswahl der einzelnen Komponenten ergibt sich anhand unterschiedlicher Anforderungen. Die Festlegung, z. B. ob ein sohlnaher Abstieg erforderlich ist, wird anhand der Zielfischarten und der Wassertiefe vor dem Rechen getroffen. Bei Wassertiefen größer 2 m geht man davon aus, dass die sohlorientierten Fische auch bei schräg zur Sohle geneigten Vertikalrechen die oberflächennahe Abstiege nicht erreichen. Je nach Gewässergröße und Ausbaugrad der Wasserkraftanlage stehen unterschiedliche Bypass-Betriebsabflüsse zur Verfügung. In Kombination mit den Zielfischarten (Leitwirkung, ausreichende Wassertiefe und Durchlassbreite) ergeben sich die Randbedingungen für die Bypassöffnungen.

Die nachfolgende Skizze stellt eine Fischschutzanlage mit Horizontalstabsrechen und einer seitlich angeordneten Abstiegseinrichtung dar. Der Rechen wird durch eine obere und untere Betonleitwand begrenzt. Neben der Leitwirkung für die Fische wird dadurch erreicht, dass das schwimmende Treibgut sowie das Geschiebe durch das seitliche Spülgeschütz gut abgeführt werden kann und sich damit die Betriebssicherheit der Wasserkraftanlage erhöht. Das oberflächennahe Eintrittsprofil (Oberflächenbypass) muss kontinuierlich dotiert werden. Die Abmessungen ergeben sich aufgrund der Anforderungen der Zielfischarten und des verfügbaren Abflusses.

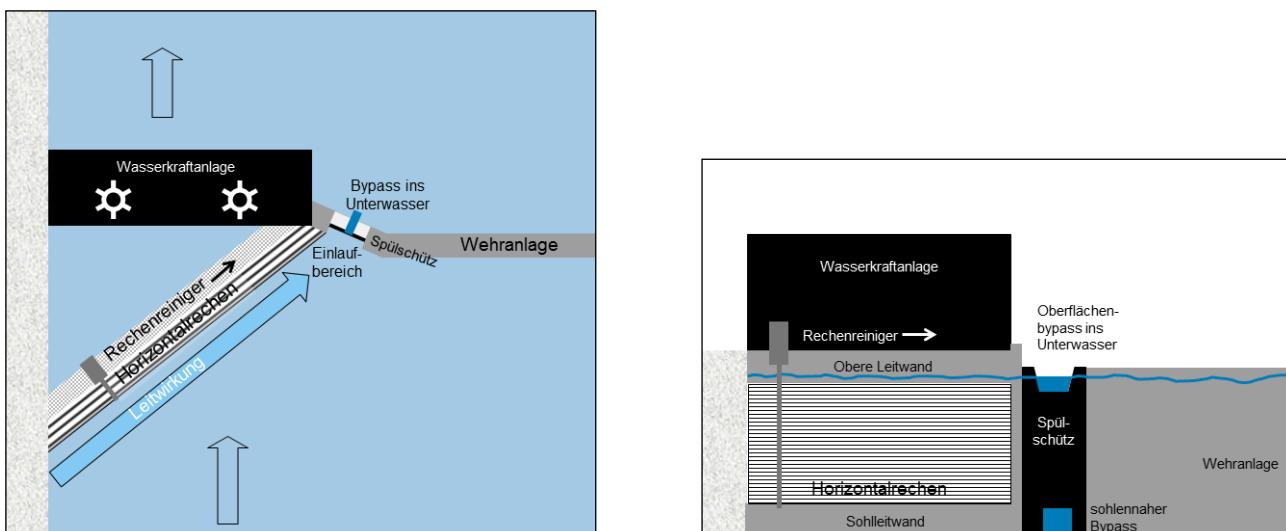


Abb. 4.2: Skizze Horizontalrechen geneigt zum Anströmvektor mit oberflächennahem und sohlnahem Bypass ohne Kontrollbauwerk (links Draufsicht, rechts Ansicht vom Oberwasser)



Abb. 4.3: Horizontalrechensystem mit Oberflächenabstieg an der VKA Katzwerke Murg, Weisenbach

Anhand aktuell vorliegender Untersuchungsergebnisse zur Funktionsfähigkeit von FSA bieten Rechen mit horizontaler Schräganströmung und horizontaler Stabausrichtung in Kombination mit einem von der Sohle bis zum Wasserspiegel vertikal durchgehenden Einlaufsystem, analog zum System Ebel, Gluch & Kehl [Ebel et al. 2015] [Ebel 2016], derzeit die beste Schutz- und Leitwirkung für Fische sowie eine hohe verhaltensbiologische Akzeptanz für ein sehr großes Arten-Spektrum. Sowohl bodenorientiert als auch oberflächennah abwandernde Arten finden den Einstieg in das vertikal durchgehende Bypasssystem. Je großzügiger die schachttartigen Bypässe ausgestaltet sind, desto besser kann die Auffindbarkeit unterstützt werden. Die Steuerung des Bypassdurchflusses erfolgt nicht am Einlaufprofil, sondern an nachgelagerten Kontrollbauwerken. Dieses Abstiegssystem eignet sich insbesondere in Gewässern mit hohem und erhöhtem Migrationsbedarf, in welchen grundsätzlich ein umfangreiches Fischartenspektrum mit vielfältigem Abwanderungsverhalten zu berücksichtigen ist. Im Einlaufprofil zum Bypass sowie im Abstiegsschacht müssen ausreichend hohe Fließgeschwindigkeiten vorliegen, was bei gegebener Dimensionierung einen entsprechend hohen Betriebsabfluss erfordert. Details zur Dimensionierung der Bauteile sind in einer Fachplanung für die jeweiligen Zielarten und -größen individuell zu entwickeln (siehe Kapitel 4.3). Für diese Fachplanung ist der aktuelle Stand des Wissens einzusetzen [DWA 2005] [Umweltbundesamt 2015] [Ebel 2016].

Alternativ kommt häufig ein zur Sohle geneigter Rechen mit vertikaler Stabausrichtung zum Einsatz. Dieser hat sich insbesondere an kleinen Anlagen mit geringer Rechenfeldbreite (< 6 m), bei größeren Anlagen mit geringer Wassertiefe am angestromten Rechenfeld (< 2 m) sowie in Gewässern mit normalem Migrationsbedarf bewährt. An Anlagen mit einer Wassertiefe am Rechenfeld von mehr als 2 m muss zusätzlich zum Oberflächenabstieg ein sohlnahes Abwandersystem errichtet werden. Die Einlaufdimensionierungen und damit die jeweiligen Betriebsdurchflüsse sind auf die Auffindbarkeit und Passierbarkeit der Zielarten und -größen auszurichten. Der Fischabstieg ist kontinuierlich zu betreiben. Da die Abstiegsrinne auch als Spülrinne für das Geschwemmsel genutzt wird, muss immer ein ausreichend dimensionierter Abfluss mit einem ausreichenden Wasserpolster in der Rinne gewährleistet werden, damit die absteigenden Fische durch das Treibgut nicht geschädigt werden. Der Wasserstrahl muss so weit in das Unterwasser reichen, dass die Fische außerhalb der Wehrfundamente in ein ausreichend tiefes Wasserpolster fallen. Einige sohlnahe Bypasstypen müssen durch kontinuierlichen Abtransport des Sediments mittels eines separaten Spül schützes ins Unterwasser sowie einer Spülung des Bypasses frei gehalten werden.

Bei der ökologischen Modernisierung bestehender Anlagen kann auch eine Kombination von Bauwerkstypen zielführend sein. Zusätzlich kommen Sonderbauweisen zum Einsatz, wie z. B. zirkulierende Rechenfelder, deren Betrieb sich ebenfalls bewährt hat.

In der nachfolgenden Skizze ist ein zur Sohle geneigter Vertikalrechen als Schutzeinrichtung mit zwei oberflächennahen Rechenaussparungen aufgrund der Breite des Rechens dargestellt (ab 6 m mindestens zwei Aussparungen). Flach geneigte Vertikalrechen können auch über die gesamte Rechenbreite überströmt werden, wenn eine ausreichende Abflussmenge und damit Überströmhöhe über den Rechen verfügbar ist.

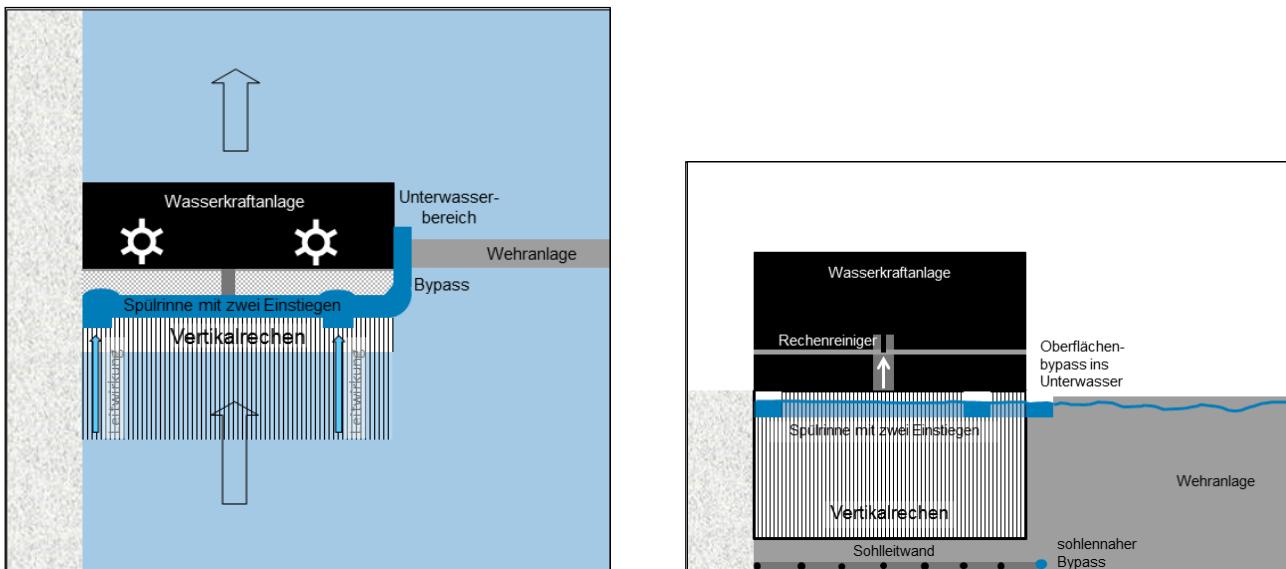


Abb. 4.4: Skizze Vertikalrechen im Winkel α zur Sohle geneigt für die Leitwirkung nach oben mit mehreren Einstiegen in den oberflächennahen Bypass und optionalem sohlnahem Bypass (links Draufsicht, rechts Ansicht vom Oberwasser)



Abb. 4.5: WKA Lomersheim an der Enz: Vertikalrechen mit vier Einstiegen und sohlnahem Bypass

Bei sehr kleinen Wasserkraftanlagen kann auch ein seitlicher oberflächennaher Bypass angeordnet werden. Es handelt sich in der Skizze um einen zur Sohle geneigten Rechen mit vertikaler Stabausrichtung als Schutzeinrichtung. Damit der Bypass gefunden wird, ist eine ausreichende Strömung in das strömungsgünstig gestaltete Einlaufbauwerk erforderlich. Ansonsten gelten für den oberflächen- und sohnahen Bypass die Anforderungen des vorangegangenen Beispiels.

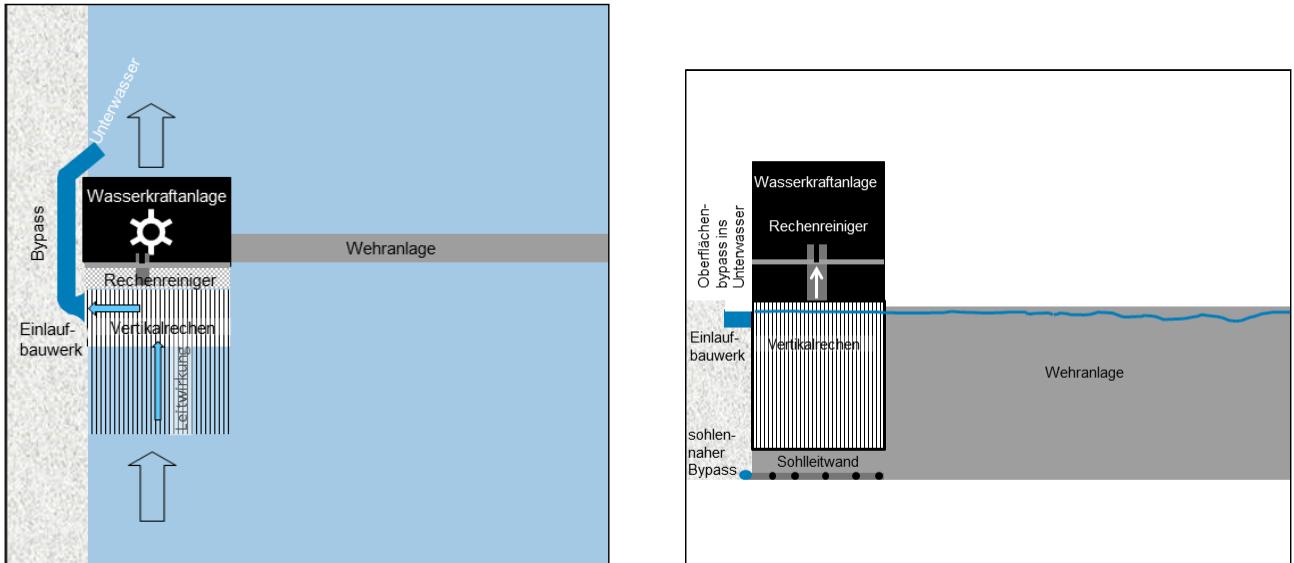


Abb. 4.6: Skizze Vertikalrechen bei kleiner WKA im Winkel α zur Sohle geneigt für die Leitwirkung nach oben mit seitlichem Einstieg in den oberflächennahen Bypass und optionalem sohnahen Bypass (links Draufsicht, rechts Ansicht vom Oberwasser)



Abb.4.7: Seitlich angelegter Oberflächenabstieg an der WKA Winkelhof am Kraftwerkskanal der Wolf

4.2 FISCHSCHUTZANLAGE UND LEITSYSTEM

Nach dem aktuellen Stand des Wissens und der Technik (DWA 2005, Umweltbundesamt 2014, Ebel 2016) bieten für die Fließgewässerfischfauna nur mechanische Barrieren einen hinreichenden Schutz vor der Turbinenpassage, wobei Rechen die größte praktische Bedeutung besitzen. Alle bekannten Verhaltensbarrieren haben nur einen deutlich geringeren oder keinen Effekt.

Die an Wasserkraftanlagen einsetzbaren Rechentypen lassen sich sowohl bezüglich ihrer Exposition als auch entsprechend ihrer Stabanzahl klassifizieren. Im Hinblick auf die Exposition sind einerseits zur Sohle geneigte Rechen (Anströmwinkel α) und andererseits senkrecht auf der Sohle stehende, jedoch schräg zur Flussachse angeordnete Rechen (Anströmwinkel β) zu unterscheiden. Dabei verringert sich bei gegebener Anströmgeschwindigkeit mit abnehmendem Anströmwinkel die senkrecht auf die Rechenfläche auftreffende Strömungskomponente (Normalgeschwindigkeit), wogegen sich die parallel zur Rechenfläche ausgebildete Strömungskomponente (Tangentialgeschwindigkeit) vergrößert. Eine hohe Tangentialgeschwindigkeit begünstigt die Leitwirkung des Rechens für Fische.

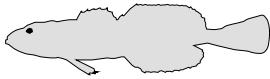
Die Stäbe eines Rechens können vertikal oder horizontal angeordnet sein. Um die Hinführung der Fische zum Bypass zu unterstützen und die Abreinigung des Treibgutes vom Rechenfeld zu erleichtern, werden zur Sohle geneigte Rechen mit vertikalen Stäben und schräg zur Flussachse angeordnete Rechen meist mit horizontalen Stäben ausgestattet. Durch den Einsatz glatter Staboberflächen und hydraulisch optimierter Stabgeometrien kann nicht nur das Verletzungsrisiko für Fische, sondern auch der Energieverlust bei der Rechendurchströmung deutlich vermindert werden. Neben den Stabrechen kommen verschiedentlich auch spezifisch gestaltete Sonderbauformen, wie beispielsweise rotierende Lochblechrechen zum Einsatz.

Die limitierenden Körpermaße der Fische und Neunaugen sind bei Vertikalrechen die Körperbreite und bei Horizontalrechen die Körperhöhe. Beide können als relative Größen in Bezug zur Körperlänge gesetzt werden und ergeben dann die relative Fischbreite $k_{\text{dick}} = D_{\text{Fisch}} / L_{\text{Fisch}}$ bzw. die relative Fischhöhe $k_{\text{hoch}} = H_{\text{Fisch}} / L_{\text{Fisch}}$. Es wird angenommen, dass bei einer lichten Stabweite von 10 mm ein Fisch mit 10 mm Körperbreite bei einem Vertikalrechen bzw. 10 mm Körperhöhe bei einem Horizontalrechen gerade noch zurückgehalten wird (Schutzfunktion). Dies gilt analog für Rechen mit 15 mm lichter Stabweite. Damit ergeben sich für verschiedene Körperformen die Fischlängen, welche durch 10 mm bzw. 15 mm lichter Stabweite von Vertikal- und Horizontalrechen zurückgehalten werden (Tabelle1).

Merke

Da bei den meisten heimischen Fischarten die Körperhöhe die Körperbreite übersteigt, kann mit Horizontalrechen bei gleicher lichter Stabweite eine höhere Schutzwirkung erzielt werden als mit Vertikalrechen.

Tabelle 1: Körperlängen unterschiedlicher Fischarten für die eine Schutzwirkung von Vertikalrechen und Horizontalrechen mit 10 mm bzw. 15 mm lichter Stabweite erreicht wird

| Körperform / Körperwuchs | Arten (Beispiele) | Vertikalrechen | | | | Horizontalrechen | | | |
|---|---|--------------------------------------|--|--|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|------------|--|
| | | k_{dick} | lichte Stabweite bzw. Körperbreite | | k_{hoch} | lichte Stabweite bzw. Körperhöhe | | | |
| | | | 10 mm | 15 mm | | 10 mm | 15 mm | | |
| Fischlänge | | | | Fischlänge | | | | Fischlänge | |
|  | Aal | (0,05) 0,03 | 33 cm* gezwängt | 50 cm** gezwängt | (0,05) 0,03 | 33 cm* gezwängt | 50 cm** gezwängt | | |
| aalförmig / groß | | | | | | | | | |
|  | Bachneunauge, Schmerle, Schlammpeitzger, Steinbeißer, Fluss- und Meerneunauge (Makroptalmi) | 0,05 | 20 cm | —*** | 0,05 | 20 cm | —*** | | |
| aalförmig / klein | | | | | | | | | |
|  | Hecht | 0,10 | 10 cm | 15 cm | 0,14 | 7 cm | 11 cm | | |
| hechtförmig / groß | | | | | | | | | |
|  | Barbe Brachsen Nase Rotauge Hasel | 0,12 0,10 0,16 0,15 0,10 | 8 cm 10 cm 6 cm 7 cm 10 cm | 13 cm 15 cm 9 cm 10 cm 15 cm | 0,19 0,35 0,26 0,32 0,22 | 5 cm 3 cm 4 cm 3 cm 5 cm | 8 cm 4 cm 6 cm 5 cm 7 cm | | |
| cyprinidenförmig / groß | | | | | | | | | |
|  | Bitterling, Strömer, Schneider, Ukelei | 0,09 | 11 cm | —*** | 0,18 | 6 cm | 8 cm | | |
| cyprinidenförmig / klein | | | | | | | | | |
|  | Äsche, Bach-, Meer- und Seeforelle, Lachs, Maifisch | 0,10 | 10 cm | 15 cm | 0,20 | 5 cm | 8 cm | | |
| salmonidenförmig / groß | | | | | | | | | |
|  | Flussbarsch Zander | 0,17 0,12 | 6 cm 8 cm | 9 cm 13 cm | 0,31 0,19 | 3 cm 5 cm | 5 cm 8 cm | | |
| percidenförmig / groß | | | | | | | | | |
|  | Kaulbarsch, Streber | 0,13 | 8 cm | 12 cm | 0,28 0,20 | 4 cm 5 cm | 5 cm 8 cm | | |
| percidenförmig / klein | | | | | | | | | |
|  | Döbel Quappe Schleie Wels | 0,17 0,18 0,15 0,15 | 6 cm 6 cm 7 cm 7 cm | 9 cm 8 cm 10 cm 10 cm | 0,26 0,18 0,26 0,16 | 4 cm 6 cm 4 cm 6 cm | 6 cm 8 cm 6 cm 9 cm | | |
| korpulent / groß | | | | | | | | | |
|  | Groppe | 0,13 | 8 cm | 12 cm | 0,16 | 6 cm | 9 cm | | |
| korpulent / klein | | | | | | | | | |

* Sowohl männliche als auch weibliche Blankaale erreichen oder überschreiten i.d.R. diese Körperlänge und werden somit durch einen 10 mm Rechen zurückgehalten.

LU:W

** Nur weibliche Blankaale und größere Gelbaale erreichen oder überschreiten i.d.R. diese Körperlänge und werden somit durch einen 15 mm Rechen zurückgehalten.

*** Aufgrund ihrer Kleinwüchsigkeit erreichen die Arten diese Körperbreiten nicht oder nur in Ausnahmefällen, so dass eine Passage des Rechens meist durch alle Altersstadien möglich ist.

Kraftwerksrechen sind so zu gestalten und auszurichten, dass sie eine bestmögliche, d. h. verzögerungsfreie Auffindbarkeit des Einlaufbauwerks ermöglichen. Sie haben damit eine Doppelfunktion, d. h. sie sollen Fische einerseits an dem Eindringen in das Triebwerk hindern und sie andererseits zu einem alternativen Abwanderkorridor leiten.

Von besonderer Bedeutung für die Auffindbarkeit eines Bypasses ist neben der physischen auch die hydraulische Leitwirkung an der Barriere. Da sich Fische bei der Abwanderung überwiegend an der Hauptströmung orientieren, gelangen sie an Querbauwerksstandorten mit Wasserkraftnutzung meist in den Anströmbereich des Kraftwerksrechens. Strömungen an Rechenanlagen und anderen mechanischen Barrieren können erst eine hydraulische Leitwirkung entfalten, wenn sie mit einem ausreichend großen Strömungsvektor in Richtung Bypass wirken. Der andere Aspekt der Leitwirkung ergibt sich aus der Kombination von hydraulisch-taktilem Mechanismen und der Tatsache, dass die Schwimmgeschwindigkeit, die der Fisch zur Vermeidung von Kollisionen mit dem Rechen und zum Auffinden des Bypasses aufwenden muss, bei β -Rechen geringer als bei konventionellen Rechen ist.

Die Anströmgeschwindigkeit (v_A) kennzeichnet die querprofilgemittelte Fließgeschwindigkeit vor der Barriere. Bei der Bemessung von Fischschutzanlagen und Fischleitsystemen ist diese Geschwindigkeit vektoriell in eine senkrecht auf die Barriere auftreffende Normalgeschwindigkeit (v_S) und eine parallel zur Barriere ausgebildeten Tangentialgeschwindigkeit (v_T) zu zerlegen (Abbildung 4.8).

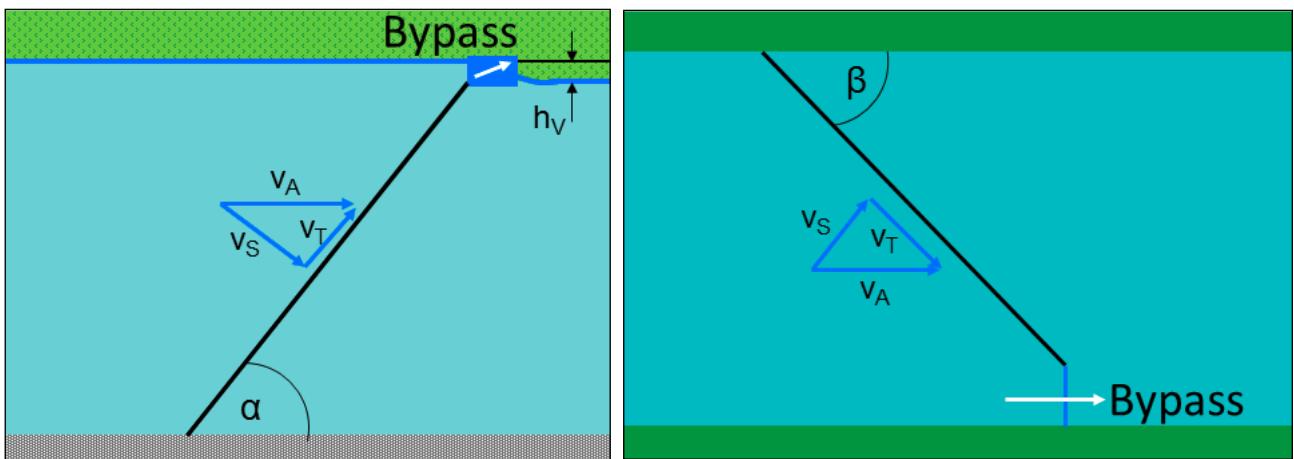


Abb. 4.8: Strömungsvektor an einem Vertikalrechen (links Längsschnitt) bzw. Horizontalrechen (rechts Draufsicht)

Für die hydraulische Leitwirkung zum Bypass ist die Tangentialgeschwindigkeit relevant. Bei einem Anströmwinkel von 45° (α und β) sind Tangentialgeschwindigkeit und Normalgeschwindigkeit gleich. Um eine hydraulische Leitwirkung zum Bypass zu erzielen, muss die Tangentialgeschwindigkeit deutlich höher sein als die Normalgeschwindigkeit. Aus dieser Anforderung an die Leitfunktion ergibt sich ein maximaler Anstellwinkel für Rechen von 30° . Bei diesem Winkel liegt das Verhältnis von Tangentialkomponente zu Normalkomponente bei rund 1,7:1 und bewirkt damit eine günstige Leitkomponente. Die im Jahresgang maximal auftretende Anströmgeschwindigkeit v_A darf bei Neuanlagen 0,5 m/s nicht überschreiten. Sofern bei bestehenden Wasserkraftanlagen höhere Anströmgeschwindigkeiten aus baulichen Gründen nicht vermeidbar sind, ist der für die Leitwirkung erforderliche Winkel auf der Grundlage der einschlägigen Modelle zu berechnen (Details in [Ebel 2016]), da in derartigen Fällen ein Anströmwinkel von deutlich kleiner 30° erforderlich werden kann.

Im Zuge von ethohydraulischen Versuchen wird im Labor derzeit die Wirkung von schräg zur Gerinneachse gestellten Rechenanlagen auf die abwandernden Fische und das Auffinden von Bypassöffnungen untersucht. Die einzelnen Fischarten verhalten sich vor den Rechen unterschiedlich. Zum Beispiel ist der Aal aktiv suchend vorwärtschwimmend, während z. B. die Lachssmolts rückwärts schwimmend, abtastend, immer zur Flucht bereit, mit Distanz zum Hindernis

agieren. Wie bereits bei anderen Untersuchungen in der Vergangenheit konnte auch bei den o.g. ethohydraulischen Versuchen gezeigt werden, dass sich die Schrägstellung positiv auf das Auffinden von Bypassöffnungen auswirkt.

4.3 EINLAUFBAUWERK

Fische orientieren sich bei ihrer flussabwärts gerichteten Wanderung überwiegend an der Hauptströmung, wobei artspezifisch unterschiedliche Wassertiefen bevorzugt werden. Damit bestehen sowohl im Gewässer selbst als auch in der großräumigen Situation und im Nahbereich der Wasserkraftanlage individuelle Abwanderkorridore.

Im unmittelbaren Anströmbereich einer Wasserkraftanlage wird die Ausprägung der Hauptströmung wesentlich durch den Anlagenbetrieb geprägt. Durch eine geeignete räumliche Lage und Ausgestaltung des Einlaufbauwerks ist eine bestmögliche Auffindbarkeit ohne nennenswerte Verzögerung zu gewährleisten. Die Auffindbarkeit muss bei allen Betriebszuständen der Wasserkraftanlage gewährleistet sein. Es ist bekannt, dass Fische an Wanderungshindernissen in artspezifisch unterschiedlichem Ausmaß Suchbewegungen durchführen. Selbst für Arten mit ausgeprägtem Suchverhalten, wie den Lachs, ist mit zunehmender Entfernung der Einlauföffnung vom Wanderungshindernis eine deutliche Minderung der Auffindbarkeit festzustellen [DWA 2005]. Daher sind kontinuierliche Dotation und Betrieb des Fischabstiegs wichtig.



Abb. 4.9: Strömungsgünstige Einlausituation an einem Vertikalrechen ohne Verwirbelungen (Einlaufbauwerk linksseitig)

Die hydraulischen Bedingungen am Rechen und am Einlaufbauwerk sind maßgeblich für die Auffindbarkeit und Akzeptanz des Zugangs in den Bypass. Ziel ist es, im Übergang vom Oberwasser in den Bypass eine gleichmäßige und turbulenzfreie Durchströmung zu erzielen, welche das Verhalten von Fischen nicht beeinträchtigt. Abrupte Veränderungen der Fließgeschwindigkeit und abgelöste Wasserstrahlen sind ebenso zu vermeiden wie Scherströmungen und Verwirbelungen mit Lufteinschlüssen.

Der für den Abstieg erforderliche Abfluss einer Fischschutz- und Fischabstiegsanlage (FSA) hat großen Einfluss auf deren Funktionsfähigkeit. Grundsätzlich steigt die Funktionsfähigkeit von FSA mit zunehmendem Betriebsabfluss an. Die Betriebsabflüsse sind in Abhängigkeit von Bautyp, Auffindbarkeit, Anzahl, Lage und erforderlicher Dimensionierung der Einlauföffnungen festzulegen. Im Mittel werden in Baden-Württemberg bisher je nach Gewässergröße Betriebsabflüsse von 1 bis 5% des MQ angesetzt. Die Praxis hat gezeigt, dass funktionsfähige Einlauföffnungen jeweils mit mindestens 100 l/s betrieben werden.

Aus einer baulich ungünstigen Anlagenkonstellation mit schlechter Leitwirkung der mechanischen Barriere ergibt sich eine eingeschränkte Auffindbarkeit des Bypasses. In solchen Fällen sind höhere Betriebsabflüsse erforderlich als an Anlagen mit guter Leitwirkung und Auffindbarkeit des Einlaufbauwerks.

Einlauf über die gesamte Höhe der Wassersäule

Seit einigen Jahren werden vermehrt Bypässe errichtet, deren Einlaufprofil die gesamte Höhe der Wassersäule am Rechen erfasst. In dem sich anschließenden Kanalprofil, in dem meist die gesamte Wasserspiegeldifferenz zwischen dem Ober- und dem Unterwasser der Wasserkraftanlage überwunden wird, befinden sich spezielle Bauwerke, die die Fließgeschwindigkeit und den Durchfluss im Bypass begrenzen. Hierbei handelt es sich im Regelfall um eine Klappe mit vertikaler Drehachse und um ein nachgeordnetes Überfallwehr (Abb. 4.10). Meist werden derartige Bypässe in Kombination mit einem schräg zur Flussachse ($\beta < 90^\circ$) angeordneten Horizontalrechen betrieben (sog. Leitrechen-Bypass-System nach Ebel, Gluch & Kehl, vgl. [Ebel et al. 2015] und [Ebel 2016]), welcher die abwandernden Fische zum Einlaufprofil des Bypasses leitet. Kontrolluntersuchungen zeigen, dass derartige Bypässe vom gesamten heimischen Fischartenspektrum genutzt werden können. Das am Rechen horizontal abgereinigte Treibgut wird gleichfalls durch den Bypass in das Unterwasser transportiert, so dass Aufwendungen für die Treibgutentsorgung entfallen. Neben der Treibgutweiterleitung kann der Bypass auch eine Geschiebetransport- und eine Hochwasserentlastungsfunktion wahrnehmen. In Abhängigkeit von den standörtlichen Bedingungen wird der Bypass mit einer Breite von meist 0,8 bis 2,0 m ausgeführt.

Nachstehend werden die im Bypasskanal vorhandenen Kontrollbauwerke in Kurzform beschrieben. Die Klappe mit vertikaler Drehachse (Türflügelprinzip) wird unmittelbar unterhalb des Einlaufprofils angeordnet. Sie verfügt über je eine permanent durchströmte oberflächennahe und sohlennahe Öffnung. Im normalen Betriebszustand ist die Klappe verschlossen, die Fischabwanderung kann über die beiden Abstiegsöffnungen erfolgen. Der Abfluss durch die oberflächennahe Öffnung wird durch deren Größe und den Oberwasserspiegel bestimmt. Das nachgeordnete Überfallwehr mit schrägem Anströmboden ($10 - 30^\circ$) und ausgerundeter Krone reguliert durch seinen Rückstaueffekt die Fließgeschwindigkeit und den Durchfluss in der sohlennahen Abstiegsöffnung. In Abhängigkeit von den jeweiligen Anforderungen wird das Wehr als festes oder bewegliches Bauwerk ausgeführt.

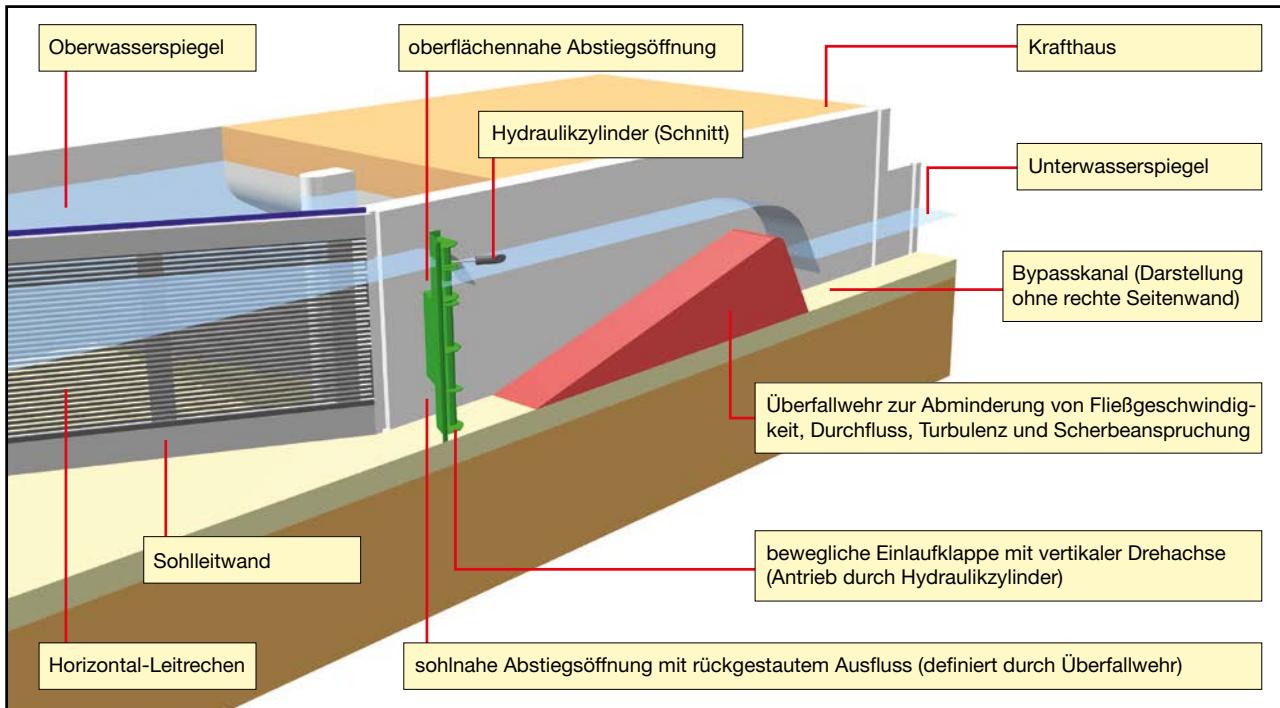


Abb. 4.10: Prinzipskizze des Leitrechen-Bypass-Systems nach Ebel, Gluch & Kehl in Seitenansicht mit oberflächen- und sohlnaher Abstiegsöffnung sowie nachgeordnetem Überfallwehr (aus [Ebel 2016])

Zum Spülen von Treibgut und Geschiebe sowie bei Hochwasserereignissen kann die Klappe vollständig geöffnet werden. Bewegliche Überfallwehre können bei Bedarf abgesenkt werden, so dass die Durchflusskapazität des Bypassgerinnes vergrößert wird.



Abb. 4.11: Leitrechen-Bypass-System am Neckar bei Horb

Grundsätzlich sind bei allen Bautypen sämtliche Bypasskomponenten ohne scharfe Kanten oder Grade auszuführen, um Fischverletzungen bei der Passage zu vermeiden. Die Konturen der Abstiegsöffnungen in der Einlaufklappe und die Krone des Überfallwehres sollten strömungsgünstig ausgerundet werden, um Geschwindigkeitsgradienten zu verringern und damit die verhaltensbiologische Akzeptanz des Bypasses zu fördern. Hydraulische und geometrische Zielgrößen für die Bemessung des Bypasses sind in [Ebel 2016] dargestellt.

Oberflächennaher Einlauf

Oberflächenabstiege in Kombination mit Vertikalrechen (ohne Sohlenbypass) werden überwiegend an kleinen Wasserkraftanlagen mit einer Wassertiefe vor dem Rechen von weniger als 2 m betrieben. Neben den hydraulischen Bedingungen am Einlauf sind bei der Bemessung des Bypasses auch die geometrischen Anforderungen der jeweils maßgebenden Zielfischarten und -größen zu berücksichtigen. In der Regel sind Einlaufwassertiefen von 30 cm und mehr erforderlich. Für Salmonidensmolts sind 45 cm als Mindestbreite und Mindesthöhe notwendig [Ebel 2016].

Sohlennaher Einlauf

Fischarten, die nahe der Gewässersohle abwärtswandern (Aal, Barbe u.a.) nutzen sohlennahe Einlauföffnungen. Flach zur Sohle geneigte, nicht passierbare Rechen ($\alpha \leq 30^\circ$) können diese Fische auch zu einem oberflächennahen Einlauf leiten.

Insbesondere wenn die Wassertiefe am Rechen größer als ca. 2 m ist, werden auch sohlennahe Einlauföffnungen erforderlich. Diese sollten für Aale eine Mindestbreite und Mindesthöhe von 30 cm aufweisen. Die sonstigen in Baden-Württemberg heimischen, sohlennah abwandernden Fischarten benötigen aufgrund der Regressionsmodelle von [Ebel 2016] eine Profilbreite von meist 40 bis 60 cm und eine Profilhöhe von meist 60 bis 90 cm.

4.4 BYPASS

Der eigentliche Abstieg von Fischen erfolgt in einem innenwandig glatten, möglichst lichtoffenen Bauwerk. Damit die Zielfischarten und -größen nicht in das Oberwasser zurückweichen (fliehen), müssen eine gleichmäßige Strömung ohne Turbulenzen und eine ausreichende Wassertiefe durch eine entsprechende geometrische Gestaltung geschaffen werden. Dies gilt für den Bypassabschnitt bis zum Erreichen der Grenzschwimmgeschwindigkeit der Fische. Der Abstieg im anschließenden Abschnitt erfolgt passiv. In den Bypass hineinragende Bauteile sind ebenso zu vermeiden wie abrupte Richtungswechsel mit Schädigungspotenzial.



Abb. 4.12: Offenes Bypass-Gerinne wird über den Fischaufstieg geführt (ENCW, Nagold in Calw)

Bei einem sohlennahen Einlauf wird der Bypass oft mittels eines Rohres in das Unterwasser realisiert. Diese Bauform hat eine hohe Verlegungsanfälligkeit und muss daher oft gereinigt werden. Es ist somit vorteilhafter, ein nach oben offenes Gerinne in Kombination mit einer den Durchfluss begrenzenden Kontrolleinrichtung zu installieren. Bei gekrümmten Abschnitten wird ein Mindestradius empfohlen, der dem Fünffachen des Rohrdurchmessers (bzw. der Kanalbreite) entspricht und 3,0 m nicht unterschreitet [Ebel 2016].

4.5 UNTERWASSERBEREICH

Damit der Abstieg für die Fische schädigungsfrei abgeschlossen werden kann, müssen der Auslauf des Oberflächenbypasses und damit der Weg der Fische in das Unterwasser in ein ausreichend tiefes Wasserpolster führen. Nach DWA (2005) wird angenommen, dass Schädigungen gering ausfallen, wenn die Wassertiefe mindestens $\frac{1}{4}$ der Fallhöhe, keinesfalls jedoch weniger als 0,9 m beträgt. Um auch geringe Schädigungen zu vermeiden, wird für Baden-Württemberg eine Mindestwassertiefe von einem Drittel der Fallhöhe, aber nicht weniger als 1,0 m empfohlen. Es muss ausgeschlossen werden, dass der Wasserstrahl bis auf die Sohle durchschlägt und dadurch Fische zu Schaden kommen. Dies ist auch erforderlich, wenn z. B. bei höheren Abflüssen der Fischabstieg über ein Querbauwerk erfolgt.



Abb. 4.13: Fischrückführung in kolkartigen Unterwasserbereich parallel zum Fischpasseinstieg (WKA Höfen, Enz bei Höfen)

Zusätzlich zur ausreichenden Wassertiefe muss dafür Sorge getragen werden, dass im Abstiegskolk keine Verklausungen mit Gehölz oder Schwemmgut entstehen, auf welche Fische fallen können und dann zu Schaden kommen. Bei Anlagen, deren Bypass auch zur Weiterleitung des Rechengutes genutzt wird, muss daher durch eine ausreichende Strömung das zügige Austragen dieser Materialien aus dem Unterwasserbereich gewährleistet werden.

Bei sohlennahen Bypässen ist ebenfalls ein ausreichendes freies Wasserpolster nötig, damit die Fische nicht mit dem Wasserdruckstoß gegen Hindernisse prallen.

5 UMSETZUNG AN NEUANLAGEN UND BESTEHENDEN WASSERKRAFTANLAGEN

Fischschutz- und Fischabstiegsanlagen können nicht für alle Wasserkraftanlagen mit einem einzigen Bautyp umgesetzt werden. Aufgrund der unterschiedlichen fischökologischen Anforderungen und der jeweiligen örtlichen Rahmenbedingungen (großräumige Situation und Abflussverhältnisse im Nahbereich) sind in den konkreten Projekten verschiedene Kombinationen und Anordnungen der Komponenten sinnvoll. Die Gestaltung funktionsfähiger Fischschutz- und Fischabstiegsanlagen an Wasserkraftanlagen lässt sich in zwei Schritten beschreiben.

- **Im ersten Schritt** werden die vier Komponenten Fischschutzanlage mit Leitsystem, Einlaufbauwerk(e), Bypass und Unterwasserbereich konzipiert. Je nach Zielarten und damit einhergehenden Anforderungen werden Art und Aufbau der jeweiligen Komponenten bemessen. Dabei sind der Rechentyp, die maximale lichte Stabweite, der Anströmwinkel sowie die Anzahl und Dimensionierung von Einlaufbauwerken und Bypässen festzulegen.
- **Im zweiten Schritt** werden diese Komponenten aufeinander abgestimmt und so angeordnet, dass sie die Kriterien eines Abstiegskorridors für Fische erfüllen. Maßgabe ist eine gute Auffindbarkeit, ohne dass Verhaltensbarrieren zu Verzögerungen bei der Abwanderung führen. Der Betriebsabfluss wird ermittelt und ggf. die Dimension des Einlaufbauwerks angepasst. Im Ergebnis muss abwandernden Fischen der Zielarten und -größen eine schädigungsfreie Passage durch den Bypass und Rückführung in das Unterwasser ermöglicht werden.

Bei der Planung neuer Kraftwerke lassen sich die Anforderungen an Fischschutz und Fischabstieg vergleichsweise unproblematisch umsetzen. Dagegen müssen bei Bestandsanlagen oft bauliche Zwangspunkte berücksichtigt werden. Diese bestehen insbesondere in einem oft stark eingeschränkten Platzangebot für die Installation der Schutzanlage und des Leitsystems. Dies kann bei Bestandsanlagen Abweichungen von dem für neue Kraftwerke umsetzbaren Standard erfordern. Infolge dieser ungleichen Ausgangslage ist es erforderlich, den Stand der Technik für neue Anlagen und bestehende Wasserkraftanlagen getrennt darzustellen, um die Verhältnismäßigkeit zu beachten. Tabelle 2 stellt die entsprechenden Anforderungen zusammen.

Tabelle 2: Anforderungen an FSA

| Modul | Neuanlage | | Bestandsanlage* | | | |
|---|--|----------------------------------|--|---|--|--|
| Fischschutzanlage Maximale lichte Stabweite; Anströmgeschwindigkeit | Vertikalabrechen | Horizontalabrechen | Vertikalabrechen | Horizontalabrechen | | |
| Zielgewässer für anadrome Wanderfische ■ Lachs/Meerforelle ■ Seeforelle | 10 mm $V_A < 0,5 \text{ m/s}$ | 15 mm $V_A < 0,5 \text{ m/s}$ | 15 mm $V_A < 0,5 \text{ m/s}$ | 18 mm $V_A < 0,5 \text{ m/s}$ | | |
| Aalmanagementgewässer | 10 mm $V_A < 0,5 \text{ m/s}$ | 10 mm $V_A < 0,5 \text{ m/s}$ | 15 mm $V_A < 0,5 \text{ m/s}$ | 15 mm $V_A < 0,5 \text{ m/s}$ | | |
| Migrationsbedarf hoch oder erhöht | 15 mm $V_A < 0,5 \text{ m/s}$ | 18 mm $V_A < 0,5 \text{ m/s}$ | 15 mm $V_A < 0,5 \text{ m/s}$ | 18 mm $V_A < 0,5 \text{ m/s}$ | | |
| Migrationsbedarf normal | 15 mm $V_A < 0,5 \text{ m/s}$ | 18 mm $V_A < 0,5 \text{ m/s}$ | 20 mm** $V_A < 0,5 \text{ m/s}$ | 20 mm** $V_A < 0,5 \text{ m/s}$ | | |
| FFH-Arten | gesonderte fischökologische Betrachtung*** | | | | | |
| Leitsystem Maximaler Anströmwinkel | | | | | | |
| Zielgewässer für anadrome Wanderfische ■ Lachs/Meerforelle ■ Seeforelle | $\leq 30^\circ$ | $\leq 30^\circ$ | $\leq 30^\circ$, sofern räumlich möglich | $\leq 30^\circ$, sofern räumlich möglich | | |
| Aalmanagementgewässer | $\leq 30^\circ$ | $\leq 30^\circ$ | $\leq 30^\circ$, sofern räumlich möglich | $\leq 30^\circ$, sofern räumlich möglich | | |
| Sonstige Gewässer mit Migrationsbedarf normal bis hoch | $\leq 30^\circ$ | $\leq 30^\circ$ | $\leq 30^\circ$, sofern räumlich möglich | $\leq 30^\circ$, sofern räumlich möglich | | |
| Einlaufbauwerk(e) | | | | | | |
| Minimale Wassertiefe | 30 cm | | 30 cm | | | |
| Zielgewässer für anadrome Wanderfische ■ Lachs/Meerforelle ■ Seeforelle | Betriebsabfluss 1-5% MQ jedoch mindestens 100 l/s | | Betriebsabfluss 1-5% MQ jedoch mindestens 100 l/s | | | |
| Aalmanagementgewässer | Betriebsabfluss 1-5% MQ jedoch mindestens 100 l/s | | Betriebsabfluss 1-5% MQ jedoch mindestens 100 l/s | | | |
| Sonstige Gewässer mit Migrationsbedarf normal bis hoch | Betriebsabfluss 1-5% MQ jedoch mindestens 100 l/s | | Betriebsabfluss 1-5% MQ jedoch mindestens 100 l/s | | | |
| Bypass | | | | | | |
| Max. Fließgeschwindigkeitszunahme im Bypass | 1 m/s pro Meter Fließstrecke | | | | | |
| Unterwasserbereich | | | | | | |
| Rückführung Unterwasser | Mindestwassertiefe 1/3 der Fallhöhe und mindestens 1 m | | | | | |

LU:W

* Sofern an Bestandsanlagen eine Anströmgeschwindigkeit von $< 0,5 \text{ m/s}$ nicht zu gewährleisten ist, wird ggf. ein Anströmwinkel des Rechens von deutlich weniger als 30° erforderlich. Die jeweils geeigneten Kombinationen von Anströmgeschwindigkeit und Anströmwinkel sind in [Ebel 2016] dargestellt. Alternativ kann die Nutzwassermenge soweit verringert werden, dass die maximal zu lässige Anströmgeschwindigkeit eingehalten wird.

** Bei gewässerökologischen Defiziten sind höhere Anforderungen analog der Neuanlagen möglich

*** Erhöhte Anforderungen können sich beim Vorkommen von FFH-Fischarten in allen Gewässergrößen ergeben.

6 Glossar

| Begriff | Erläuterung |
|-----------------------------------|---|
| adult | Erwachsenenstadium |
| anadrome Fische | Wanderfische, die zum Laichen aus dem Meer in die Fließgewässer wandern, wie Lachs, Meerforelle, Mairisch, Meerneunauge und Flussneunauge |
| Blankaal | Aal in der Rückwanderungsphase zum Meer |
| diadrome Fische | Wanderfische, die zum Laichen zwischen Meer und Fließgewässer wechseln (Oberbegriff für anadrome und katadrome Arten). |
| Fließgewässerregion (Fischregion) | Zone im Längsverlauf der Fließgewässer, die von einer typischen Lebensgemeinschaft besiedelt wird. Hinsichtlich der Fischlebensgemeinschaft werden die Regionen nach dort typischerweise häufigen Arten charakterisiert. In Baden-Württemberg sind die (Obere und Untere) Forellenregion sowie die Äschen-, Barben- und Brachsenregion vorhanden. |
| Gelbaar | Aal in der Aufwuchsphase im Fließgewässer |
| juvenil | Jugendstadium |
| katadrome Fische | Wanderfische, die zum Laichen aus den Fließgewässern in das Meer wandern, wie Aal und Flunder |
| natürliche Fischfauna | Alle heimischen Fisch- und Neunaugenarten eines Gewässers oder Gewässerabschnittes, welche aktuell und natürlicherweise vorkommen oder vorkamen und in absehbarer Zeit wieder vorkommen können. |
| potamodrome Fische | Fische, die Wanderungen innerhalb des Fließgewässers ausführen und hierbei oftmals die Grenzen von Fließgewässerregionen überschreiten, z. B. Nase und Barbe |
| Referenz-Fischzönose | Das unter unbeeinträchtigten Bedingungen zu erwartende natürliche Fischartenspektrum eines Gewässerabschnittes mit der relativen Häufigkeit der einzelnen Arten in der Fischlebensgemeinschaft. Als Grundlage für die ökologische Zustandsbewertung wurden für die Fließgewässer Baden-Württembergs 750 Referenz-Fischzönosen erstellt. |
| Zielfischart | Art, deren physische und verhaltensbiologische Anforderungen bei der Positionierung und Gestaltung sowie der geometrischen und hydraulischen Bemessung von Fischschutz- und Fischabstiegsanlagen zugrunde gelegt werden. |

7 Quellen und Abbildungen

Baer, J. et al. (2014): Die Rote Liste für Baden-Württembergs Fische, Neunaugen und Flusskrebse. – Ministerium für Ländlichen Raum und Verbraucherschutz Baden-Württemberg, Stuttgart, 64 S.

Bewirtschaftungsplan 2015: Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, Zweiter Bewirtschaftungszyklus 2016 – 2021, Dezember 2015

DWA (2005): Fischschutz- und Fischabstiegsanlagen - Bemessung, Gestaltung, Funktionskontrolle. – Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., 2. korrigierte Auflage, Hennef, 256 S.

DWA (2014): Merkblatt DWA-M 509. Fischaufstiegsanlagen und fischpassierbare Bauwerke - Gestaltung, Bemessung, Qualitätssicherung. – Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef, 334 S.

Ebel, G. (2008): Turbinenbedingte Schädigung des Aals (*Anguilla anguilla*) – Schädigungsarten an europäischen Wasserkraftanlagenstandorten und Möglichkeiten der Prognose. – Mitteilungen aus dem Büro für Gewässerökologie und Fischereibiologie Dr. Ebel, Band 3, Halle (Saale), 176 S.

Ebel, G. (2016): 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, Band 4 (2. Auflage), Halle (Saale), 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 105 (7/8): 44 – 50.

Umweltbundesamt (2014): Synthesepapier des vom Umweltbundesamt gegründeten Forums „Fischschutz und Fischabstieg“ – <http://forum-fischschutz.de/konferenz/synthesepapier> , 36 S.

Umweltbundesamt (2015): Forum „Fischschutz und Fischabstieg“ Empfehlungen und Ergebnisse des Forums, Texte 97/2015, UBA, 53 S.

Abbildungen

Abb. 2.1 – LUBW + LAZBW

Abb. 4.3, 4.5, 4.7, 4.9, 4.11, 4.12, 4.13 – RP Karlsruhe Ref. 33

Abb. 4.1, 4.2, 4.4, 4.6, 4.8 – LUBW

Abb. 4.10 – Büro für Gewässerökologie und Fischereibiologie Dr. Ebel

