

Wasserkraftanlagen mit niedrigen Fallhöhen

Markus Aufleger und Barbara Brinkmeier

Zusammenfassung

Die vermehrten Anstrengungen zur Nutzung regenerativer Energien sowie die ökologisch begründeten Restriktionen bzw. Rücksichtnahmen beim Wasserkraftausbau haben dazu geführt, dass die schon bestehenden Kraftwerkskonzepte um eine Reihe von Ansätzen für niedrige Fallhöhen ergänzt wurden. Während man etwa bis Ende der 1990er Jahre Fallhöhen unter 5 m als grundsätzlich unattraktiv zur Wasserkraftnutzung angesehen hatte, hat sich im Bereich der „Wasserkraftanlagen mit niedrigen Fallhöhen“ (mit typischen Fallhöhen zwischen 2 und 5 Metern) seither viel getan.

Mit Hilfe neuer Entwicklungen und Konzepte wird versucht, typische ungünstige Einwirkungen auf die Fließgewässerökologie zu begrenzen bzw. nach Möglichkeit zu vermeiden. Zur Beschreibung dieser Anlagen hat sich der Begriff der „ökologischen Wasserkraftanlagen“ bereits etabliert (Aufleger et al., 2015). Es ist nun wichtig, die tatsächlichen Einflüsse des Projekts den Erwartungshaltungen gegenüber zu stellen.

Der Beitrag beschreibt Wasserkraftanlagen mit niedrigen Fallhöhen, welche hinsichtlich ihrer maßgebenden energiewirtschaftlichen Merkmale (u.a. Ausbauabfluss, Turbinengrößen etc.) so ausgelegt sind, dass sie sich für den Einsatz in mittleren und größeren Flüssen eignen. Verschiedene Konzepte werden gegenübergestellt und hinsichtlich wichtiger Kriterien miteinander verglichen (z.B. Fischschutzkonzept, Sedimentmanagement).

1 Einführung

Wasserkraftanlagen mit niedrigen Fallhöhen sind insbesondere für den Einsatz an anthropogen stark veränderten aber dennoch gewässerökologisch wertvollen Flussstrecken vorgesehen. Derzeit befinden sich unter anderem in Bayern verschiedene Konzepte mit einem besonderen ökologischen Anspruch in Planung, Bau und Betrieb (Overhoff et al., 2015). Im Sprachgebrauch hat sich für diese Anlagenkonzepte die sehr weitgehende Bezeichnung „Ökologische Wasserkraft“ etabliert.

Mehrere dieser Kraftwerkskonzepte für niedrige Fallhöhen werden durch die verwendeten Turbinentypen (z.B. Wasserkraftschnecke, VLH-Turbine, bewegliches Kraftwerk (vgl. Overhoff et al., 2015)) charakterisiert. Bei diesen Anlagen wird die grundsätzliche Anordnung des Kraftwerkes maßgeblich durch die maschinelle Ausrüstung bestimmt. Andere Lösungen (z.B. Schachtkraftwerk, Fließgewässerkraftwerk) sind grundsätzlich mit unterschiedlichen Turbinentypen ausrüstbar. Diese Konzepte definieren sich über die räumliche und funktionelle Zuordnung der grundsätzlichen Anlagenteile und die Betriebsweise. Im Hinblick auf die Bewertung der ökologischen Verträglichkeit kommt bei allen Kraftwerkskonzepten den jeweiligen Fischschutzstrategien große Bedeutung zu.

Der vorliegende Beitrag beschränkt sich auf Wasserkraftanlagen, welche hinsichtlich ihrer maßgebenden energiewirtschaftlichen Merkmale (u.a. Ausbauabfluss, Turbinengrößen etc.) so ausgelegt sind, dass sie sich für den Einsatz in mittleren und größeren Flüssen eignen. Das typische Anwendungsfeld dieser Anlagen sind inner- und voralpine Kiesflüsse. Lösungen, welche sich auf vergleichsweise geringe Abflüsse beschränken (z.B. Wasserkraftschnecken),

werden in die vorliegende vergleichende Betrachtung nicht einbezogen. Aufgrund der niedrigen Fallhöhen konzentriert sich nachfolgende Zusammenstellung zudem auf Flusskraftwerke (d.h. keine eigene Berücksichtigung der Situation an Ausleitungskraftwerken).

2 Anforderungen

An Wasserkraftanlagen mit niedrigen Fallhöhen, welche als Flusskraftwerke angeordnet sind, werden ähnlich wie bei größeren Anlagen, zunächst folgende Anforderungen gestellt.

Gesamtanlage (Kraftwerk und Querbauwerk bzw. Wehr einschließlich aller Nebenanlagen):

- Sichere Abfuhr des Bemessungshochwasserabflusses
- Funktionsfähiger Fischaufstieg
- Verhinderung von Ablagerungen im Unterwasser des Querbauwerks
- Verhinderung von Verklausungen
- Geschiebeabweisung (d.h. möglichst geringer Eintrag in den Bereich des Kraftwerkeinlaufes)

Nahbereich des Kraftwerkes:

- Möglichst gleichmäßige und verlustarme Anströmung der Turbinen
- Begrenzung der hydraulischen Verluste am Rechen
- Begrenzung des betrieblichen Aufwandes bei der Rechenreinigung
- Schutz der Turbine vor Beschädigungen
- Verhinderung / Reduzierung des Eintrages von Feststoffen in die Turbinen
- Gegebenenfalls Spülbarkeit des Nahbereichs der Turbineneinläufe
- Fischschutz und Fischabstieg
- Zugänglichkeit und Wartungsfreundlichkeit der Turbinen
- Reduzierung des baulichen Aufwandes bzw. der Baukosten

Im Oberwasser von Kraftwerken mit niedrigen Fallhöhen ergeben sich vergleichsweise niedrige Fließtiefen und entsprechend höhere Fließgeschwindigkeiten. Erhöhte Beachtung ist hierdurch insbesondere der Kraftwerksanströmung, der Geschiebeabweisung, dem Schutz der Turbine vor Steinschlägen bzw. vor anderen mechanischen Beschädigungen sowie dem Fischschutz zu schenken. Weitere Anforderungen ergeben sich aus dem häufig ökologisch sehr sensiblen Umfeld dieser Anlagen, welches in den jeweiligen Bedingungen des Standorts begründet ist. Hieraus resultiert oft der Wunsch nach einer Überströmbarkeit des Kraftwerks aus Gründen des Landschaftsbildes.

In Tabelle 1 soll versucht werden wichtige Erwartungshaltungen an „ökologische“ Wasserkraftanlagen aus der Sicht von Wasserbau- und Flussbauingenieuren zu formulieren. Diese Anforderungen stellen die planenden Ingenieure vor große Herausforderungen. Die inhaltliche Breite dieser teilweise mit der traditionellen Wasserkraftnutzung konkurrierenden Ansprüche (z.B. niedrige Fallhöhe = deutliche Begrenzung der Energieproduktion an einem Standort) bedingt, dass befriedigende technische Lösungen nur auf dem Niveau der Gesamtanlage gefunden werden können. Alle Anlagenteile und ihre gegenseitige Zuordnung im Sinne des Gesamtlayouts müssen im Sinne des Ziels „ökologische“ Wasserkraft ausgelegt und aufeinander abgestimmt werden. Ein einzelnes Anlagenelement alleine (z.B. ein innovatives Fischschutzsystem oder eine fischfreundliche Turbine) können keinesfalls ausreichen, um die Gesamtanlage hinsichtlich ihrer ökologischen Auswirkung zu charakterisieren.

Tab. 1 Wichtige Erwartungshaltungen an „ökologische“ Wasserkraftanlagen (Aufleger, 2015)

Ziel / Erwartungshaltung	Mögliche Maßnahme	Anmerkung
Erhalt des Fließgewässercharakters	Niedrige Fallhöhe	Je nach Fallhöhe und Steuerung Verhinderung bzw. Begrenzung des „Stau-Charakters“ möglich.
Erhalt der Dynamik der Wasserspiegellagen	Dynamische OW-Steuerung	Abflussabhängige Steuerung von Turbinen und Verschlüssen
Rücksichtnahme auf Strukturvielfalt und Habitate	Verzicht auf die Planung von Wasserkraftanlagen in flussmorphologisch und fließgewässerökologisch besonders wertvollen Gewässerstrecken, Anpassung des flussbaulichen Konzeptes (z.B. „Weiche Ufer“, OW-Steuerung bei geschiefeführenden Abflüssen)	In verbauten Flusstrecken (Längsverbau, Querbauwerke u.a.) erhebliches Potential zur Verbesserung der Strukturvielfalt und der Habitate im Zuge von Wasserkraftprojekten!
Sicherstellung der Durchgängigkeit für Feststoffe (Schwebstoffe, Geschiebe, Schwimmstoffe)	Sinnvolle Zuordnung der Anlagenteile, Gesamtlayout	Infolge niedriger Fallhöhen i.a. keine nachhaltige Rückhaltewirkung auf Schwebstoffe <u>und</u> Geschiebe
Wirksamer Fischaufstieg	Fischaufstiegsanlage nach den Regeln der Technik	Umfassende Regelwerke bzw. Empfehlungen verfügbar
Wirksamer Fischschutz und Fischabstieg	Fischschutz- und -ableitungskonzept	Bedarf an weiteren Entwicklungen und Funktionskontrollen, da noch kein Stand der Technik vorhanden
Berücksichtigung des Landschaftsbildes und der optischen Wirkung der Anlage	Überströmbarkeit des Krafthauses, Architektonische Gestaltung.	Möglicher Einfluss der Überströmbarkeit u.a. auf Betrieb, Fischabstieg und Geschiebetransport

3 Merkmale „ökologischer“ Wasserkraftanlagen

Für eine zielführende und umfassende Bewertung der ökologischen Verträglichkeit von Wasserkraftanlagen ist es wichtig, verschiedene Merkmale der Wasserkraftanlagen in allgemeiner Form zu extrahieren und hinsichtlich ihrer Bedeutung bezüglich der ökologischen Verträglichkeit zu bewerten. Dieses Vorgehen zwingt naturgemäß zu Vereinfachungen. Diesem Vergleich liegen zunächst die aus einer Reihe von Veröffentlichungen bekannten Konzepte des Fließgewässerkraftwerks, des Schachtkraftwerks und des beweglichen Kraftwerks zu Grunde (siehe u.a. Overhoff et al, 2015). Die folgende allgemeine Darstellung verzichtet jedoch im Rahmen der vergleichenden Bewertung der Merkmale bewusst auf die konkrete Zuordnung einzelner Eigenschaften zu diesen Konzepten bzw. Schlagworten. Hierdurch soll insbesondere den vielen konkreten oder auch noch vorläufigen 'freien' Planungen zu gewässerökologisch verträglichen Anlagen Rechnung getragen werden.

Merkmal A: Anordnung im Grundriss und Überströmbarkeit

Die grundsätzliche Anordnung der Turbinen (Tabelle 2) hat eine wesentliche Auswirkung auf die optische und auch subjektive Wahrnehmung der Kraftwerksanlage. Dabei wird die Nicht-Sichtbarkeit der Kraftwerksanlage bei einer dauerhaften Überströmung als positiv wahrgenommen. Die Überströmbarkeit bietet jedoch neben dem rein visuellen Effekt auch die Möglichkeit, einen bedeutenden Teil des Hochwasserabflusses über die Turbinen abzuführen. Hierdurch bietet sich unter Umständen die Möglichkeit, die typische Verbreiterung des

Flusslaufes im Bereich der Kraftwerksanlage zur Platzierung des Krafthauses zu vermeiden bzw. zu begrenzen. Dieser Effekt ist jedoch von der tatsächlichen Flussbreite und dem jeweiligen flussbaulichen Entwicklungskonzept im Oberwasser abhängig. Ungünstige Auswirkungen der Überströmbarkeit der Turbinen sind die eingeschränkte Zugänglichkeit und insbesondere auch die Tatsache, dass bei erhöhtem Geschiebetrieb im Zuge von Hochwasserereignissen ein vermehrter Feststoffeintrag in den Nahbereich der Turbinen nicht verhindert werden kann. Diesem Problem kann bei beweglichen Turbineneinheiten, welche zwischen Pfeilern gelagert werden, durch eine aktive Unterströmung begegnet werden. Grundsätzlich ist festzustellen, dass sich die Anordnung im Grundriss sowie die Überströmbarkeit positiv auf das Landschaftsbild und die subjektive Wahrnehmung auswirken können. Ein unmittelbar positiver Einfluss auf die ökologische Verträglichkeit ist jedoch hierdurch nicht gegeben.

Tab. 2 Typische Anordnung von „ökologischen“ Wasserkraftanlagen im Grundriss (Aufleger et.al., 2015)

Bezeichnung, Beschreibung	Lageskizze	Anmerkung	
<p><u>Konventionelles Buchtenkraftwerk</u></p> <p>Anordnung der Turbinen im Krafthaus außerhalb des Stromstrichs bzw. Flusslaufs</p> <p>nicht überströmbar, Hochwasserabfuhr nur über Wehrfelder</p>		<ul style="list-style-type: none"> - Beeinträchtigung Landschaftsbild + wenig Geschiebezustrom (Turbinen) + gute Zugänglichkeit der Turbinen 	
<p><u>Überströmbare Kraftwerke</u></p> <p>Teilweise oder vollständig im Stromstrich bzw. Flusslauf angeordnet</p> <p>Hochwasserabfuhr über Wehrfelder und durch Überströmung des Turbinenbereichs</p> <p>Im Normalbetrieb Überströmung der Turbinen aus Gründen des Landschaftsbildes sowie gegebenenfalls auch zur Gewährleistung des Fischabstiegs und der Verhinderung von Einlaufwirbeln bei geringer Überdeckung</p>		<ul style="list-style-type: none"> + günstiges Landschaftsbild - vermehrter Geschiebezustrom (Turbinen) - eingeschränkte Zugänglichkeit der Turbinen 	„Ökologische“ Wasserkraftwerke
<p><u>Bewegliche Turbineneinheiten, zwischen Pfeilern gelagert</u></p> <p>Hochwasserabfuhr über und unter den beweglichen Turbineneinheiten, gegebenenfalls auch über zusätzliches Wehrfeld</p> <p>Im Normalbetrieb Überströmung der Turbinen</p>		<ul style="list-style-type: none"> + günstiges Landschaftsbild + Geschiebeabfuhr unter den Turbinen - eingeschränkte Zugänglichkeit - ggfs. aufwändiger Stahlwasserbau - u.U. erhöhte Verklausungsgefahr 	

Merkmals B: Gestaltung des Wehres und Verschlussarten

Auch an „ökologischen“ Wasserkraftanlagen sind zunächst keine grundsätzlichen Einschränkungen bei der Gestaltung der Wehrschwelle und der Wahl der Verschlussart gegeben. Die niedrigen Fallhöhen bedingen – bezogen auf den im Hochwasserfall freizugebenden Abflussquerschnitt – tendenziell ein großes Breiten/Höhen-Verhältnis. Unter diesen Randbedingungen eignen sich insbesondere auf der Wehrschwelle angeordnete Wehrverschlüsse, wie Klappen und Schlauchwehre. Diese Verschlüsse besitzen zudem deutliche Vorteile hinsichtlich der Nachweisführung im (n-1) bzw. (n-a)-Fall. Grundsätzlich kann „naturnahen“ Bauweisen - z.B. einem als aufgelöste Riegelrampe ausgebildeten Querbauwerk - und „weichen“ Verschlusskonzepten (insbesondere Schlauchwehren) eine günstigere optische Wirkung und damit eine gegenüber klar erkennbaren Betonstrukturen und konventionellem Stahlwasserbau erhöhte Akzeptanz zugeordnet werden.

Merkmals C: Betriebsweise und dynamische Oberwassersteuerung

Die Dynamik der Wasserspiegellagen kann durch eine Steuerung des Oberwassers (OW) in Abhängigkeit des Abflusses erreicht werden (Abbildung 1). Dies ist grundsätzlich mit nahezu allen überströmbaren Verschlüssen möglich. Nichtsdestotrotz ergeben sich aus der dynamischen Oberwassersteuerung besondere Herausforderungen an die Konzeption der Anlage. Grundsätzlich ist diese Betriebsweise insbesondere dann zielführend, wenn der Oberwasserbereich ohne Stauhaltungsdämme gestaltet werden kann. Solche Situationen sind bei Projekten der Sohlstabilisierung gegeben, bei welchen einer bereits entwickelten Sohleintiefung durch eine Anhebung des Wasserspiegels nachhaltig entgegnet werden soll.

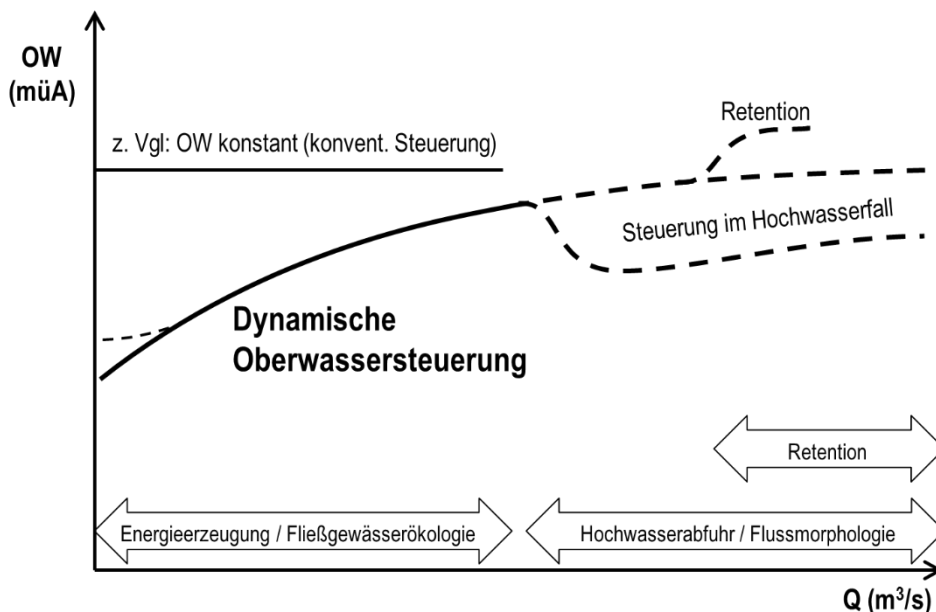


Abb. 1 Dynamische Oberwassersteuerung

Hier bietet sich insbesondere auch die Kombination mit Uferrückbaumaßnahmen und anschließender eigendynamischer Aufweitung an. In diesen Fällen wird durch die OW-Steuerung auch in einem gewissen Umfang eine Steuerung bzw. nachhaltige Beeinflussung der flussmorphologischen Entwicklung in den Aufweitungsstrecken möglich (Aufleger et al., 2012). Dieser Zusammenhang ist als ein wesentlicher und je nach Projektsituation möglicherweise höchst relevanter Vorteil von Sohlstabilisierungsmaßnahmen unter Einbeziehung von Wasserkraftanlagen mit niedrigen Fallhöhen zu sehen. Im Vergleich zu rein flussbaulichen Sanierungsvarianten kann durch ein Anheben oder Absenken des OW-Spiegels bei

geschiebeführenden Abflüssen unter anderem eine deutliche Einflussnahme auf laterale Erosionsvorgänge und in der Folge auch auf die Sohllagenentwicklung genommen werden. Die OW-Steuerung bietet grundsätzlich das Potential des Hochwasserrückhaltes im Hauptschluss, d.h. im Flussbett und den angrenzenden Vorländern. Die Wirksamkeit solcher Maßnahmen ist von den lokalen Randbedingungen abhängig. Gegebenenfalls kann jedoch, insbesondere durch die Anpassung wichtiger Anlagenteile (u.a. Verschlusshöhen), eine deutliche Rückhaltewirkung erreicht werden.

Merkmal D: Fischaufstieg

Der Fischaufstieg ist an Wasserkraftanlagen mit niedrigen Fallhöhen aufgrund der tendenziell eher kurzen Fischaufstiegsanlagen mit geringerem Aufwand als an anderen Anlagen verbunden. Zur Planung und Ausführung gut funktionierender Fischaufstiegsanlagen stehen umfassende Regelwerke bzw. Empfehlungen sowie eine große Anzahl von Referenzprojekten zur Verfügung.

Merkmal E: Fischschutz und –abstieg

Bei der flussabgerichteten Migration besteht im Gegensatz zum Fischaufstieg noch ein signifikanter Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Die Optimierung und Überprüfung verschiedener Fischschutz- und Abstiegskonzepte ist erforderlich, jedoch wird auch die grundsätzliche Frage nach der Notwendigkeit von Fischschutz- und Abstiegsmaßnahmen für potamodrome Arten an großen und mittleren Anlagen kontrovers diskutiert. Aufgrund der relativ geringen Mortalität für kleine Fischstadien an den vergleichsweise großen Turbinen sowie der Biologie der Fischarten (Größen der wandernden Stadien, Fortpflanzungsraten) wird die Notwendigkeit von Schutzmaßnahmen am Bauwerk (insbesondere bei relativ großen Wasserkraftanlagen) in Frage gestellt (Reckendorfer, 2014). Eine viel größere Bedeutung wird in diesen Einschätzungen habitatverbessernden Maßnahmen in den anschließenden Flussstrecken zugemessen. Grundlegende Untersuchungen hierzu sind erforderlich.

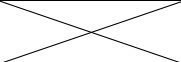
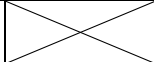
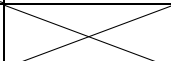
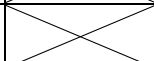
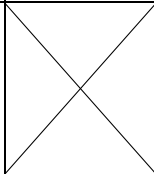
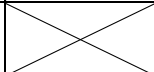
Dem Fischschutz kommt in den laufenden Genehmigungsverfahren von „ökologischen“ Wasserkraftanlagen und in der allgemeinen Akzeptanzdiskussion eine herausragende Bedeutung zu. Eine solche Anlage mit niedriger Fallhöhe braucht daher zwingend ein effektives Fischschutz- und Fischabstiegskonzept. Grundsätzlich kann durch ein „fischschonendes“ Anlagenmanagement, d.h. ein Reduzieren bzw. Einstellen der Stromerzeugung und Öffnen der Wehrfelder bei signifikanter Wanderbereitschaft der Fische ein deutlicher Beitrag zur Vermeidung von Fischschäden geleistet werden. Allerdings sind der Anwendung dieser Strategie an den im Rahmen dieses Beitrages behandelten inner- und voralpinen Kiesflüssen infolge der unzureichenden Vorhersagemöglichkeiten und des diffusen Charakters der Wanderbewegungen der hier relevanten Fischarten deutliche Grenzen gesetzt.

Turbinen unterscheiden sich in nicht unerheblichem Umfang hinsichtlich der Schädigungsraten. Bei Wasserkraftanlagen mit niedrigen Fallhöhen sind die kleinen Laufraddurchmesser und hohen Drehzahlen als ungünstig, die geringen Druckunterschiede eher als günstig für eine schadlose Turbinenpassage der Fische zu sehen. Ein Fischschutz- und Fischabstiegssystem muss für alle Fische, welche bei einem Durchgang durch die am jeweiligen Standort vorhandene Turbine mit vergleichsweise hoher Wahrscheinlichkeit geschädigt werden, eine sichere Ableitung (z.B. an einem geeigneten Rechen) und eine schadlose Weitergabe über einen Bypass in das Unterwasser sein. Grundsätzlich ist anzustreben, dass auch Fische,

welche mechanisch durch das „Trennsystem“ (z.B. Rechen) gelangen könnten, dennoch - insbesondere bedingt durch Verhaltensreize - dem Bypass aktiv zuschwimmen.

Für Wasserkraftanlagen mit niedrigen Fallhöhen eignet sich eine Reihe von Fischschutzkonzepten (Tabelle 3). Die große Mehrzahl der bekannten Konzepte umfasst rechenartige Strukturen, welche sowohl als Turbinen- als auch als Fischschutz wirken. Getrennte Systeme sind beispielsweise Scheucheinrichtungen, welche vor den zum Turbinenschutz notwendigen vergleichsweise groben Rechen angeordnet werden. Scheuchsysteme werden im vorliegenden Beitrag jedoch aufgrund der derzeit geringen praktischen Relevanz nicht weiter in die Betrachtung miteinbezogen.

Tab. 3 Fischschutzkonzepte an Wasserkraftanlagen mit niedrigen Fallhöhen (Aufleger, 2015)

		Kombinierter Fisch- und Turbinenschutz ¹⁾				Getrennte Systeme für Fischschutz und Turbinenschutz	
		Konventionelle Rechen	Flachrechen ²⁾	Horizontaler Rechen (~ Schachtkraftwerk)	Schrägrechen ³⁾	Fischschutz	Turbinenschutz
Fischleitwirkung	ohne Überströmung	keine direkte Ableitung	zu Bypass		zu Bypass	zu Bypass	
	mit Überströmung	nach oben	nach oben	über Rechen		zu Bypass	
Schwemmgutabfuhr		Rechenreinigung	Rechenreinigung	Direkte Abfuhr und Rechenreinigung	horiz. Rechenreinigung zu Bypass	Ablegen der Seile, Abfuhr in Richtung Unterwasser	Rechenreinigung
Wertung hinsichtlich Fischschutz		Eingeschränkte Leitwirkung zum Bypass, meist hohe Fließgeschwindigkeiten	Wirkung abh. von tats. Fließgeschwindigkeiten, je flacher umso bessere Leitwirkung nach oben	Wirkung abh. von tats. Fließgeschwindigkeiten, Praxisnachweis erforderlich	Wirkung abh. von tats. Fließgeschwindigkeiten, Leitwirkung bei Neigung gegenüber der Anströmrichtung	Wirkung abh. von tats. Fließgeschwindigkeiten, Praxisnachweis erforderlich, mögliche Verhaltensbarriere	
Kosten (ggfs. einschl. Rechenreinigung)		Referenzgröße	etwas höher	höher	höher	günstiger ⁴⁾	

¹⁾ Annahme: Stababstände Rechen: 15 – 20 mm

²⁾ Mit vertikal angeordneten Rechenstäben

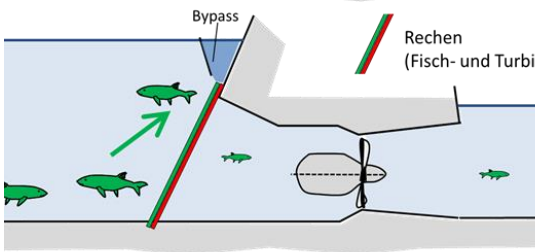
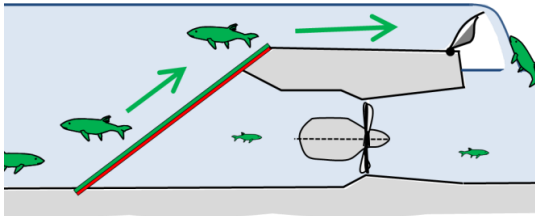
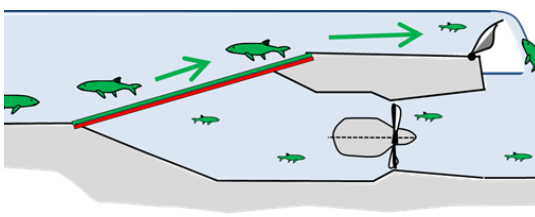
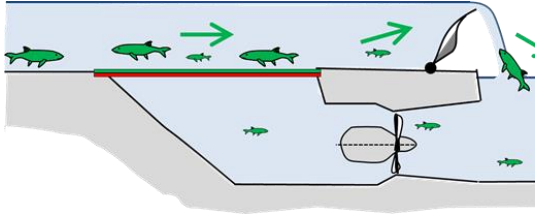
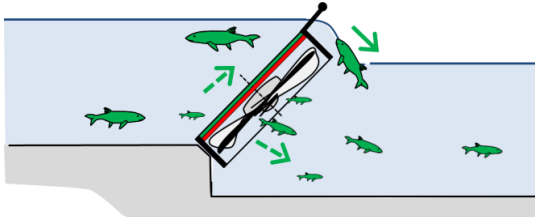
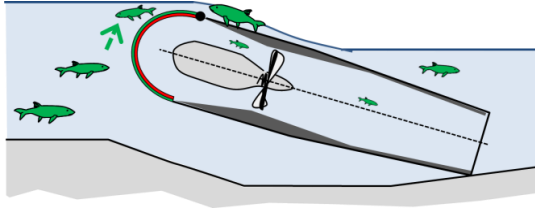
³⁾ Mit horizontal angeordneten Rechenstäben

⁴⁾ In Abhängigkeit der Standortbedingungen

Kombinierte Turbinen- und Fischschutzsysteme sind meist als Rechen, deren Stäbe grundsätzlich in Fließrichtung (projiziert auf den Grundriss) angeordnet sind, direkt am Einlauf zu den Turbinen positioniert (Tabelle 4). Falls keine Überströmung des Kraftwerks möglich ist, so sollte ein geeignetes Bypass-System für die Fische gut auffindbar sein. Bei überströmten Kraftwerken ist eine Ableitung der Fische über einen Überfall möglich. Die Stababstände haben eine direkte Wirkung auf den Anteil der kleineren Fische, welche den Rechen durchwandern und durch die Turbinen absteigen. Es ist davon auszugehen, dass ein signifikanter Anteil der im mechanischen Sinne „rechengängigen“ Fische die Rechenebene in allen dargestellten Situationen durchschwimmen wird. Grundsätzlich gelingt die Ableitung umso besser, je flacher der Rechen angeordnet ist und je geringer die Anströmgeschwindigkeiten sind. Die Geschwindigkeit bzw. der Abfluss, welcher über das Kraftwerk abgeführt wird, hat bei den typischen geneigten Flachrechen keinen direkten Einfluss auf die Ableitungswirkung (Cuchet et. al 2014). Hier sind daher bereits sehr geringe Abflüsse ausreichend um den Fischen den Weg ins Unterwasser über einen Überfall oder auch eine Sammelrinne zu ermöglichen. Je nach Überströmungshöhe und Abfluss sind insbesondere an Turbinen, welche sehr direkt am Oberwasserkörper (d.h. z.B. eine frei unter einem Flachrechen oder einem Horizontalrechen

angeordnete Kompaktturbine ohne Zulaufverziehung) positioniert sind, Maßnahmen zur Wirbelabwehr erforderlich. Dies kann durch eine deutliche Überströmung des Turbinen-einlaufes geschehen, welche dann zumindest bei Horizontalrechen auch eine grundsätzlich günstige Wirkung hinsichtlich der Ableitung der Fische über das Kraftwerk hinweg hat (Geiger et al., 2014).

Tab. 4 Kombiniertes Fisch- und Turbinenschutz, Konzepte im Längsschnitt (Aufleger, 2015)

Beschreibung	Systemskizze	
Steiler konventioneller Rechen		Nicht überströmbare Anlagen (mit Bypass)
Stärker geneigter konventioneller Rechen (bzw. „steiler Flachrechen“)		Überströmbare Anlagen (mit Ableitung der Fische nach oben)
Flachrechen mit Überströmung		
Horizontaler Rechen (bzw. „sehr flacher“ Flachrechen, ähnlich dem Schachtkraftwerk)		
Fischfreundliche Turbine mit direkt vorgesetztem Fisch- und Turbinenschutz (hier: Very Low Head –Turbine)		Schwenkbare Turbinen mit direkt vorgesetztem Rechen
Schwenkbare Turbine mit direkt vorgesetztem Fisch- und Turbinenschutz (hier: Bewegliches Kraftwerk)		

Dieser Abflussanteil, welcher fallweise bis zu etwa 10 % des Turbinenabfluss betragen kann, steht dann für die Energieerzeugung nicht zur Verfügung. Sinngemäß ist dieser Abflussanteil in die Beurteilung des Gesamtwirkungsgrades der Wasserkraftanlage mit einzubeziehen. Schwenkbaren Turbinen verfügen in der Regel über einen direkt aufgesetzten Rechen zum Fisch- und Turbinenschutz. Die Anforderungen an die Fischableitung sind bezüglich der Abstände der Rechenstäbe bei besonders fischschonenden Turbinen (z.B. Very Low Head Turbines) grundsätzlich niedriger als bei Turbinen konventioneller Bauart. Nichtsdestotrotz ist auch bei diesen Turbinen für große Fische eine geeignete Schutz- und Ableitungseinrichtung erforderlich. Ein regelmäßiges Anheben der schwenkbaren Turbinen nur aus Gründen der Fischableitung ist für den Normalbetrieb üblicherweise nicht vorgesehen. Der Fischabstieg sollte daher für alle Fische, welche die Turbine nicht mit einer sehr hohen Wahrscheinlichkeit unbeschadet direkt passieren können, durch eine geeignete dauerhafte Überströmung erfolgen.

Bei den aufgezeigten kombinierten Fisch- und Turbinenschutzkonzepten soll die Ableitung der Fische zunächst im Längsschnitt, d.h. in der Betrachtungsebene, erfolgen. Die Fische werden nach oben abgelenkt und gelangen dann mit der gleichmäßigen Überströmung oder aber auch in Abflusskonzentrationen im Bereich von Aussparungen in das Unterwasser. Eine Überströmung ist aus Gründen des Landschaftsbildes ohnehin oft gewünscht. Nichtsdestotrotz steht ein nicht unerheblicher Teil des Abflusses nicht mehr zur Energieerzeugung zur Verfügung. Je nach Turbineart und -anordnung kann es zudem schwierig sein, bei diesen Konzepten eine ausreichend niedrige Geschwindigkeit in der Rechenebene sicherzustellen (abhängig von Fischart und Rechenkonzept, häufig $v_{\text{soll}} < \text{ca. } 0,5 \text{ m/s}$).

Weitergehende Konzepte zielen darauf ab, die Ableitung der Fische bereits flussauf der eigentlichen Kraftwerksanlage durch geeignete Strukturen in die Wege zu leiten. Schrägrechen sind in der Regel sehr kostenintensive Baukonstruktionen, welche neben einem umfassenden Stahlwasserbau (Rechenkonstruktion mit Rechenreinigung) in der Regel auch noch erhebliche ergänzende Baumaßnahmen (u.a. Brücke, Pfeiler mit Gründung, Rechenreinigung) erfordern. Sie können nur bei nicht überströmbaren Anlagen zum Einsatz kommen und dienen sowohl dem Fisch- als auch dem Turbinenschutz. Neben vertikal und horizontal angeordneten Rechenstäben im Sinne konventioneller Rechen (allerdings mit sehr engen Rechenabständen von etwa 10 bis 40 mm) können auch Leitrechen unter Verwendung von Bar Rack- und Louver-Anordnungen zum Einsatz kommen. Die Anwendung dieser Strukturen, welche im nord-amerikanischen Raum häufige Verwendung finden, an Flüssen in der Schweiz ist Gegenstand eingehender wissenschaftlicher Untersuchungen (Kriewitz, 2015). Die vergleichsweise hohen hydraulischen Verluste infolge der zur Ausbildung der Fischleitwirkung notwendigen Turbulenzen haben jedoch gerade bei Wasserkraftanlagen mit niedrigen Fallhöhen einen signifikanten Einfluss auf die Energieerzeugung. Seilrechen befinden sich derzeit in der Entwicklung (Böttcher et al. 2014). Dieses Fischschutzsystem besteht aus horizontal gespannten Stahlseilen, welche mittels eines Spannsystems vollständig auf der Gewässersohle abgelegt werden können. Dadurch ist der Einsatz dieser Vorrichtung auch an überströmbaren Anlagen möglich, da im Hochwasserfall der Abflussquerschnitt vollkommen freigegeben werden kann. Seilrechen sind gegenüber Schrägrechen deutlich kostengünstiger. Die frei im Wasserkörper verlaufenden bis zu etwa 100 m langen Seile bieten ein erhebliches Potential zur Kombination mit Verhaltensreizen (insbesondere Schwingungen, Strom und Licht).

Merkmal D: Geschiebemanagement

Die vollkommene Geschiebedurchgängigkeit von „ökologischen“ Wasserkraftanlagen ist ein zwingendes Merkmal, um nachteilige Auswirkungen auf die Flussmorphologie zu vermeiden bzw. sehr deutlich zu begrenzen. Sobald sich im Oberwasser der Wasserkraftanlage ein dynamisches Gleichgewicht der Sohllage eingestellt hat, steht die grundsätzliche Geschiebedurchgängigkeit dann auch technisch bzw. flussmorphologisch nicht mehr in Frage. Bei entsprechend hohen Abflüssen wird der Geschiebezustrom vollkommen ins Unterwasser weitergegeben. Es hängt nun von der Auslegung und Formgebung sowie dem Anlagenbetrieb ab, auf welchen Wegen der Geschiebestrom durch die Anlage geht. Im Sinne einer nachhaltigen und störungsfreien Betriebsführung sollte dafür Sorge getragen werden, dass der lokale Geschiebetransport nicht auf dem Triebwasserweg erfolgt. Hierdurch kann ein Beitrag zu einer sehr langen technischen Lebensdauer des Laufrades und anderer der Strömung direkt ausgesetzten Bauteile geleistet werden. Es hängt nun von der Gewässerstrecke und insbesondere von dem tatsächlichen Feststoffdargebot ab, wie sehr zusätzliche Maßnahmen zum lokalen Geschiebemanagement im Kraftwerksbereich notwendig sind. Bei überströmbaren Anlagen wird der über dem Kraftwerksbereich zur Verfügung stehende Abflussquerschnitt in der Regel auch zur Hochwasserabfuhr herangezogen. Hieraus resultiert zwingend ein gegenüber nicht überströmbaren Anlagen höherer Geschiebezustrom in Richtung der Turbinen (Abbildung 2).

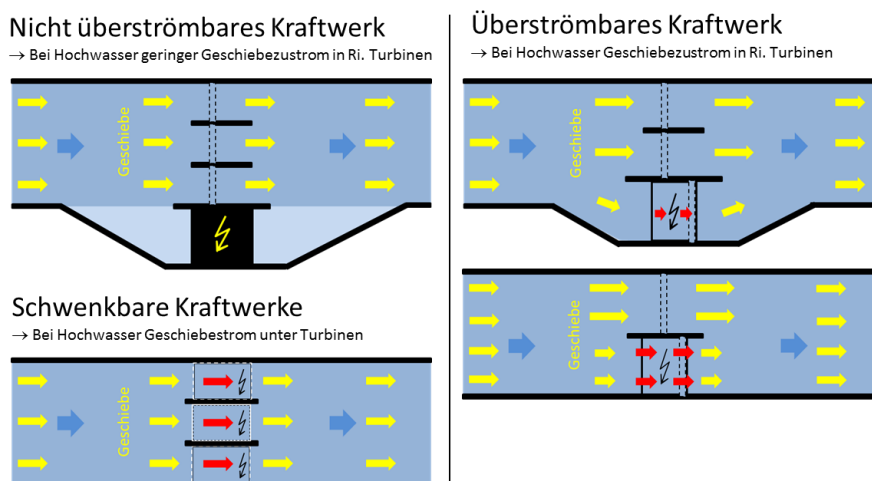


Abb. 2 Geschiebezustrom in den Kraftwerksbereich in Abhängigkeit der Überströmbarkeit (qualitative Darstellung, rote Pfeile: Geschiebetransport im unmittelbaren Nahbereich der Turbinen), (Aufleger et al., 2015)

Lokale Geschiebeablagerungen können den Kraftwerksbetrieb in erheblichem Maße beeinträchtigen. Grundsätzlich besteht die Möglichkeit solchen Ablagerungen durch Maßnahmen der Geschiebeführung bzw. -abweisung im Oberwasser (in Richtung der Wehrfelder), durch ein geeignetes Abflussmanagement oder aber auch mittels strömungslenkenden Maßnahmen im Unterwasser zu begegnen. Die zuverlässige Dimensionierung und Prognose der Gefahr von Ablagerungen im Unterwasser von Flusskraftwerken ist immer noch als eine technische Herausforderung zu sehen. Wasserbaulichen Modellversuchen in einem für die Untersuchung des Geschiebetransportes günstigen Maßstab kommt hier eine herausragende Bedeutung zu. Zur Vermeidung bzw. zur Begrenzung des Geschiebeeintritts in den unmittelbaren Turbinenbereich sind neben den Maßnahmen der Geschiebeabweisung im Oberwasser insbesondere gegenüber der Gewässersohle etwas erhöhte Turbineneinläufe bzw. Einlaufschwelen in Verbindung mit Geschiebeabzügen geeignet. Die Funktionsfähigkeit solcher zusätzlichen

Betriebseinrichtungen und die grundsätzliche Anfälligkeit von Wasserkraftanlagen mit niedrigen Fallhöhen gegenüber betrieblichen Problemen aufgrund lokaler Geschiebeablagerungen hängen nun insbesondere von der morphologisch wirksamen Tiefe der Turbinenein- und -ausläufe (Abbildung 3) sowie dem noch verbleibenden Gefälle bei den geschiebewirksamen Abflüssen sowie den hydraulischen Randbedingungen bei den potentiellen Spülabflüssen ab. Bei sehr großen Höhenunterschieden – d.h. einer gegenüber dem Turbinenbereich sehr hohen Sohlkote im Unterwasser – ist der Geschiebeabzug möglicherweise aufgrund des negativen Gefälles der Sohle im Bereich der Spülkanäle bzw. der daran in Richtung Unterwasser anschließenden Sohle signifikant beeinträchtigt. Kompaktturbinen bieten in diesem Zusammenhang das Merkmal einer vergleichsweise geringen Einbautiefe (Abbildung 3). Hieraus ergeben sich klare Vorteile hinsichtlich des Geschiebemanagements im Nahbereich des Kraftwerks. Bei größeren Ausbauabflüssen sind allerdings mehrere Kompaktturbinen nebeneinander erforderlich. Hieraus resultiert mitunter eine signifikante Bauwerksbreite der Kraftwerke („breit statt tief“). In Modellversuchen hat sich gezeigt, dass die Kombination von Kompaktturbinen und Geschiebeabzügen gute Voraussetzungen für ein nachhaltiges lokales Geschiebemanagement bieten kann (Brinkmeier, 2012).

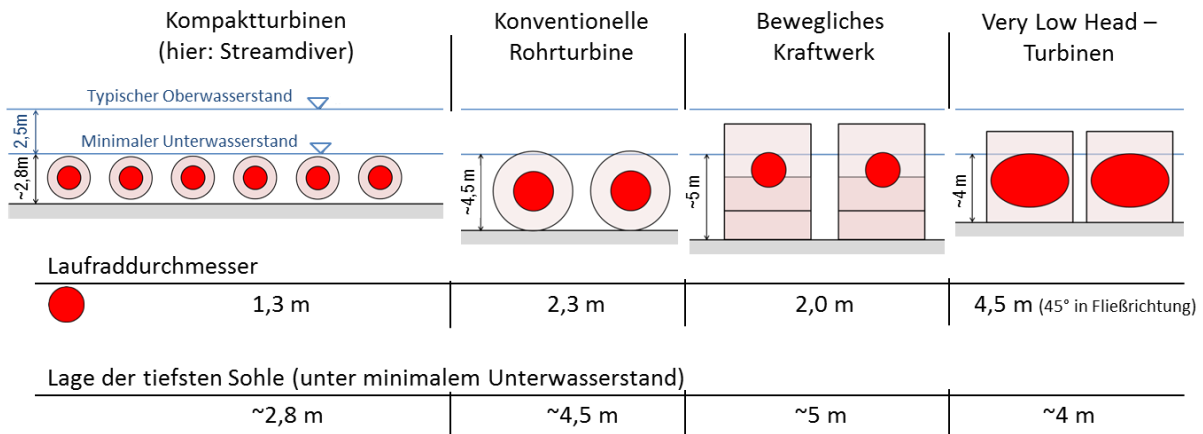


Abb. 3 Ungefähre Lage der tiefsten Sohle im Kraftwerksbereich unter dem minimalen Unterwasserstand bei unterschiedlichen Turbinen (grobe Abschätzung für Ausbauabfluss $Q_A = 45 \text{ m}^3/\text{s}$ und Rohfallhöhe $H = 2,5 \text{ m}$)

4 Schlussfolgerungen

Wasserkraftanlagen mit niedrigen Fallhöhen eignen sich, um gewässerökologische Aspekte in hohem Maße zu berücksichtigen. Besonders an bereits durch Quer- und Längsbauwerke stark veränderten Gewässerstrecken kann im Zuge von Wasserkraftprojekten eine Verbesserung der morphologischen und hydraulischen Situation im Sinne einer ökologischen Aufwertung erreicht werden. „Ökologische“ Wasserkraftanlagen sind möglich. Allerdings definieren sich diese in keiner Weise durch Schlagworte, welche sich auf singuläre Eigenschaften der Anlagen beziehen (wie zum Beispiel spezielle Turbinentypen oder Einlaufformen). Es geht vielmehr darum, den diesen Anlagen gestellten Erwartungen möglichst gut gerecht zu werden. Eine Reihe dieser Kriterien und Erwartungshaltungen (z.B. Fließgewässercharakter, dynamisches Oberwasserspiegel, Berücksichtigung von Flussmorphologie und Habitaten, Landschaftsbild) kann mit sehr unterschiedlichen Konzepten erfüllt werden. Besonderes Augenmerk ist sicherlich dem Fischschutz sowie – in Abhängigkeit der gewässermorphologischen Randbedingungen – auch dem lokalen Geschiebemanagement zu schenken. Hier sind maßgeschneiderte Lösungen notwendig. Wichtige Schritte auf dem Weg zu einer erfolgreichen

Implementierung gut funktionierender „ökologischer“ Wasserkraftanlagen mit niedrigen Fallhöhen sind unter anderem hydraulische Modellversuche zum lokalen Geschiebemanagement, die Weiterentwicklung von Fischschutz- und -ableitungssystemen (einschließlich ethohydraulischer Versuche) sowie ein umfassendes Monitoring an Pilotanlagen. Am wichtigsten sind jedoch die Bereitschaft, die Offenheit und der Mut solche Anlagen auf den Weg zu bringen.

Literatur

Aufleger, Markus; Gems, Bernhard; Klar, Robert (2012): Flussaufweitungen als flussbauliche Methode – Grundsätze und Werkzeuge. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft. Heft 7-8/2012, S. 363-378

Aufleger, Markus; Brinkmeier, Barbara (2015): Wasserkraftanlagen mit niedrigen Fallhöhen – Verschiedene Konzepte im kritischen Vergleich. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft. Heft 7-8/2015, S. 281-291

Böttcher, Heidi; Brinkmeier, Barbara; Markus Aufleger (2014): Der Seilrechen als neues Fischschutzkonzept – Untersuchung der technischen Machbarkeit. Internationales Symposium Wasser- und Flussbau im Alpenraum. 25.-27. Juni 2014 in Zürich, Tagungsband 1 Wasserkraft und Gewässerrenaturierung. S 227 – 236.

Brinkmeier, Barbara (2012): Wasserkraftnutzung an ökologisch sensiblen und erosionsbedingt sanierungsbedürftigen Standorten – Das Konzept des Fließgewässerkraftwerkes. Forum Umwelttechnik und Wasserbau. Vol. 16. Innsbruck University Press. ISBN 978-3-902811-76-9.

Cuchet, Mathilde; Rutschmann Peter (2014): Laboruntersuchungen zu Fischschutz und Fischabstieg an geneigten Rechen. Internationales Symposium Wasser- und Flussbau im Alpenraum. 25.-27. Juni 2014 in Zürich, Tagungsband 1 Wasserkraft und Gewässerrenaturierung. S 283 – 293.

Geiger, Franz; Sepp, Albert, Rutschmann Peter (2014): Prototypanlage Schachtkraftwerk – Konzept Mehrschachtanlage. Internationales Symposium Wasser- und Flussbau im Alpenraum. 25.-27. Juni 2014 in Zürich, Tagungsband 1 Wasserkraft und Gewässerrenaturierung. S 169 – 181.

Kriewitz, Carl Robert (2015). Leitrechen an Fischabstiegsanlagen. Hydraulik und fischbiologische Effizienz. VAW-Mitteilungen 230, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), (R.M. Boes, ed.), ETH Zürich, Schweiz.

Overhoff, Gregor; Keller, Thomas (2015): „Ökologische optimierte Wasserkraft“ – Innovationsvorhaben in Bayern. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, Heft 7-8/2015

Reckendorfer, Walter (2014): Potamodrome Fischarten, Populationsökologie. Vortrag beim Forum Fischschutz & Fischabstieg, Erfurt, 23.09.2014, <http://forum-fischschutz.de/5-workshop/praesentationen> (7.5.2015)

Anschrift der Verfasser

Prof. Dr.-Ing. Markus Aufleger

Dipl.-Ing. Dr.techn. Barbara Brinkmeier

Arbeitsbereich Wasserbau, Universität Innsbruck

Technikerstraße 13, 6020 Innsbruck, Österreich

markus.aufleger@uibk.ac.at, barbara.brinkmeier@uibk.ac.at