

Statkraft

# AALSCHONENDES BETRIEBSMANAGEMENT

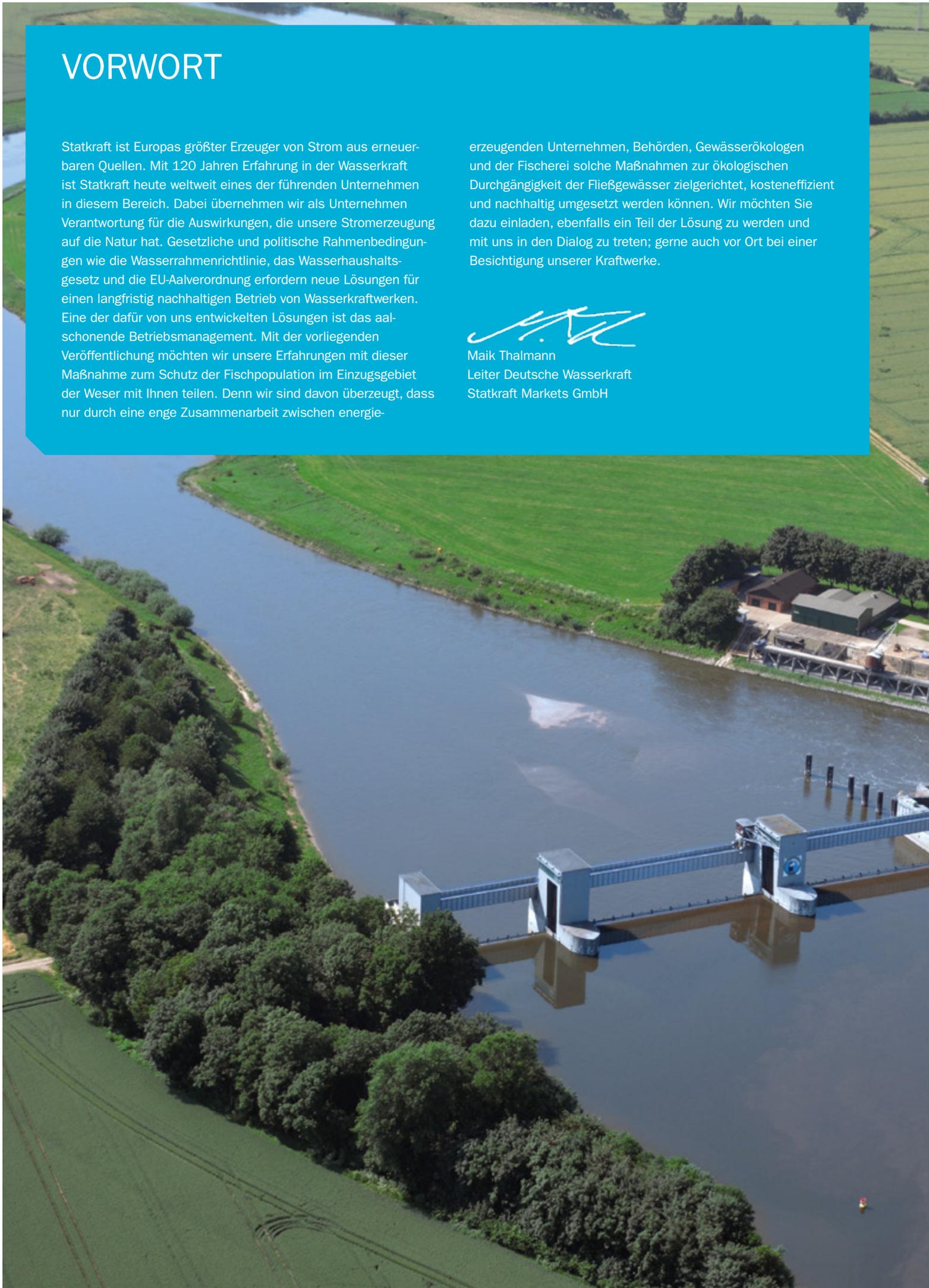


# VORWORT

Statkraft ist Europas größter Erzeuger von Strom aus erneuerbaren Quellen. Mit 120 Jahren Erfahrung in der Wasserkraft ist Statkraft heute weltweit eines der führenden Unternehmen in diesem Bereich. Dabei übernehmen wir als Unternehmen Verantwortung für die Auswirkungen, die unsere Stromerzeugung auf die Natur hat. Gesetzliche und politische Rahmenbedingungen wie die Wasserrahmenrichtlinie, das Wasserhaushaltsgesetz und die EU-Aalverordnung erfordern neue Lösungen für einen langfristig nachhaltigen Betrieb von Wasserkraftwerken. Eine der dafür von uns entwickelten Lösungen ist das aal-schonende Betriebsmanagement. Mit der vorliegenden Veröffentlichung möchten wir unsere Erfahrungen mit dieser Maßnahme zum Schutz der Fischpopulation im Einzugsgebiet der Weser mit Ihnen teilen. Denn wir sind davon überzeugt, dass nur durch eine enge Zusammenarbeit zwischen energie-

erzeugenden Unternehmen, Behörden, Gewässerökologen und der Fischerei solche Maßnahmen zur ökologischen Durchgängigkeit der Fließgewässer zielgerichtet, kosteneffizient und nachhaltig umgesetzt werden können. Wir möchten Sie dazu einladen, ebenfalls ein Teil der Lösung zu werden und mit uns in den Dialog zu treten; gerne auch vor Ort bei einer Besichtigung unserer Kraftwerke.

Maik Thalmann  
Leiter Deutsche Wasserkraft  
Statkraft Markets GmbH



**Vorwort** 2

**1. Einleitung** 5

**2. Der Aal** 6

**3. Wasserkraftwerk und Aale** 11

**4. Aalschonender Betrieb im Wesereinzugsgebiet** 16

4.1 Aufbau und Funktionsweise des MIGROMAT® 16

4.2 Laufwasserkraftwerk Wahnhausen an der Fulda 20

4.3 Laufwasserkraftwerk Werrawerk an der Werra 20

4.4 Laufwasserkraftwerk an der Mittelweser 21

**5. Ergebnisse** 22

5.1 Theoretische Modellierung Betriebsmanagement 22

5.2 Abwanderungsalarme MIGROMAT® 23

5.3 Fangergebnisse an der Weser 24

5.4 Kosten des aalschonenden Betriebsmanagements 29

**6. Fazit** 29

**7. Literaturverzeichnis** 30

**Danke** 32

**Anhang** 33



Luftaufnahme des Laufwasserkraftwerkes Dörverden



Satellitenbild des Laufwasserkraftwerkes Dörverden

# 1. EINLEITUNG

Der norwegische Energiekonzern Statkraft ist Europas größter Erzeuger erneuerbarer Energie und weltweit führend im Bereich Wasserkraft. In Deutschland betreibt das Tochterunternehmen Statkraft Markets GmbH unter anderem neun Laufwasserkraftanlagen an vier Fließgewässern im Einzugsgebiet der Weser. Die sechs Laufwasserkraftwerke Langwedel, Dörverden, Drakenburg, Landesbergen, Schlüsselburg und Petershagen liegen an der Mittelweser, Wahnhausen an der Fulda, Affoldern an der Eder sowie das Werrawerk an der Werra. Statkraft hat das Ziel, mit technisch umsetzbaren und kosteneffizienten Lösungen einen Beitrag zum Fischschutz und damit zur Verbesserung der allgemeinen Gewässerökologie zu leisten, ohne dabei die Erzeugungskapazität zu gefährden. Dafür hat das Unternehmen nachhaltige Konzepte entwickelt, die besonders dem Schutz der Aale in der Weser dienen sollen.

Die Weser hat ihre Quellflüsse Werra und Fulda im deutschen Mittelgebirge. Diese vereinen sich bei Hannoversch Münden, durchfließen das norddeutsche Tiefland und münden bei Bremerhaven in die Nordsee. Die Weser ist eine Bundeswasserstraße und zugleich ein wichtiges Gewässer für den katadromen Europäischen Aal (*Anguilla anguilla*). Der Europäische Aal ist vom Aussterben bedroht. Dabei sind die Gefährdungsursachen komplex und vielfältig und wirken auf den gesamten Lebenszyklus der Aale. Die anthropogene Mortalität entsteht unter anderem durch Überfischung an den Küsten, schlechte Wasserqualität, unzureichende Habitatqualität und -quantität, Blankaalfischerei und Nutzung der Fließgewässer durch Wasserkraftwerke.

Mit dieser Publikation stellt Statkraft einen alternativen Lösungsansatz vor, mit dem die anthropogene Mortalität des Europäischen Aals während seiner

Abwanderung wirksam reduziert wird und der gleichzeitig ein kosteneffizientes Fischschutzkonzept darlegt. Dieser sogenannte aalschonende Betrieb (ASB) an Laufwasserkraftwerken erhöht die Überlebensrate der abwandernden Aale, ohne in ihr natürliches Wanderverhalten einzugreifen. Für den Kraftwerksbetreiber erfordert die Umsetzung des aalschonenden Betriebs ein hohes Maß an technischen, vor allem standortspezifischen Kenntnissen (*Anhang 1*). Die Laufwasserkraftwerke von Statkraft liegen im Wandergebiet des Aals. Sie sind in der Lage, automatisch von Normalbetrieb in aalschonenden Betrieb zu wechseln. Das ermöglicht Statkraft eine wirtschaftliche und effiziente Lösung zu schaffen, die zum Populationserhalt des Europäischen Aals beiträgt.



Bild 1: Laufwasserkraftwerk Drakenburg an der Weser

## 2. DER AAL

Der Europäische Aal ist ein katadromer Wanderfisch mit einem komplexen Lebenszyklus, der bis heute nur teilweise erforscht ist (Bild 2). Zudem ist der Aal mit einer Lebenserwartung von annähernd zwei Jahrzehnten eine besonders langlebige Art. Veränderungen im Bestand machen sich dadurch nur schleichend bemerkbar und werden erst nach langer Zeit offensichtlich. Die Aale schlüpfen in der Sargassosee, schwimmen als Weidenblatt-Larven zu den Küsten Europas und wachsen dort zu circa sieben Zentimeter langen Glasaalen heran.

Im Frühjahr wandern sie als Steigaale flussaufwärts in die europäischen Binnengewässer. In ihren neuen Heimatgewässern wachsen sie die nächsten Jahre zur vollen Größe und Geschlechtsreife heran. Weibliche Tiere werden mit 12 bis 15 Jahren geschlechtsreif, männliche bereits im Alter von sechs bis neun Jahren. Männchen erreichen eine Länge von circa 60 Zentimetern, Weibchen hingegen werden bedeutend größer (bis zu 150 Zentimeter und können bis zu sechs Kilogramm schwer werden). In den Aufwuchshabitaten suchen die

dämmerungs- und nachtaktiven Fische den Gewässergrund nach wirbellosen Tieren wie Schnecken, Muscheln und Krebsen ab; zum Teil fressen sie auch Fische. Wenn die Geschlechtsreife eintritt, wandern die Tiere als Blankaale über die Flüsse in Richtung Küste und von dort zum Ablaichen in die Sargassosee zurück. Diese Wanderungen geschehen in der Regel während der Nachtstunden in den Monaten September bis Februar. Während der Abwanderung nimmt der Aal keine Nahrung mehr zu sich. Vermutlich sterben die Aale nach dem Laichen.

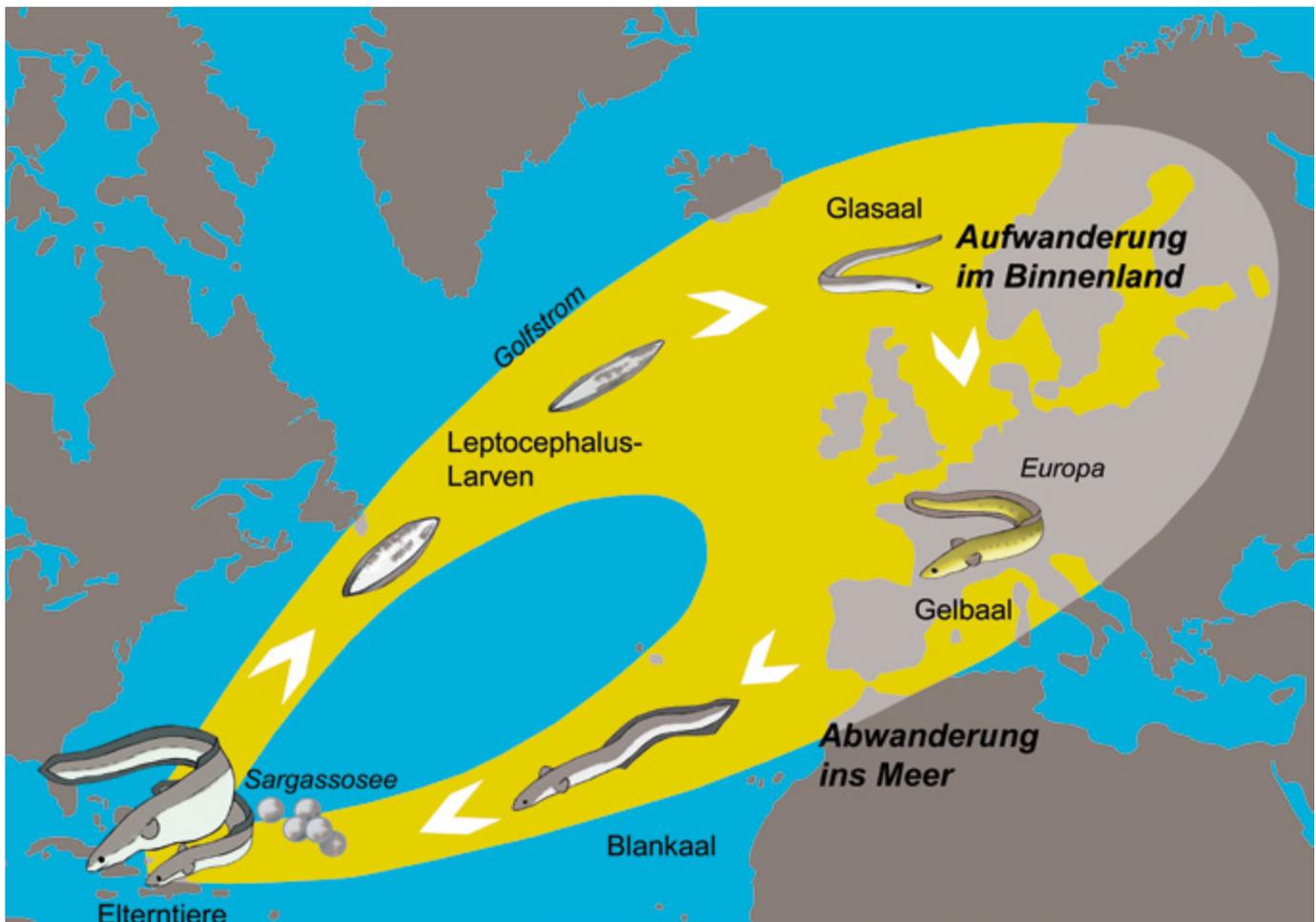


Bild 2: Lebenszyklus des Europäischen Aals (*Anguilla anguilla*) (THORSTAD et al. 2010)

## PRÄMIGRATORISCHE UNRUHE DER AALE

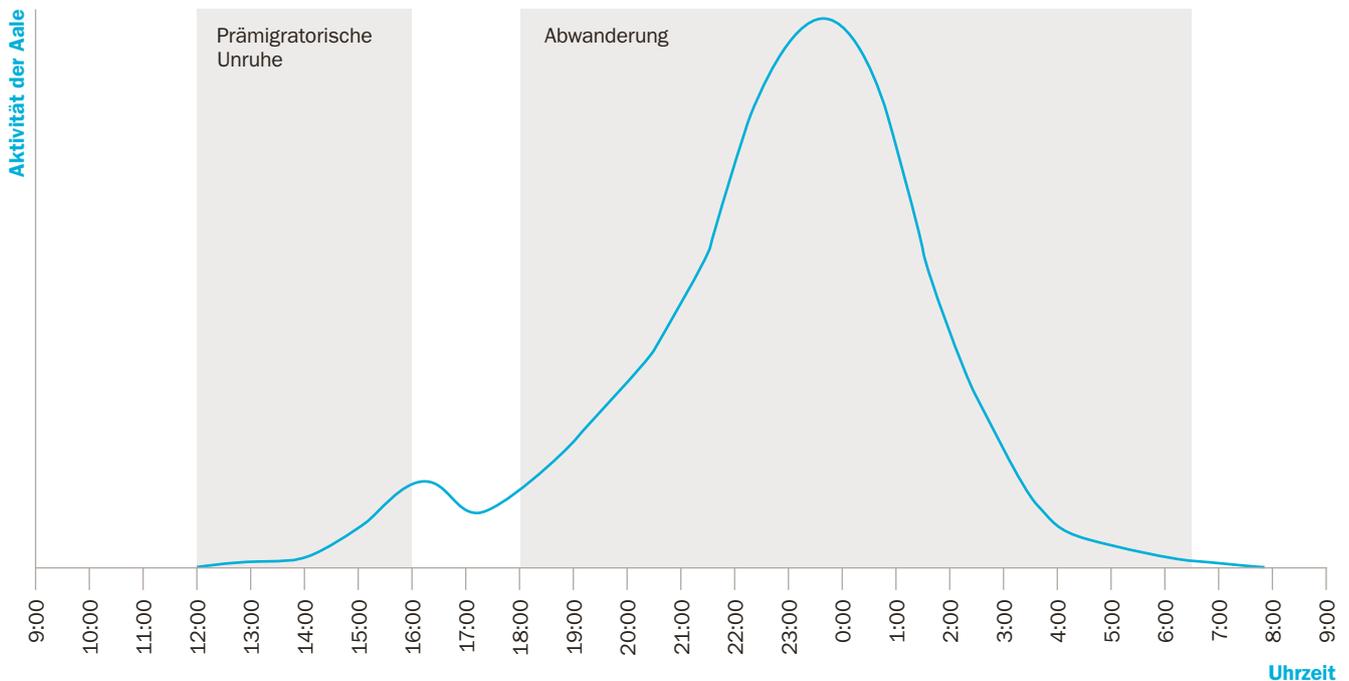


Bild 3: Idealisierter Verlauf eines Abwanderereignisses des Europäischen Aals (*Anguilla anguilla*) (B. ADAM 2006)

Bevor die Abwanderungsphase flussabwärts beginnt, zeigen die Tiere eine charakteristische Verhaltensweise, die als prä migratorische Unruhe bezeichnet wird (Bild 3). Diese beginnt in der Regel nachmittags. Die eigentliche Abwanderung startet aber meist nach Einbruch der Dämmerung, erreicht ihren Höhepunkt um Mitternacht und flaut danach sehr schnell ab.

Die Abwanderung von Aalen erfolgt unregelmäßig über das Jahr verteilt. Erste, kleinere Abwanderereignisse können sich bereits im Spätsommer ereignen, aber die Hauptabwanderung findet in den Monaten November bis Januar statt. Pro Saison gibt es in der Regel eine bis drei Hauptabwanderwellen, bei denen insgesamt weit mehr als 50 Prozent der Blankaale abwandern. In der Hauptabwanderungszeit ist

verschiedentlich zu beobachten, dass die Wanderaktivität in den Morgenstunden nicht abbricht, sondern auch tagsüber allenfalls leicht vermindert anhält. Für die Fulda sind Abwanderwellen von beträchtlichem Ausmaß bis Ende Februar dokumentiert. Danach ist die Abwandersaison nach derzeitigem Kenntnisstand beendet. Aale brechen ihre Abwanderung vor allem in mehrfach gestauten Flüssen häufig für längere Zeit ab, sodass ein Teil von ihnen mehr als eine Saison benötigt, um das Meer zu erreichen (HARO 2003, BRUIJS et al. 2003).

Europaweit wurden Maßnahmen zum Schutz des Bestandes des Europäischen Aals beschlossen. Ziel hierbei ist es, „die anthropogene Mortalität zu verringern und so mit hoher Wahrscheinlichkeit die Abwanderung von mindestens 40 Prozent

derjenigen Biomasse an Blankaalen ins Meer zuzulassen, die [...] ohne Beeinflussung des Bestands durch anthropogene Einflüsse ins Meer abgewandert wäre“ (KOMMISSION DER EUROPÄISCHEN GEMEINSCHAFTEN 2003). Die in Deutschland verantwortlichen Fischereiverwaltungen haben für jedes Gewässersystem einen Bewirtschaftungsplan für den Aal erstellt. Für die Flüsse Oder, Elbe, Warnow/Peine, Schlei/Trave, Eider, Weser, Ems sowie Rhein und Maas sehen diese Pläne primär die Intensivierung von Besatzmaßnahmen zur Wiederauffüllung der Bestände sowie eine Erhöhung des Schonmaßes für gefangene Aale vor ([www.portal-fischerei.de/](http://www.portal-fischerei.de/) vom 4. Januar 2014).

## ANTHROPOGENE EINFLÜSSE AUF DEN BLANKAAL IM BINNENLAND

Für den Bestandsrückgang beim Aal lassen sich mehrere Faktoren benennen, allerdings wird hier größtenteils auf die für den Blankaal relevanten Zusammenhänge hingewiesen.

- 1 Laufwasserkraftwerk
- 2 Berufsfischer / Schokker
- 3 Angler
- 4 Kormorane
- 5 Wasserqualität
- 6 Schifffahrt
- 7 Kühlwasserentnahmen

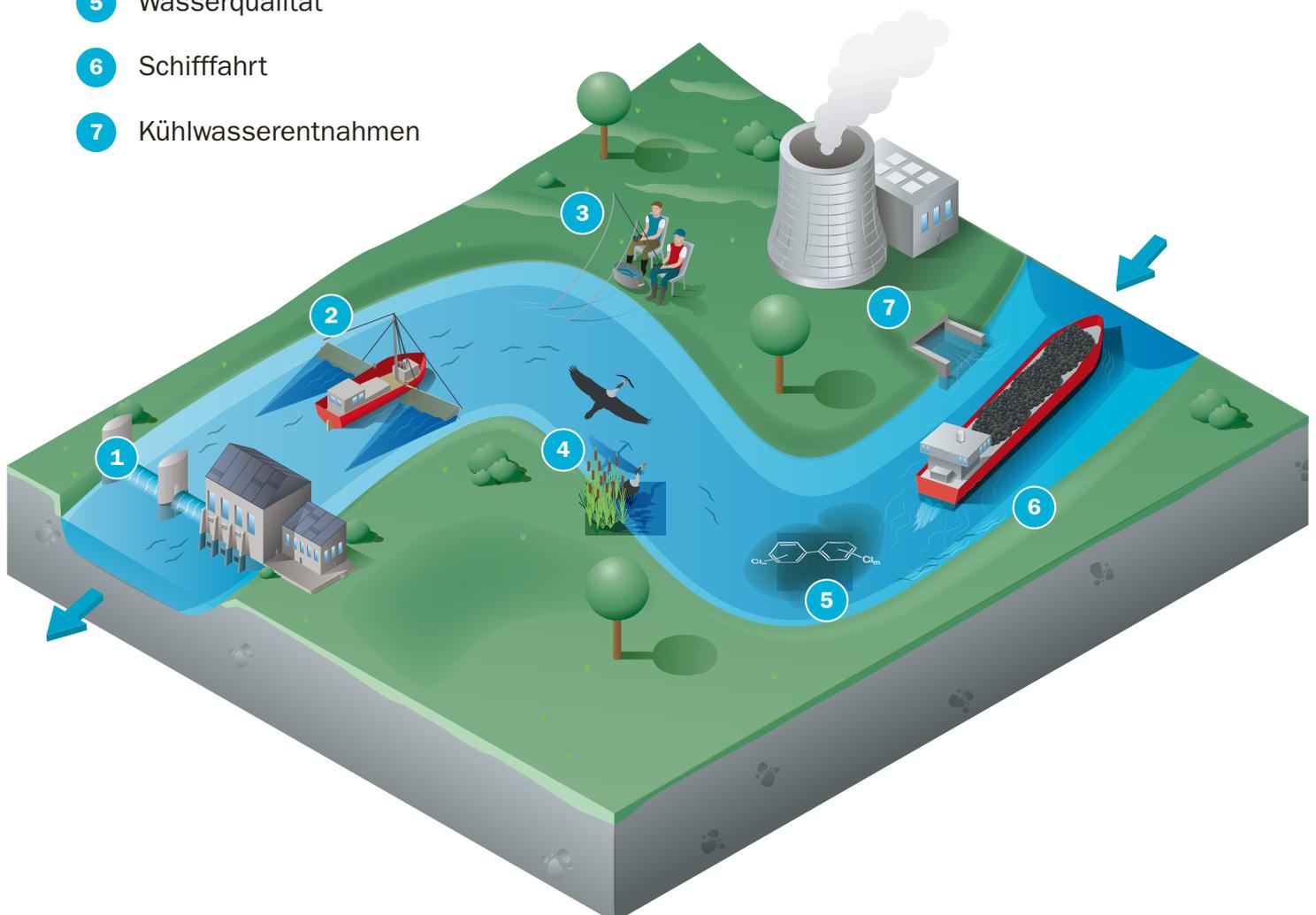


Bild 4: Verschiedene Gefährdungsursachen für den Bestand des Europäischen Aals (*Anguilla anguilla*) in Bundeswasserstraßen (Quelle: Statkraft)

### Fischerei (2/3)

In der Mittelweser ergab eine Auswertung der leider unvollständigen Fangaufzeichnungen aus dem Zeitraum 1979 bis 2006, dass Berufsfischer und Angler im Jahresdurchschnitt circa 55 Kilogramm Aal pro Hektar Gewässerfläche fangen. Das Mittelweser-Gebiet hat eine Gewässerfläche von 940 Hektar. Somit werden rund 51,7 Tonnen Aal pro Jahr durch die Fischerei entnommen (SCHWEVERS et al. 2008).

Auf Basis der Aalbewirtschaftungspläne der deutschen Bundesländer wird versucht, die fischereiliche Mortalität zu reduzieren – zum Beispiel durch die Einführung von Schonzeiten und eine Erhöhung des Schonmaßes. Allerdings fallen solche Regelungen und deren Umsetzung in die Zuständigkeit der einzelnen Bundesländer (FLADUNG et al. 2012). Für die Weser ist berechnet worden, dass 62 Prozent des Aalbestandes (261 Tonnen) die Nordsee erfolgreich erreicht (AALBEWIRTSCHAFTUNGSPLANE DER DEUTSCHEN LÄNDER 2007).

### Kormorane (4)

Von besonderer Bedeutung als Prädator von Fischbeständen ist der Kormoran (*Phalacrocorax carbo*). Nachdem er im Jahr 1979 europaweit durch die EU-Vogelschutzrichtlinie unter Schutz gestellt wurde, hat sich sein Bestand im Binnenland zunächst sehr stark erhöht und hält sich seit circa 10 Jahren auf hohem Niveau. In kleineren Mittelgebirgsflüssen kann der Fraßdruck des Kormorans sehr hoch werden und zu drastischen Bestandseinbrüchen der Fischfauna führen (SCHWEVERS & ADAM 1998 und 2003).

### Wasserqualität (5)

Viele Substanzen gelangen in erheblichem Umfang in die Gewässer und gefährden dort die Fischfauna. Der Aal hat im Gegensatz zu anderen Fischarten einen besonders hohen Fettanteil, dadurch können sich in seinem Körper fettlösliche Schadstoffe, wie Schwermetalle oder organische Verbindungen wie polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAKs), polychlorierte Biphenyle (PCBs) und Dioxine in wesentlich höheren Konzentrationen anreichern.

Hohe Schadstoffkonzentrationen im Gewebe sind für die Gesundheit des Aals sehr gefährlich. Auf seiner gesamten Laichwanderung bis in die Sargassosee nimmt er keine Nahrung mehr zu sich, sondern lebt von seinen Fettreserven. Diese werden sukzessive abgebaut, setzen die Schadstoffe aus dem Fettgewebe im Körper frei und lassen dadurch die Schadstoffkonzentration im Körper immer weiter ansteigen, so dass die Gefahr einer inneren Vergiftung besteht.

### Schifffahrt (6)

Auch die Schifffahrt auf Bundeswasserstraßen beeinträchtigt die Fischfauna erheblich. Die von den Schiffen ausgelösten Wellen verursachen starke Strömungen entlang der Uferlinie. Dadurch wird dieser Lebensraum insbesondere als Aufwuchshabitat für Jungfische stark entwertet (WOLTER & ARLINGHAUS 2003). Die Schiffe lösen Hub- und Sunkwellen aus, die in angebundenen Altarmen, Bühnenfeldern und Abgrabungsgewässern starke Wasserstandsschwankungen hervorrufen und somit die Habitatqualität ebenfalls herabsetzen (SCHWEVERS & ADAM 1998). Darüber hinaus besteht die Gefahr, dass Fische durch direkten Kontakt mit der Schiffsschraube oder durch in deren Nahbereich auftretende Scherkräfte verletzt und getötet werden (PIANC 2008).

### Wasserentnahmebauwerke und Einläufe von Wasserkraftwerken (7)

Flussabwärts in Richtung Meer wandernde Blankaale sind besonders gefährdet in wasserbauliche Anlagen zu geraten und hier verletzt oder getötet zu werden. Allein im Verlauf der Bundeswasserstraßen, die von den Aalen durchwandert werden müssen, stehen die 200 größten Laufwasserkraftwerke Deutschlands. Hinzu kommen unzählige Entnahmebauwerke, die Brauch- oder Kühlwasser aus den Flüssen entnehmen. Die Entnahmebauwerke sind in der Regel mit Rechen ausgestattet, welche die dahinter liegenden Anlagenteile vor Treibgut schützen. Allerdings ist die Stabweite der Rechen in vielen Fällen zu breit, um als physische Barriere für Aale zu dienen. Freilanduntersuchungen belegen, dass manche dieser wasserbaulichen Anlagen der Fischfauna einen nicht unerheblichen Schaden zufügen können (MÖLLER et al. 1991; HOLZNER 1999).

## GLASAALFISCHEREI

Der Aal ist wirtschaftlich einer der bedeutendsten Speisefische, der in den Küsten- und Binnengewässern gleichermaßen durch Berufs- und Angelfischer gefangen wird. Eine künstliche Vermehrung des Aals ist bis heute nicht möglich. Daher stammen alle weltweit vermarkte-

ten Aale aus den natürlich vorkommenden Glasaalbeständen an den Küsten. Deshalb ist der Bedarf an Satzaalen hoch und wird durch die Nachfrage aus asiatischen Ländern zusätzlich gesteigert. Dort sind die Aalbestände vollständig überfischt. Zum Schutz der Glasaalbe-

stände des Europäischen Aales wurde daher der Export in außereuropäische Länder verboten.



Bild 5: Alljährliche Jagd auf Glasaale auf der Seeseite des Sperrwerks von Arzal in der französischen Vilaine (Foto: C. Briand)

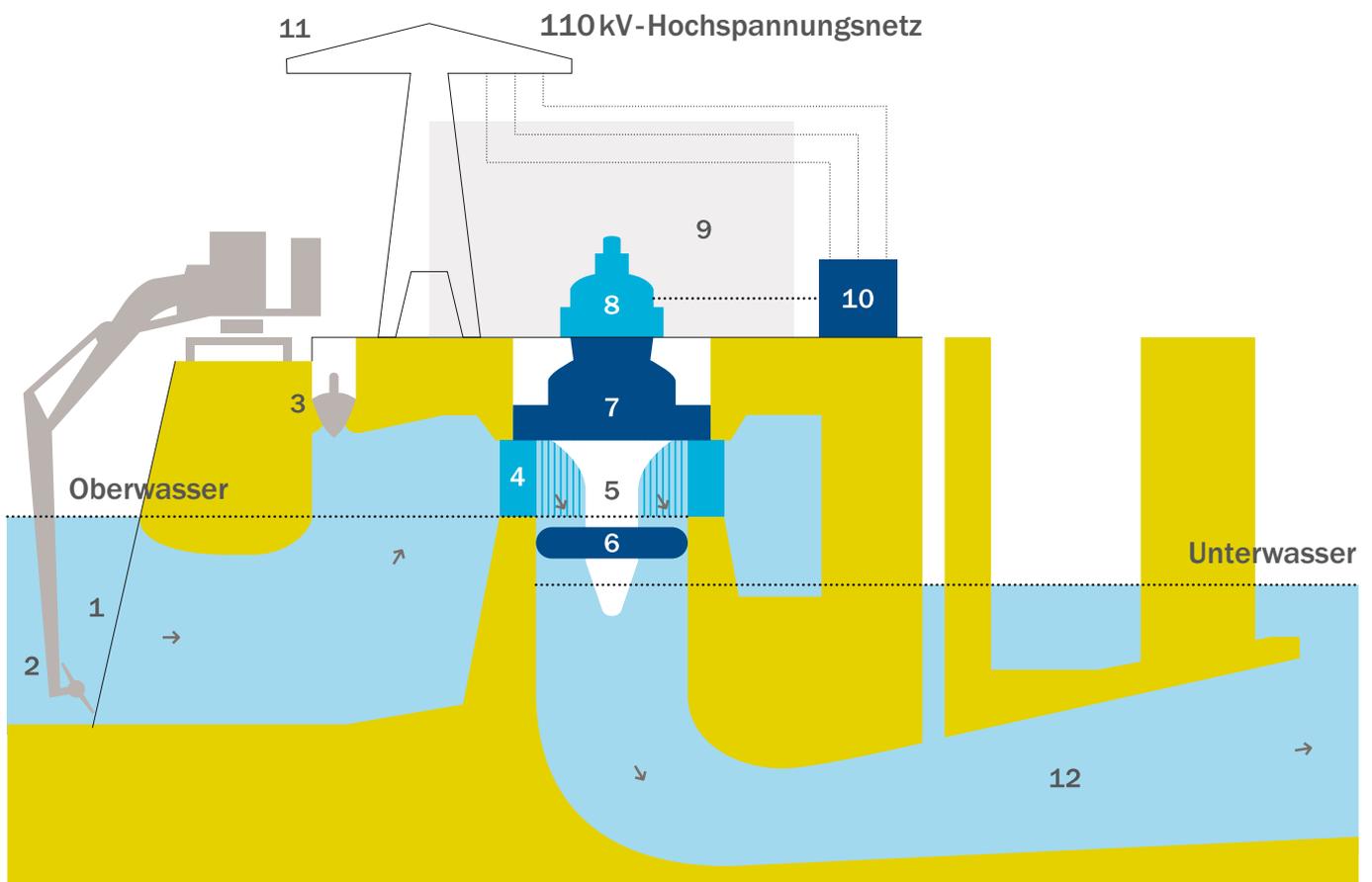
### 3. WASSERKRAFTWERKE UND AALE

An den deutschen Bundeswasserstraßen werden Stauanlagen hauptsächlich errichtet, um die Schifffahrt zu ermöglichen. Die Wehrkörper halten das Wasser zurück, und die Betreiber der oft danebenliegenden Wasserkraftwerke sind dafür zuständig, den Wasserpegel konstant und damit die Flüsse schiffbar zu halten.

Ein Laufwasserkraftwerk nutzt die Bewegung des Wassers zur Erzeugung elektrischer Energie. Der Wasserdruck, der bei der Überwindung natürlicher oder künstlich geschaffener Höhenunterschiede entsteht, setzt ein Turbinenrad in Betrieb und treibt damit einen Generator an, der Strom erzeugt (Bild 6). Die Energieerzeugung ist maßgeblich von dem im Gewässer zur Verfügung stehenden Abfluss und der nutzbaren Fallhöhe abhängig.

Darüber hinaus spielt auch der eingesetzte Turbinentyp eine wichtige Rolle für den Wirkungsgrad. In den Laufwasserkraftwerken von Statkraft sind aufgrund der geringen Fallhöhen größtenteils Kaplanturbinen eingesetzt (siehe Tabelle 1).

#### FUNKTIONSSCHEMA EINES LAUFWASSERKRAFTWERKS



- |                    |                 |                  |                      |
|--------------------|-----------------|------------------|----------------------|
| 1 Einlaufrechen    | 4 Leitschaufeln | 7 Getriebe       | 10 Transformator     |
| 2 Rechenreinigung  | 5 Turbine       | 8 Generator      | 11 Hochspannungsnetz |
| 3 Belüftungsventil | 6 Laufrad       | 9 Maschinenhalle | 12 Saugschlauch      |

Bild 6: Funktionsschema (Quelle: Statkraft)

Die von Statkraft betriebenen Laufwasserkraftwerke im Einzugsgebiet der Weser sind sich im technischen Aufbau relativ ähnlich (Tabelle 1). Im Wasserkraftwerk Wahnhausen an der Fulda ist bei einer Fallhöhe von 7,6 Metern eine Kaplan-Turbine klassischer Bauweise mit 150 Umdrehungen pro Minute (U/min) installiert. Im Wasserkraftwerk Werrawerk an der Werra arbeiten bei einer Fallhöhe von 3,8 Metern drei

Kaplan-Rohr-S-Turbinen. In den Wasserkraftwerken sind jeweils zwei bis vier doppelt geregelte Kaplan-Turbinen mit senkrechter Welle und vier Laufradschaufeln eingebaut. Hierbei handelt es sich um Hebermaschinen, an welchen sich der Leitapparat oberhalb des Oberwasserspiegels befindet. Mit einer Drehzahl von 60 U/min gelten sie als langsam laufende Turbinen. Beim aalschonenden Betrieb sind die

unterschiedlichen Auslegungen der Turbinen (Drehzahl, Durchmesser und Getriebe) wichtige Kenngrößen (Tabelle 1). Anhang 1 gibt einen Überblick über allgemein relevante Parameter zur Umsetzung eines aalschonenden Betriebsmanagement an Laufwasserkraftwerken.

**Kenndaten der Statkraft-Wasserkraftwerke an Fulda, Werra und Weser**

Standort	Fallhöhe (m)	Ausbau-durchfluss Kraftwerk (m <sup>3</sup> /s)	Bauart der Turbine	Anzahl Turbinen in Kraftwerk	Drehzahl der Turbine (U/min)	Umfangsgeschwindigkeit (m/s)	Durchmesser (m)	Schauffelanzahl	Getriebe	Verstellbare Lauf-schauffel
Werrawerk	3,8	81,5	Kaplan-Rohr-S	3	142	17,9	2,4	4	/	X
Wahnhausen	7,6	70	Kaplan-Rohr	1	150	24,4	3,1	4	/	X
Petershagen	2,5	150	Kaplan	3	68	14	3,9	4	X	X
Schlüsselburg	3,1	200	Kaplan	3	61	14,5	4,5	4	X	X
Landesbergen	3,8	200	Kaplan	4	69	16,3	4,5	4	X	X
Drakenburg	3	200	Kaplan	3	60	14,14	4,5	4	X	X
Dörverden	3,5	174	M*1: Laufrad mit rotierendem Außenkranz, M2/M4: Kaplan, M3: Propeller	4	M1: 63 M3: 60 M2/M4: 100	M1: 13,3 M2/M4: 15,7 M3: 20,2	M1: 4,06 M2/M4: 3 M3: 4,11	M1: 7 M2/M4: 4	X	X
Langwedel	3,2	250	Kaplan	4	61,5	14,49	4,5	4	X	X

Tabelle 1: Kenndaten der technischen Einrichtungen an den Laufwasserkraftwerken von Statkraft an Fulda, Werra und Weser

\*M = Maschine

## SCHÄDIGUNGSTELLEN RECHEN UND TURBINE

Der aalschonende Betrieb zielt darauf ab, die Gefährdung der Blankaale in zwei Bereichen der Wasserkraftanlagen zu minimieren (Bild 7):

I. Rechen: Der Rechen am Einlauf des Wasserkraftwerks ist in der Regel mit einer Rechenreinigungsmaschine ausgestattet. Je nach Standort gibt es unterschiedliche Stabweiten und dadurch herrschen vor dem Rechen unterschiedliche hydraulische Bedingungen.

II. Turbine: Die Turbine ist das Triebwerk, das sich aus einem Leitapparat und dem Laufrad mit einer Anzahl von Laufradschaufeln zusammensetzt.

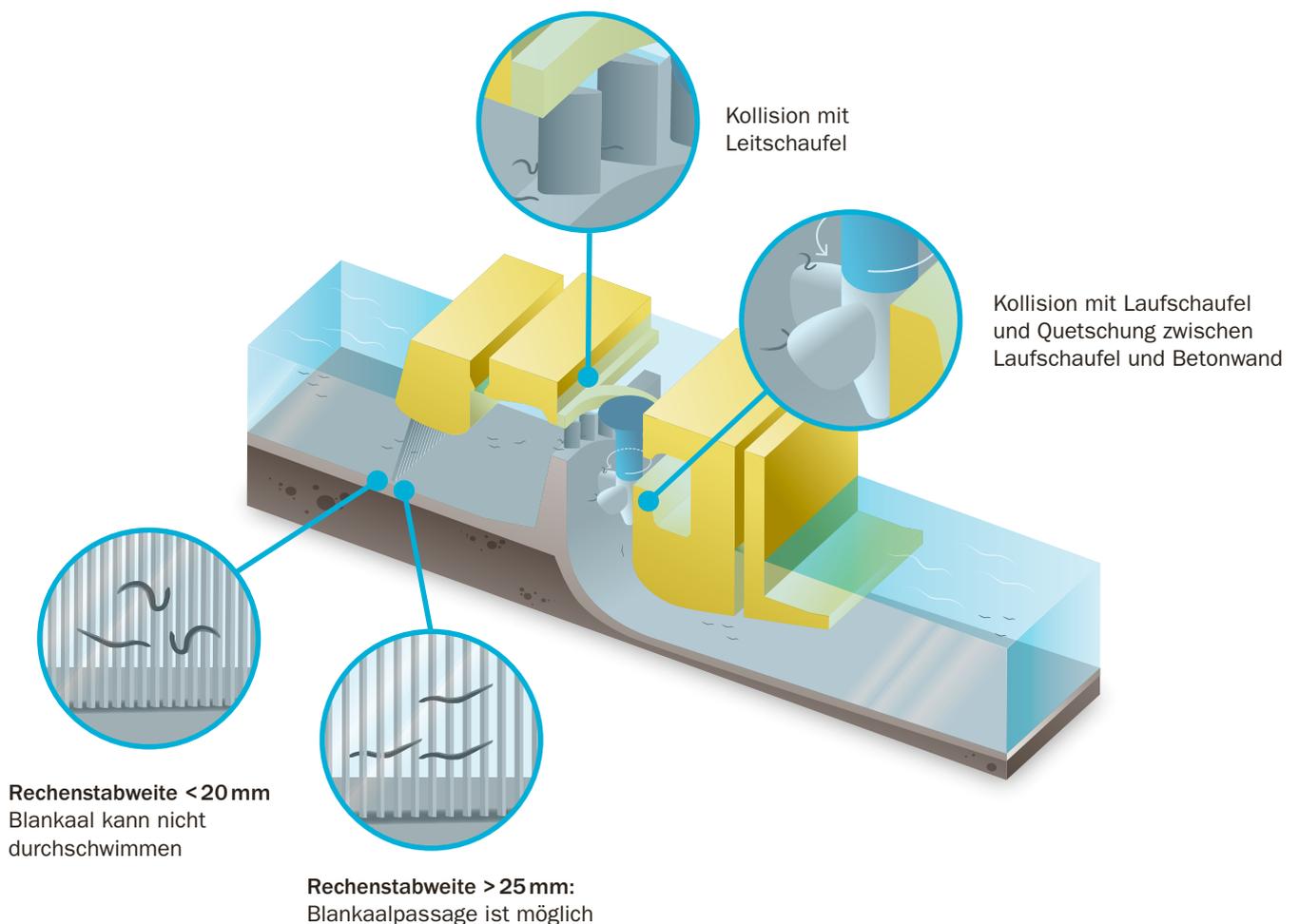


Bild 7: Schädigungspotenzial in Laufwasserkraftwerken (Quelle: Statkraft)

## Rechen

Vor dem Einlauf an Laufwasserkraftwerken ist ein Rechen installiert, der die Turbinen vor Beschädigung durch Treibgut schützt. Um Fische und insbesondere Aale vor einem Eindringen in die Turbine zu schützen, ist die Stabweite der Einlaufrechen manchmal geringer als maschinentechnisch erforderlich. Um weibliche Blankaale effektiv fernzuhalten, darf die Weite maximal 15 Millimeter betragen, während sie zum Schutz der kleineren männlichen Exemplare sogar auf 10 Millimeter begrenzt werden muss (DWA 2005). Technisch realisierbar sind solche geringen Stabweiten nur bei kleineren Kraftwerken mit einem Schluckvermögen bis circa 20 Kubikmeter pro Sekunde ( $\text{m}^3/\text{s}$ ). Die Weserkraftwerke von Statkraft haben ein Schluckvermögen zwischen 70 und 250  $\text{m}^3/\text{s}$ . Diese Größenordnung stellt statisch, hydraulisch sowie betrieblich eine hohe Herausforderung dar.

Allerdings bergen Feinrechen stets die Gefahr, dass die Anströmgeschwindigkeit vor dem Rechen so weit erhöht wird, dass Fische gegen die unpassierbare Barriere gepresst werden. Dort können sie an Erschöpfung und inneren Verletzungen sterben oder durch die Rechenreinigungsmaschine verletzt und getötet werden. Damit der Einlauf einer Wasserkraftanlage nicht zur tödlichen Falle für abwandernde Aale und andere Fische wird, darf die Anströmgeschwindigkeit 0,5 Meter pro Sekunde ( $\text{m}/\text{s}$ ) nicht überschreiten (ADAM et al. 1999).

## Turbine

Sämtliche Laufwasserkraftwerke von Statkraft an Fulda, Werra und Weser sind größtenteils mit Kaplan-Turbinen ausgestattet. Die Besonderheit der Kaplan-Turbine besteht in den verstellbaren Laufradschaufeln. Hierdurch kann die Turbine bei konstanter Drehzahl unterschiedlichen Wasserabflüssen an-

gepasst werden, ohne dass der Wirkungsgrad vermindert wird: Steht viel Wasser zur Verfügung, werden die Schaufeln in einen möglichst hohen Anstellwinkel gestellt und somit der Öffnungsgrad maximiert. Entsprechend ist in diesem Betriebszustand auch der Durchfluss. Verringert sich das Wasserdargebot, werden die Laufradschaufeln in geringere Anstellwinkel gestellt. Der Abstand zwischen den Laufradschaufeln reduziert sich. Hierdurch verringern sich der Durchfluss und die Energieerzeugung, während der Wirkungsgrad nur geringfügig abnimmt.

Eine Ausnahme bildet die Turbine der Maschine 3 am Laufwasserkraftwerk Dörverden. Diese hat eine Kaplan-Propeller-Turbine. Diese Turbinenart gleicht einer Kaplan-Turbine; deren Laufradschaufeln können jedoch nicht verstellt werden. Die Zusammenarbeit mit einem örtlichen Berufsfischer hat aufgezeigt, dass die Schädigungsrate bei Aalen durch eine Kaplan-Propeller-Turbine höher ist als bei Kaplan-Turbinen. Bei ersteren besteht eine höhere Wahrscheinlichkeit, dass Aale zwischen Laufradschaufel und Betonwand gequetscht werden. Daher wird die Kaplan-Propeller-Turbine bei aalschonendem Betrieb außer Betrieb genommen.

Bei einer Turbinenpassage können sich Aale ganz unterschiedlich verletzen (Bild 7). Das größte Risiko bilden die Laufradschaufeln. Wenn ein Aal mit der Vorderkante einer Laufradschaufel kollidiert, entstehen Prellungen sowie Wirbelbrüche und andere innere Verletzungen. Besonders gefährlich ist es für den Aal, wenn er in die Spalten zwischen den Laufradschaufeln und dem Laufradmantel oder der Laufradnabe gerät. Hieraus resultieren vor allem tiefe Schnitte sowie Teil- und Volldurchtrennungen des Körpers. Wenn der Anstellwinkel der Laufradschaufeln hoch ist, wird das Risiko für solche Verletzungen

reduziert oder komplett eliminiert. Weitere potenzielle Schädigungsstellen sind raue Betonwände im Ein- oder Auslaufbauwerk, an denen die Fische Schürfwunden durch Reibung erleiden können.

Die Schädigungs- und Überlebensraten, das heißt der Anteil der infolge einer Turbinenpassage geschädigten und überlebenden Fische ist kraftwerkspezifisch. Größere Fische, beziehungsweise lange Aale, unterliegen dabei grundsätzlich einem höheren Schädigungsrisiko als kleinere Fische wie Lachs- und Meerforellensmolts.

Unterschiedliche Schädigungsraten in Turbinen gleichen Konstruktionstyps lassen sich vor allem auf eine unterschiedliche Kollisionswahrscheinlichkeit zurückführen. Dies bedeutet, dass die Überlebensrate abhängig ist von der Drehzahl der Turbine, der Anzahl ihrer Laufradschaufeln und dem Laufraddurchmesser sowie dem Betriebsmodus, d. h. vom Turbinendurchfluss.

Untersuchungen an der Weser zeigen, dass die Schädigungsrate selbst vergleichbar großer Fische derselben Art abhängig vom Betriebsmodus in derselben Turbine starken Schwankungen unterliegen kann (SCHWEVERS et al. 2011). Untersuchungen am Laufwasserkraftwerk Linne an der niederländischen Maas, vergleichbar mit den Kraftwerkstypen an der Weser, ergaben eine eindeutige Korrelation zwischen dem Turbinendurchfluss und der Schädigung von Aalen (BRUIJS et al. 2003): Je höher der Durchfluss und je größer entsprechend der Öffnungswinkel der Laufradschaufeln ist, umso geringer ist die Kollisionsgefahr und damit das Risiko für den Aal, geschädigt zu werden. So lag die Mortalitätsrate der Aale im Wasserkraftwerk Linne bei minimalem Turbinendurchfluss von 30  $\text{m}^3/\text{s}$  bei circa 25 Prozent, während sie sich bei maximalem Durchfluss von 100  $\text{m}^3/\text{s}$  auf Werte zwischen

## ÜBERLEBENSRATE VON AALEN IN ABHÄNGIGKEIT VOM BETRIEBSMODUS

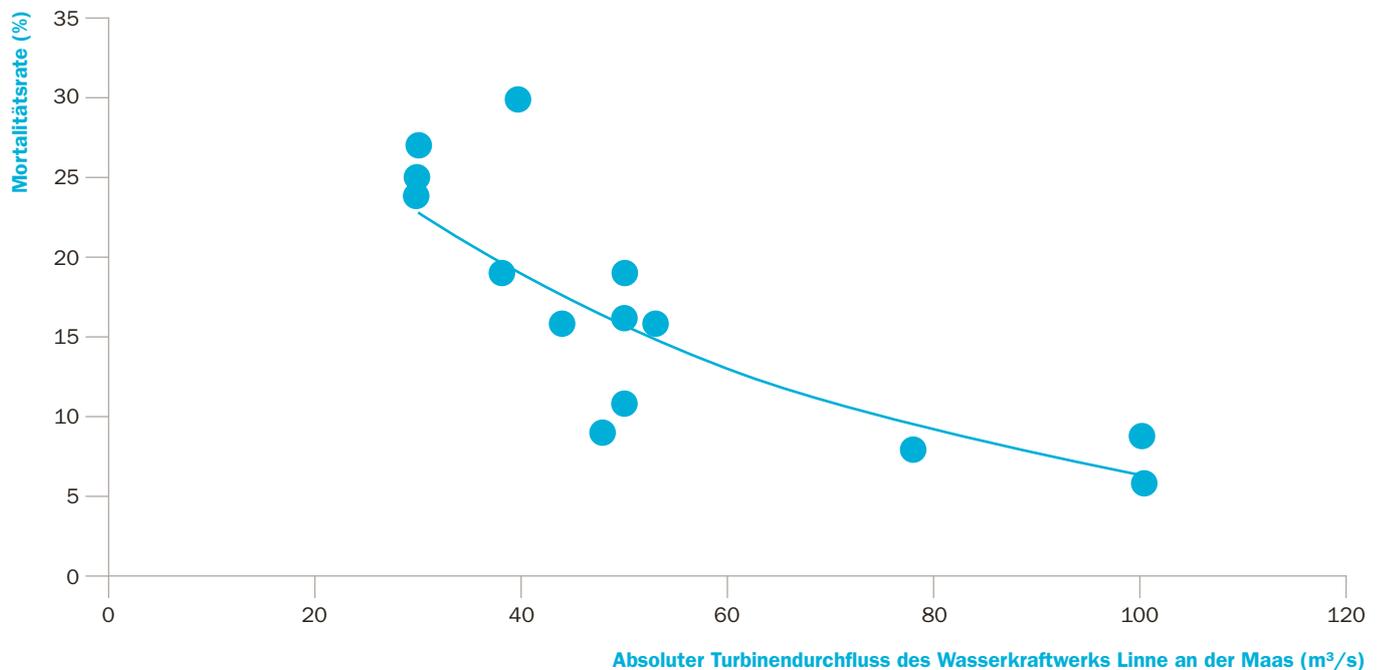


Bild 8: Abhängigkeit der Mortalitätsrate (in Prozent) abwandernder Blankaale vom Turbinendurchfluss (m³/s) am Laufwasserkraftwerk Linne an der Maas (nach Daten von BRUIJS et al. 2003)

5 und 10 Prozent reduzierte (Bild 8). Genau diesen Effekt des erhöhten Turbinendurchflusses nutzt das aal-schonende Betriebsmanagement der Laufwasserkraftwerke von Statkraft an der Mittelweser (Kapitel 4).

Während der Passage vom Oberwasser durch die Turbinenkammer ins Unter-

wasser sind die Fische Druckschwankungen ausgesetzt. Diese können schwere innere Verletzungen, vor allem Rupturen der Schwimmblase, hervorrufen. Physikalisch entsteht dieses Problem jedoch erst bei wesentlich größeren Fallhöhen, als sie bei den Weserkraftwerken von Statkraft gegeben sind. Während vor allem Fischlarven

und Brütlinge durch Kavitation und Scherkräfte verletzt werden können, sind Blankaale hierdurch nicht gefährdet. Auch die Abwanderung über oder unter dem Wehr kann mit Risiken für die Fische verbunden sein, vor allem, wenn die Unterwassertiefe gering ist, oder wenn im Unterwasser Toskörper oder Störsteine angeordnet sind.

## 4. AALSCHONENDER BETRIEB IM WESEREINZUGSGEBIET

Durch den aalschonenden Betrieb von Laufwasserkraftwerken wird die Passierbarkeit des eigentlichen Wanderhindernisses erhöht und der Aal wird mit einer hohen Überlebenschance vom Oberins Unterwasser geführt. Da die Blankaale synchron und zeitlich komprimiert abwandern, kann das aalschonende Betriebsmanagement ohne größere Produktionseinschränkungen gefahren werden. Allerdings sind zur Umsetzung dieses Fischschutzkonzeptes relevante Parameter standortspezifisch und Effizienz wie Erfolg hängen stark von der

Berücksichtigung dieser Bedingungen ab. Daher ist es zu empfehlen, bei der Übertragung des Konzepts auf andere Standorte gewisse Kriterien zu beachten. Diese sind in *Anhang 1* in einer Tabelle zusammengefasst.

Weiterhin ist zur Durchführung des aalschonenden Betriebsmanagements wichtig, die genauen Zeitpunkte der Abwanderungen zu kennen. Mithilfe von Frühwarnsystemen ist es möglich, diese relativ genau vorherzusagen, um dann ein zielgerichtetes Betriebsmanagement

einzuweisen. Diese Frühwarnsysteme können aus Prognosemodellen bestehen, bei denen Umweltfaktoren wie die Temperatur- und Abflussentwicklung zu Grunde gelegt werden. Alternativ kann ein Biomonitoring-System wie der MIGROMAT® oder sogenannte Real-Time-Observationstechniken mit Unterwasserkameras, die auf der direkten Überwachung des Aalverhaltens basieren, eingesetzt werden.

### 4.1 AUFBAU UND FUNKTIONSWEISE DES MIGROMAT®

Bereits bevor die Blankaale abwandern, werden sie in auffälliger Weise aktiver. Dieser Aktivitätsanstieg wird als prä-migratorische Unruhe bezeichnet. Der MIGROMAT® ist als Biomonitoring-System in der Lage diese Verhaltensänderung der Aale vollautomatisch zu erkennen. Setzt die prä-migratorische Unruhe ein, sendet das System einen entsprechenden Alarm an die Kraftwerks-

leitstelle, woraufhin ein aalschonender Betrieb der Laufwasserkraftwerkskette eingeleitet werden kann. Der MIGROMAT® besteht aus folgenden Hauptkomponenten (*Bild 9*):

- Zwei jeweils etwa 5 Meter lange und für Aale ausbruchsichere Hälterbecken, die jeweils 30 zu überwachende Fische aufnehmen.

- Zwei Tauchpumpen mit etwa 25 Kubikmeter pro Stunde ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) Förderleistung, die dafür sorgen, dass die Hälterbecken permanent vom Wasser des jeweiligen Flusses durchströmt werden.
- Ein Betriebscontainer, in dem die technischen Komponenten des Systems hochwassersicher und witterungsfest untergebracht sind.



Bild 9: MIGROMAT® am Laufwasserkraftwerk Werrawerk (Foto: U. Schwevers)

In den Hälterbecken befinden sich jeweils etwa 30 gesunde, mindestens 50 cm lange Blankaale. Sie werden zwischen Juli und August per Elektrofischerei oder mit Reusen ihren Heimatgewässern entnommen. Diese Blankaale werden mit Mikrochips, sogenannten Transpondern unter Beachtung aller Auflagen des Tierschutzgesetzes (TierSchG 2013) individuell besendert (Bild 10 und 11).

Die Aale werden in der Regel circa sechs Wochen bevor sie abwandern in die MIGROMAT®-Hälterbecken gesetzt, damit sie sich der neuen Umgebung anpassen können. Das Innere der Hälterbecken ist durch vier Trennwände mit je einer Öffnung unterteilt, vor denen je eine Antenne installiert ist (Bild 12). Durchschwimmt ein Aal eine der Öffnungen in den Trennwänden, schickt der Transponder ein Signal an die Überwachungsantenne. Das Signal wird dann von einem nachgeschalteten Lesegerät in einen Identifikationscode übersetzt und von einem Computer zeit- und antennen-genau gespeichert.

Auf diese Weise registriert der MIGROMAT® während der von September bis Ende Februar dauernden Betriebs-saison automatisch rund um die Uhr das Verhalten jedes Aals. Diese Aufzeichnungen werden von dem Frühwarnsystem stündlich unter anderem in Hinblick auf die prä-migratorische Unruhe analysiert, plausibilisiert und mit verschiedenen Schwellenwerten verglichen. Werden Schwellenwerte überschritten, gibt der MIGROMAT®-Alarm. Diese Alarme werden automatisch als E-Mail an die Leitwarte der Kraftwerke von Statkraft versandt. Zusätzlich dazu wird

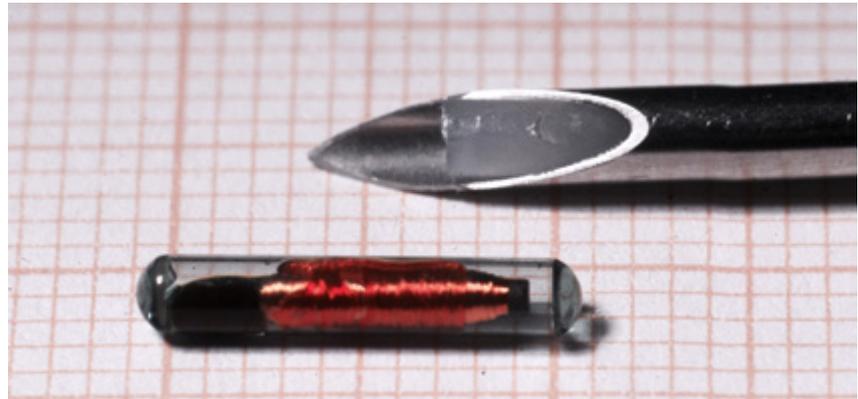


Bild 10: Transponder mit Injektionskanüle (Foto: U. Schwevers)

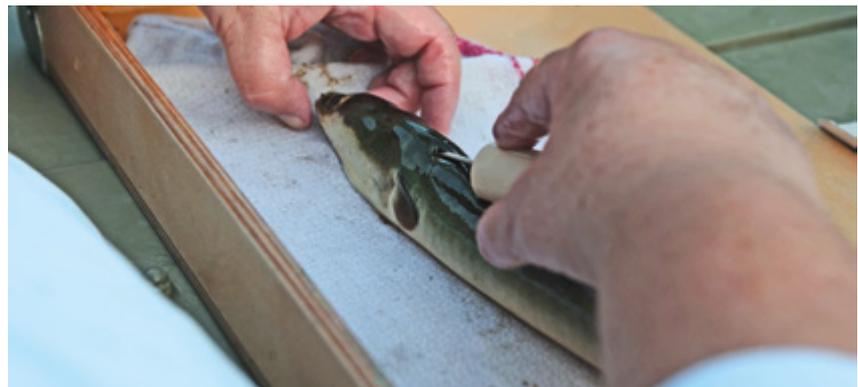


Bild 11: Transpondieren eines Aals (Foto: U. Schwevers)

die Alarmierung per Datendirektleitung als USB-Signal gesendet. Dieses Signal wird direkt in die Maschinensteuerung der Laufwasserkraftwerke eingespeist. Der aalschonende Betrieb wird vollautomatisch eingeleitet, ohne dass das Betriebspersonal eingreifen muss.

Am Ende der Betriebssaison werden die Aale im Unterwasser des jeweiligen Wasserkraftwerks wieder in den Fluss gesetzt.

Am 20. August 2011 wurde ein 77 cm langer Aal für den MIGROMAT® am Wasserkraftwerk Langwedel mit einem Transponder markiert. Am Ende der Betriebssaison im März 2012 wurde der Aal stromabwärts der Staustufe wieder der Weser zugeführt. Dort hielt er sich auf, bis er am 10. Juni 2013 in Brake von einem Angler gefischt wurde. Zwischenzeitlich war er auf eine Länge von 84 cm herangewachsen. Dieses Exemplar hatte seine Abwanderung demnach für mehr als ein Jahr unterbrochen.

## ÜBERWACHUNG UND ANALYSE DES VERHALTENS VON 60 AALEN

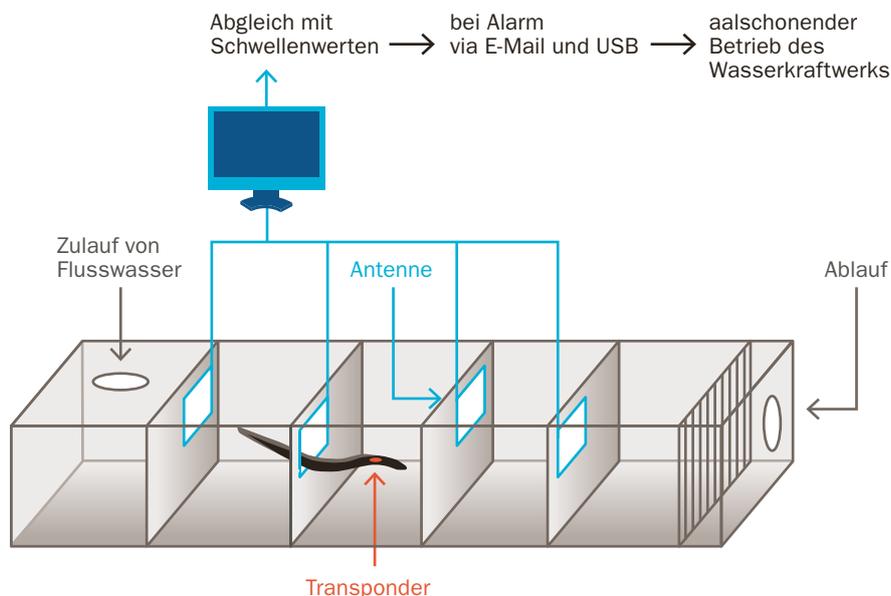


Bild 12: Technischer Aufbau eines MIGROMAT® (nach ADAM 2006). Erklärung siehe Text

Bei Alarm durch den MIGROMAT® werden alle Laufwasserkraftwerke von Statkraft an Fulda, Werra und Weser automatisch in einen aalschonenden Betriebsmodus überführt und nach Abklingen einer Abwanderwelle wieder in den Normalbetrieb zurückgestellt.

An der Weser befinden sich jeweils in Petershagen und in Langwedel ein MIGROMAT® (Bild 13). Der Standort Langwedel liegt stromabwärts der Einmündung der Aller. Es ist anzunehmen, dass die Abwanderung der Aale aus diesem Zufluss nicht immer zeitgleich mit der Abwanderung der Weser-Aale stattfindet.

Sicherheitshalber wird das Laufwasserkraftwerk Langwedel jedoch auch dann in den aalschonenden Betriebsmodus überführt, wenn ein MIGROMAT®-Alarm aus Petershagen eingeht. Zwei weitere Standorte weiter südlich, stromaufwärts sind das Laufwasserkraftwerk Wahnhausen an der Fulda und das Laufwasserkraftwerk Werrawerk an der Werra.

### Aalschonender Betrieb an den Laufwasserkraftwerken von Statkraft im Einzugsgebiet Weser

Ereignis	Wahnhausen	Werrawerk	Mittelweserkraftwerke (von Petershagen bis Langwedel):
MIGROMAT®-Alarm zwischen 6:00 Uhr und 17:00 Uhr	Alarm wird zwischengespeichert, aalschonender Betrieb ab 17:00 Uhr		
MIGROMAT®-Alarm zwischen 17:00 Uhr und 6:00 Uhr	Aalschonender Betrieb sofort aktiviert		
Turbine	Schluckvermögen wird auf 26 m³/s reduziert, um Anströmungsgeschwindigkeit vor dem Rechen auf 0,5 m/s sicherzustellen	Schluckvermögen der Turbine wird reduziert und Abstiegsweg am Kraftwerk verfügbar	Landseitige Turbine wird gedrosselt, flussmittige Turbinen laufen mit maximaler Laufschaufelöffnung
Wehr	Kraftwerksnahes Wehr übernimmt die Restwassermenge	Kraftwerksnahes Wehr wird mit 12 m³/s beaufschlagt	Kraftwerksnahes Wehr beaufschlagt mit Restwassermenge

Tabelle 2: Verfahrensweisen der aalschonenden Betriebsführung an den unterschiedlichen Standorten (Fulda, Werra und Weser)

Eine Abwanderwelle kündigt sich in der Regel tagsüber durch die prä migratorische Unruhe an. Wenige Stunden danach, meist in der Abenddämmerung, setzt dann die Abwanderung ein und erreicht gegen Mitternacht ihren Höhepunkt, um dann bis in den Morgenstunden wieder abzuebben (Bild 3, Seite 7). Auf diese Aktivitäts- und Abwanderdynamik ist die aalschonende Betriebsführung der Wasserkraftwerke von Statkraft ausgerichtet: Trifft ein MIGROMAT®-Alarm tagsüber zwischen 6 Uhr und 17 Uhr ein, wird um 17 Uhr die aalschonende Betriebsführung eingeleitet. Wird ein MIGROMAT®-Alarm zwischen 17 Uhr und 6 Uhr ausgelöst, wird der aalschonende Betrieb sofort aktiviert.

Gelegentlich treten auch zwei- oder dreitägige Abwanderwellen auf, bei denen die Wanderaktivität der Blankaale im Fluss tagsüber zwar abschwächt, aber nicht gänzlich abreißt. Gemäß den Beobachtungen von Statkraft und eines Berufsfischers an Fulda und Weser ereignen sich solche mehrtägigen Abwanderwellen vor allem, wenn die Wasserführung im Fluss ansteigend ist (nach starken, langen Regenfällen oder durch künstlich erzeugte Wellen aus dem Edersee). Im Falle eines Abflussanstiegs ( $< 1 \text{ m}^3/\text{s}$  pro Stunde) wird der aalschonende Betrieb der Laufwasserkraftwerke nicht um 6 Uhr morgens beendet, sondern den ganzen folgenden Tag beibehalten. Steigt der Abfluss während dieses Tages weiter an, verlängert sich die Zeitdauer der aalschonenden Betriebsführung der Wasserkraftwerke entsprechend. Durch diese Maßnahmen wird die Überlebensrate erhöht und das Schädigungsrisiko für abwandernde Aale minimiert.

Wie die aalschonende Betriebsweise ausgestaltet wird, ist von den hydraulischen und technischen Rahmenbedingungen am jeweiligen Standort abhängig.



Bild 13: Standort der Wasserkraftwerke von Statkraft an der Eder, Fulda, Werra und Weser sowie die Standorte des MIGROMAT® in Wahnhausen, Werrawerk, Petershagen und Langwedel

Diese sind an den sechs Weserkraftwerken vergleichbar, unterscheiden sich aber deutlich an Werra und Fulda. Entsprechend erfolgt das Betriebsmanagement an den Weserkraftwerken in identischer Weise, während in Wahnhausen (Fulda) und am Werrawerk andere, anlagenspezifische Betriebs-

führungen bei Alarm ausgelöst werden. Die relevanten Eckdaten sowie die am jeweiligen Standort getroffenen Maßnahmen sind in Tabelle 2 im Überblick dargestellt. Details zur aalschonenden Betriebsführung an den jeweiligen Laufwasserkraftwerken enthalten die nachfolgenden Kapitel.

## 4.2 LAUFWASSERKRAFTWERK WAHNHAUSEN AN DER FULDA

Die Standortbedingungen am Laufwasserkraftwerk Wahnhausen an der Fulda unterscheiden sich wesentlich von denen der an der Weser liegenden Laufwasserkraftwerke. Einerseits verfügt dieses Kraftwerk nur über eine einzige Turbine mit hoher Umdrehungszahl (150 U/min, vgl. *Tabelle 1*), sodass eine Turbinenpassage mit sehr hohen Mortalitätsraten verbunden wäre. Andererseits ist das Kraftwerk mit einem 20 mm-Rechen ausgestattet, der größere Aale zuverlässig von einer Turbinenpassage abhält.

Allerdings erreicht die Anströmung am Rechen bei Volllast der Turbine Fließgeschwindigkeiten von bis zu 1,8 m/s. Abwandernde Blankaale können dadurch gegen den Rechen gepresst werden.

Um die Mortalität an diesem Standort zu reduzieren, ist es notwendig, den Turbinendurchfluss soweit zu reduzieren, dass die Anströmgeschwindigkeit vor dem Rechen maximal 0,5 m/s erreicht, sodass die Aale vom Rechen wegschwimmen können.

Entsprechend besteht das aalschonende Betriebsmanagement am Laufwasserkraftwerk Wahnhausen in einer Drosselung des Turbinendurchflusses von bis zu 70 m<sup>3</sup>/s auf 26 m<sup>3</sup>/s. Der übrige Abfluss wird über das Wehrfeld neben dem Kraftwerkseinlauf abgeführt, welches auch der Pegelhaltung dient (*Bild 14*). Durch die Beaufschlagung des kraftwerksnahen Wehrfeldes wird eine Bypass-Strömung erzeugt, mit der abwandernde Aale ins Unterwasser gelangen können.



Bild 14: Am Standort Wahnhausen wird das Wehrfeld neben dem Kraftwerk bei aalschonendem Betrieb so stark beaufschlagt, dass sich der Turbinendurchfluss auf weniger als 30 m<sup>3</sup>/s reduziert und damit die Anströmgeschwindigkeit vor dem Rechen auf maximal 0,5 m/s verringert wird (Foto: B. Adam)

## 4.3 LAUFWASSERKRAFTWERK WERRAWERK AN DER WERRA

Am Kraftwerk Werrawerk an der Werra erreicht die Anströmung am Rechen nur sehr geringe Fließgeschwindigkeiten zwischen 0,18 und 0,3 m/s. Für abwandernde Aale besteht hier deshalb kein Risiko, gegen den Einlaufrechen gepresst und dadurch verletzt zu werden. Andererseits ist durch frühere Untersuchungen bekannt, dass Blankaale den

25 mm-Rechen passieren und in die Turbinen gelangen können (BERG 1988). Deshalb liegt die Priorität beim aalschonenden Betriebsmanagement (ASB) an diesem Standort darin, einen sicher auffindbaren und passierbaren Abwanderkorridor zu eröffnen. Allerdings haben Freilanduntersuchungen von Statkraft gezeigt, dass selbst ein Wehrüberfall

von 5 m<sup>3</sup>/s nicht ausreicht, um den Blankaalen einen wirksamen Abwanderkorridor zu bieten. Aus diesem Grunde wird am Werrawerk während des ASBs derzeit ein Wehrüberfall von 12 m<sup>3</sup>/s eingeführt und zusätzlich an einer Bypass-Lösung gearbeitet.

## 4.4 LAUFWASSERKRAFTWERKE AN DER MITTELWESER

Die aalschonende Betriebsführung der Laufwasserkraftwerke an der Weser besteht aus einem gezielten Turbinenmanagement (Bild 15): Im Normalbetrieb laufen an diesen Standorten drei oder vier Turbinen, wobei der Öffnungswinkel der Laufradschaufeln so gestellt ist, dass eine maximale Stromerzeugung erreicht wird. In diesem Betriebsmodus

hängt die Schädigungsrate für abwandernde Aale vom Öffnungswinkel der Turbinen ab und kann bei 25 Prozent liegen (SCHWEVERS et al. 2011).

Während des aalschonenden Betriebs hingegen wird der Öffnungswinkel der Laufradschaufeln maximiert, das heißt nach Möglichkeit vollständig geöffnet.

Hierdurch vergrößert sich der Abstand zwischen den Laufradschaufeln, die Kollisionswahrscheinlichkeit für Aale sinkt und infolge dessen reduziert sich die Mortalitätsrate auf unter 5 Prozent.

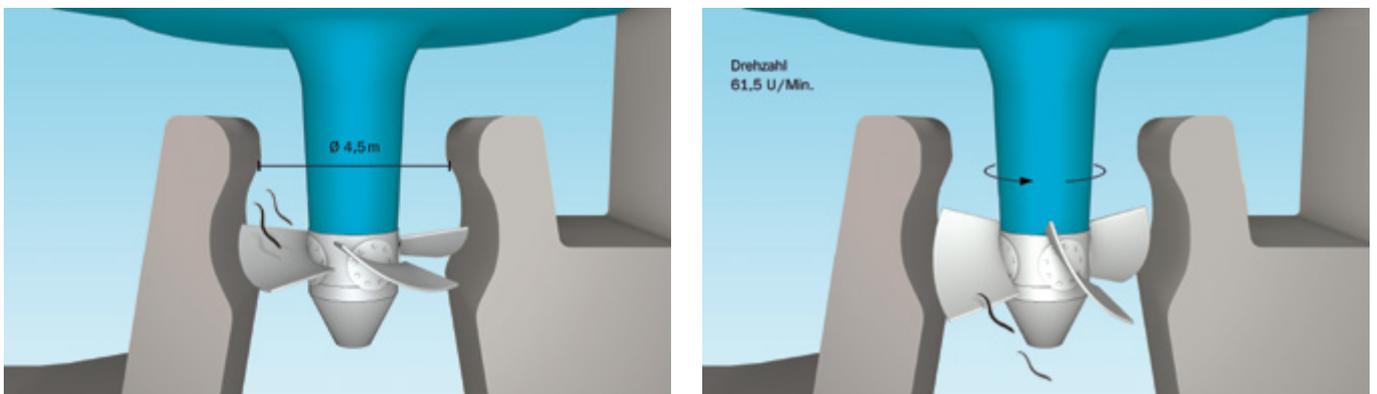


Bild 15: Aalschonende Betriebsweise der Kaplan-Turbinen an der Weser durch maximale Öffnung des Anstellwinkels der Laufradschaufeln ermöglicht eine hohe Passierbarkeit für Aale (Quelle: Statkraft)

Im aalschonenden Betriebsmodus werden jeweils so viele Turbinen mit maximalem Öffnungswinkel und entsprechend minimierter Schädigungsrate gefahren, wie dies der Abfluss im Gewässer zulässt. Bevorzugt sind dies die flusssmittigen Turbinen, sodass abwandernde Aale, die geradlinig der Hauptströmung folgen, gezielt dort auf die Kraftanlage stoßen. Die landseitige Turbine hingegen liegt am weitesten abseits von der Hauptströmung, sodass

dort mit den wenigsten Aalen zu rechnen ist. Deshalb wird die landseitige Maschine dazu genutzt, jeweils so viel Wasser abzuarbeiten, wie dies zur Sicherstellung eines konstanten Oberwasserspiegels für die Schifffahrt notwendig ist. Ist der Restabfluss so gering, dass er nicht zum Betrieb dieser Turbine ausreicht, wird diese Maschine stillgelegt und die Abflussregelung vom Wehr übernommen.

Anschauliche Erläuterungen über die technischen und biologischen Zusammenhänge der aalschonenden Betriebsführung der Wasserkraftwerke an der Weser gibt der Film „Rettung für die Aale“ (Erstausstrahlung am 26. Mai 2013, Länge: 5:31 Minuten), der über Internet aus der Mediathek zur ARD-Sendereihe „W wie Wissen“ abgerufen werden kann (<http://www.ardmediathek.de>).

## 5. ERGEBNISSE

Um die Wirksamkeit der aalschonenden Betriebsführung der Laufwasserkraftwerke im Wesersystem beurteilen zu können, hat Statkraft eine theoretische Modellierung durchgeführt. Weiterhin gibt es fischökologische Freilanduntersuchungen an der Weser (SCHWEVERS et al. 2011).

### 5.1 THEORETISCHE MODELLIERUNG BETRIEBSMANAGEMENT

Die heutigen Modelle für Überlebensraten von Aalen bei der Turbinenpassage sind in ihrer Aussagekraft zum aalschonenden Betrieb sehr begrenzt, da diese nicht die unterschiedlichen Öffnungsgrade der Turbinenschaufeln berücksichtigen. Für Blankaale stehen allerdings Prognosen zur Überlebensrate bei der Passage von Kaplan-Turbinen als empirische artspezifische Modelle von EBEL (2008) zur Verfügung. Ein weiteres Modell von LARINIER und DARTIGUELONGUE (1989) hat mit EBEL die Prognose der mittleren Überlebensrate gemeinsam.

Die Mortalitätsraten für Aale wurden mit dem Modell von EBEL für standortbezogene Mittelwerte (Grundlage von 16 Datensätzen, Erklärungsgrad  $R = 0,88$ ,  $p < 0,00001$ ) für Kaplan-Turbinen (2008) berechnet:

$$M = -44,6 - 13,56s_{\text{ABSOL, MAX}} + 2,70u_{\text{MAX}} + 108,98TL$$

mit  $M =$  Mortalitätsrate [%]

$s_{\text{ABSOL, MAX}} =$  absoluter Schaufelabstand am größten Laufraddurchmesser [m]

$u_{\text{MAX}} =$  Umfangsgeschwindigkeit am größten Laufraddurchmesser [m]

$TL =$  Totallänge des Fisches [m]

Da diese Prognoseberechnungen nur standortspezifische Mittelwerte angeben, können sie lediglich als Abschätzung und nicht als konkrete Größe verstanden werden. Gemäß einer theoretischen Modellierung durch das Ingenieurbüro Floecksmühle können bis zu 97 Prozent der absteigenden Aale einen Laufwasserkraftwerksstandort mit einem aalschonenden Betriebsmanagement durchwandern, während es ohne ein solches Schutzkonzept nur etwa 76 Prozent sind (KEUNEKE, 2014).

## 5.2 ABWANDERUNGSLARME MIGROMAT®

Die MIGROMAT®-Systeme an den Standorten Wahnhausen, Werrawerk, Petershagen und Langwedel sind grundsätzlich von September bis Ende Februar in Betrieb. Die Anzahl der Alarme schwankt zwischen 24 und 50 Alarmen pro Saison.

Die großen Abwanderungswellen finden an drei bis sechs Tagen im Spätherbst statt, und zu diesen Zeitpunkten wird vorwiegend Alarm gleichzeitig an allen Standorten gegeben. Die Mehrzahl der Alarme steht im Zusammenhang mit

erhöhter Wasserführung im Fluss. *Tabelle 3* stellt die Werte von 2002 bis 2014 am Standort Wahnhausen sowie für die drei weiteren MIGROMAT®-Systeme in den Betriebsaisons 2011, 2012 und 2013 dar.

**Betriebstage und Alarme des MIGROMAT®**

Jahr	MIGROMAT® in Betrieb (Anzahl Tage)	MIGROMAT®-Alarm (Anzahl Tage)	Jahr	MIGROMAT® in Betrieb (Anzahl Tage)	MIGROMAT®-Alarm (Anzahl Tage)
Wahnhausen			Werrawerk		
2002/03	112	11	2011/12	147	31
2003/04	152	21	2012/13	161	45
2004/05	188	27	2013/14	186	50
2005/06	190	30	Petershagen		
2006/07	197	21	2011/12	154	25
2007/08	194	29	2012/13	190	24
2008/09	205	19	2013/14	185	34
2009/10	213	28	Langwedel		
2010/11	216	46	2011/12	153	32
2011/12	180	49	2012/13	190	40
2012/13	151	30	2013/14	185	46
2013/14	154	55			

Tabelle 3: Betriebstage und Alarme des MIGROMAT®

Trotz verschiedener Probleme bei der Umsetzung des aalschonenden Betriebs kann festgestellt werden, dass die Verlässlichkeit des MIGROMAT® hoch ist. Technische Probleme äußerten sich in der Vergangenheit meist im Versagen der Pumpen, der Antennen

oder Störungen der Alarmmeldungen. Auch gab es Probleme aufgrund von unterbrochenen Kommunikationslinien menschlicher und technischer Art. Diese Probleme ergaben sich vor allen Dingen in der Anfangsphase der MIGROMAT®-Einführung und sind Gegenstand von

kontinuierlichen Verbesserungen. Weiterhin ist es wichtig, dass die Aale schonend gefangen werden und diese eindeutige Blankaal-Kennzeichen aufweisen. Das erhöht ebenfalls die Verlässlichkeit des MIGROMAT®.

## 5.3 FANGERGEBNISSE AN DER WESER

Um Informationen über Zeitpunkt, Dauer und Ausmaß der Abwanderung von Blankaalen in der Weser zu erhalten, hat Statkraft einen Berufsfischer beauftragt, Probefänge im Unterwasser der Staustufe Landesbergen durchzuführen.

Der Aalschokker des Berufsfischers liegt im Unterwasser des Laufwasserkraftwerks Landesbergen und damit zwei Staustufen und insgesamt etwa 40 km stromabwärts des MIGROMAT®-Standorts am Kraftwerk Petershagen. Die Probefänge wurden nach Eingang eines MIGROMAT®-Alarms während des aalschonenden Betriebs sowie bei Normalbetrieb (Kontrollprobe) durchgeführt.

Die nach Stückzahlen und Gewichten differenzierten Fangergebnisse wurden nachträglich und unabhängig mit den Zeiträumen des aalschonenden Betriebs verglichen. So gingen dem Berufsfischer

in der Betriebssaison 2011/2012 an nur fünf Fangtagen, die während des aalschonenden Betriebs lagen, zwei Drittel des Gesamtfanges der Betriebssaison ins Netz. Die graphische Darstellung dieses Abgleichs lässt eine hohe Übereinstimmung zwischen dem MIGROMAT®-Alarmgeschehen und dem Fangenerfolg erkennen (Bilder 17, 18 und 19).



Bild 16: Aalschokker (Foto: B. Adam)

### VERGLEICH FÄNGE UND AALSCHONENDER BETRIEB 2011

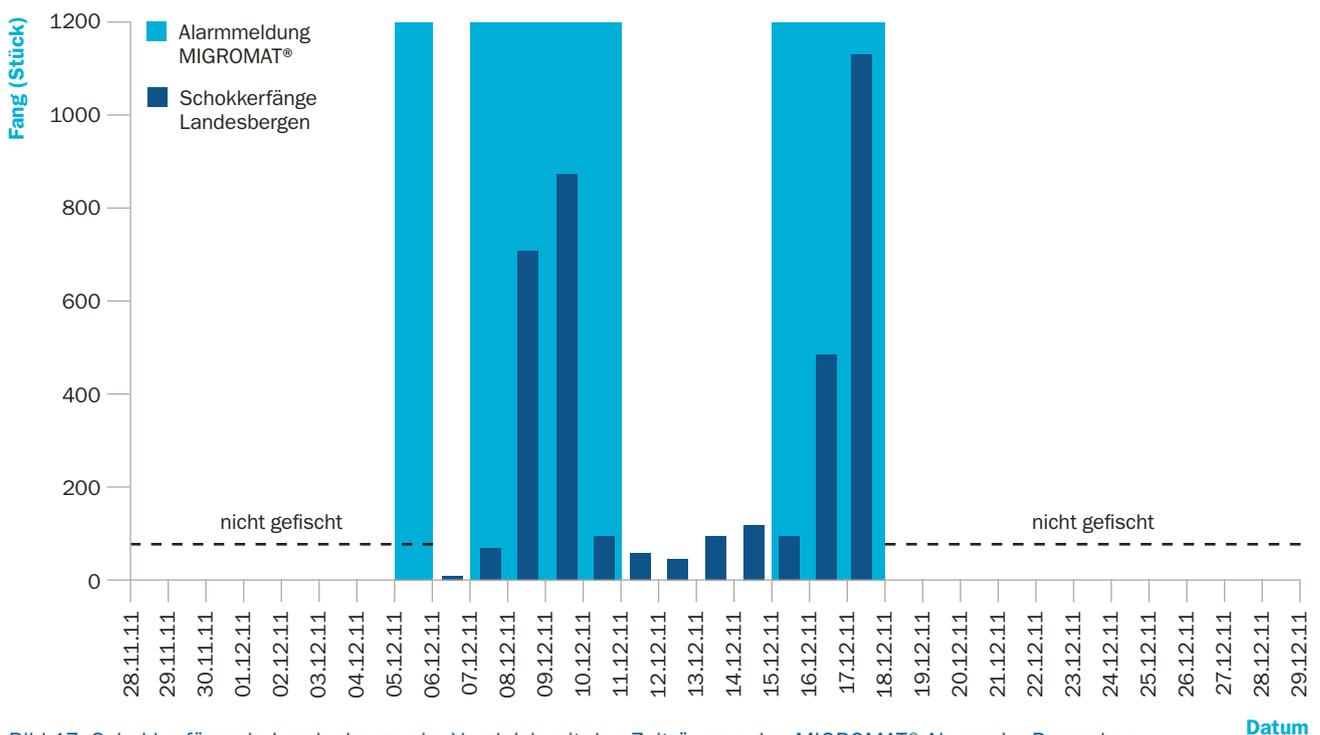


Bild 17: Schokkerfänge in Landesbergen im Vergleich mit den Zeiträumen des MIGROMAT®-Alarms im Dezember der Betriebssaison 2011/2012

Datum

### VERGLEICH FÄNGE UND AALSCHONENDER BETRIEB 2012

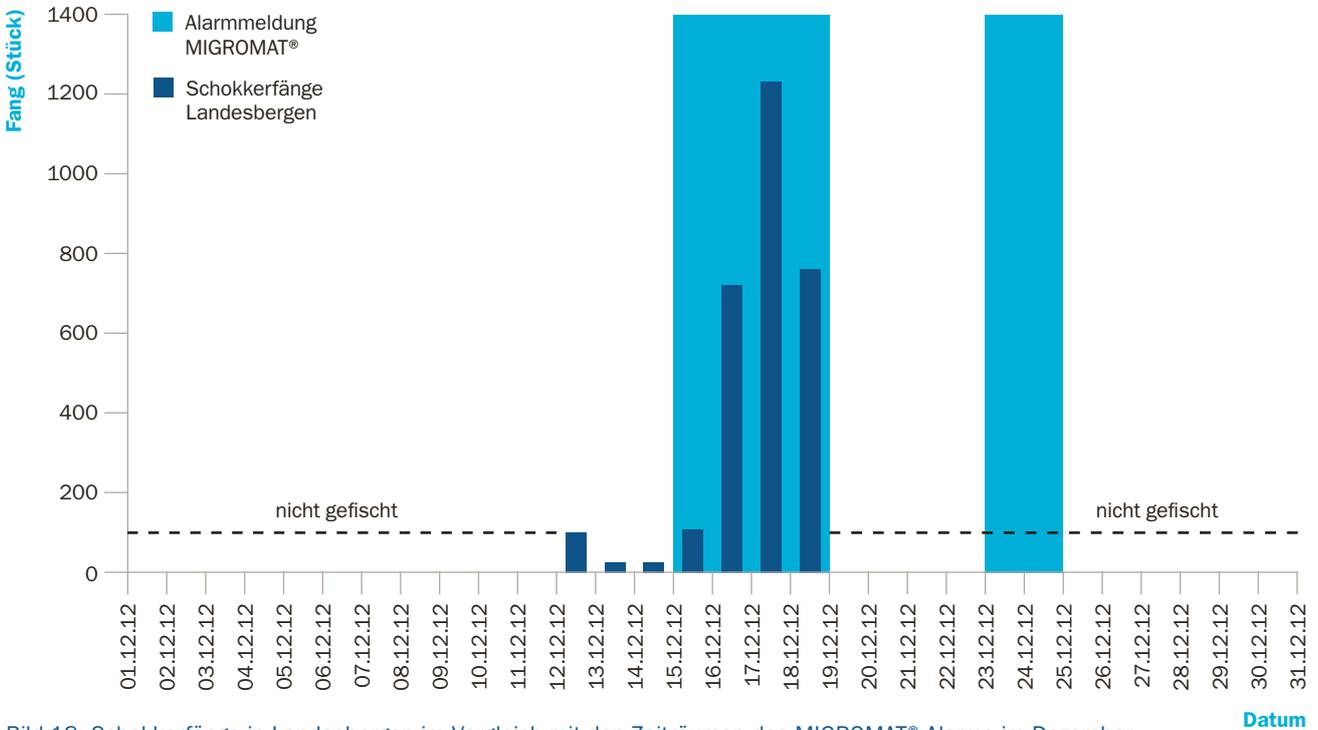


Bild 18: Schokkerfänge in Landesbergen im Vergleich mit den Zeiträumen des MIGROMAT®-Alarms im Dezember der Betriebssaison 2012/ 2013

Datum

### VERGLEICH FÄNGE UND AALSCHONENDER BETRIEB 2013

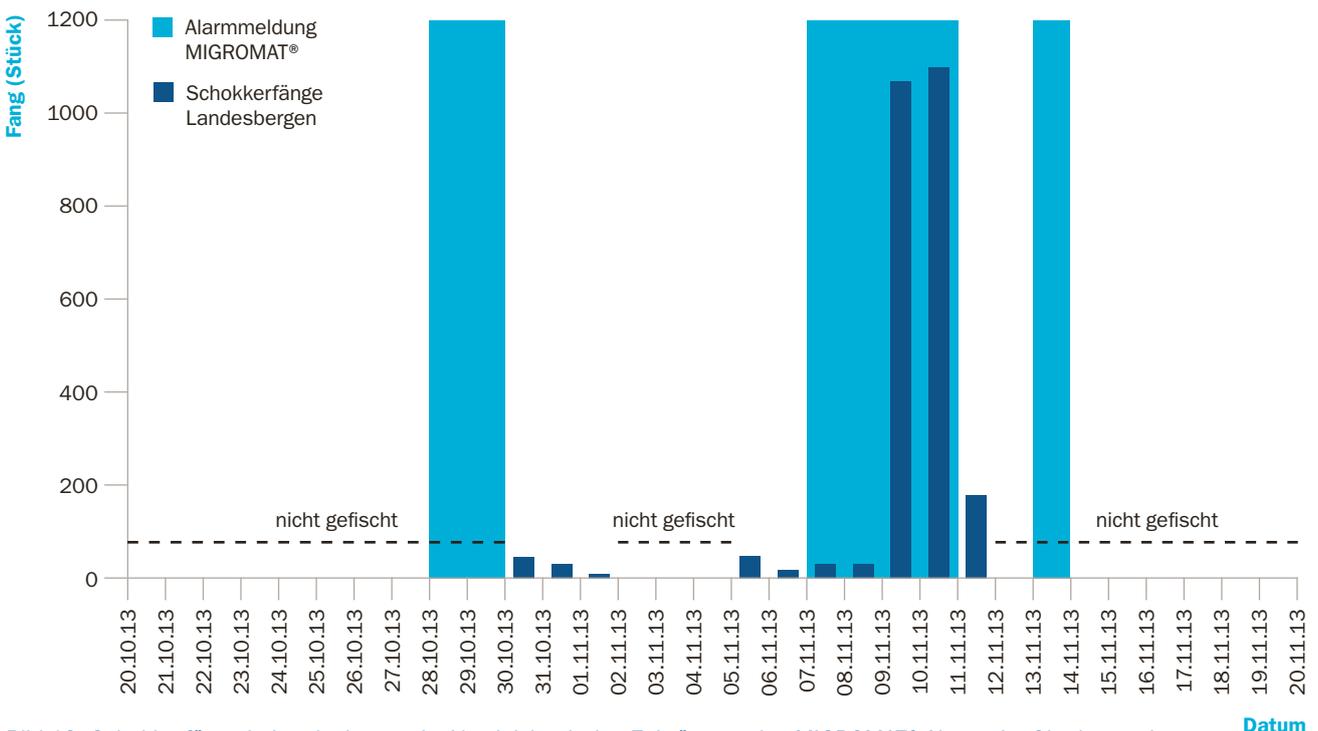


Bild 19: Schokkerfänge in Landesbergen im Vergleich mit den Zeiträumen des MIGROMAT®-Alarms im Oktober und November der Betriebssaison 2013/ 2014

Datum

In den Betriebssaisons 2011/2012 und 2012/2013 wurden insgesamt 20 und in der Saison 2013/2014 17 Probebefischungen mit dem Aalschokker durchgeführt. Die Bilanz der Fänge ist in *Tabelle 4* aufgeführt. Die Auswertung der Probebefischungen

ergab, dass nach einer Alarmmeldung des MIGROMAT® am Standort Petershagen sowohl in der Saison 2012/2013 als auch in der Saison 2013/2014 mehr als 90 Prozent der Biomasse (registriertes Gewicht, siehe *Tabelle 4*) im Unterwasser nachgewiesen werden konnten.

Probebefischungen	Betriebssaison 2011/2012		Betriebssaison 2012/2013		Betriebssaison 2013/2014	
Gesamtzahl	17		20		17	
aalschonender Betrieb	7		12		9	
Normalbetrieb	10		8		8	
Fangbilanz	Stück	Fanggewicht [kg]	Stück	Fanggewicht [kg]	Stück	Fanggewicht [kg]
Gesamtfang	3.763	2.911	3.014	2.445,0	3.831	2.615,2
aalschonender Betrieb	2.591	2.118,4	2.852	2.329,0	3.706	2.519,7
Normalbetrieb	1.172	792,6	162	116,0	125	95,5
<b>Effizienz</b>	<b>72,8%</b>		<b>95,2%</b>		<b>96,3%</b>	

Tabelle 4: Effizienz des aalschonenden Betriebs anhand der Fangbilanz durch Probebefischungen für die drei Betriebssaisons von 2011–2014 (Fangaufzeichnungen: C. Brauer)

Die Probefänge mit dem Aalschokker stromabwärts des Wasserkraftwerks Landesbergen bieten zudem auch die Möglichkeit, die Aale auf Verletzungen hin zu untersuchen, um anhand des Anteils geschädigter Fische die Wirksamkeit des Turbinenmanagements beurteilen zu können. Hierbei ist allerdings zu berücksichtigen, dass die

Fische auch durch die im Netzsack des Fanggerätes herrschenden strömungsbedingten Druckverhältnisse geschädigt werden können (HAMMICH et al. 2012). Solche methodisch bedingten Verletzungen können je nach der Maschenweite von Hamen und Fangsack sowie der Verweildauer der Aale im Fanggerät ein erhebliches Ausmaß annehmen.

Zum Teil sind sie gut von turbinenbedingten Verletzungen zu unterscheiden (*Bild 20*). Doch treten häufig auch unspezifische Schädigungsmuster auf, die sich nicht eindeutig zuordnen lassen. Insofern wird die Schädigungsrate bei Untersuchungen turbinenbedingter Schädigungen mittels Schokkern tendenziell überschätzt.

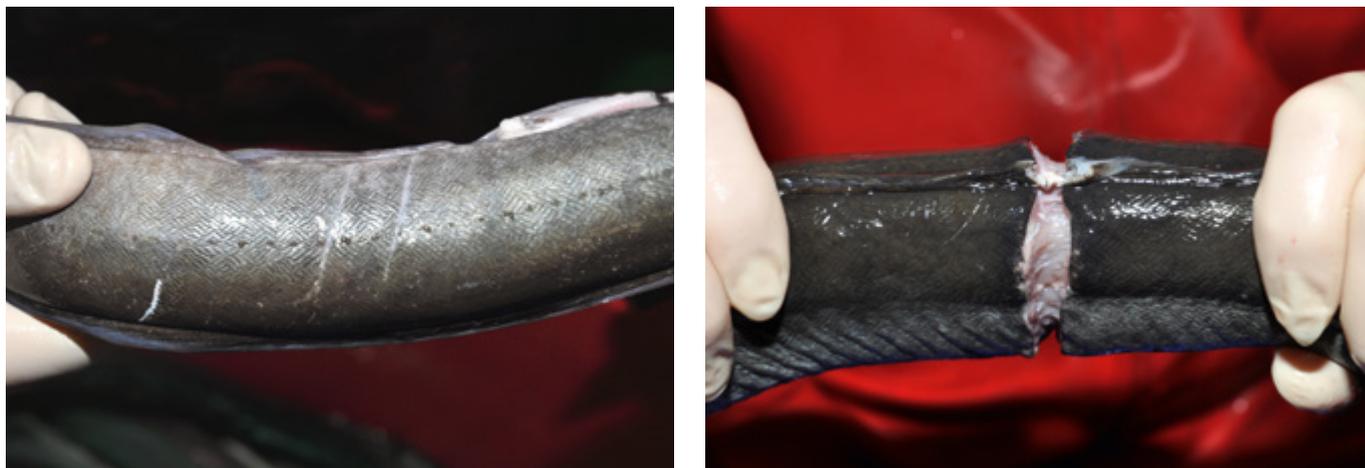


Bild 20: Typische Schädigungen von Aalen aus Schokkerfängen; links: Verletzungen der Haut durch Einschnitt des Garns von Hamen oder Steert; rechts: umlaufender Schnitt, der von Versuchen des Tieres zeugt, sich zwischen den Maschen des Hamens hindurch zu winden (Fotos: Claus Mitmann)

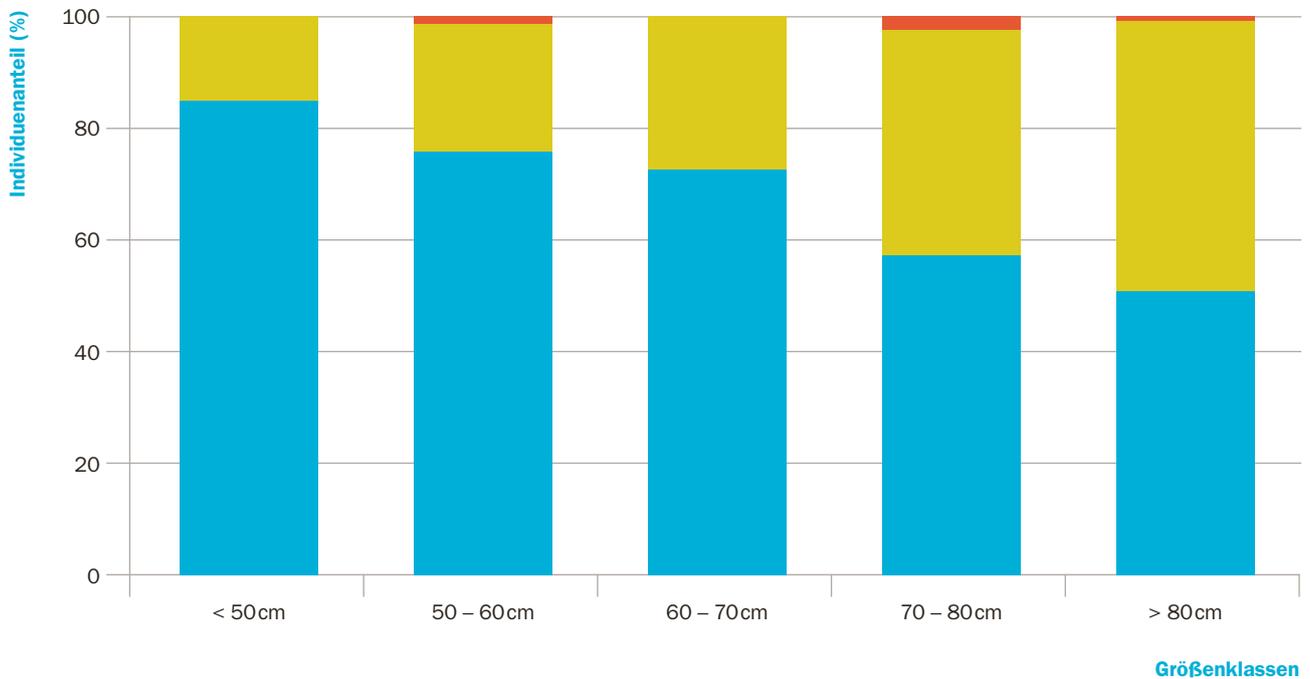
Bereits in den Jahren vor der Inbetriebnahme der Frühwarnsysteme sind an den Wasserkraftwerken Landesbergen und Drakenburg turbinenbedingte Schädigungen abwandernder Aale, beziehungsweise deren Überlebensraten untersucht worden (SCHWEVERS et al. 2011). Die Ergebnisse zeigen deutliche Unterschiede zwischen den Standorten. Diese Unterschiede können einerseits durch unterschiedliche Betriebsmodi erklärt werden, ähnlich der Untersuchungen an der Maas (Bild 8; BRUIJS et al. 2003, Seite 15). In Landesbergen konnte eine geringe Mortalitätsrate verzeichnet werden, weil hier zwei Turbinen mit ho-

hem Öffnungsgrad liefen. Die Ergebnisse zeigen auch, dass große Individuen eine höhere Überlebenschance bzw. geringere Schädigungsraten haben. Andererseits war die Zahl der verletzten Aale sehr hoch in Landesbergen, allerdings sind in der Untersuchung die fangmethodisch bedingten Schäden nicht berücksichtigt worden (Bild 21).

In Drakenburg war die Mortalität verglichen mit Landesbergen deutlich höher. Die Ursache dafür ist vermutlich der Betriebsmodus der ufernahen Turbine, die in dieser Zeit nur mit Mindestöffnung ( $25 \text{ m}^3/\text{s}$ ) lief und eine geringe Über-

lebensrate zulässt. Während des aal-schonenden Betriebs wird diese abgeschaltet. Allerdings ist die Anzahl der verletzten Aale niedriger als in Landesbergen. Hier ist zu beobachten, dass größere Individuen unbeschädigt das Kraftwerk passieren können. Auch dabei wurden fangmethodisch bedingte Schäden nicht berücksichtigt.

## BEFISCHUNG IN LANDESBERGEN



## BEFISCHUNG IN DRAKENBURG

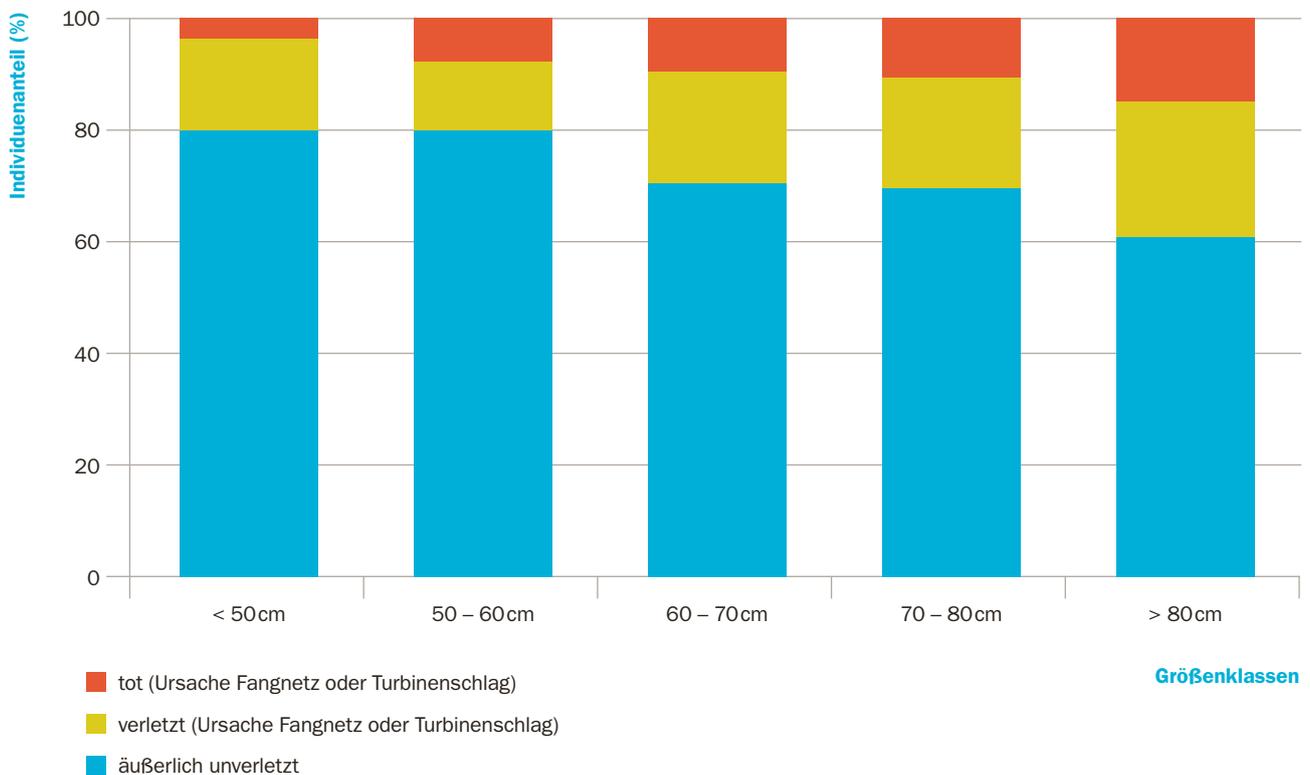


Bild 21: Schädigungs- bzw. Mortalitätsrate in Prozent der Aalfänge im Unterwasser der Staustufen Landesbergen (oben) und Drakenburg (unten), differenziert nach Größenklassen im Jahr 2008 (SCHWEVERS et al. 2011). Fangmethodisch bedingte Schäden wurden in dieser Aufstellung nicht berücksichtigt.

## 5.4 KOSTEN DES AALSCHONENDEN BETRIEBSMANAGEMENTS

Das aalschonende Betriebsmanagement an Fulda, Werra und Weser ist mit einmaligen und mit laufenden Kosten verbunden. Die einmaligen Kosten umfassen zunächst die Investitionskosten für die MIGROMAT®-Systeme und die Kosten der Automatisierung der kraftwerksinternen Leit- und Steuersysteme.

Die Einbindung des Personals in die Abläufe des aalschonenden Betriebsmanagement ist weniger kosten-, als zeitintensiv. Die laufenden Kosten umfassen die jährlichen Betriebskosten, die sich aus Anschaffungskosten neuer Halteraale für den MIGROMAT® am Anfang jeder Saison, sowie Kosten

für die Kontrollbefischungen zusammensetzen. Das aalschonende Betriebsmanagement kann in manchen Fällen zu Erzeugungsverlusten führen, die direkt von der Anzahl und Dauer der Abwanderereignisse sowie den zeitgleich herrschenden Abflussverhältnissen abhängig sind.

## 6. FAZIT

Statkraft hat an allen Wasserkraftwerken an Fulda, Werra und Weser ein aalschonendes Betriebsmanagement unter Einsatz des Frühwarnsystems MIGROMAT® eingeführt und somit einen Beitrag geleistet, die Ziele der EU-Wasserrahmenrichtlinie, der Aalverordnung und des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) zu erreichen. Die Erkenntnisse über das Ursachen-Wirkungs-Gefüge der Kraftwerkstechnik und -steuerung einerseits und den jeweiligen Auswirkungen auf abwandernde Aale andererseits hat Statkraft hier konsequent umgesetzt. Entsprechend kommen im Fall einer bevorstehenden Abwanderung standortspezifisch verschiedene Maßnahmen zum Einsatz:

- Bei den Kraftwerken an der Weser werden die Teilströme so auf die Maschinen verteilt, dass die flussseitigen Turbinen, an denen die große Mehrzahl der abwandernden Aale zu erwarten sind, mit maximalem Öffnungswinkel gefahren werden. Hierdurch wird das Kollisionsrisiko für die Fische verringert und damit die Überlebensraten erhöht sowie das Schädigungsrisiko gesenkt.

- Am Wasserkraftwerk Wahnhausen an der Fulda wird das Schluckvermögen der Turbine so weit reduziert, dass die Anströmgeschwindigkeiten vor dem Rechen den abwandernden Blankaale die Möglichkeit geben, über das benachbarte, geöffnete Wehrfeld abzuwandern. Die bislang vorliegenden Befunde belegen, dass das Frühwarnsystem MIGROMAT® bevorstehende Abwanderereignisse mit großer Zuverlässigkeit vorhersagt.
- Bei Probebefischungen in Landesbergen wurde nachgewiesen, dass dort mehr als 90 Prozent der Aale tatsächlich während des aalschonenden Betriebs abwandern (Tabelle 5). Schließlich ergab die Auswertung der Schokkerfänge, dass die Aale bei der Turbinenpassage während des aalschonenden Betriebs eine hohe Überlebensrate aufweisen. Bis zu 97 Prozent der abwandernden Aale können eine Turbinenpassage überleben, wie auch anhand einer Prognosemodellierung festgehalten wurde.

Statkraft hat mit der Umsetzung des aalschonenden Betriebs im Einzugsgebiet der Weser eine standortspezifische, automatische und nachhaltige Lösung entwickelt. Die standortspezifischen Anpassungen sind wichtig, damit eine hohe Überlebensrate erreicht werden kann (siehe auch *Anhang 1*). Eine automatisierte Lösung ist sicherer im tagtäglichen Betrieb und gewährleistet eine zuverlässige Umstellung von Normalbetrieb in den aalschonenden Betrieb. Die Nachhaltigkeit ist gegeben, weil es zu keinem Eingriff in den Wanderinstinkt und damit in das natürliche Verhalten des Blankaals kommt. Somit ist die Erzeugung der Wasserkraft nicht nur erneuerbar und klimafreundlich, sondern trägt auch zur Verbesserung der Gewässerökologie bei.

## 7. LITERATURVERZEICHNIS

- ADAM, B. & U. SCHWEVERS (2006): Möglichkeit eines aalschonenden Betriebs von Wasserkraftanlagen mit dem Frühwarnsystem MIGROMAT®.- Wasserwirtschaft 96/ 5, S. 16 – 21.
- ADAM, B. (2006): Das Frühwarnsystem MIGROMAT® schützt abwandernde Aale (*Anguilla anguilla*) vor Verletzungen durch Wasserkraftanlagen. - Artenschutzreport 19, S. 13 – 18.
- ADAM, B. (2000): MIGROMAT® - ein Frühwarnsystem zur Erkennung der Aalabwanderung. - Wasser & Boden 52/ 4, S. 16 – 19.
- ADAM, B., SCHWEVERS, U. & U. DUMONT (1999): Beiträge zum Schutz abwandernder Fische - Verhaltensbeobachtungen in einem Modellgerinne. - Solingen (Verlag Natur & Wissenschaft), Bibliothek Natur und Wissenschaft 16, 63 S.
- BERG, R. (1988): Gutachterliche Stellungnahme zu Fischschäden durch den Betrieb der Wasserkraftanlage "Am letzten Heller". - Langenargen (Institut für Seenforschung und Fischereiwesen), 34 S.
- BRUIJS, M. C. M., WINTER, H. V., SCHWEVERS, U. & U. DUMONT (2003): Management of silver eel: Human impact on downstream migrating eel in the river Meuse. - KEMA-Report 50180283-KPS/ MEC 03-6183, Abschlußbericht des EU-Forschungsprojekts Q5RS-2000-31141, 105 S.
- DUMONT, U., ANDERER, P. & U. SCHWEVERS (2012): Methoden zur Untersuchung von Fischwanderungen und der Schädigung von Fischen an Wasserkraftstandorten. - Dessau (Umweltbundesamt), UBA-Texte 21/ 2012 ([www.uba.de/uba-info-medien](http://www.uba.de/uba-info-medien)), 195 S.
- DWA (2005): Themenband WW-8.1: Fischschutz- und Fischabstiegsanlagen - Bemessung, Gestaltung, Funktionskontrolle. DWA Verlag, ATV-DVWK - Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.), Hennef, 256 S.
- DWA (2014): Merkblatt M-509: Fischaufstiegsanlage und fischpassierbare Bauwerke: Gestaltung, Bemessung, Qualitätssicherung. ISBN 978-3-942-964-91-3, DWA Verlag, Hennef.
- EBEL, G. (2013): Fischschutz- und Fischabstieg an Wasserkraftanlagen: Handbuch Rechen- und Bypasssysteme. Mitteilungen aus dem Büro für Gewässerökologie und Fischereibiologie Dr. Ebel (Hrsg.), Band 4, 484 S. ISBN 978-3-00-039686-1, Halle.
- FLADUNG, E., SIMON, J. & U. BRÄMICK (2012): Umsetzungsbericht 2012 zu den Aalbewirtschaftungsplänen der deutschen Länder 2008. - Potsdam-Sacrow (Institut für Binnenfischerei e.V.), Im Auftrag des niedersächsischen Ministeriums für Umwelt, 53 S.
- HAMMIRICH, A., GORANOVIC, G., CHEN, X. & M. DONNER (2012): Analyse der Kräfte in einem Hamennetz in der Weser. - Syke (DHI-WASY GmbH), im Auftrag der Statkraft Markets GmbH, 33 S.
- HARO, A. (2003): Downstream Migration of Silver-Phase Anguillid Eels - In: Aida, K., K. Tsukamoto & K. Yamauchi (Hrsg.): Eel Biology, Springer Verlag, Tokyo, 2003, S. 215 - 222.
- HOLZNER, M. (1999): Untersuchungen zur Vermeidung von Fischschäden im Kraftwerksbereich, dargestellt am Kraftwerk Dettelbach am Main/ Unterfranken. - Schriftreihe Landesfischereiverband Bayern 1, 224 S.
- ICES (2012): Report of the Joint EIFAAC/ ICES Working Group on Eels (WGEEL). - Copenhagen (ICES), 824 S.
- KEUNEKE, R., HOFFMANN, M. & DUMONT U. (2014): Fischschutz an der Wasserkraftanlage Langwedel/ Weser. Machbarkeitsstudie, 103 S.
- KOMMISSION DER EUROPÄISCHEN GEMEINSCHAFTEN (2003): Entwicklung eines gemeinschaftlichen Aktionsplans zur Bewirtschaftung des Europäischen Aals. Mitteilung der Kommission an den Rat und das Europäische Parlament, Brüssel 01.10.2003, KOM(2003)573, 15 S.
- LARINIER, M. & J. DARTIGUELONGUE (1989): La circulation des poissons migrateurs et transit à travers les turbines des installations hydroélectriques. - Bull. Fr. Pêche Piscic. 312/ 313, 90 S.
- LAVES, DEZERNAT BINNENFISCHEREI (2008): Aalbewirtschaftungsplan für das Flusseinzugsgebiet der Weser. (<http://www.portal-fischerei.de/index.php?id=1240>, 12.11.2014).
- MÖLLER, H., LÜCHTENBERG, H. & G. SPRENGEL (1991): Rückführung der am Einlaufrechen des Kernkraftwerks Brunsbüttel zurückgehaltenen Fische in der Elbe. Institut für Meereskunde an der Universität Kiel, im Auftrag der Kernkraftwerk Brunsbüttel GmbH, 94 S.
- PIANC (2008): Considerations to reduce environmental impacts of vessels. PIANC Report No. 99, Brussels, 103 S.

SCHWEVERS, U., ADAM, B. & O. ENGLER (2011): Befunde zur Aalabwanderung 2008/09. Erarbeitung und Praxiserprobung eines Maßnahmenplans zur ökologisch verträglichen Wasserkraftnutzung an der Mittelweser. UBA-Texte 75/2011, Umweltbundesamt Dessau ([www.uba.de/uba-info-medien/4200.html](http://www.uba.de/uba-info-medien/4200.html)), 72 S.

SCHWEVERS U., ADAM, B. & O. ENGLER (2008): Fischereiwirtschaftliches und -biologisches Gutachten für die Mittelweseranpassung. Im Auftrag des Wasser- und Schifffahrtsamtes Verden, 190 S.

SCHWEVERS, U. (2005): Der Aal (*Anguilla anguilla*) stirbt aus! - Artenschutzreport 16, S. 24 – 29.

SCHWEVERS, U. & B. ADAM (1998): Fischökologische Untersuchungen in den Main-Stauhaltungen Würzburg und Randersacker. Mitt. BfG 17 (Der Main: Fluss und Wasserstraße), S. 77 – 89.  
TierSchG (2013): Tierschutzgesetz. In der Fassung der Bekanntmachung vom 18. Mai 2006 (BGBl. I S. 1206, 1313), zuletzt geändert am 04. Juli 2013. - BGBl. I, S. 2182 ff.

TierSchG (2013): Tierschutzgesetz. In der Fassung der Bekanntmachung vom 18. Mai 2006 (BGBl. I S. 1206, 1313), zuletzt geändert am 04. Juli 2013. - BGBl. I, S. 2182 ff.

THORSTAD, E. B., M. B. LARSEN, T. HESTHAGEN, T. F. NÆSJE, R. POOLE, K. AARESTRUP, M. I. PEDERSEN, F. HANSEN, G. ØSTBORG, F. ØKLAND, I. AASESTAD & O. T. SANDLUND (2010): Ål og konsekvenser av vannkraftutbygging/ en kunnskapsoppsummering. Im Auftrag von Norges vassdrags og energidirektorat (NVE), Oslo, 137 S.

WOLTER, C. & R. ARLINGHAUS (2003): Navigation impacts on freshwater fish assemblages: the ecological relevance of swimming performance. *Reviews in Fish Biology and Fisheries* 13, S. 63 – 89.

## DANKE

Mein erster und besonderer Dank gilt meiner norwegischen Kollegin Mari Roald Bern, die als Projektleiterin für die Mitentwicklung und Implementierung des aalschonenden Betriebs verantwortlich war. Sie hat mit Ihrem unermüdlichen Einsatz wesentlich zum Erfolg des Projektes beigetragen. Ebenso möchte ich Frau Dr. Beate Adam und Dr. Ulrich Schwevers vom Institut für angewandte Ökologie danken. Ohne sie wäre das aalschonende Betriebsmanagement (ASB) an der Weser und die vorliegende Publikation nicht realisiert worden. Danke auch an meinen Kollegen Volker Schmidt für seine unentbehrliche technische Mitarbeit und Innovationskompetenz für das ASB.

Danke an die Kraftwerksgruppen Weser und Werra und die Kollegen in der Leitwarte in Erzhausen für ihre Bereitschaft, neue Wege zu gehen, Verbesserungsvorschläge und Rückmeldungen zu geben und damit den aalschonenden Betrieb ins Leben zu rufen.

Ich wünsche Euch und Ihnen allen weiterhin gute Ideen und frohes Schaffen!



Maik Thalmann  
Leiter Deutsche Wasserkraft  
Statkraft Markets GmbH

# ANHANG 1:

Liste wichtiger Parameter zur Umsetzung des aalschonenden Betriebsmanagement (ASB) und deren Beschreibung.

Anlageneigenschaften	Beschreibung
Bundeswasserstraße (j/n)	An Bundeswasserstraßen hat die Schifffahrt Vorrang; ein aalschonender Betrieb muss immer die Pegelhaltung gewährleisten. Eine Betätigung der kraftwerksseitigen Wehrklappe im ASB muss mit der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung abgestimmt werden.
Anzahl der Wehrverschlüsse	An Stauanlagen mit mehreren Wehrverschlüssen ist vorzugsweise das dem Kraftwerk benachbarte Wehrfeld für den aalschonenden Betrieb als Wehrüberfall zu nutzen. Dies erzeugt einen Bypass-Strom, der die Blankaale ins Unterwasser bringt.
Bautyp der Wehrverschlüsse	Je nach Konstruktionstyp der Wehrverschlüsse und ihrer Anströmung können hier unterschiedliche Schädigungsarten auftreten.
Beaufschlagung der Wehrverschlüsse	Die Auffindbarkeit und verletzungsfreie Passage über Wehrverschlüsse ist abhängig von dem Abflussvolumen.
Anzahl Wehrverschlüsse	Sind mehrere Wehre an einer Stauanlage vorhanden, muss das Kraftwerksnahe Wehr beim aalschonenden Betrieb genutzt werden, um einen Hauptstrom zu erzeugen, der die Blankaale über das Wehr leitet.
Steuermöglichkeiten (Klappe senken/ Segment heben)	Die Wassermenge ist entscheidend für die Auffindbarkeit des Wehrüberlaufs für Aale als auch für eine schadensfreie Passage über oder unter dem Wehr.
Störkörper (j/n)	Eine hohe Überlebensrate bei der Wehrpassage ist nur bei ausreichendem Wasser und ohne Störkörper im Unterwasser möglich.
Fallhöhe (m)	Eine Turbinenpassage und/ oder Wehrpassage ab 10 m Fallhöhe ist aufgrund der durch Druckunterschiede hervorgerufene Schwimmblasenschädigungen sowie Aufprallkräfte nicht geeignet für die Fische.
Unterwasser	Die Tiefe im Unterwasser sollte mindestens ein Viertel der Fallhöhe betragen um eine gefähderungsfreie Passage der Fische zu gewährleisten (KRIEWITZ et al. 2012).
<b>Turbine</b>	
Anzahl Turbinen in Kraftwerk	Bei möglicher Umverteilung des Wassers zwischen Turbinen ist die Erzeugung eines dezidierten Hauptstroms während des aalschonenden Betriebs erforderlich, da der Blankaal im Mittelwasser in der Hauptströmung schwimmt.
Drehzahl der Turbine (U/min)	Eine aalschonende Turbinenpassage ist nur möglich, wenn die Turbine eine niedrige Drehzahl hat (max. 65 U/min).
Durchmesser der Turbine (m)	Ein größerer Durchmesser (mindestens 4 m) verringert die Kollisionswahrscheinlichkeit mit Laufschaufeln bei der Turbinenpassage.
Umfangsgeschwindigkeit (m/s)	Die Umfangsgeschwindigkeit steht im Verhältnis zu Drehzahl und Durchmesser und ist somit entscheidend für die schadensfreie Turbinenpassage.
Anzahl der Laufradschaufeln	Der Schaufelanzahl beeinflusst die Kollisionswahrscheinlichkeit, das heißt je weniger Laufradschaufeln die Turbine hat, desto geringer ist die Kollisionswahrscheinlichkeit für die Fische.
Verstellbare Laufschaufel (j/n)	Die Überlebensrate erhöht sich mit steigendem Öffnungsgrad der verstellbaren Laufschaufeln der Turbine. Diese müssen stets im aalschonenden Betrieb in größtmöglichen Öffnungswinkel (90–100%) gefahren werden.
Laufschaufeldesign	Die vorderen Kanten der Laufschaufel müssen mit einem großen Radius aufgeprägt sein, um Schlagschäden bestmöglich zu minimieren.
<b>Rechen</b>	
Anströmungsverhältnisse (m/s)	Die Anströmung vor dem Rechen darf 0,5 m/s nicht überschreiten, wenn die lichte Stabweite des Rechens die Aalpassage unmöglich macht.
Rechenstabweite (mm)	Eine lichte Stabweite des Rechens von <20 mm gilt als bedingt passierbar für Blankaale. Für die kleineren Blankaalmännchen gilt eine lichte Weite <12 mm als nicht passierbar.

