



# **Abschlussbericht zum Projekt Fischschutz und Fischabstieg an der Pilotanlage Unkelmühle**

**Bezirksregierung Köln**

**innogy SE**

**Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und  
Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen**

**Düsseldorf, Köln, Essen 2019**

## Durchführende Stellen:

### Bezirksregierung Köln

Dez. 54, Wasserwirtschaft, 50606 Köln

### innogy SE

Opernplatz 1, 45128 Essen

### Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen

Referat Flussgebietsmanagement, Gewässerökologie,  
Hochwasserschutz, 40190 Düsseldorf

### Ansprechpartner

T. Wilke (thomas.wilke@bezreg-koeln.nrw.de)

E. Gnaudschun (ellen.gnaudschun@bezreg-koeln.nrw.de)

T. Schneider (clausstill.schneider@innogy.com)

S. Teggers-Junge (susanne.teggers-junge@innogy.com)

Dr. D. Ingendahl (detlev.ingendahl@mulnv.nrw.de)

P. Weimer (peter.weimer@mulnv.nrw.de)

Das Kapitel 4 „Biologisches Monitoring“ basiert in wesentlichen Teilen auf dem Abschlussbericht zum Projekt „Monitoring an der Pilotanlage für Fischschutz und Abstieg Unkelmühle“ im Auftrag des Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW Fachbereich 26, Heinsbergerstraße 53, 57399 Kirchhundem-Albaum



Dr. Lisa Heermann, Dr. Maxim Teichert &  
Prof. Dr. Jost Borchering  
Universität zu Köln Biozentrum  
Institut für Zoologie Allgemeine Ökologie und Limnologie  
Zülpicher Straße 47b, D-50674

Projektpartner: Finn Økland, Dr. Eva Thorstad, Dr. Richard Hedger,  
Torgeir Havn, Dr. Stein Are Sæther, Dr. Ola Diserud & Dr. Meelis Tambets  
Norwegian Institute for Nature Research



Postboks 5685 Sluppen  
7485 Trondheim  
Norwegen

# Inhalt

1	Einleitung.....	6
2	Beschreibung des Vorhabens .....	8
2.1	Veranlassung und Ziele.....	8
2.2	Vorgehensweise und Zielerreichungsmatrix.....	8
2.3	Standortbeschreibung und Monitoringeinrichtungen .....	11
2.3.1	Neue Anlagenkomponenten .....	12
2.3.1.1	Fischaufstiegsanlage.....	13
2.3.1.2	Feinrechen und Rechenreinigungsmaschinen.....	13
2.3.1.3	Oberflächenabstieg Fische .....	18
2.3.1.4	Sohnaher Fischabstieg .....	19
2.3.1.5	Geschiebeschütz und Geschiebekanal .....	20
2.3.2	Monitoringeinrichtungen .....	21
2.3.2.1	Oberflächennaher Bypass .....	23
2.3.2.2	Aalrohre.....	24
2.3.2.3	BottomGallery .....	25
3	Betriebliches Monitoring.....	27
3.1	Vorgehensweise .....	27
3.2	Betriebserfahrungen .....	29
3.2.1	Sonstige Auffälligkeiten.....	36
3.3	Ergebnisse des betrieblichen Monitorings .....	37
3.3.1	Betriebliches Monitoring – 4. und 5. Monitoringjahr .....	41
4	Biologisches Monitorings .....	43
4.1	Methoden und Vorgehensweise .....	43
4.2	Migrationsrouten und Verluste von abwandernden Atlantischen Lachssmolts.....	44
4.2.1	Methoden.....	44
4.2.1.1	Fang und Markierung .....	44
4.2.1.2	Aufzeichnung markierter Smolts .....	45
4.2.1.3	Unterscheidung tot/driftend vs. lebendig/schwimmend.....	46
4.2.1.4	Datenanalyse .....	46
4.2.2	Ergebnisse 2014.....	49
4.2.2.1	Smoltverluste im freifließenden Abschnitt im Vergleich zum Staubereich .....	49
4.2.2.2	Wanderwege an der Stau- und Wasserkraftanlage .....	49
4.2.2.3	Verluste an der Wasserkraftanlage .....	50

4.2.2.4	Wasserkraftbedingter Verlust von Smolts .....	52
4.2.2.5	Verluste im Vergleich zu Körpergröße .....	52
4.2.2.6	Migrationsgeschwindigkeiten / Wanderung im Tagesverlauf .....	52
4.2.3	Ergebnisse 2015.....	54
4.2.3.1	Ergebnisse allgemein.....	54
4.2.3.2	Smoltverluste im freifließenden Abschnitt im Vergleich zum Staubereich .....	54
4.2.3.3	Wanderwege an der Stau- und Wasserkraftanlage .....	54
4.2.3.4	Drift toter Smolts.....	54
4.2.3.5	Verluste an und unterhalb der Wasserkraftanlage.....	55
4.2.3.6	Wasserkraftbedingter Verlust von Smolts .....	57
4.2.3.7	Migrationsgeschwindigkeiten .....	57
4.2.4	Ergebnisse 2016.....	59
4.2.4.1	Ergebnisse allgemein.....	59
4.2.4.2	Smoltverluste im freifließenden Abschnitt im Vergleich zum Staubereich .....	59
4.2.4.3	Wanderwege an der Stau- und Wasserkraftanlage .....	59
4.2.4.4	Drift toter Smolts.....	59
4.2.4.5	Verluste an und unterhalb der Wasserkraftanlage.....	60
4.2.4.6	Wasserkraftbedingter Verlust von Smolts .....	61
4.2.4.7	Migrationsgeschwindigkeiten .....	61
4.2.5	Verluste 2014-2016 im Vergleich .....	62
4.2.6	Migrationsgeschwindigkeit 2014-2016 im Vergleich .....	63
4.2.7	Diskussion.....	64
4.2.7.1	Verluste im Staubereich .....	64
4.2.7.2	Wandergeschwindigkeit im Staubereich.....	65
4.2.7.3	Zusätzlicher Verlust im Staubereich aufgrund des Vorhandenseins einer Wasserkraftanlage.....	65
4.2.7.4	Verluste an der Wasserkraftanlage und zusätzlicher Verlust aufgrund des Vorhandenseins einer Wasserkraftanlage .....	66
4.3	Ergänzende Untersuchungen in den Frühjahren 2014 bis 2016 .....	68
4.3.1	Fangmonitoring 2014-2016.....	68
4.3.2	Ergänzende Videoaufzeichnungen .....	71
4.3.3	Untersuchungen zum kleinräumigen Verhalten abwandernder Lachse.....	72
4.4	Migrationsrouten und Verluste von abwandernden Europäischen Aalen.....	74
4.4.1	Methoden.....	74
4.4.1.1	Fang und Markierung von Blankaalen.....	74

4.4.1.2	Aufzeichnung markierter Aale.....	75
4.4.1.3	Drift toter Aale.....	76
4.4.1.4	Datenanalyse .....	77
4.4.2	Ergebnisse des Jahres 2014/2015 .....	80
4.4.2.1	Drift toter Aale.....	80
4.4.2.2	Ergebnisse allgemein.....	81
4.4.2.3	Wanderwege an der Stau- und Wasserkraftanlage .....	83
4.4.2.4	Verluste von Aalen im gesamten Untersuchungszeitraum.....	84
4.4.2.5	Migrationsgeschwindigkeiten .....	86
4.4.3	Ergebnisse des Jahres 2015/2016 .....	87
4.4.3.1	Drift toter Aale.....	87
4.4.3.2	Ergebnisse allgemein.....	89
4.4.3.3	Wanderwege an der Stau- und Wasserkraftanlage .....	91
4.4.3.4	Verluste von Aalen im gesamten Untersuchungszeitraum.....	92
4.4.3.5	Migrationsgeschwindigkeiten .....	93
4.4.4	Diskussion.....	95
4.5	Ergänzende Untersuchungen im Herbst 2014 und 2015 .....	96
4.5.1	Fangmonitoring .....	96
4.5.2	Untersuchungen zum kleinräumigen Verhalten abwandernder Aale.....	100
5	Fazit (inkl. Bewertung der Zielerreichung) .....	102
5.1	Fazit zum betrieblichen Monitoring .....	102
5.2	Fazit zur Schutzwirkung des Feinrechens.....	102
5.3	Fazit Smoltabwanderung.....	103
5.4	Fazit Blankaalabwanderung .....	105
6	Ausblick und Empfehlungen.....	107
7	Literaturverzeichnis.....	109
8	Abbildungsverzeichnis.....	113
9	Tabellenverzeichnis .....	116

## 1 Einleitung

Im Rahmen des von der IKS (Internationale Kommission zum Schutz des Rheins) beschlossenen Programms „Lachs 2000“, das nach dem Chemie-Unfall bei Sandoz aufgelegt worden war, wird auch in der Sieg die Wiederansiedlung des Lachses vorangetrieben. Bereits seit 1988 werden regelmäßig Junglachse besetzt (Molls & Nemitz 2008). Erste Erfolge zeigten sich als 1990 in der Bröl, einem Zufluss zur Sieg, der erste adulte Lachs nachgewiesen werden konnte. 1994 wurde die erste natürliche Vermehrung des Lachses im Rheinsystem dokumentiert. Im Jahr 1998 startete das „Wanderfischprogramm NRW“, das die Sieg als Schwerpunktgewässer bestätigt hat. Seit dem Jahr 2000 ist es möglich, die aus dem Meer zum Laichen in die Sieg zurückkehrenden Lachse in einer speziell errichteten Fangstation in Siegburg-Buisdorf zu erfassen, was einen wichtigen Teil des Erfolgsmonitorings des Wanderfischprogramms darstellt. Weiterhin ist die Sieg als Aal-Zielartengewässer im Bewirtschaftungsplan der EU-Wasserrahmenrichtlinie ausgewiesen worden. Seit geraumer Zeit werden in der Sieg Jungaale besetzt, um den Aalbestand zu stützen und die Ziele der EG Aalverordnung zu erreichen.

Die in der Sieg vorhandenen Wasserkraftanlagen können für die abwandernden Junglachse und Blankaale eine Gefährdung darstellen, insbesondere, wenn es auf dem Abstieg ins Unterwasser zu einer Turbinenpassage kommt. Zur Verbesserung des Fischschutzes und des Abstiegs wurde daher vom Land NRW zusammen mit dem Betreiber der Wasserkraftanlage Unkelmühle eine Pilotanlage für Fischschutz und Abstieg realisiert. Der Fischschutz und die Abwanderung von Lachssmolts und Blankaalen sollten in einem mindestens dreijährigen biologischen und technischen Monitoring untersucht werden, um die Effizienz der Pilotanlage bewerten zu können. Das biologische Monitoring umfasste einerseits ein Fangmonitoring an den Abstiegsanlagen in Unkelmühle und andererseits telemetrische Untersuchungen, die die Universität zu Köln in Kooperation mit dem Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW (LANUV) und dem Norwegian Institute for Nature Research (NINA) durchführte. Im Zuge der Entwicklung der Sieg als Gewässer für diadrome Fischarten begannen im Jahr 2011 am Standort Unkelmühle die Bauarbeiten für das aktuelle Pilotprojekt. Die Wasserkraftanlage Unkelmühle wurde durch die Bezirksregierung Köln in Abstimmung mit dem Betreiber mit verschiedenen Einrichtungen für die Verbesserung der Durchgängigkeit und des Fischschutzes des Kraftwerkes, insbesondere Feinrechen (10 mm), Fischabstiege und Fischaufstieg ausgestattet.

Ziel des Projektes war, Erkenntnisse über den Betrieb und die Funktionsfähigkeit der verschiedenen Einrichtungen, besonders im Hinblick auf den Fischabstieg, zu gewinnen. Dabei sollte ein möglichst ausgewogener Kompromiss zwischen bestmöglichem Fischschutz und geringstmöglicher Energieeinbuße erzielt werden. Um den erreichten Fischschutz an der Pilotanlage Unkelmühle wissenschaftlich fundiert zu beurteilen, wurde das Thema Fischschutz und Fischabstieg möglichst umfassend betrachtet. Dafür sollte die Funktion der technischen Anlagen, wie beispielsweise Bypässe oder Feinrechen, auch im Zusammenspiel mit der Energieerzeugung an der Anlage untersucht werden. Dazu wurde eine Mindererzeugung durch den Betrieb der Fischschutz- und Abstiegseinrichtung sowie die erhöhte Anforderung an die Rechenreinigung errechnet. Weiterhin wurde der erhöhte Betreuungsaufwand im Betrieb der Pilotanlage mit Mitarbeiterstunden kalkuliert, die wiederum in Strom-Mindererzeugung umgerechnet wurden. Das betriebliche Monitoring wurde durch die innogy SE durchgeführt und die Ergebnisse gemeinsam mit der Bezirksregierung Köln ermittelt.

Das biologische Monitoring wurde vom Land NRW beauftragt und von einem Konsortium aus der Universität Köln (Leitung und Koordination), dem norwegischen Forschungsinstitut NINA (Radiotelemetrie) und dem fischökologischen Büro Limnoplan (Fangmonitoring) durchgeführt. Im Zuge der Diskussionen einer begleitenden Arbeitsgruppe zum biologischen Monitoring wurde entschieden, zum besseren Verständnis der Auswirkungen eines Wasserkraftstandortes markierte Smolts und Blankaale auf dem ganzen Abwanderweg durch den Standort der Pilotanlage Unkelmühle, einschließlich des Rückstaus und einer Strecke unterhalb der Wasserkraftanlage telemetrisch zu verfolgen. Dies diente der Analyse der Fischwanderbewegungen, die nicht nur durch die eigentliche Wasserkraftanlage selbst, sondern auch durch mit dem Standort verbundene Habitatveränderungen, insbesondere hinsichtlich möglicher Migrationsverzögerungen und gegebenenfalls Prädation beeinflusst werden. Nähere Details zu den Zielsetzungen und dem Studiendesign können dem von der Universität zu Köln erstellten Bericht „Monitoringkonzept Wasserkraftanlage Pilotanlage Unkelmühle 2013-16“ (Borcherding & Teichert 2013) entnommen werden. Der von der Universität zu Köln ausgearbeitete Monitoringansatz wurde in einer begleitenden Arbeitsgruppe vorgestellt und abgestimmt.

Dieser Bericht umfasst die Ergebnisse des betrieblichen Monitorings sowie die Ergebnisse aus den bisher unveröffentlichten jährlichen Zwischenberichten des biologischen Monitorings (Heermann et al. 2015, 2016) sowie den veröffentlichten englischsprachigen NINA-Fachberichten zur Aal und Lachsabwanderung (Økland et al. 2016, 2017a, b). Weiterhin werden Ergebnisse aus den Berichten des biologischen (Fang-) Monitorings (Staas et al. 2014a, 2014b, 2015a, 2015b, 2016) sowie aus verschiedenen an der Universität zu Köln durchgeführten Abschlussarbeiten (Dickert 2015, Kreische 2015, Lindner 2016) zusammengefasst. Im Anschluss an die Vorstellung der Ergebnisse des Monitorings wird ein gemeinsames Fazit des Landes NRW und dem Betreiber der Anlage, innogy SE, gezogen. Dieses Fazit bewertet den Erfolg der Pilotanlage in Hinblick auf eine zu Projektbeginn gemeinsam definierte Zielerreichungsmatrix und den im Monitoring erreichten biologischen Schutzraten für abwandernde Aale und Lachse sowie der Mindererzeugung der Anlage.

## 2 Beschreibung des Vorhabens

### 2.1 Veranlassung und Ziele

Auf Grund des erheblichen Forschungs- und Entwicklungsbedarfs zum Thema Fischschutz und Fischabstieg entstand seitens des Landes NRW die Idee, ein Rechen-Bypass-System speziell für den Lachs und Aal zu testen. Die Unkelmühle wurde als geeigneter Standort ausgewählt, weil die Sieg Programmgewässer des Landes Nordrhein-Westfalen für die Wiederansiedlung des Lachses und Zielartengewässer des Aals ist und der Standort als vorletztes Querbauwerk vor der Mündung in den Rhein eine große Bedeutung für das gesamte Flussgebiet hat. Der Revisionsbedarf der innogy SE zu eigenen Lasten ermöglichte außerdem eine Konzentration der Belastung für Gewässer und Umfeld durch die Baumaßnahmen auf den gleichen Zeitraum.

Das Vorhaben ist somit Teil der Entwicklung der Sieg als Gewässer für diadrome Fischarten und erfolgte als gemeinschaftliches Projekt des Landes NRW und dem Eigentümer innogy SE. Neben der Verbesserung der Durchgängigkeit der Sieg war das Ziel, Erkenntnisse über den Bau und die Funktionsfähigkeit der neuen Einrichtungen zum Fischschutz und Fischabstieg zu gewinnen, die im Handbuch Querbauwerke (MUNLV 2005) entwickelt und beschrieben worden sind.

Durch die Umsetzung als Pilotanlage haben das Land NRW und innogy SE die Voraussetzungen zur gleichberechtigten Untersuchung der ökologischen und betrieblichen Auswirkungen sowie der damit verbundenen Erzeugungsverluste geschaffen.

Die bauliche Umgestaltung des Standortes hatte folgende Ziele:

- Verbesserung der biologischen Durchgängigkeit speziell für die Zielarten Lachs und Aal
  - Neubau eines Fischaufstiegs am Krafthaus, Einbau 10 mm Feinrechen mit oberflächennahen Öffnungen für den Lachsabstieg, Einbau von Vorrichtungen für den Aalabstieg
- Verbesserung der Feststoffbewirtschaftung
  - Weiterführung von Schwemmgut ins Unterwasser, Weiterführung von Geschiebe und Sedimenten über Grundschütz
- Einbau von Vorrichtungen für das biologische Monitoring

### 2.2 Vorgehensweise und Zielerreichungsmatrix

Zur Umsetzung der Ziele haben beide Partner einen öffentlich-rechtlichen Vertrag geschlossen, in dem alle Aspekte der Planung, des Baus, des Betriebs, der Nutzung und des Monitorings der Maßnahme sowie eventuell notwendige Anpassungen geregelt wurden.

Dieser Vertrag stellt für Planung, Bau und Monitoring das zentrale Dokument dar und wurde daher mit ausreichender Vorlaufzeit und unter Berücksichtigung umfangreicher Erfahrung von Juristen und Technikern geschlossen. Möglichst alle absehbaren Ereignisse und Vorkommnisse wurden berücksichtigt. Planung, Bau und Betrieb der Pilotanlage begleitete eine Arbeitsgruppe bestehend aus dem Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz NRW, der Bezirksregierung Köln, der innogy SE, dem Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz, der Sieg-Fischerei-Genossenschaft, dem Wanderfischprogramm Nordrhein-Westfalen und der Energie Agentur (beratend).



innogy SE übernahm die Pflicht die erforderlichen Grundstücke kostenlos zur Verfügung zu stellen, sich an der Gesamtinvestition zu beteiligen, die Wasserkraftanlage und den neuen Fischaufstieg mindestens 20 Jahre zu betreiben und ein betriebliches Monitoring der Pilotanlage durchzuführen.

Pflichten des Landes waren über die Bezirksregierung Köln als Landesmittelbehörde die Planung und Durchführung der Baumaßnahmen, die Übergabe von gebrauchsfähigen Anlagen, die Übernahme von Kosten für erforderliche Anpassungsmaßnahmen sowie über das Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV) die Koordination und Durchführung eines biologischen Monitorings.

Im öffentlich rechtlichen Vertrag zum Umbau der Wasserkraftanlage Unkelmühle zur Pilotanlage für den Fischschutz und den Fischabstieg im Aal- und Lachs-Zielartengewässer Sieg haben die Vertragspartner festgelegt, ein gemeinsames Fazit zur Zielerreichung des Projektes zu ziehen. Dieses Fazit betrifft einerseits die biologische Wirksamkeit des Fischschutzes und der Abstiegsanlagen sowie andererseits die betrieblichen und energetischen Auswirkungen, die der Umbau der Anlage und die geänderte Betriebsweise auf den energetischen Ertrag der Wasserkraftanlage haben. Zwischen den Vertragspartnern wurde ein biologisches Monitoring (verantwortlich Land NRW) und ein betriebliches Monitoring (innogy SE) vereinbart und im Zeitraum von drei Jahren von 2014 bis 2016 durchgeführt. Die Ergebnisse des Monitorings finden sich in diesem gemeinsamen Abschlussbericht. Darüber hinaus gibt es zum biologischen Monitoring detaillierte Ergebnisberichte zu den radiotelemetrischen Untersuchungen (sog. NINA-Berichte) sowie Berichte über die Ergebnisse des Fangmonitorings (Fa. Limnoplan), die zum Download auf der Homepage des Landes NRW zu finden sind ([www.flussgebiete.nrw.de](http://www.flussgebiete.nrw.de)).

Für die Beurteilung des Erfolges haben beide Vertragspartner vor Beginn des Umbaus der Pilotanlage eine Zielerreichungsmatrix vereinbart. Diese Matrix setzt den erreichbaren Grad des Fischschutzes und das Ausmaß des durch den Umbau der Rechenanlage und der Dotation von Fischabstiegswegen bedingten energetischen Minderertrags zueinander in Beziehung. In die Matrix sollen die Ergebnisse der Pilotanlage (Abb. 1) auf einer zu Beginn des Projektes festgelegten Skala in die Kategorien „bestmögliches Ergebnis“, „akzeptables Ergebnis“, „Anpassung notwendig“ und „Ergebnis unbefriedigend“ eingeordnet werden.

Die Festlegung der oben genannten Kategorien zum Ergebnis „Fischschutz“ erfolgte u.a. nach den Vorgaben, die im Handbuch Querbauwerke (MUNLV 2005) für den Fischschutz an Wasserkraftanlagen in Nordrhein-Westfalen ermittelt worden sind. Danach wird eine Schutz- und Abstiegsrate für Lachssmolts und Blankaale von 95 % an einer optimal geschützten Wasserkraftanlage als anzustrebendes Ergebnis beschrieben, um einen ausreichenden Fischschutz an Wasserkraftanlagen innerhalb von anadromen bzw. katadromen Zielartengewässern für den Populationsaufbau bzw. Erhalt zu erreichen. Um eine wissenschaftliche Grundlage für die Beurteilung des Fischschutzes für die Zielarten zu schaffen, wurde ein telemetrisches Monitoring abwandernder Blankaale und Lachssmolts vereinbart (Kap. 4). Dieses Monitoring wurde von der Universität zu Köln gemeinsam mit dem norwegischen Forschungsinstitut NINA in einer Kooperation mit dem LANUV NRW durchgeführt. Das Untersuchungsdesign entspricht auch den vom Forum Fischschutz ausgesprochenen Empfehlungen zum Monitoring von Wasserkraftanlagen (Forum „Fischschutz und Fischabstieg“ 2015). Die Ergebnisse des telemetrischen Monitorings ermöglichen, die Schutzraten abwandernder Blankaale und Lachssmolts bei der Passage der Wasserkraftanlage zu quantifizieren.

Die Ergebnisse des parallel dazu verlaufenden Fangmonitorings sollen herangezogen werden, um die Beurteilung des Erfolgs der Pilotanlage Unkelmühle abschließend zu ergänzen.

Die Beurteilung der Auswirkungen auf den Stromertrag der Anlage gründet auf der Kalkulation der für den Betrieb der Abstiegswege (Bypässe) erforderlichen Betriebswassermengen, die für die Stromerzeugung (je nach Abfluss der Sieg) ggf. nicht mehr zur Verfügung stehen sowie weiterer Energieverluste z.B. durch Verlegung des 10 mm Feinrechens (Rechenverluste) und steigendem Energiebedarf z. B. die für eine höhere Reinigungsfrequenz der neuen Rechenreinigungsmaschinen. Weiterhin wurden die höheren zeitlichen Aufwendungen für die Wartung der Anlage und der neuen baulichen Einrichtungen zum Fischschutz und Abstieg (Stundenaufwand) in ein Energieäquivalent umgerechnet, und ebenso wie der höhere Energieverbrauch der Fischschutzeinrichtungen als Mindererzeugung von der zwischen 2014 und 2016 erzeugten Strommenge der Wasserkraftanlage abgezogen (Abb. 1 und Kap. 5).

Die vor dem Umbau formulierte Erwartung lag bei einem Ertrag von mindestens 90 % als „bestmöglichem Ergebnis“, und von mindestens 85 % als „akzeptablem Ergebnis“. Ein darüber hinaus gehender Verlust mit einem Ertrag von weniger als 85 % würde „Anpassung notwendig“, bedeuten.

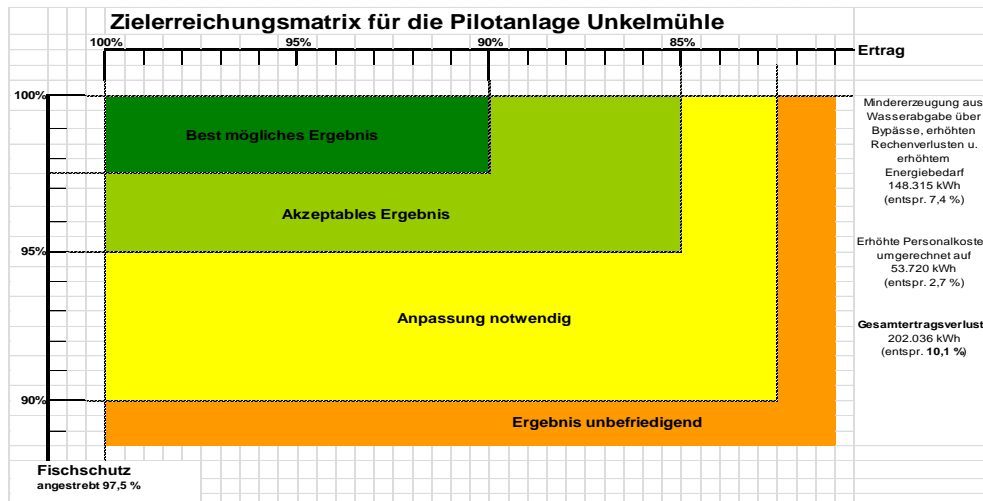


Abbildung 1: Zielerreichungsmatrix für die Pilotanlage Unkelmühle

Der Grad der Zielerreichung wurde während eines jeweils 3-jährigen betrieblichen und biologischen Monitorings dokumentiert und hinsichtlich des technischen Betriebs und der Erzeugungsverluste fortlaufend bewertet. Dies führte z.T. bereits während der Monitoringphase zu Anpassungen und Verbesserungen an einzelnen Anlagenkomponenten (insbesondere durch den Tausch eines Rechenfeldes), um aufgetretene Erzeugungsverluste zu minimieren, ohne die biologische Wirksamkeit des Fischschutzes zu beeinträchtigen.

## 2.3 Standortbeschreibung und Monitoringeinrichtungen

Die Sieg ist ein Mittelgebirgsfluss, der östlich von Siegen entspringt und mit einer Gesamtlänge von 155 km bei Bonn in den Rhein mündet. 25 km östlich von Bonn befindet sich an der unteren Sieg die Wasserkraftanlage Unkelmühle. Die Inbetriebnahme der Wasserkraftanlage fand 1923 auf dem Gelände einer bereits 1601 dokumentierten gleichnamigen Mühle statt. 1965 ging die Anlage in den Besitz von RWE über und wurde 1966 modernisiert und weitgehend automatisiert.



Abbildung 2: Wasserkraftanlage Unkelmühle in früherer Zeit, Quelle: innogy SE

Das Siegwehr und die Wasserkraftanlage Unkelmühle liegen bei Flusskilometer 44 in der Gemeinde Windeck des Rhein-Sieg-Kreises. Die direkt an der Landstraße L333 gelegene Wasserkraftanlage, die Betriebsgräben und der Fischpass befinden sich am rechten Ufer. Am linken Siegufer sind ein zweiter Fischaufstieg sowie eine Bootsruhsche innerhalb des Wehrs vorhanden. Dieses Wehr gliedert sich in ein ca. 120 m langes und ca. 10 m breites festes Streichwehr. An dieses schließt sich ein Verschlussorgan zur Regulierung der Abflüsse in den Betriebsgräben an. Über einen ca. 15 m breiten und 130 m langen Oberwassergraben wird das Wasser zu den drei Turbinen-Einläufen geleitet, um dort die mittlere Fallhöhe von ca. 2,5 m energetisch zu nutzen. Die Gesamtlänge der Ausleitungsstrecke beträgt ca. 700 m.

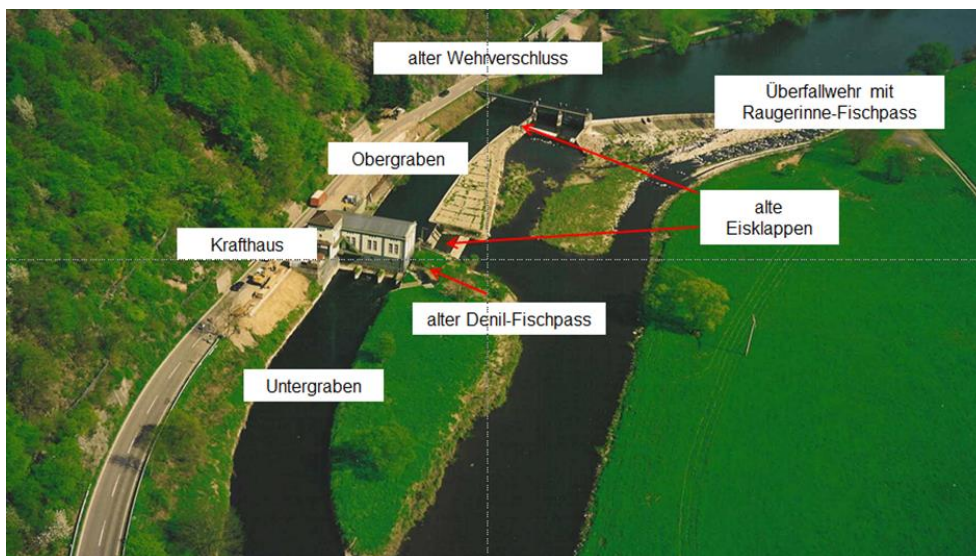


Abbildung 3: Anordnung und Anlagenteile vor dem Umbau zur Pilotanlage, Quelle: innogy SE

1992 wurde die Wasserkraftanlage mit Wehr, Kraftwerkshalle und den Unterwasserausläufen als Zeugnis des Industriebaustils unter Denkmalschutz gestellt. Neben der architekturgeschichtlichen Bedeutung wird die landschaftsprägende Bedeutung des Gesamtstandortes mit Wasserlauf, Wehranlage und Kraftwerk für das Windecker Land als Begründung hervorgehoben. Ausdrücklich nicht unter Denkmalschutz gestellt wurden die maschinellen und elektrischen Einrichtungen.



Abbildung 4: Außen- und Innenansicht der Wasserkraftanlage vor dem Umbau als Pilotanlage, Quelle: innogy SE

Mit einer Ausbauwassermenge von  $27 \text{ m}^3/\text{s}$  und den drei Francis-Turbinen mit einer Gesamtleistung von 420 kW kann theoretisch eine maximale Jahreserzeugung von zwei GWh Strom erreicht werden.

An der Wasserkraftanlage wird eine Mindestwassermenge von 700 l/s abgegeben, die nicht zur Stromerzeugung zur Verfügung steht. Diese teilt sich auf die beiden Fischaufstiege am Krafthaus und am Wehr auf. Zusätzlich werden seit dem Umbau als Pilotanlage 2013 vereinbarungsgemäß zu bestimmten Zeiten die erforderlichen Wassermengen für die neuen Bypässe in Höhe von bis zu 1.000 l/s abgegeben. Um die Eisabfuhr im Winter sicherzustellen befindet sich am Ende des Oberwassergrabens außerdem eine zusätzliche Eisklappe.

Für die Unterhaltung des Wehres und den Betrieb der Wasserkraftanlage ist heute innogy SE als Gesellschaft des RWE Konzerns zuständig. Zeitgleich mit einer Modernisierung der bestehenden Wasserkraftanlage durch den Betreiber wurden in den Jahren 2011 bis 2013 innovative Konzepte für den Schutz und den Abstieg von Fischarten wie Lachs und Aal realisiert einschließlich der für das Monitoring vorgesehenen Fangeinrichtungen (Tiroler Rechen und Fangbecken).

### **2.3.1 Neue Anlagenkomponenten**

Im Jahr 2009 wurde der Vertrag über die Pilotanlage zwischen dem Land NRW und innogy SE auf Basis einer Vor- und Entwurfsplanung des Ingenieurbüros Floecksmühle geschlossen. 2010 begannen die Ausführungsplanung und die Ausschreibungen.

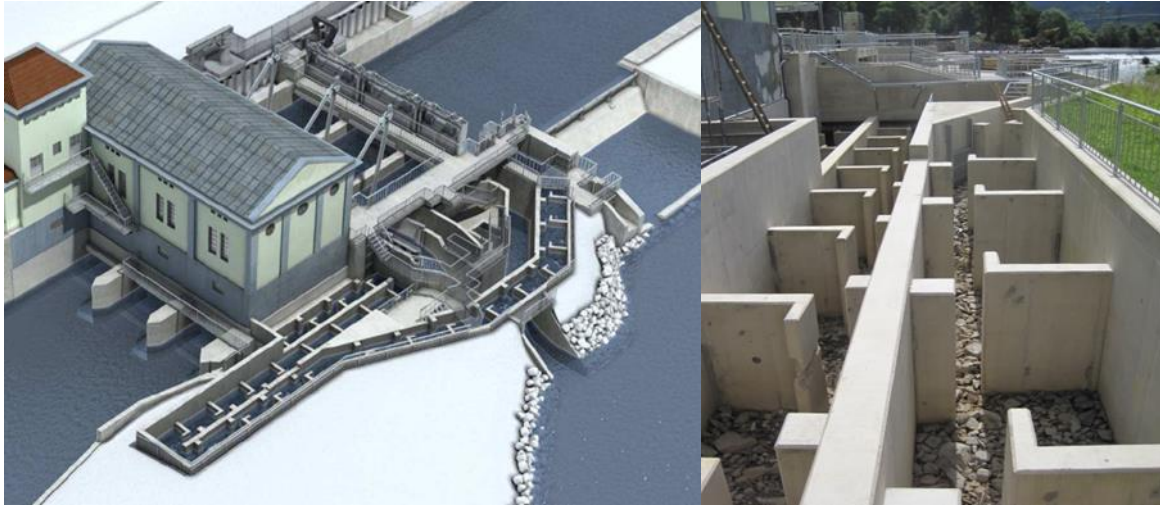


Abbildung 5: Grafik der Pilotanlage und Blick in den neuen Vertical-Slot Fischpass

Folgende Anlagenkomponenten wurden in der Pilotanlage neu installiert:

#### 2.3.1.1 Fischaufstiegsanlage

Um wandernden Fischen den Wechsel vom Unterwasser der Wasserkraftanlage in das Oberwasser zu ermöglichen, gibt es am Standort Unkelmühle bereits seit langer Zeit entsprechende Fischaufstiegsanlagen. So wurden 1990 direkt am Streichwehr der Anlage eine Blocksteinrampe sowie an der Wasserkraftanlage selbst ein sogenannter Denilfischpass errichtet. Zuvor hatte es hier bereits einen nicht funktionsfähigen Beckenpass gegeben.

Mit dem Umbau der Pilotanlage wurde der nur für sprintstarke Fischarten selektiv durchgängige Denilfischpass durch einen „Vertical Slot Pass“ nach neuestem technischen Standard ersetzt. Über 27 Becken mit einem Durchfluss zwischen 280 bis 320 l/s können aufsteigende Fische die rd. 3 m Höhendifferenz zwischen Unter- und Oberwasser der Anlage überwinden.

Planung und Bau von Fischaufstiegsanlagen sind heute eine bekannte und erprobte Technik (DWA Merkblatt 509); ein spezielles Monitoring des „Vertical Slot Passes“ war somit nicht erforderlich.

Weit weniger erforscht sind dagegen bis heute Möglichkeiten und Einrichtungen des Fischschutzes und des sicheren Fischabstieges, deren Einrichtungen an der Anlage Unkelmühle für den Schutz der Wanderfischarten Aal und Lachs konzipiert worden sind.

#### 2.3.1.2 Feinrechen und Rechenreinigungsmaschinen

Neu eingebaut wurden in die Anlage drei flach geneigte vertikal angeordnete Feinrechen mit einem Stababstand von 10 mm, um das Einschwimmen kleinerer Fische und insbesondere von Lachssmolts, die ihre Aufwuchshabitate in Richtung Meer verlassen, in die Turbinen zu verhindern.

Die jeweils 27° zur Horizontalen geneigten 10 mm Rechenfelder besitzen unterschiedliche Stabprofile:

- Maschine 1 (rechtsufrig) tropfenförmiges Rechenprofil mit nach vorne gezogenen Abstandhaltern mit den Abmessungen 8,10 m Länge und 4,20 m Breite.



Abbildung 6: Feinrechenprofil in Tropfenform der Maschine 1

- Maschine 2 (mittig) Umbau im August 2015, seitdem tropfenförmiges Rechenprofil (wie Maschine 1), allerdings mit Rundhülsen als Abstandshalter. Bis August 2015 eingebautes Y-Rechenprofil mit nach vorne gezogenen Abstandshülsen. Abmessungen 8,10 m Länge und 4,12 m Breite.



Abbildung 7: Feinrechenprofil in Y-Form der Maschine 2 vor Umbau 2015

- Maschine 3 (siegseitig) Rechen kombiniert aus Y-Profilen und Flachstählen mit nach vorne gezogenen Abstandshaltern mit den Abmessungen 8,10 m Länge und 3,56 m Breite.



Abbildung 8: Feinrechenprofil in Y-Form und Flachstählen der Maschine 3

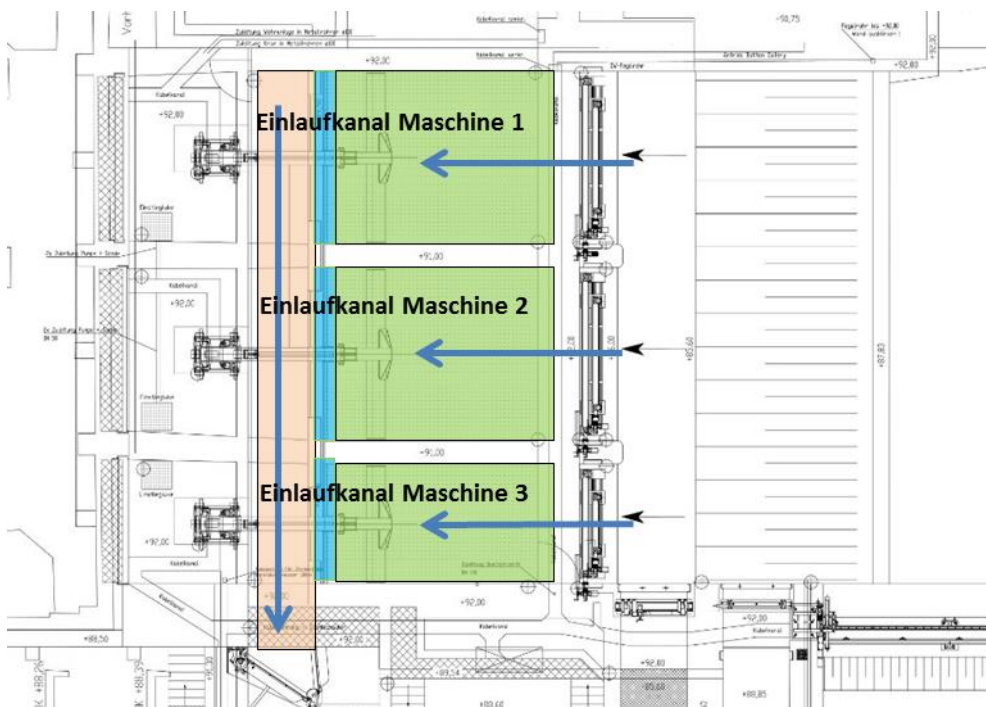
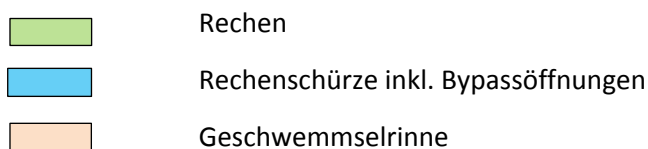


Abbildung 9: Einlaufrechen und Bypass System Oberflächenabwanderer



Durch den engen Stababstand behindert verstärkt Geschwemmsel (Äste, Laub, sonstiges Treibgut) den Kraftwerksbetrieb, so dass für alle 3 Rechenfelder jeweils eine leistungsfähige Rechenreinigungsanlage (Knickarmreiniger) installiert wurde. Die Rechenreinigungsmaschinen ziehen

das ankommende Geschwemmsel über die Oberkante des Rechen in eine Querrinne mit einer Breite von 1,80 m und einer Tiefe von 63 cm (Geschwemmselrinne), über welches es, im Bedarfsfall mit einer zusätzlichen Spülpumpe, am Kraftwerk vorbei in das unterwasserseitige Flussbett der Sieg abgeführt wird (Abb. 10-14).

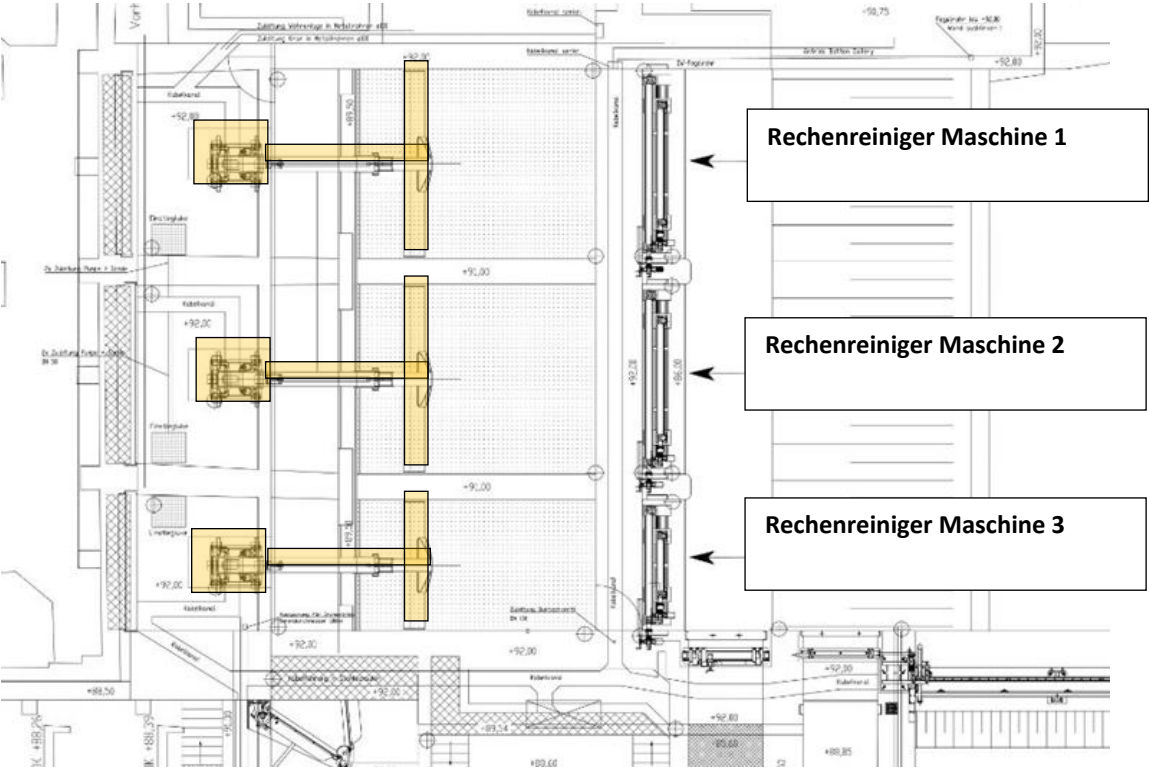


Abbildung 10: Rechenreiner



Abbildung 11: Fischabstiegsrinne mit Rechenschürze und Rechenreinigern





Abbildung 12: Detail Rechenreiniger mit Reinigungsleiste und Bürsten

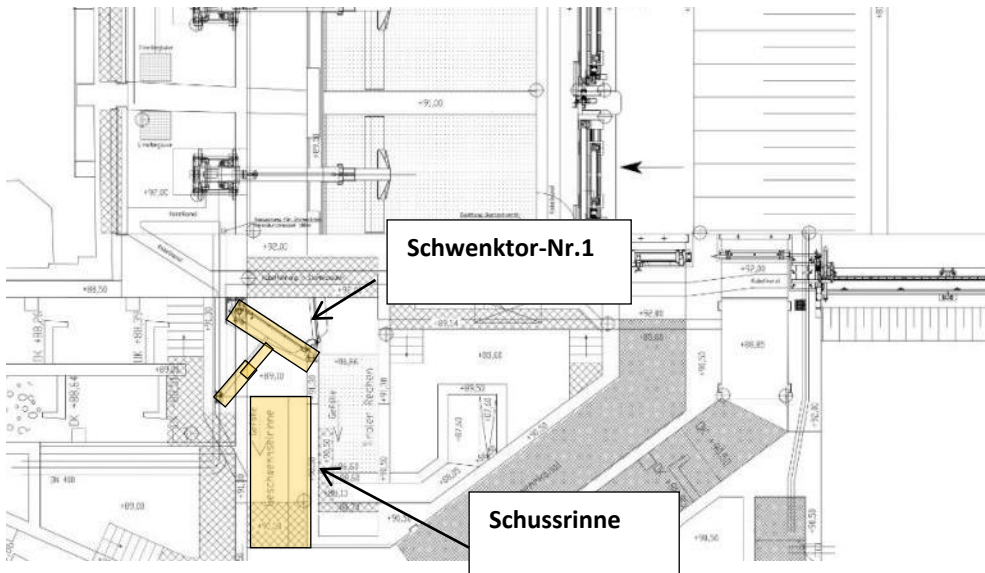


Abbildung 13: Fischabstieg hinter Geschwemmselrinne mit Schwenktor 1

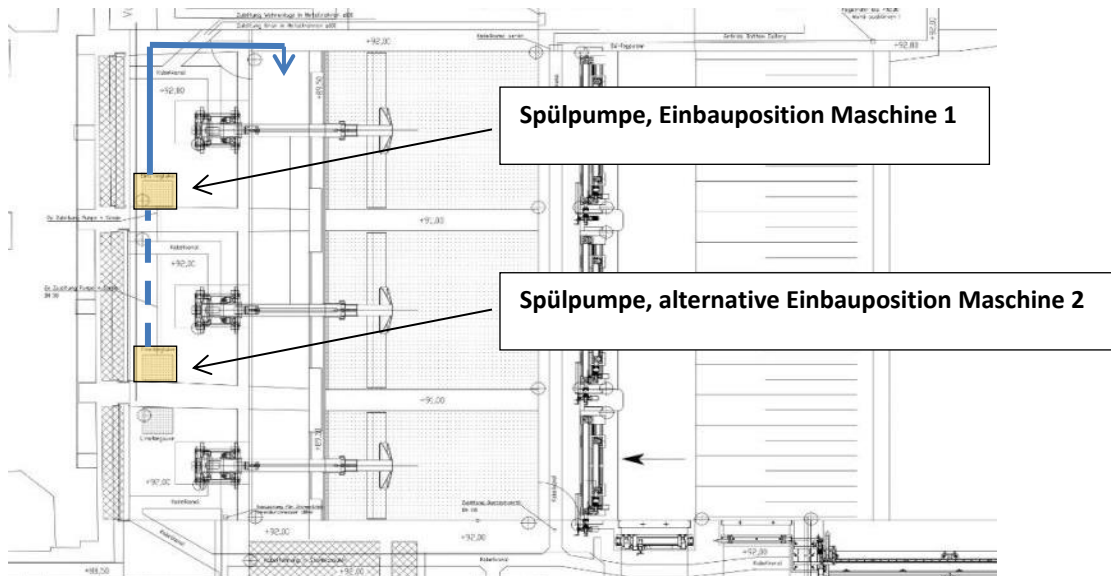


Abbildung 14: Spülpumpe in der Geschwemmselrinne

### 2.3.1.3 Oberflächenabstieg Fische

Am oberen Ende der drei Rechenfelder sind in der Rechenschürze jeweils zwei Öffnungen angeordnet.

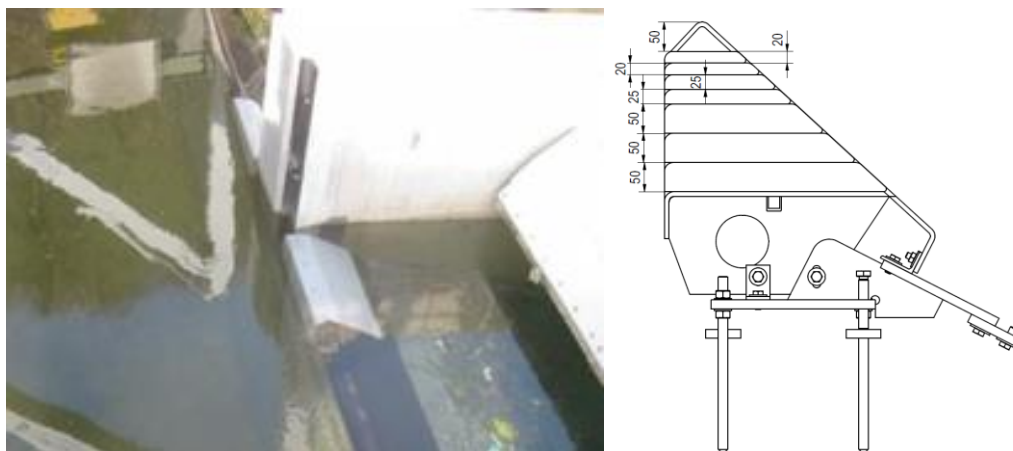


Abbildung 15: Bypassöffnungen in der Rechenschürze

Diese oberflächennahen Bypässe werden im Frühjahr von Mitte März bis Mitte Mai für die abwandernden Lachssmolts geöffnet, um den Fischen über die Querrinne (Geschwemmselrinne) eine Passage an den Turbinen vorbei ins Unterwasser zu ermöglichen. Die Bypassöffnungen können durch Einbauelemente in ihrer Tiefe und Breite verändert werden. Dadurch sind stufenweise eine Überfallhöhe von 5-29 cm und eine Öffnungsbreite von 0-70 cm wählbar. Im Rahmen des Monitorings wurde die Breite von 70 cm jedoch nicht verändert. Die Querrinne (Geschwemmselrinne) erfüllt somit eine Doppelfunktion: sie gewährleistet zum einen die Abgabe von Geschwemmsel, und ermöglicht zum anderen abwandernden Fischen die Passage vom Ober- ins Unterwasser.

Das Monitoring des oberflächennahen Abstiegs erfolgte in den jeweiligen Jahren jeweils innerhalb des Zeitraums vom 15. März bis zum 20. Mai. In dieser Periode war das Schwenktor 1 permanent (ganztägig) mit einem Öffnungswinkel von 26° geöffnet, sodass ein Abstieg über die Spülrinne zu jeder Zeit möglich war. An den drei Rechenfeldern wurde über die Einbauelemente bei der in Fließrichtung jeweils rechten Öffnung eine Überfallhöhe von 24 cm bei maximaler Öffnungsbreite (70 cm) eingestellt. Bei der in Fließrichtung jeweils linken Öffnung war es hingegen eine Überfallhöhe von 14 cm bei 70 cm Breite. Diese unterschiedlichen Einbauhöhen wurden gewählt, um einen Rückfluss über die jeweils unterhalb liegende Öffnung in die Einlaufkammer der Turbinen zu verhindern.

#### **2.3.1.4 Sohl naher Fischabstieg**

Einige Fischarten, wie z.B. Aale wandern nach bisherigen wissenschaftlichen Erkenntnissen bevorzugt am Grund eines Gewässers ab oder orientieren sich an seitlichen Strukturen.

Für diese Fische wurden an der Pilotanlage die Komponenten **Aalrohre** und **Bottom Gallery** installiert.

Bei den Aalrohren handelt es sich um drei in die Seitenwand der Turbinenkammer 3 in unterschiedlicher Höhe eingebrachte Rohre, durch welche die Fische die Anlage zu bestimmten Wanderzeiten in der 2. Jahreshälfte passieren konnten.

Neben den Aalrohren wurde vor dem Fuß des Feinrechens eine sogenannte Bottom Gallery im Abstand von 7,45 m eingebaut. Hierbei handelt es sich um eine quer zum Turbinengraben eingebrachte, klappenartige Vorrichtung, die durch wechselndes Öffnen und Schließen Fische (Aale) einfängt und über eine Rohrleitung dem Unterwasser zuführt. Der zyklische Betrieb der Bottom Gallery unterteilt sich in eine Fang- und eine Transportphase. In der Fangphase ist die Klappe der Bottom Gallery geöffnet und das Quetschventil verschlossen (kein Durchfluss ins Monitoringbecken). In der Transportphase ist die Klappe der Bottom Gallery geschlossen und das Quetschventil Richtung Monitoringbecken geöffnet, sodass Fische, die in der Fangphase den strömungsarmen Bereich der Bottom Gallery aufgesucht haben, ins Monitoringbecken einströmen.

Das Monitoring der sohl nahen Abstiege erfolgte im Jahr 2014 innerhalb des Zeitraums vom 11. August bis 15. Dezember und im Jahr 2015 vom 25. August bis 14. Dezember. In diesen Perioden waren die Quetschventile der Aalrohre und der Bottom Gallery permanent (ganztägig) geöffnet, sodass ein Einschwimmen in die Monitoringbecken zu jeder Zeit möglich war. Die Monitoringbecken der Aalrohre waren permanent mit einem geringen Durchfluss durchströmt. In diesen Monitoringperioden war auch die Bottom Gallery permanent (ganztägig) in Betrieb. Als Betriebszyklus der Bottom Gallery wurden 30 Minuten gewählt, bestehend aus 20 Minuten Fangphase und 10 Minuten Transportphase.



Abbildung 16: Einbau der BottomGallery

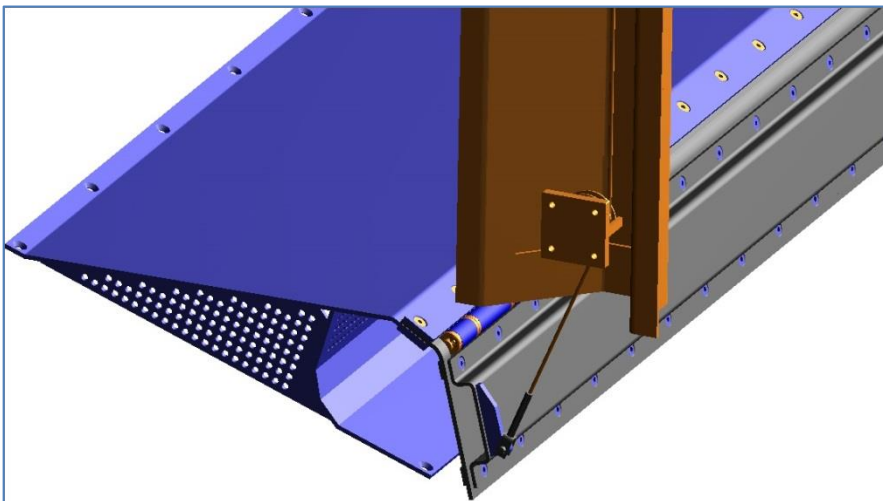


Abbildung 17: Detail der BottomGallery inkl. Antrieb in geschlossenem Zustand

### 2.3.1.5 Geschiebeschütz und Geschiebekanal

Aufgrund der vergrößerten, flacheren Feinrechenanlage bestand die Gefahr, dass sich hier vermehrt Sedimente (Schlamm, Sand, Kies) ablagern, welche den Durchflussquerschnitt zu den Turbinen sukzessive reduzieren würden.

Um dies zu verhindern, wurden vor der Rechenanlage ein Geschiebeschütz und ein Geschiebekanal eingebaut, so dass abgelagerte Sedimente aus dem Turbineneinlaufkanal bei Bedarf ins Unterwasser gespült werden können. Außerdem können mit dem so generierten Wasserstrom Ansammlungen von Geschwemmsel am Fuß der Geschwemmselrinne in die Sieg abgeführt werden.

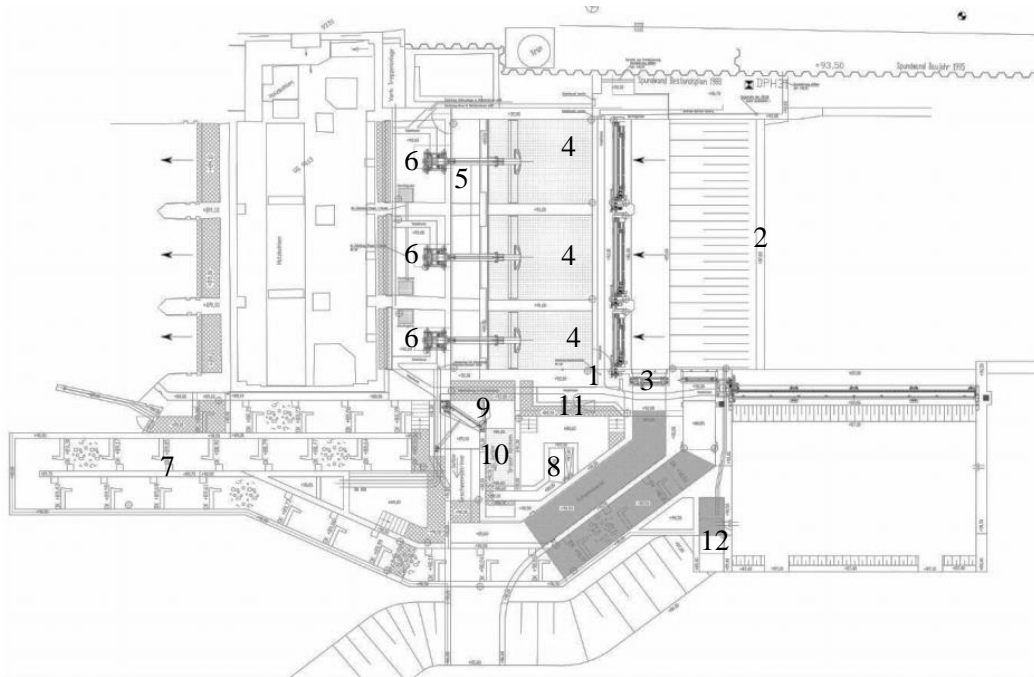


Abbildung 18: Übersicht der Gesamtanlage mit allen Anlagenkomponenten

1. Aalrohre
2. Bottom Gallery
3. Geschiebeschütz
4. Feinrechen
5. Geschwemmselrinne
6. Rechenreinigungsanlage
7. Vertical Slot Pass
8. Fangkammer Oberflächenbypässe
9. Schwenktor 2
10. Tiroler Rechen
11. Fangkammer Aalrohre
12. Fangkammern BottomGallery

### 2.3.2 Monitoringeinrichtungen

Folgende Ziele wurden mit dem Monitoring der Pilotanlage verbunden:

- Beurteilung der biologischen Effizienz von Fischschutz und Abstieg (insbesondere Schutzraten abwandernder Blankaale bzw. Lachssmolts)
- Beurteilung der technischen Einsatz- und Funktionsfähigkeit sowie des Wartung- und Kontrollaufwands
- Dokumentation der Betriebskosten sowie der Erzeugungsverluste
- Sammlung von Erfahrungen zur Optimierung des künftigen Betriebs sowie zur Weiterentwicklung der Technik
- Soweit möglich: Beurteilung der Funktionsfähigkeit von Methoden zur Erfassung von Fischbestand und Fischbewegungen

Vertraglich wurde vereinbart, dass die Verwertung der Ergebnisse aus dem Monitoring beiden Partnern zusteht und hierfür wurde der vorliegende Bericht gemeinsam erstellt. Der dauerhafte Betrieb der neuen Vorrichtungen, insbesondere zum Fischschutz und Abstieg erfolgt auf Basis der abschließenden Ergebnisse. Fünf Jahre nach der Inbetriebnahme können ggf. noch Erfahrungen zur Lebensdauer und dem Unterhaltungs- und Reparaturaufwand der neuen Anlagenteile in dem Bericht ergänzt werden.

Nach dem Umbau und einer anschließenden Probephase begannen im Herbst 2013 der offizielle Betrieb und der Start des biologischen und betrieblichen Monitorings.

Die neuen Abwanderwege und das Fischschutzkonzept wurden in einem dreijährigen Monitoring von Oktober 2013 bis zum Oktober 2016 auf ihre Funktionsfähigkeit, ihre Effektivität und ihre Vereinbarkeit mit dem Betrieb der Wasserkraftanlage getestet. Zusätzlich wurden viele neue Erkenntnisse und Einsichten zur Biologie der Abwanderung diadromer und potamodromer Fischarten gewonnen. Um das biologische Monitoring durchführen zu können, wurden an der Anlage Fang-Einrichtungen zur Kontrolle abwandernder Fische an den oberflächennahen Bypassöffnungen, den seitlichen Aalrohren und der BottomGallery installiert.

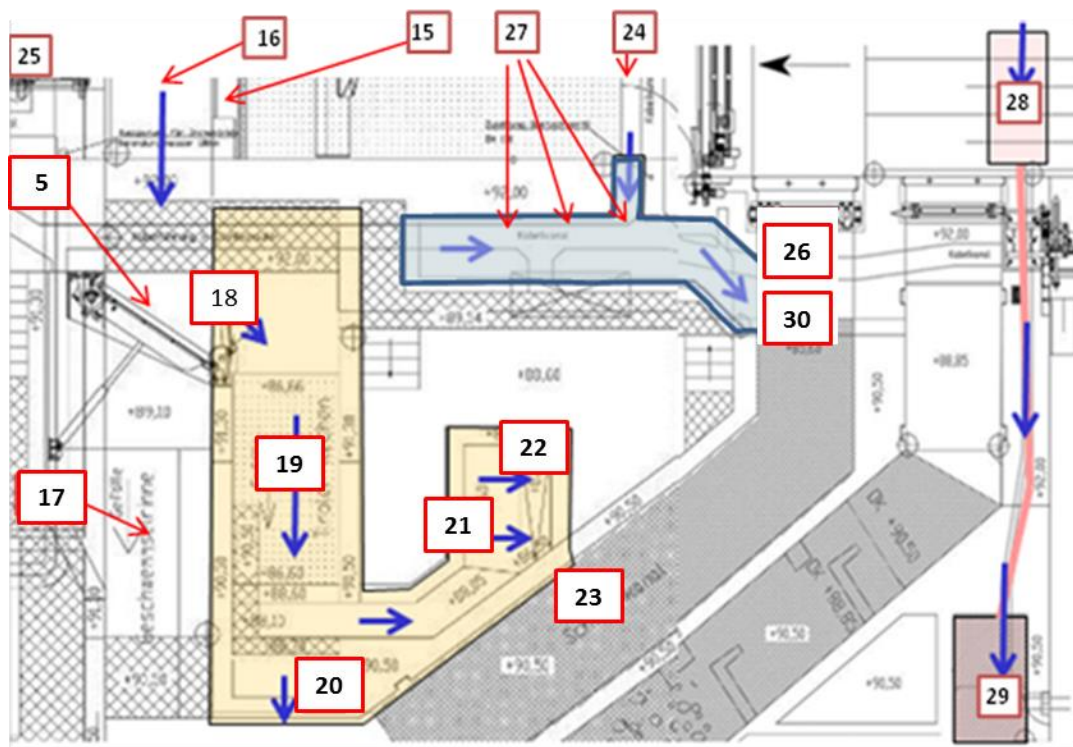


Abbildung 19: Übersicht der Monitoringeinrichtungen Unkelmühle

- Monitoring oberflächennaher Bypass (18 - 23)
- Monitoring Aalrohre (24 - 27)
- Monitoring BottomGallery (28 - 29)

### 2.3.2.1 Oberflächennaher Bypass

Der Funktionsbereich des oberflächennahen Bypasses umfasst folgende Funktionselemente innerhalb des Monitoring-Bauwerks:

- 18 Schwenktor-Nr.2
- 19 Tiroler Rechen
- 20 Spindelschieber Tiroler Rechen
- 22 Lochblechkonstruktion einschl. Schützzug im Monitoringbecken
- 23 Spindelschieber Monitoringbecken
- 31 Holzbalkenelement

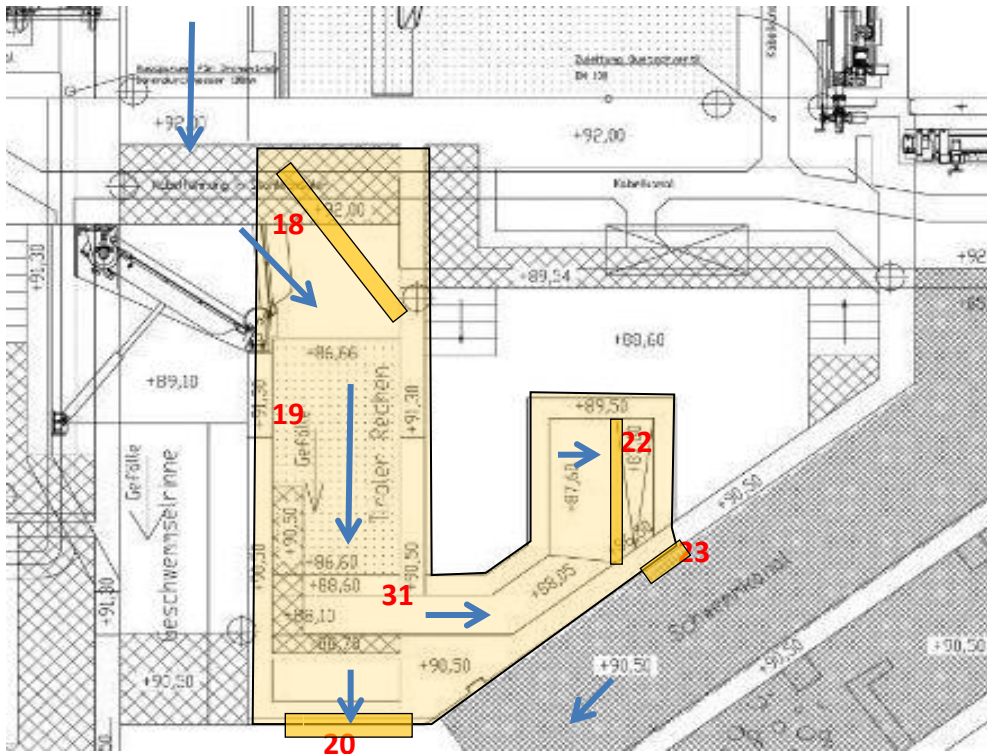


Abbildung 20: Monitoringeinrichtungen der Oberflächenbypässe

Die zu den oberflächennahen Bypässen und der Abstiegsrinne gehörenden Funktionselemente innerhalb des Bereichs ermöglichen das biologische Monitoring der Fischarten, die durch die Nutzung des oberflächennahen Bypasses der Pilotanlage und die Geschwemmselrinne absteigen. Durch das Schwenktor wird die abgeführte Wassermenge mit den Fischen über einen Tiroler Rechen gelenkt, um die Wassermenge deutlich zu reduzieren, mit der die Fische zum Fangbecken geleitet wurden. Periodisch wurden die im Sammelbecken (22) vorhandenen Fische abgekeschert, bestimmt und vermessen (Fangmonitoring), bevor diese wieder ins Unterwasser entlassen wurden. Bei der Leerung des Sammelbeckens wurde das Schwenktor geschlossen (18), um den Wasseranfall im Monitoringbereich zu begrenzen. In diesem Zeitfenster absteigende Fische gelangten direkt über die Abstiegsrinne ins Unterwasser der Pilotanlage.

### 2.3.2.2 Aalrohre

Der Bereich Aalrohre beinhaltet folgende Funktionselemente innerhalb des Monitoring-Bauwerks:

- 24 3 übereinander liegende Quetschventile im Bereich des Einlaufkanals Maschine 3
- 26 Spindelschieber Aal(-Monitoring)becken (manuell)
- 27 Monitoringbecken mit Lochblechkonstruktionen
- 30 Entwässerung Monitoringebene

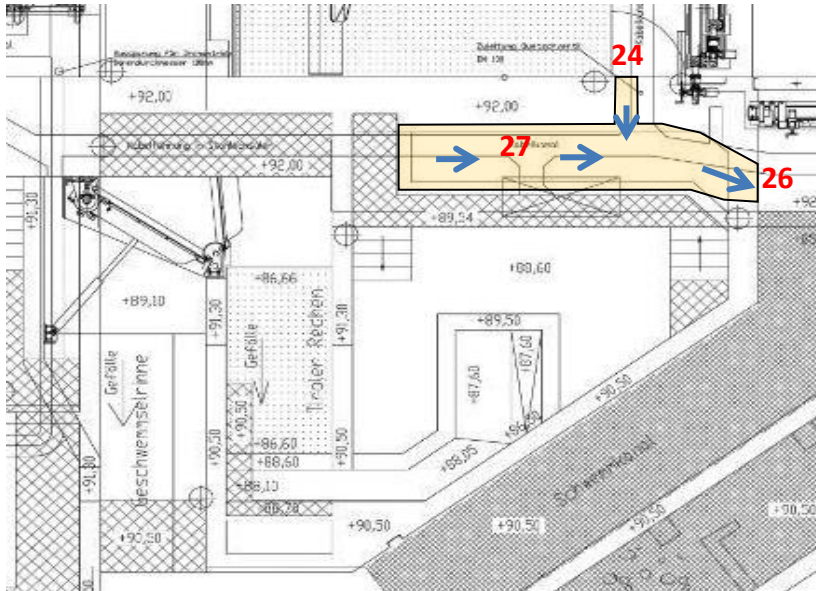


Abbildung 21: Monitoringeinrichtungen Aalrohre

Der zu den Aalrohren gehörende Funktionsbereich ermöglicht das Monitoring und den Abstieg von flussabwärts wandernden Fischen (Aale) vom Oberwassergraben (Einlaufkanal Maschine 3) ins Unterwasser der Stauanlage (Geschiebekanal).

Die Einläufe der Aalrohre im Einlaufkanal sind an der linken Kanalwand unmittelbar hinter dem Einlaufdoppelschütz in drei verschiedenen Höhen (86,88 mNHN, 88,03 mNHN und 89,78 mNHN) positioniert. Dies entspricht einem Abstand von 0,88m , 2,03m und 3,78m über der Sohle.

Der Durchfluss durch die Aalrohre wird durch Quetschventile, die sich am Einlauf der Rohrleitungen Richtung Einlaufkanal Maschine 3 befinden, ermöglicht. Die Quetschventile werden mit Druckluft geöffnet und geschlossen. Eine Regelung des Durchflusses ist nicht möglich. Die zugehörige Pneumatik-Anlage ist im Kraftwerkskeller aufgestellt.

Die Aalrohre enden bodennah bzw. an der Betonwand (oberstes Aalrohr) im Monitoringbecken. Dieses ist durch Lochblechkonstruktionen in drei separate Einzelbecken unterteilt.

Die untersten beiden Aalrohre können durch manuelle Verschlussbleche abgedeckt werden, jedoch nicht wasserdicht. Sie verhindern nur das Zurückschwimmen von Aalen in die Rohrleitungen.



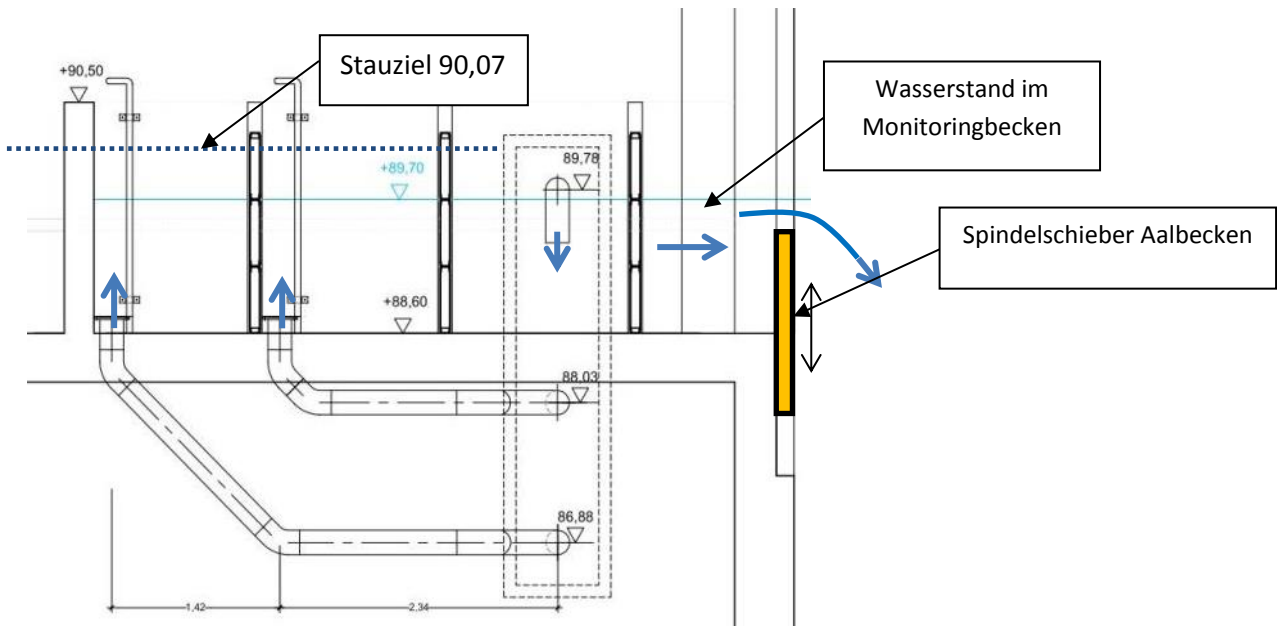


Abbildung 22: Betrieb der Aalrohre in drei verschiedenen Höhen

### 2.3.2.3 BottomGallery

Der Funktionsbereich Aalbypass (BottomGallery) ermöglicht das Monitoring von sohlennah flussabwärts wandernden Fischen (Aale) und beinhaltet folgende Funktionselemente innerhalb des Monitoring-Bauwerks:

- 28 BottomGallery
- 32 Aalrohr DN 200
- 33 Quetschventil
- 29 Monitoringbecken mit Lochblech
- 34 Regulierschütz (manuell)

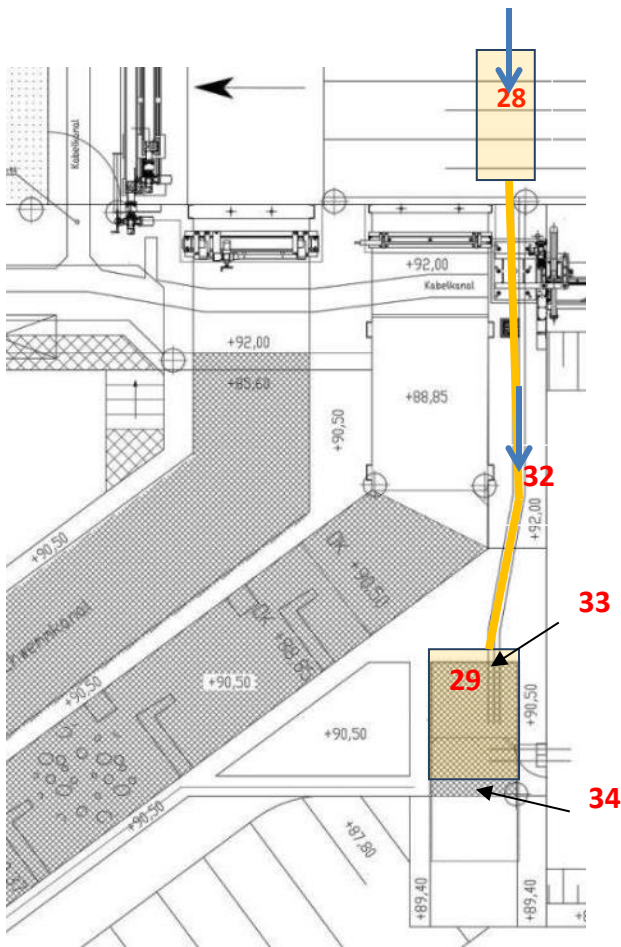


Abbildung 23: Monitoringeinrichtungen BottomGallery

Die BottomGallery ist eine auf der Gerinnesohle des Oberwassergrabens installierte Verschlussklappe. Die Klappe erstreckt sich über die gesamte Breite des Oberwassergrabens und wird durch zwei Schwenk-(Seil)antriebe bewegt.

Der Klappenkörper hat eine halbrunde Form und bildet im geschlossenen Zustand eine direkte Verlängerung der anschließenden Rohrleitung zum Monitoringbecken an der linken Bauwerksseite. Der Durchfluss der Rohrleitung wird über ein Quetschventil am Ende der Rohrleitung reguliert. Das Quetschventil wird mit Druckluft gesteuert. Die zugehörige Pneumatik-Anlage ist im Kraftwerkskeller aufgestellt.

Die Rohrleitung endet mit dem Quetschventil im Monitoringbecken und ist von diesem durch eine PE-Abdeckung räumlich getrennt. Das Monitoringbecken ist mit einer Lochblechkonstruktion und einem Reglerschutz ausgerüstet. Ein direkter Zugang der über die BottomGallery abgestiegenen Fische zurück in die Sieg bestand nicht. Die bei den Kontrollen angetroffenen Fische wurden daher nach Artbestimmung und Vermessung direkt in das Unterwasser der Sieg entlassen.

### 3 Betriebliches Monitoring

#### 3.1 Vorgehensweise

Für das Pilotprojekt Unkelmühle gab es neben dem biologischen auch ein betriebliches Monitoring. Dieses startete im Oktober 2013 und erfolgte durch innogy SE. Ergänzend wurde vom Land, im Hinblick auf eine fachliche Beurteilung von erforderlichen Anpassungen, Herr Professor Ekkehard Heinemann, ehemals Universität Köln, beratend hinzugezogen.

Das betriebliche Monitoring soll neben der wirtschaftlichen Funktionsfähigkeit auch die technischen Gegebenheiten und möglichen Verbesserungen beschreiben. Zur Beurteilung des Ergebnisses wurde im Vorfeld eine Zielmatrix definiert, in die sowohl der Fischschutz als auch die Wirtschaftlichkeit Eingang findet (siehe 2.2). Im betrieblichen Monitoring wurden folgende elektrische Verbräuche gemessen:

- HIAB Schwenkkran
- Spülpumpe
- Rechenreinigungsmaschine (RRM) 1
- RRM 2
- RRM 3
- Schwenktor 1 und 2 (ein gemeinsamer Hydraulikantrieb mit Motor)
- Seitenschildheizung Schwenktor 1 + 2
- Antrieb Dotationswassermengenregulierschieber für Fischaufstiegsanlage (FAA)
- Kompressor für alle Quetschventile
- Eisklappe 2 inkl. Heizung Seitenschild (sofern für biologisches Monitoring eingesetzt; Messung wird manuell aktiviert, da zu viele Kriterien vorhanden sind um dieses zu automatisieren)
- Wehranlage (sofern eingeschränkter Turbinenbetrieb auf Grund von Störungen der RRM oder des biologischen Monitorings) Messung wird manuell aktiviert, da zu viele Kriterien vorhanden sind um dieses zu automatisieren
- Antrieb Bottom Gallery 1 + 2
- Beleuchtung
- Stromverbrauch biologisches Monitoring allgemein (Steckdosen, Hebezeuge etc.) ab Außen-Schaltschrank Ebene 92,00
- Geschiebeschutz (Weiterleitung Sedimente)

Zusätzlich wurden die Wasserabgaben nachfolgender Komponenten aufgezeichnet und die daraus resultierenden Energieverluste (kWh) berechnet:

- Rechenverlust Rechen 1
- Rechenverlust Rechen 2
- Rechenverlust Rechen 3
- Aalrohre
- Bottom Gallery
- Schwenktor 1
- Schwenktor 2
- Wehranlage
- Eisklappe 2
- Dotationswassermengenregulierschieber

Die Personalaufwendungen für das Pilotprojekt wurden ebenfalls erfasst. Da es nicht möglich ist die Personalstunden in kWh zu messen, sind die geleisteten Arbeitsstunden in einen äquivalenten Energieverbrauch umgerechnet worden. Der vereinbarte Stundenverrechnungssatz beträgt für einen Handwerker 62,69 €/Std. Daraus ergibt sich pro geleisteter Arbeitsstunde/Fahrstunde ein äquivalenter Energieverbrauch in Höhe von 537 kWh ( $537 \text{ kWh} * 0,1167 \text{ €/kWh} = 62,69 \text{ €}$ ). Die Betrag von 0,1167 €/kWh entspricht der EEG-Vergütung für Stromerzeugung aus Wasserkraft nach EEG 2009.

Das betriebliche Monitoring sollte nach den ersten drei Jahren (08.10.2013 bis 07.10.2016) für weitere zwei Jahre in einem geringeren Umfang fortgeführt werden. Dieses verlängerte Monitoring soll in Hinblick auf die Lebensdauer, Unterhaltungs- und den Reparaturaufwand der neuen Anlagenteile erfolgen.

In der nachfolgenden Tabelle sind die Messwerte der einzelnen Komponenten erläutert.

Tabelle 1: Erläuterung der ermittelten Verbräuche

Komponente	Erläuterung
Hydraulikkran [kWh]	Energieverbrauch für den Betrieb vom Hydraulikaggregat
RRM1 [kWh]	Energieverbrauch für den Betrieb vom Hydraulikaggregat
RRM2 [kWh]	Energieverbrauch für den Betrieb vom Hydraulikaggregat
RRM3 [kWh]	Energieverbrauch für den Betrieb vom Hydraulikaggregat
Wehranlage [kWh]	Energieverbrauch für den Betrieb vom Hydraulikaggregat
Aussenbeleucht [kWh]	Energieverbrauch für die Außenbeleuchtung verursacht durch das Pilotprojekt
Spuelpumpe [kWh]	Energieverbrauch für Betrieb
HydSchwenktore [kWh]	Energieverbrauch für den Betrieb vom Hydraulikaggregat
Kompressor [kWh]	Energieverbrauch für Betrieb
Wehrklappe_Q [kWh]	Der Turbinenbetrieb wurde teilweise bedingt durch die Anlagenteile der Pilotanlage, z. B. verlegter Feinrechen, eingeschränkt und das Wasser über die Wehr- bzw. Eisklappe abgegeben. Wenn immer dies der Fall war, wurden diese Wasserverluste ermittelt und in kWh erfasst.
Geschiebeschutz [kWh]	Energieverbrauch für Betrieb
Eisklappe [kWh]	Energieverbrauch für Betrieb
Dotationsverschluss [kWh]	Energieverbrauch für Betrieb
Schwenktore_HZ [kWh]	Energieverbrauch für die Heizung der Dichtungen
Eisklappe_HZ [kWh]	Energieverbrauch für die Heizung der Dichtungen
BottomGallery [kWh]	Energieverbrauch für Betrieb
Einspeisung LANUV [kWh]	Stromverbrauch für das biologische Monitoring
Eisklappe_Q [kWh]	Der Turbinenbetrieb wurde teilweise bedingt durch die Anlagenteile der Pilotanlage, z. B. verlegter Feinrechen, eingeschränkt und das Wasser über die Wehr- bzw. Eisklappe

Komponente	Erläuterung
	abgegeben. Wenn immer dies der Fall war, wurden diese Wasserverluste ermittelt und in kWh erfasst.
Geschiebesch_Q [kWh]	Wasserverluste durch den Betrieb des Geschiebeschützes umgerechnet in kWh
BottomGallery_Q [kWh]	Wasserverluste durch den Betrieb der BottomGallery umgerechnet in kWh
Aalrohre_Q [kWh]	Wasserverluste durch den Betrieb der Aalrohre umgerechnet in kWh
Schwenktor_1_Q [kWh]	Wasserverluste durch den Betrieb des Schwenktors 1 für das Pilotprojekt, Dotation Abstiegs-Bypässe, umgerechnet in kWh.
Schwenktor_2_Q [kWh]	Wasserverluste durch den Betrieb des Schwenktors 2 für das Pilotprojekt, Dotation Abstiegsbypässe, umgerechnet in kWh.
Dotationsver_Q [kWh]	Wasserverluste durch den Betrieb des Dotationsverschlusses umgerechnet in kWh.
RRM1_Diff [kWh]	Rechenverluste bei Maschine 1 umgerechnet in kWh. Hierbei wurden die Verluste für den alten Rechen bereits abgezogen.
RRM2_Diff [kWh]	Rechenverluste bei Maschine 2 umgerechnet in kWh. Hierbei wurden die Verluste für den alten Rechen bereits abgezogen.
RRM3_Diff [kWh]	Rechenverluste bei Maschine 2 umgerechnet in kWh. Hierbei wurden die Verluste für den alten Rechen bereits abgezogen.
Erzeugungsverluste M1-M3 [kWh]	Hier wurden Erzeugungsverluste berücksichtigt, die nicht automatisch berechnet werden konnten.
Arbeitseinsatz [kWh]	Hier wurden die Aufwendungen (z. B. Kontrollgänge, Wartung, Störungsbehebung) berücksichtigt, die durch das Pilotprojekt verursacht wurden. Diese wurden in kWh umgerechnet.

### 3.2 Betriebserfahrungen

Um das geeignetste Rechenprofil zu eruieren, wurden die drei Rechenfelder mit unterschiedlichen Rechenprofilen ausgestattet. Der Rechen vor Maschine 1 wurde als Tropfenprofil ausgeführt, der Rechen vor Maschine 2 als Y-Profil und der Rechen vor Maschine 3 bestand abwechselnd aus Y-Stab und Flachstahl/Rechteckprofil (siehe Abbildung 24).

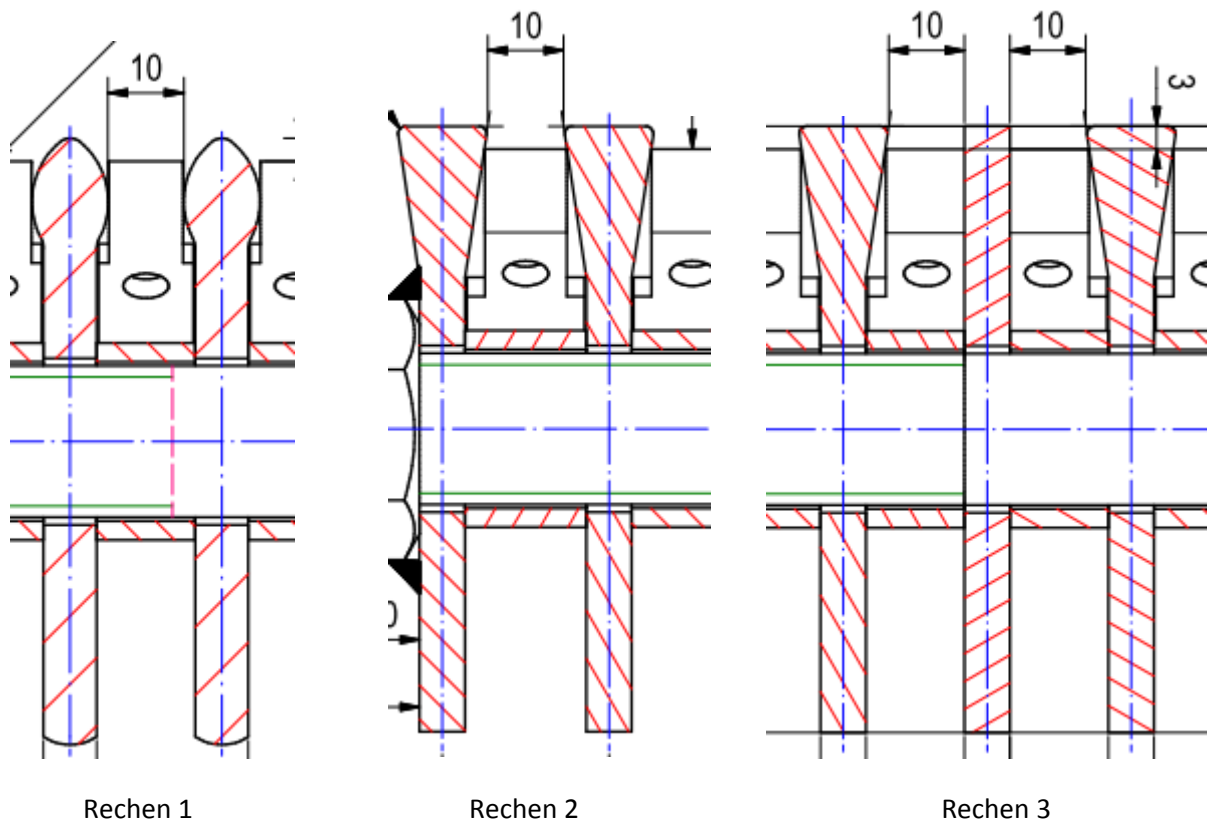


Abbildung 24: Profile der Rechen 1 bis 3

Die Abstandshalter der jeweiligen Rechen wurden nach vorne in Richtung der Oberfläche gezogen. Somit sollte gewährleistet werden, dass diese durch die Rechenreinigungsmaschine (RRM) mit gereinigt werden. In Abbildung 25 ist der Abstandshalter dargestellt (gelb markiert).

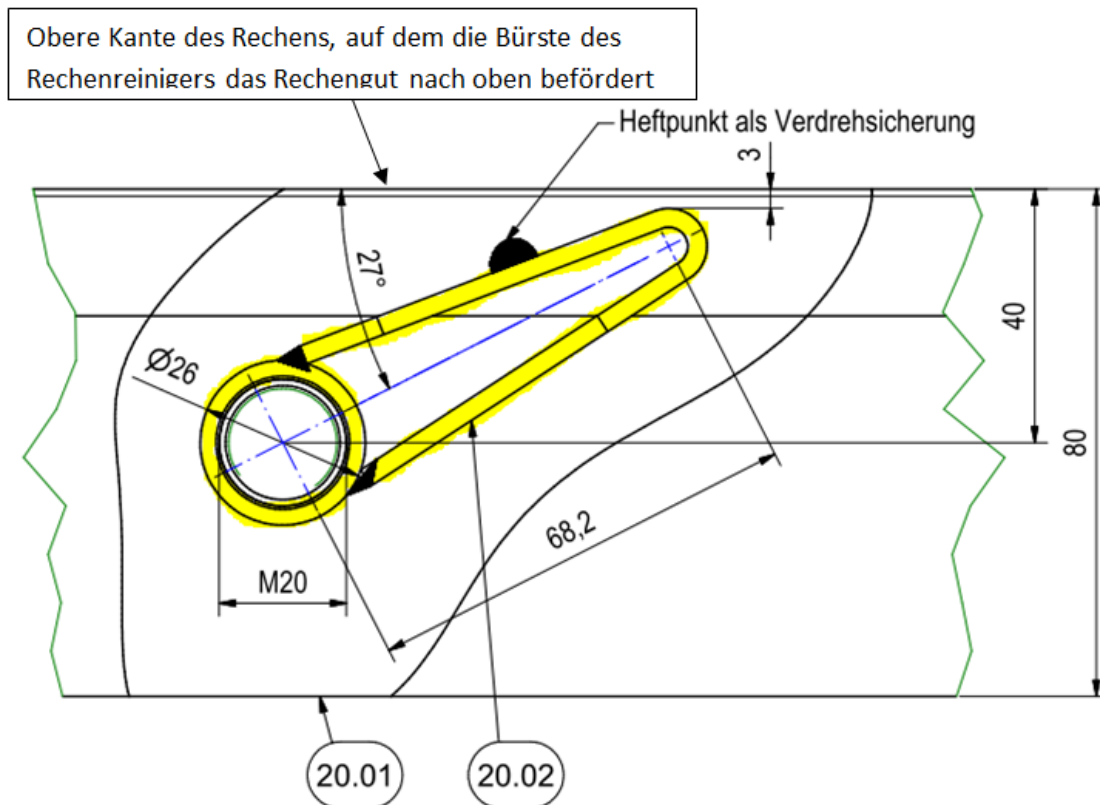


Abbildung 25: Abstandshalter mit nach vorn gezogenem Füllelement

Die RRM werden über eine Druckdifferenzmessung (Pegel wird vor und nach dem Rechen gemessen und die Differenz gebildet) automatisch in Betrieb gesetzt. Sobald die Messung eine Differenz von > 10 cm ergab, lief der RRM automatisch an.

Direkt nach dem Beginn der Monitoringphase haben sich die Rechen im Oktober/November 2013 mehrmals komplett zugesetzt, obwohl die RRM im Dauerbetrieb liefen. Die Rechen wurden dann jeweils mit Hilfe eines Hochdruckreinigers (Dreckfräse) manuell gereinigt. Nach der Auswertung der Messwerte wurde entschieden die RRM bereits bei einer Rechendifferenz von 5 cm zu reinigen. Dies hat zu einer Verbesserung geführt. Dennoch konnte eine Verlegung der Rechen nicht komplett verhindert werden.

Es stellte sich heraus, dass an den Füllelementen das Geschwemmsel hängenbleibt und sich der Rechen dann langsam zusetzt. Die Bürste der RRM fährt (in Abbildung 25) von rechts nach links über den Rechen. Das Geschwemmsel wird durch die Form des Füllelements in den Rechen gedrückt. Wenn der Anpressdruck nicht mehr ausreicht, um das Rechengut nach oben zu befördern, streicht die Bürste über das Rechengut und verdichtet dieses in den Rechen. Bei jedem weiteren Rechenreinigungszyklus bleibt mehr Rechengut vor dem Füllelement hängen und der Rechen verlegt sich von oben nach unten, beginnend bei den einzelnen Abstandshaltern. Dieses verdeutlicht die Abbildung 26, die den teilweise verlegten Rechen 2 von vorne zeigt, sowie die Abbildung 27, die den Rechen 2 mit Geschwemmselablagerung von hinten zeigt.



Abbildung 26: Teilverlegter Rechen 2 (Ansicht von vorne, November 2014)



Abbildung 27: An den Füllelementen gehaltenes Geschwemmsel (Ansicht Rechen 2 von hinten, August 2014)

Dieses Phänomen war an allen drei Rechen zu beobachten. An den Rechen 1 und 3 wurden diese Ablagerungen nach längerer Zeit teilweise von den RRM durch den Betrieb bei geringerem Geschwemmselanfall beseitigt oder bei der Reinigung von Rechen 2 ebenfalls entfernt.



Der Rechen 2 setzte sich dagegen regelmäßig bei hohem Geschwemmselaufkommen zu. Daher erfolgte der Austausch des Rechens im August 2015 parallel zu einer Maschinenrevision um zusätzliche Erzeugungsverluste zu vermeiden. Der Austausch war wegen der hohen Rechenverluste (zu den Rechendifferenzverlusten wurden auch die Erzeugungsverluste addiert, welche durch die Komplettverlegung des Rechens und dem daraus resultierenden Abstellen der Maschine entstanden) und der häufig manuell durchzuführenden Reinigung des Rechens erforderlich, die in dieser Form auch aus Gründen der Arbeitssicherheit nicht auf Dauer verantwortet werden konnte.

Die Stäbe des neuen Rechens 2 wurden ebenfalls wie die des Rechens 1 in Tropfenform ausgebildet. Die neuen Abstandshalter wurden als Distanzhülsen ausgeführt und befinden sich ungefähr in der Mitte der einzelnen Stahlprofile (siehe Abbildung 28 in gelb).

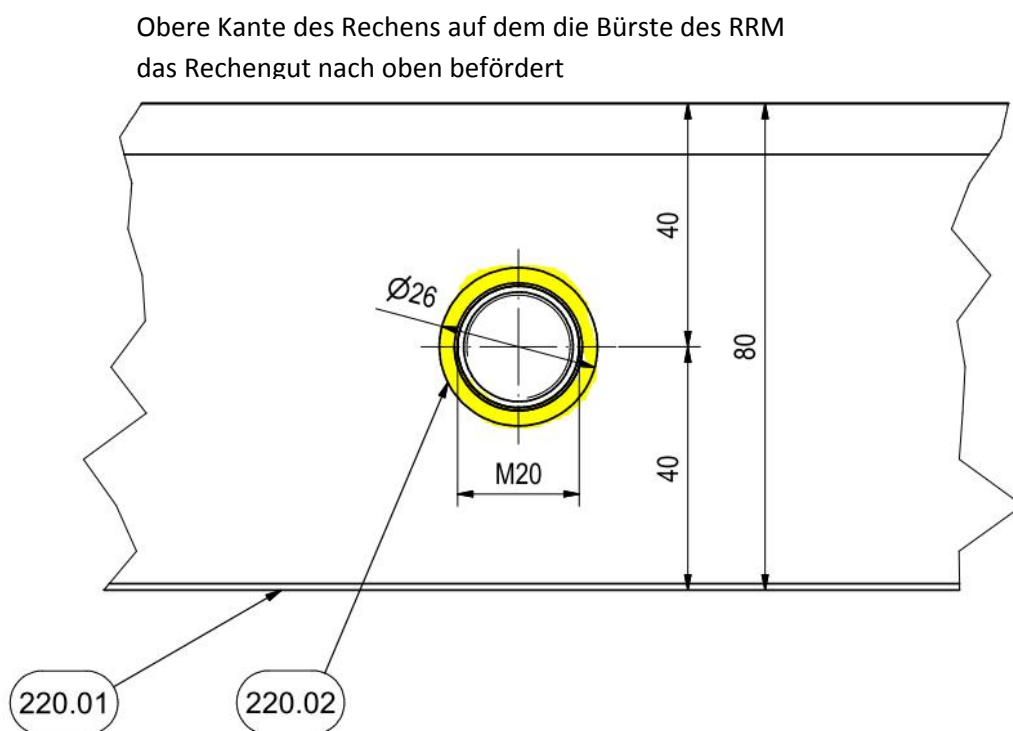


Abbildung 28: Abstandshalter nur als Hülse ausgeführt

Die Revision von Maschine 2 war am 11.12.2015 beendet. Eine erste Messung ohne Verlegung ergab für den Rechen die gleiche Verlusthöhe wie am Rechen vor Maschine 1. Da für den Bau beider Rechen das gleiche Stabprofil verwendet wurde und der Unterschied sich lediglich auf die Form der Abstandshalter beschränkt, konnte diese Übereinstimmung erwartet werden.

Um den Nutzen des Rechenaustauschs auf den Betrieb der Maschine 2 abzuschätzen, wurde der Betrieb im Dezember 2015 mit früheren Erfahrungen (im Jahr 2014) bei ähnlicher Wasserführung und Geschwemmselanfall verglichen:

- Im August 2014 wurde die Kammer von Maschine 2 entleert, um eine Rechenreinigung manuell vorzunehmen.
- Im Oktober 2014 wurde bei ähnlicher Wasserführung wegen zu großer Rechendifferenz (Wasserspiegeldifferenz am Rechen) die Maschine 2 abgeschaltet. Auch ein gedrosselter Betrieb war nicht möglich.
- Auch im November 2014 und im Dezember 2014 musste Maschine 2 zeitweise wegen zu großer Rechendifferenz abgeschaltet werden.

Trotz der starken Wasserführung und dem entsprechenden Geschwemmselanfall kam es im Dezember 2015 weder zu einer Drosselung noch zu einer Abschaltung von Maschine 2.

Ferner ist die durch den Fallhöhenverlust am Rechen bedingte Energieeinbuße deutlich zurückgegangen. Zur Verdeutlichung wurden Tageswerte mit vergleichbaren Bedingungen bei möglichst hohen Turbinenwasserströmen herangezogen. Dabei war für die Auswahl der Daten vor dem Austausch darauf zu achten, dass Maschine 2 nicht gedrosselt oder abgeschaltet war. Die Energieeinbußen am Rechen vor Maschine 2 sind in Abbildung 29 über den entsprechenden Werten an Maschine 1 aufgetragen. Die blauen Punkte stellen die Verhältnisse vor dem Rechenaustausch und die roten Punkte die Einbußen danach dar. Die blau eingetragene Linie zeigt den Zustand, bei dem beide Rechen exakt die gleiche Energieeinbuße aufweisen würden.

Trotz aller Messtoleranzen und sonstigen Einflüssen ist erkennbar, dass die Energieeinbußen am Rechen vor Maschine 2 durch den Austausch um 15 % bis 30 % zurückgegangen sind. Berücksichtigt man weiterhin, dass auch die Zeiten für eine Drosselung bzw. eine Abschaltung von Maschine 2 zumindest deutlich verkürzt werden, dann ist hier schon nach sehr kurzer Zeit ein deutlicher Erfolg dieser Maßnahme erkennbar.

Schon im Januar 2016 wurde eine Verschlechterung der Verlustverhältnisse am ausgetauschten Rechen der Maschine 2 deutlich (grüne Dreiecke in Abbildung 29). Es wurde festgestellt, dass die Bürste den Rechen erst nach mehrmaligem Reinigen erreicht. Der Fehler wurde dem Hersteller gemeldet. Anschließend erfolgte eine Nachjustierung des Anpressdruckes der RRM. Dieser Fehler trat aber nach kurzer Zeit wieder auf. Die Ursache befindet sich noch in der Aufklärung..

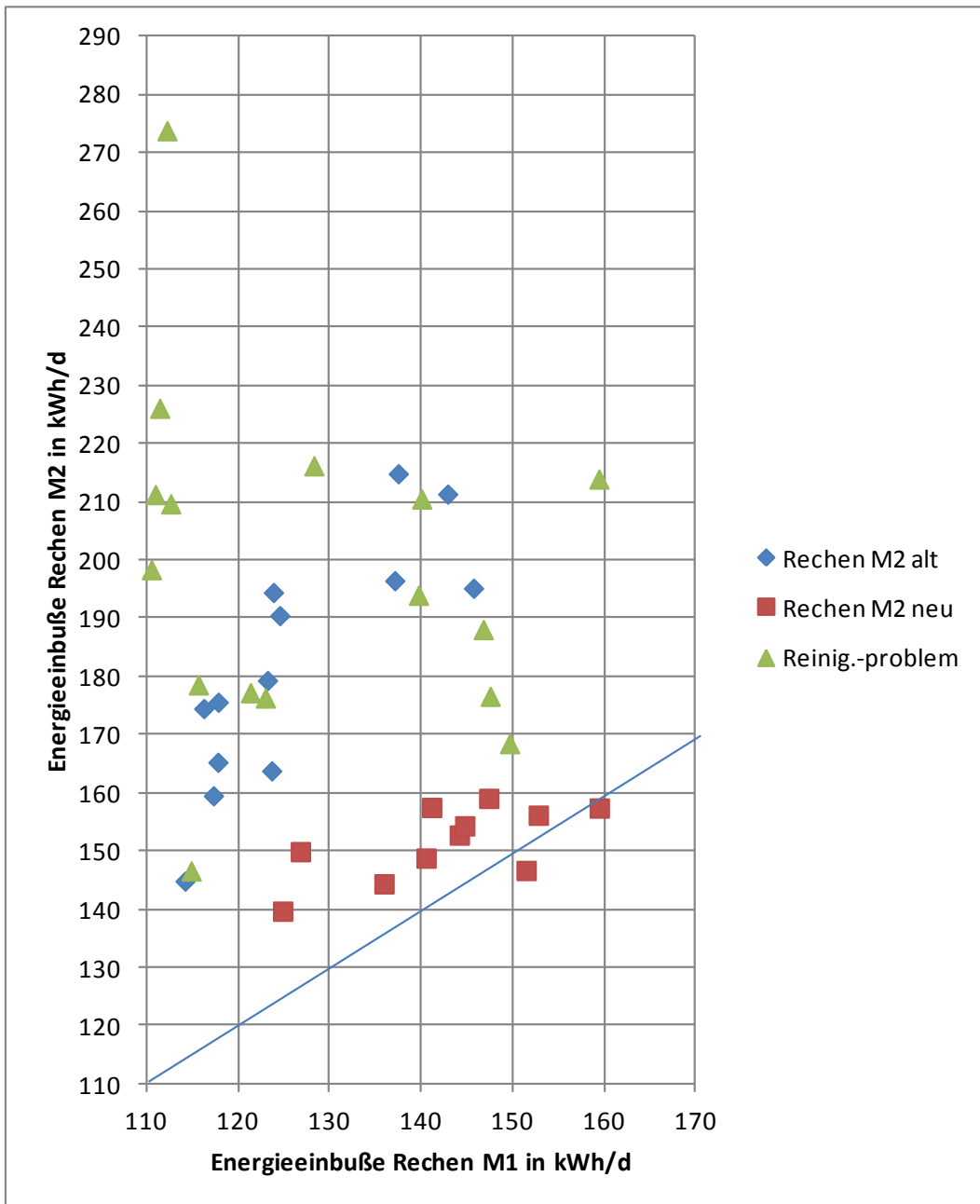


Abbildung 29: Energieeinbußen am Rechen 2 im Vergleich zu denen am Rechen 1

Auch bei den RRM 1 und 3 wurde im ersten Monitoringjahr der Anpressdruck nachjustiert. Der Anpressdruck der Bürste an den Rechen ist mit der derzeit eingesetzten Technik nicht zufriedenstellend gelöst. Die Probleme befinden sich noch in der Aufklärung.

Im Winter 2015/16 wurde festgestellt, dass die Rechenreinigungsmaschinen nach längerem Stillstand bei Temperaturen nahe dem Gefrierpunkt und darunter nicht funktionieren. Es kommt immer wieder zu Sicherheitsabschaltungen. Dieses Problem wurde bis zum heutigen Tage nicht gelöst. Auch in diesem Punkt findet derzeit eine juristische Klärung zwischen der Bezirksregierung Köln und dem Hersteller statt.

Im Februar/März 2017 kam es mehrmals zur kompletten bzw. teilweisen Verlegung aller drei Rechen. Dies führte entsprechend zum Abstellen bzw. zur Reduzierung des Durchflusses der jeweiligen Maschine. Bei der Begutachtung und Säuberung der Rechen wurde visuell festgestellt, dass der Rechen 2 – obwohl es dort die meisten Probleme mit der RRM gibt – am geringsten verlegt war. Dieses lässt darauf schließen, dass die neuen Abstandshalter eine deutliche Verbesserung für die Reinigung der Rechen erbracht haben. Wenn die Probleme der RRM behoben worden sind, könnte es sein, dass es zukünftig zu keiner kompletten Verlegung des Rechens kommen wird. Warum sich die Rechen 1 und 3 verlegten, die vorher 3 Jahre ohne Verlegung funktionierten, konnte nicht geklärt werden. Die Verlegungen wurden sicherlich durch die Abstandshalter in Tropfenform begünstigt. Inwieweit auch die Problematik des Anpressdrucks der Bürsten zum Tragen kommt, ist ebenfalls fraglich. Im November 2017 waren der Rechen 1 und 2 wiederum ver- bzw. teilverlegt und es kam zu Erzeugungseinbußen.

### 3.2.1 Sonstige Auffälligkeiten

Hinter dem Schwenktor 1 wird das Geschwemmsel in die Sieg weitergeleitet. Durch die baulichen Gegebenheiten wird die kreuzende Fischaufstiegsanlage (FAA) bei höheren Siegwasserständen zur Tauchwand, die das Geschwemmsel zurückhält. Die Abbildung 30 zeigt eine Ansammlung von Wasserpflanzen, die sich innerhalb von vier Stunden gebildet hat und von der FAA zurückgehalten wird.



Abbildung 30: Geschwemmsel-Ansammlung (hier Wasserpflanzen) hinter dem Schwenktor 1

### 3.3 Ergebnisse des betrieblichen Monitorings

In der nachfolgenden Tabelle sind die Verluste in Kilowattstunden (kWh) der einzelnen Komponenten dargestellt.

Tabelle 2: Verbräuche der einzelnen Komponenten

Zeit	2013/14	2014/15	2015/16	2013-2016
Hydraulikkran [kWh]	0,00	1.498,61	2.461,51	<b>3.960,11</b>
RRM1 [kWh]	724,22	2.472,37	2.367,40	<b>5.563,99</b>
RRM2 [kWh]	3.000,42	2.445,11	1.305,05	<b>6.750,58</b>
RRM3 [kWh]	751,44	566,90	557,30	<b>1.875,64</b>
Wehranlage [kWh]	13,54	45,43	6,02	<b>64,98</b>
Aussenbeleucht [kWh]	29,33	2,12	4,42	<b>35,88</b>
Spuelpumpe [kWh]	353,56	121,48	588,73	<b>1.063,76</b>
HydSchwenktore [kWh]	111,84	93,62	94,13	<b>299,59</b>
Kompressor [kWh]	6,93	15,62	10,39	<b>32,94</b>
Wehrklappe_Q [kWh]	9.588,39	35.726,29	4.947,89	<b>50.262,57</b>
Geschiebeschuetz [kWh]	0,12	2,40	0,54	<b>3,05</b>
Eisklappe [kWh]	0,02	6,97	0,00	<b>6,99</b>
Dotationsverschl [kWh]	1,05	3,48	0,00	<b>4,52</b>
Schwenktore_HZ [kWh]	1.295,31	1.728,45	1.100,92	<b>4.124,68</b>
Eisklappe_HZ [kWh]	1,61	65,97	2,13	<b>69,70</b>
BottomGallery [kWh]	24,48	48,58	27,76	<b>100,82</b>
Einspeisung LANUV [kWh]	251,22	593,86	818,07	<b>1.663,14</b>
Eisklappe_Q [kWh]	1,15	5,10	0,48	<b>6,72</b>
Geschiebesch_Q [kWh]	0,00	23,79	226,52	<b>250,31</b>
BottomGallery_Q [kWh]	816,99	2.310,41	903,14	<b>4.030,53</b>
Aalrohre_Q [kWh]	3.286,27	5.384,68	2.496,42	<b>11.167,37</b>
Schwenktor_1_Q [kWh] Dotation	30.475,58	14.250,17	13.207,01	<b>57.932,76</b>
Schwenktor_2_Q [kWh] Dotation	3.053,69	1.707,82	1.518,74	<b>6.280,25</b>
Dotationsver_Q [kWh]	33,42	73,25	0,02	<b>106,69</b>
RRM1_Diff [kWh]	14.594,85	16.520,78	20.969,63	<b>52.085,26</b>
RRM2_Diff [kWh]	27.071,14	16.108,51	28.699,10	<b>71.878,74</b>
RRM3_Diff [kWh]	4.378,13	4.121,64	4.348,83	<b>12.848,60</b>
Erzeugungsverluste M1-M3 [kWh]	7.910,00	34.341,00	0,00	<b>42.251,00</b>
Arbeitseinsatz [kWh]	94.780,50	82.161,00	38.529,75	<b>215.471,25</b>
<b>Summe</b>	<b>202.555,18</b>	<b>222.445,37</b>	<b>125.191,87</b>	<b>550.192,43</b>

Um eine tatsächliche Rangfolge der Komponenten mit den größten Verlusten zu erhalten, sind die Werte

- Wehrklappe Q
- Erzeugungsverluste M1-M3
- Arbeitseinsatz

soweit möglich auf die verursachenden Komponenten umgelegt worden.

Das Ergebnis ist in der Tabelle 3 dargestellt. Gleichzeitig wurde die Tabelle absteigend nach den Energieverbräuchen über die drei Jahre sortiert.

Tabelle 3: Verbräuche der einzelnen Komponenten absteigend sortiert

<b>Zeit</b>	<b>2013/14</b>	<b>2014/15</b>	<b>2015/16</b>	<b>2013-2016</b>
Arbeitseinsatz [kWh]	79.878,75	69.004,50	31.280,25	<b>180.163,50</b>
RRM2_Diff [kWh]	39.948,39	59.773,67	31.115,60	<b>130.837,65</b>
RRM1_Diff [kWh]	19.562,10	18.713,53	23.386,13	<b>61.661,76</b>
Schwenktor_1_Q [kWh] Dotation	30.475,58	14.250,17	13.207,01	<b>57.932,76</b>
Wehrklappe_Q [kWh]	9.588,39	31.983,13	4.947,89	<b>46.519,41</b>
RRM3_Diff [kWh]	9.345,38	6.314,39	6.765,33	<b>22.425,10</b>
Aalrohre_Q [kWh]	3.286,27	5.384,68	2.496,42	<b>11.167,37</b>
RRM2 [kWh]	3.000,42	2.445,11	1.305,05	<b>6.750,58</b>
Schwenktor_2_Q [kWh]	3.053,69	1.707,82	1.518,74	<b>6.280,25</b>
RRM1 [kWh]	724,22	2.472,37	2.367,40	<b>5.563,99</b>
Schwenktore_HZ [kWh]	1.295,31	1.728,45	1.100,92	<b>4.124,68</b>
BottomGallery_Q [kWh]	816,99	2.310,41	903,14	<b>4.030,53</b>
Hydraulikkran [kWh]	0,00	1.498,61	2.461,51	<b>3.960,11</b>
Erzeugungsverluste M1-M3 [kWh]	0,00	3.190,00	0,00	<b>3.190,00</b>
RRM3 [kWh]	751,44	566,90	557,30	<b>1.875,64</b>
EinspeisungLANUV [kWh]	251,22	593,86	818,07	<b>1.663,14</b>
Spuelpumpe [kWh]	353,56	121,48	588,73	<b>1.063,76</b>
HydSchwenktore [kWh]	111,84	93,62	94,13	<b>299,59</b>
Geschiebesch_Q [kWh]	0,00	23,79	226,52	<b>250,31</b>
Dotationsver_Q [kWh]	33,42	73,25	0,02	<b>106,69</b>
BottomGallery [kWh]	24,48	48,58	27,76	<b>100,82</b>
Eisklappe_HZ [kWh]	1,61	65,97	2,13	<b>69,70</b>

Zeit	2013/14	2014/15	2015/16	2013-2016
Wehranlage [kWh]	13,54	45,43	6,02	<b>64,98</b>
Aussenbeleucht [kWh]	29,33	2,12	4,42	<b>35,88</b>
Kompressor [kWh]	6,93	15,62	10,39	<b>32,94</b>
Eisklappe [kWh]	0,02	6,97	0,00	<b>6,99</b>
Eisklappe_Q [kWh]	1,15	5,10	0,48	<b>6,72</b>
Dotationsverschl [kWh]	1,05	3,48	0,00	<b>4,52</b>
Geschiebeschuetz [kWh]	0,12	2,40	0,54	<b>3,05</b>

Zur Bewertung der Verluste gemäß Zielerreichungsmatrix werden diese in Relation zu den Erzeugungswerten gesetzt. Die Erzeugung betrug im Zeitraum

- vom 01.10.2013 – 30.09.2014 1.519.711 kWh
- vom 01.10.2014 – 30.09.2015 1.517.134 kWh
- vom 01.10.2015 – 30.09.2016 1.533.362 kWh

Die Erzeugungswerte lagen in den drei Jahren ca. 24 % unter der Planerzeugung in Höhe von 2.000.000 kWh pro Jahr. In den drei Monitoringjahren wurden an den einzelnen drei Maschinen Revisionsmaßnahmen in den Sommermonaten (Niedrigwasserphase) durchgeführt. In dieser Zeit waren in der Regel zwei von drei Maschinen betriebsbereit. Um auszuschließen, dass die jeweiligen Maschinenrevisionen Ursache der niedrigen Erzeugungswerte waren, wurden die Revisionszeiträume einzeln analysiert. Im ersten Monitorjahr kam es durch diese Revisionsstillstände zu Erzeugungsverlusten von ca. 65.000 kWh, im zweiten Jahr zu ca. 10.000 kWh und im dritten Jahr zu ca. 85.000 kWh. Somit hatten die Revisionsmaßnahmen nur einen marginalen Einfluss auf die Erzeugungswerte. Diese Erzeugungsverluste wurden in der Berechnung nicht berücksichtigt.

Die Formel für die Berechnung der relativen Verluste lautet:

$$\text{Rel. Verluste} = \frac{\text{Verbräuche d. einzelnen Komponenten inkl. Personalstunden}}{\text{Erzeugung} + \text{Verbräuche d. einzelnen Komponenten ohne Personalstd.}}$$

Die relativen Verluste über die drei Jahre betragen

- vom 08.10.2013 bis 07.10.2014: 12,27 %
- vom 08.10.2014 bis 07.10.2015: 13,55 %
- vom 08.10.2015 bis 07.10.2016: 7,84 %

Die relativen Verluste in den ersten beiden Jahren sind gemessen an der Zielerreichungsmatrix im Bereich des „akzeptablen Ergebnisses“. Da die Verluste im zweiten Monitoringjahr gestiegen sind und nur knapp an der Grenze im Bereich „Anpassungen notwendig“ lagen, wurden erste

Maßnahmen ergriffen, um die Verluste zu verringern. Dieses waren die Stilllegung des Dotationsschützes und der Austausch des Rechens 2 (nähere Erläuterung folgen auf den nächsten Seiten).

Über den gesamten Monitoringzeitraum sind die Verlustsummen durch den Arbeitseinsatz und die Rechenverluste von Maschine 2 mit Abstand am höchsten. Die Problematiken zu den Rechen und Rechenreinigungsmaschinen sind im Kapitel 2 im Detail beschrieben.

Der Arbeitseinsatz lässt sich in drei Hauptaktivitäten

- Kontrollgänge
- Monatliche Wartung
- Fehlersuche

unterteilen. In der Tabelle 4 wurden die Arbeitseinsätze prozentual auf die drei Hauptaktivitäten verteilt.

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Kontrollgänge und monatlichen Wartungen den größten Teil der Arbeitseinsätze ausmachten. Dabei ist zu berücksichtigen, dass hier nur die für die Anlagenteile des Fischschützes notwendigen Arbeiten zur Anrechnung kommen. Im letzten Jahr sank der Einsatz der Arbeitseinsätze deutlich, da durch die Stilllegung des Dotationsschützes am 08.11.2015 die Wartung hierfür entfiel. Für diese Wartung musste das komplette Kraftwerk außer Betrieb gesetzt werden. Dieses führte zu Erzeugungsverlusten von bis zu 10.000 kWh/a (im Messwert Wehrklappe\_Q enthalten).

Tabelle 4: Arbeitseinsätze prozentual auf die Hauptaktivitäten verteilt

Zeit	2013/14		2014/15		2015/16	
	h	%	h	%	h	%
<b>Kontrollgänge</b>	72,00 h	48,4 %	53,75 h	41,8 %	39,75 h	68,2 %
<b>Monatliche Wartung</b>	71,50 h	48,1 %	60,75 h	47,3 %	14,00 h	24,0 %
<b>Fehlersuche</b>	27,75 h	3,5 %	14,00 h	10,9 %	4,50 h	7,8 %

Die Verlustsummen vom Messwert „Wehrklappe\_Q“ sind im ersten und dritten Monitoringjahr auf die Wartung des Dotationsschützes zurückzuführen. Im zweiten Jahr betragen die Verluste ca. 10.000 kWh. Die restlichen 20.000 kWh sind auf drei Ereignisse zurückzuführen. Das Kraftwerk musste für drei Tage abgestellt werden, da Mäuse diverse Kabel im Außenschrank angenagt hatten und diese repariert werden mussten. Ferner wurde die Gummibeschichtung der Abstiegsrampe hinter dem Schwenktor 1 erneuert; letztlich waren die Antriebe vom Turbineneinlaufschütz von Maschine 3 defekt und wurden getauscht.

Der Verbrauchswert für das Schwenktor 1 (Messwert: Schwenktor\_1\_Q) im ersten Monitoringjahr ist im Vergleich zum zweiten bzw. dritten Jahr doppelt so hoch, da im Herbst 2013 das Monitoring für die Aale noch nicht begonnen hatte und deshalb ein Abstieg über die oberflächennahen Bypässe und damit über das Schwenktor 1 für die Aale geschaffen wurde. Die Möglichkeiten der Aalabwanderung über die Aalrohre und Bottom Gallery enden in den Fangkammern der jeweiligen Abwanderungsmöglichkeiten. Von hier gibt es keine direkte Verbindung ins Unterwasser. Deshalb



sind auch die Verluste von den Aalrohren (Messwert: Aalrohre\_Q) und der Bottom Gallery (Messwert: BottomGallery\_Q) von Jahr zu Jahr verschieden, da nur im zweiten Jahr eine komplette Monitoringphase messtechnisch erfasst wurde.

Die Verbräuche für den Hydraulikkran beginnen erst im zweiten Monitoringjahr, da dieser erst zum 19.11.2014 in Betrieb genommen wurde. Dieses gilt auch für das Geschiebeschütz, da für den Notfall der Hydraulikkran funktionsfähig sein muss.

### 3.3.1 Betriebliches Monitoring – 4. und 5. Monitoringjahr

Das betriebliche Monitoring sollte identisch zum biologischen Monitoring mindestens 36 Monate erfolgen mit der vertraglich vereinbarten Option einer 24-monatigen Verlängerung. Um weitere Aussagen zur Verlässlichkeit der neuen Anlagenteile zu erhalten, wurde von dieser Option Gebrauch gemacht. Im vierten und fünften Monitoringjahr wurde das Monitoring jedoch in geringerem Umfang fortgeführt. Es wurden keine Personalstunden für das Pilotprojekt erfasst. Die Messungen der Verbräuche liefen aber weiter.

Tabelle 5: Verbräuche der einzelnen Komponenten im 4. und 5. Monitoringjahr

Zeit	2016/17	2017/18
Hydraulikkran [kWh]	2.763,54	2.257,78
RRM1 [kWh]	1.146,89	1.588,01
RRM2 [kWh]	2.790,72	3.280,94
RRM3 [kWh]	840,60	681,07
Wehranlage [kWh]	6,21	0,00
Aussenbeleucht [kWh]	0,00	0,00
Spuelpumpe [kWh]	23,14	0,00
HydSchwenktore [kWh]	157,26	185,77
Kompressor [kWh]	4,71	4,40
Wehrklappe_Q [kWh]	712,02	0,00
Geschiebeschuetz [kWh]	0,03	0,00
Eisklappe [kWh]	0,00	0,00
Dotationsverschl [kWh]	0,00	0,00
Schwenktore_HZ [kWh]	1.802,15	1.331,94
Eisklappe_HZ [kWh]	2,17	0,00
BottomGallery [kWh]	0,00	0,00
Einspeisung LANUV [kWh]	72,86	0,00
Eisklappe_Q [kWh]	2,47	0,00
Geschiebesch_Q [kWh]	20,99	0,00
BottomGallery_Q [kWh]	0,00	0,00
Aalrohre_Q [kWh]	0,00	0,00
Schwenktor_1_Q [kWh] Dotation	30.812,91	17.125,30

<b>Zeit</b>	<b>2016/17</b>	<b>2017/18</b>
Schwenktor_2_Q [kWh] Dotation	0,34	0,06
Dotationsver_Q [kWh]	0,00	0,00
RRM1_Diff [kWh]	16.126,60	22.300,46
RRM2_Diff [kWh]	18.781,48	28.664,15
RRM3_Diff [kWh]	3.258,51	2.357,34
Erzeugungsverluste M1-M3 [kWh]	13.600,00	5.945,00
Arbeitseinsatz [kWh]	0,00	0,00
<b>Summe</b>	<b>92.925,59</b>	<b>85.722,58</b>

Im Februar 2017 kam es zu einer Komplettverlegung aller drei Rechen und im November zu einer Verlegung der Rechen 1 und 2. Die Verlegung führte zu den „Erzeugungsverlusten M1-M3“ in der Tabelle 5.

Im August 2017 wurden die Hydraulikschläuche ausgewechselt (Auswechselintervall von sechs Jahren gemäß BGR-Regel 237). Der Wechsel ist sehr aufwendig. Das Kraftwerk ist abzustellen, damit ein Gerüst in der Geschwemmselrinne aufgebaut werden kann. Von diesem Gerüst können dann die Schläuche sicher an den Auslegern der RRM gewechselt werden. Neben den Kosten für den Schlauchwechsel und dem Gerüstbau fallen abhängig vom Wasserdargebot auch entsprechend hohe Erzeugungsverluste an.

Die Erzeugungswerte im vierten und fünften Monitoringjahr lagen unter denen in den ersten drei Monitoringjahren, obwohl es keine Maschinenrevision gab und alle Maschinen betriebsbereit waren. Die Erzeugung betrug im Zeitraum

- vom 01.10.2016 – 30.09.2017 1.190.795 kWh
- vom 01.10.2017 – 30.09.2018 1.387.225 kWh

Die relativen Verluste betragen

- vom 08.10.2016 bis 07.10.2017: 7,24 %
- vom 08.10.2017 bis 07.10.2018: 5,82 %

Bei diesen Werten ist zu berücksichtigen, dass keine Personalaufwendungen, wie z. B. manuelle Reinigung der Rechen im Februar und November 2017, berücksichtigt wurden.

Die Problematiken zu den Rechen und RRM sind im Kapitel 3.3 im Detail beschrieben.

## 4 Biologisches Monitorings

### 4.1 Methoden und Vorgehensweise

Die Wirksamkeit der technischen Einrichtungen zum Fischschutz wurde mittels einer radiotelemetrischen Studie am Atlantischen Lachs und dem Europäischen Aal untersucht. Hierfür wurden im Fall der vorliegenden Studie abwandernde Smolts bzw. Aale mit Radiotelemetriesendern markiert, so dass deren Bewegungen über das ausgesandte Funksignal anschließend von stationären oder mobilen Empfängern aufgezeichnet werden konnte. Sobald ein markierter Fisch in den Empfangsbereich der Antennen eingeschwommen ist, speicherten die Empfänger automatisch Informationen hinsichtlich Zeit, individueller Kennung des Fisches und Signalstärke. Ziel dieser Methode war es, das Abwanderverhalten und die Abstiegswegen der Fische im Bereich der Wasserkraftanlage sowie mögliche Verluste zu erfassen. Zudem wurden die Fische nicht nur im Bereich der Wasserkraftanlage aufgezeichnet, sondern auch in einem freifließenden Bereich oberhalb des beginnenden Staubereiches, zu Beginn und am Ende des Staubereichs und an bis zu vier weiteren Antennenstationen 1,9 km, 7,5 km, 19,5 km und 41,2 km unterhalb der Wasserkraftanlage (diese Stationen standen im Jahr 2014 noch nicht zur Verfügung und wurden erst in den Jahren 2015 bzw. 2016 hinzugefügt). Durch den Vergleich dieser verschiedenen Abschnitte war es möglich, den Einfluss von Staubereich und Wasserkraftanlage auf das Verhalten der Fische und mögliche auftretende Verluste zu erfassen. Die Berechnung von Smoltverlusten in den unterschiedlichen Gewässerabschnitten dieser Studie basierte auf Fischen (d.h. dem Signal der implantierten Sender), die aufhörten sich zu bewegen, oder aus dem Fluss verschwanden. Die tatsächlichen Gründe für diese Verluste sind im Einzelfall schwer exakt nachzuvollziehen, können aber theoretisch auf die folgenden Ursachen zurückgehen: i) Prädation durch Fische, Säugetiere oder Vögel, ii) andere Mortalitätsgründe, iii) Smolts/Aale, welche zwar lebendig sind, aber nicht abwandern (bei Smolts aufgrund des zeitlich sehr begrenzten Abwanderfensters weitestgehend auszuschließen) oder iv) defekte Sender. Bei Fischen, welche von Raubfischen gefressen wurden oder im Fluss infolge anderer Ursachen verendet sind, kann der Sender weiterhin durch mobile Verfolgung registriert werden. Im Fall von defekten Sendern, oder Fischen die von Räubern aus dem Fluss entfernt und außerhalb des Empfangsbereichs gebracht werden, kann der Sender in der Regel nicht mehr registriert werden. Im Einzelfall kann es aber möglich sein, Sender beispielsweise an Ruheplätzen von Prädatoren zu lokalisieren, und somit das Schicksal einzelner aus dem Untersuchungsabschnitt „verschwundener“ markierter Fische nachzuvollziehen.

Obwohl die Ursachen nicht in allen Fällen zweifelsfrei einem der genannten Gründe zuzuordnen sind, sprechen wir hier im Folgenden vom Verlust eines Fisches und seines Sendersignals, weil die Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls der Sender oder eines Verbleibs lebender, nicht abgewandeter Smolts im Untersuchungsgebiet im Unterschied zu (Blank-)Aalen vernachlässigbar gering ist. Außerdem ist zu berücksichtigen, dass die Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls eines Senders in allen untersuchten Abschnitten gleich hoch sein dürfte, und die Ergebnisse in dieser Hinsicht somit einer Korrektur durch den Wert aus dem freifließenden Siegabchnitt unterliegen.

Im Bereich der Wasserkraftanlage wurden die Fische auf allen potentiell möglichen Wanderrouten erfasst, so dass eine detailgenaue Verfolgung der Fischbewegungen gewährleistet war. Eine ausführlichere Beschreibung der Methode kann dem Bericht „Monitoringkonzept Wasserkraftanlage Pilotanlage Unkelmühle 2013-16“ (Borcherding & Teichert 2013) entnommen werden.

## 4.2 Migrationsrouten und Verluste von abwandernden Atlantischen Lachssmolts

### 4.2.1 Methoden

#### 4.2.1.1 Fang und Markierung

Für die Studie wurden in der Regel abwandernde Smolts an den Monitoringeinrichtungen der Wasserkraftanlage Unkelmühle aus der Sieg gefangen und dort vor der Markierung und anschließendem Besatz bis zu fünf Tage lang gehältert. Diese Fische stammen aller Wahrscheinlichkeit nach aus Besatz von 0+ Jungfischen von verschiedenen Fischzuchten, können (theoretisch) aber auch aus natürlicher Vermehrung rückkehrender Lachse aus dem Einzugsgebiet der Sieg stammen (Molls & Nemitz 2008, Monnerjahn 2011, Schneider 2011). Zudem wurde im Jahr 2015 eine weitere Gruppe von Zuchtlachsen aus der LANUV Fischzucht in Kirchhündem-Albaum verwendet.

Die Sender wurden, wie von Finstad et al. (2005) beschrieben, chirurgisch in die Bauchhöhle der Fische implantiert. Vor dem Eingriff wurden die Fische in 50 mg l<sup>-1</sup> Benzocain (Aethylum p-aminobenzoicum, Caesar & Loretz GmbH, Hilden, Germany) betäubt. Die Betäubung wurde während der Operation zusätzlich durch Überströmen der Kiemen mit einer schwächeren Lösung aus 25 mg l<sup>-1</sup> Benzocain aufrechterhalten. Invasive Eingriffe dieser Art unterliegen grundsätzlich dem Tierschutzgesetz und sind genehmigungspflichtig. Zu diesem Zweck liegt seit dem 26.02.2014 eine tierschutzrechtliche Genehmigung gemäß § 8 Abs. 1 TierschG i.V.m. § 33 TierSchVersV des Landesamtes für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW für die aktuelle Studie vor. Die verwendeten Radiotelemetriesender waren individuell gekennzeichnete Nanosender der Firma Lotek Wireless Inc., Canada, Modell NTQ-2 (Frequenz von 150.300 MHz und 151.500 MHz, Abmessungen 5x3x10 mm; Gewicht 0.31g, zu erwartende Batterielebensdauer 18 bis 32 Tage, je nach Sendeintervall).

Nachdem überprüft wurde, dass sich alle Fische gut von der Operation erholt hatten, wurden die Tiere in zwei belüfteten 600 l Tanks zur Besatzstelle transportiert. Zwar kann nicht gänzlich ausgeschlossen werden, dass Fische an den Spätfolgen der Operation verenden, in der aktuellen Literatur sind diese Fälle jedoch als selten bezeichnet. Das deckt sich auch mit den in dieser Studie gemachten Erfahrungen, die zum Beispiel zeigten, dass bei den in der Monitoringeinrichtung gefangenen Fischen die Operationswunden gut verheilt waren und die Fische auch sonst einen sehr guten Zustand aufwiesen. Auch für diesen Faktor gilt, dass eine Mortalität aufgrund der Operationsfolgen in allen Siegabschnitten vergleichbar sein dürfte und damit unterliegen die Ergebnisse in dieser Hinsicht somit ebenfalls einer rechnerischen Korrektur durch den im frei fließenden Siegabschnitt ermittelten Wert auftretender Verluste. Insgesamt wurden 2014 78 Smolts markiert von denen 20 am 25. März, 21 am 28. März und 37 am 30. März besetzt wurden. Die durchschnittliche Gesamtlänge betrug 168 mm. 2015 wurden 178 Smolts markiert, von denen 100 am 09. April, 50 am 16. April und 28 am 24. April 2015 besetzt wurden. Die durchschnittliche Gesamtlänge betrug in diesem Jahr 160 mm. 2016 wurden abschließend insgesamt noch einmal 120 Smolts markiert, von denen je 60 Smolts am 1. April und 7. April besetzt wurden. In diesem Jahr waren die Fische im Mittel 159 mm lang (Tabelle 6).

Tabelle 6: Übersicht über die Anzahl besetzter Smolts in den Jahren 2014-2016 sowie deren Länge und das Datum des Besatzes

Jahr	Anzahl markierter Smolts	Länge (mm) Mittelwert (Min. - Max.)	Besatz
2014	78	168 (137–212)	(25 März n = 20, 28 März n = 21, 30 März n = 37)
2015	178	160 (105–202)	(9 April n = 100, 16 April n = 50, 24 April n = 28)
2016	120	159 (116-224)	(1 April n = 60, 7 April n = 60)

#### 4.2.1.2 Aufzeichnung markierter Smolts

Die Fische wurden 8,9 km (2014) und 9,8 km (2015 und 2016) oberhalb der Wasserkraftanlage besetzt und automatisch an mehreren stationären Antennenstationen registriert (Abb. 31):

- Am Beginn der freifließenden Strecke, 8,3 km oberhalb der Wasserkraftanlage (Empfängerstandort 1)
- Am Beginn des Staubereichs, 2,5 km oberhalb der Wasserkraftanlage (Empfängerstandort 2)
- Am Ende des Staubereichs, 0,2 km oberhalb und an der Wasserkraftanlage (zusammengefasst zu Empfängerstandort 3)
- 1,9 km unterhalb der Wasserkraftanlage (Empfängerstandort 3.1) (nur 2016)
- 7,5 km unterhalb der Wasserkraftanlage (Empfängerstandort 4) (nur 2015 & 2016)

Die verwendeten Empfänger des Modells SRX 600 (Lotek Wireless Inc., Canada) wurden in Kombination mit 3-, 4- und 6-Element Yagi-Antennen sowie Unterwasserantennen betrieben. Die Empfängerstandorte 3.1 und 4 wurden in 2015 bzw. 2016 hinzugefügt, um eine unterhalb der Wasserkraftanlage auftretende verzögerte Mortalität erfassen zu können.

Detaillierte Bewegungsmuster wurden an der Wasserkraftanlage von insgesamt 5 Empfängern und 15 Antennen aufgezeichnet, die es ermöglichten alle möglichen Wanderwege zu erfassen (Abb. 32 und 33). Die Wanderbewegungen markierter Fische zwischen der Besatzstelle und der Wasserkraftanlage wurden zudem durch mobile Verfolgung kartiert. Diese Art der Verfolgung wurde von einem auf dem Fluss abwärts treibenden Boot, oder, bei niedrigen Wasserständen, von einem Fahrrad aus mittels eines tragbaren Empfängers und einer 3-Element Antenne durchgeführt. 2014 wurden so zwischen dem 1. April und dem 5. Mai 8 Kartierungen vollzogen, während 2015 zwischen dem 10. April und dem 14. Juli 30 Kartierungen durchgeführt wurden. 2016 wurden die Fische zwischen 3. April und 11. Mai an insgesamt 20 Kartierungen aufgezeichnet. Die Fische wurden in der Regel auf einer Strecke von insgesamt 38,8 km erfasst (von kurz oberhalb der Besatzstelle bis 29 km unterhalb der Wasserkraftanlage, alle stationären Empfänger lagen innerhalb dieser Strecke).

#### 4.2.1.3 Unterscheidung tot/driftend vs. lebendig/schwimmend

Um zwischen lebendigen flussabwärts wandernden und toten, aber mit der Strömung driftenden Fischen besser unterscheiden zu können, wurden 2015 20 tote Smolts mit Radiosendern versehen und im Untergraben besetzt (jeweils 10 Fische am 09. und 16. April). 2016 wurden insgesamt zehn tote Smolts markiert, von denen je fünf Smolts am 02. April und 07. April im Untergraben besetzt wurden. Die Drift dieser Smolts wurde während der mobilen Verfolgung ebenfalls erfasst.

#### 4.2.1.4 Datenanalyse

Die aufgezeichneten Daten wurden mit Hilfe der Software R (R Development Core Team, 2016) analysiert. Die Migrationsgeschwindigkeiten innerhalb der verschiedenen Flussabschnitte (Abb. 31) basieren auf der letzten Aufzeichnung an Standort 1, der ersten Aufzeichnung an Standort 2, der ersten Aufzeichnung an der am meisten flussaufwärts gelegenen Antenne an der Wasserkraftanlage (d.h. der am Wehr gelegenen Antenne), der letzten Aufzeichnung an den am weitesten flussabwärts gelegenen Antennen unterhalb der Wasserkraftanlage (Standort 3, 3 Antennen 50-100 m unterhalb der Wasserkraftanlage), der ersten Aufzeichnung an Standort 3.1 (nur 2016) und der ersten Aufzeichnung an Standort 4 (nur 2015 & 2016).

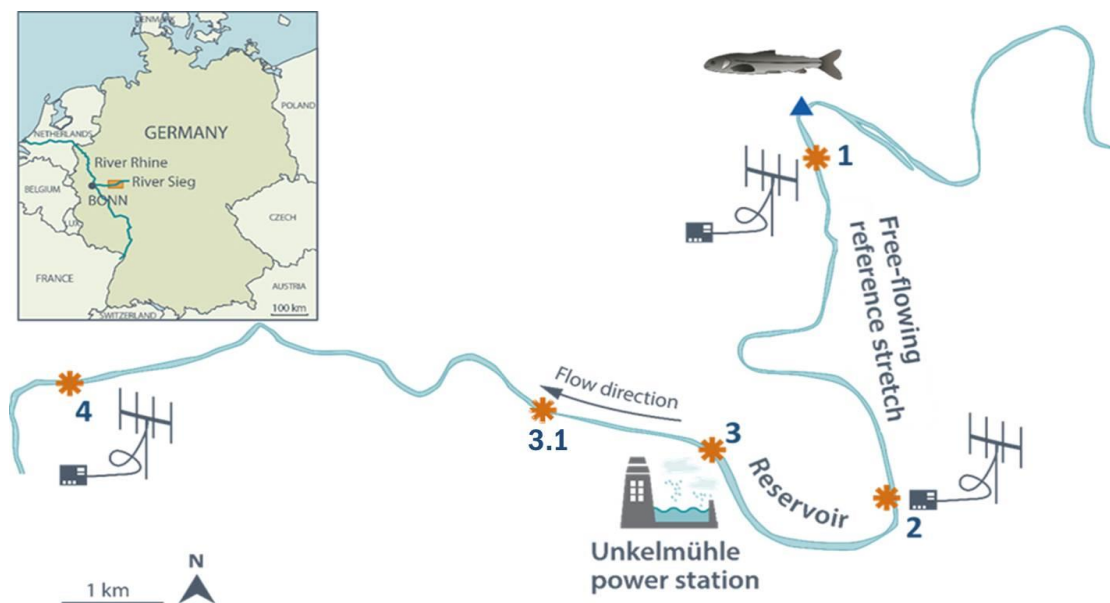


Abbildung 31: Karte des untersuchten Abschnitts der Sieg. Dargestellt sind die Besatzstelle der markierten Smolts, die Antennenstandorte, an denen die Fische registriert wurden sowie die Wasserkraftanlage Unkelmühle



Abbildung 32: Die Wasserkraftanlage Unkelmühle an der Sieg. Die verschiedenen Abwanderwege sind mit Pfeilen markiert

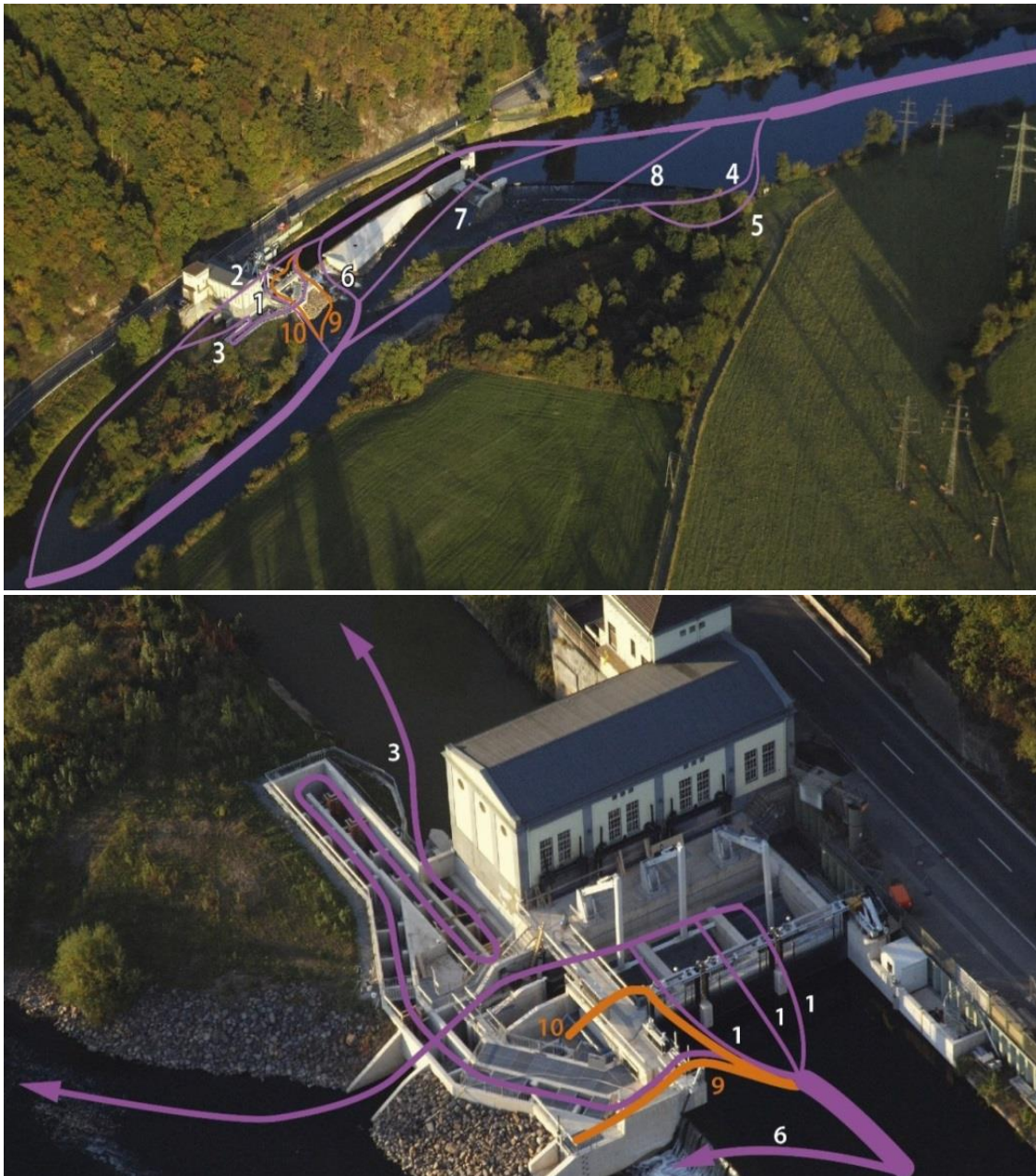


Abbildung 33: Dargestellt sind die verschiedenen Wanderwege, über welche abwandernde Fische die Stau- und Wasserkraftanlage passieren können: 1) via die Oberflächenbypässe, 2) durch die Turbinen (im Falle von Rechendurchtritt), 3) durch den Schlitzpass, 4) durch den Raugerinne-Beckenpass, 5) durch die Kanu-Rutsche, 6) über die Eisklappe, 7) über die Wehrklappe, 8) über das Wehr, 9) durch die BottomGallery und 10) durch die Aalrohre. Die beiden letzten in Orange dargestellten Wanderwege stehen nur während der Aalabwanderung im Herbst zur Verfügung. Das Tor zwischen Geschwemmselrinne und Sieg war während der Lachsabwanderung dauerhaft geöffnet, während der Aalabwanderung jedoch nur zu Zeiten der Rechenreinigung. Über das geöffnete Tor (Schwenktor 1) gelangen Fische, die den Weg über die Oberflächenbypässe wählen, wieder in den Hauptstrom der Sieg. Die Oberflächenbypässe können in Höhe und Tiefe angepasst werden. Die Einstellungen für diese Studie können Tabelle 2 entnommen werden. Die Nummern in den Darstellungen beziehen sich auf den jeweiligen Wanderweg.



Tabelle 7: Öffnungswinkel (°) und Öffnungszeiten des Schwenktores 1 am Ende der Geschwemmselrinne an der Wasserkraftanlage Unkelmühle sowie Dimensionen der Bypassöffnungen an den Rechen. Schwimmen abwandernde Fische durch die Bypässe, gelangen sie in die Geschwemmselrinne und dann durch das am Ende befindliche Tor wieder in den Hauptstrom der Sieg. An jedem der drei vor den Turbinen verbauten Rechen befinden sich zwei Bypassöffnungen. Diese sind hier nummeriert (1-6), wobei 1 der Öffnung in Fließrichtung ganz rechts und 6 der Öffnung in Fließrichtung ganz links entspricht. Die Breite der Bypassöffnungen war für alle Studienzeiträume gleich.

		Öffnung Tor	Öffnungszeiten Tor	Bypass Breite (cm)	Bypass Tiefe (cm)					
					1	2	3	4	5	6
Lachs- Smolts	2014	26°	dauerhaft	69,75	24	14	24	14	24	14
	2015	26°	dauerhaft	69,75	24	14	24	14	24	14
	2016	26°	dauerhaft	69,75	24	14	24	14	24	14
Aale	2014	63° *	Rechenreinigung	69,75	24	11	11	11	9	9
	2015	63° *	Rechenreinigung	69,75	24	11	11	11	9	9
	2016	63° *	Rechenreinigung	69,75	24	14	24	14	1	1

\* Das Tor Öffnet sich in der Regel um 63° (70% der vollen Öffnung), in regelmäßigen Abständen wird es aber auch komplett geöffnet (90°, 100%).

#### 4.2.2 Ergebnisse 2014

Von den 78 markierten Smolts wurden nach dem Besatz sechs an keiner der Antennenstationen registriert, sechs gingen in der 5,8 km langen naturnahen Strecke verloren und sieben im 2,3 km langen Staubereich. Somit erreichten 59 Smolts den Bereich der Wasserkraftanlage.

##### 4.2.2.1 Smoltverluste im freifließenden Abschnitt im Vergleich zum Staubereich

Im Vergleich zum naturnahen, frei fließenden Bereich (sechs von 72; 8,3%) ging im Staubereich ein größerer Anteil der Fische (sieben von 66 Fischen; 10,6%) verloren. Wird miteinbezogen, dass der naturnahe Bereich im Vergleich zum Staubereich deutlich länger ist, zeigt sich der Unterschied der Verluste in beiden Abschnitten noch wesentlich deutlicher (naturnaher Bereich 1,5% der Fische pro km, Staubereich 4,8% der Fische pro km). Demzufolge war der Verlust pro km im Staubereich 3-mal höher als im freifließenden Kontrollbereich.

##### 4.2.2.2 Wanderwege an der Stau- und Wasserkraftanlage

Von den 59 Smolts, die den Bereich von Wehr bzw. Wasserkraftanlage erreichten, folgten 49 (83%) dem Wanderweg 1 (Obergraben) zum Turbineneingang, 3 (5%) benutzten den vorhandenen Ausstieg des Schlitzpasses (Wanderweg 3), während dagegen 7 (12%) nicht in den Obergraben einschwammen, sondern den Raugerinne-Beckenpass oder die Kanurutsche am linken Siegufer als Abwanderweg nutzten (Wanderweg 4 & 5) (Abb. 3). Für Fische die diesen Wanderweg benutzen, konnte nicht zwischen den beiden unmittelbar nebeneinander liegenden Alternativen unterschieden werden. Infolge des geringen Stababstandes des Rechens (10 mm) passierte entsprechend des Fischschutzkonzepts der Pilotanlage erwartungsgemäß keiner der 49 Smolts, die dem Wanderweg 1 folgten, den Rechen und somit auch nicht die Turbinen. Welchen der drei Turbineneinläufe Smolts wählten, hing stark vom Durchfluss durch die Turbinen ab (Abb. 34). Bei stillgelegten Turbinen

passierte so gut wie kein Fisch die Oberflächenbypässe der äußeren Turbineneinläufe (Turbine 1 und 3), die jedoch bei laufender Turbine häufig gewählt wurden. Der mittlere Turbineneinlauf, an dem die Turbine nur in Einzelfällen in Betrieb war, wurde auch bei Stillstand der Turbine von einigen Fischen zum Abstieg über den geöffneten Bypass gewählt. Zum Zeitpunkt der Passage aller Fische in Turbineneinlauf 2 war jedoch je eine der benachbarten Turbinen in Betrieb, so dass es wahrscheinlich ist, dass auch die in der Mitte wandernden Fische durch die Strömung der randständigen Turbinen beeinflusst waren.

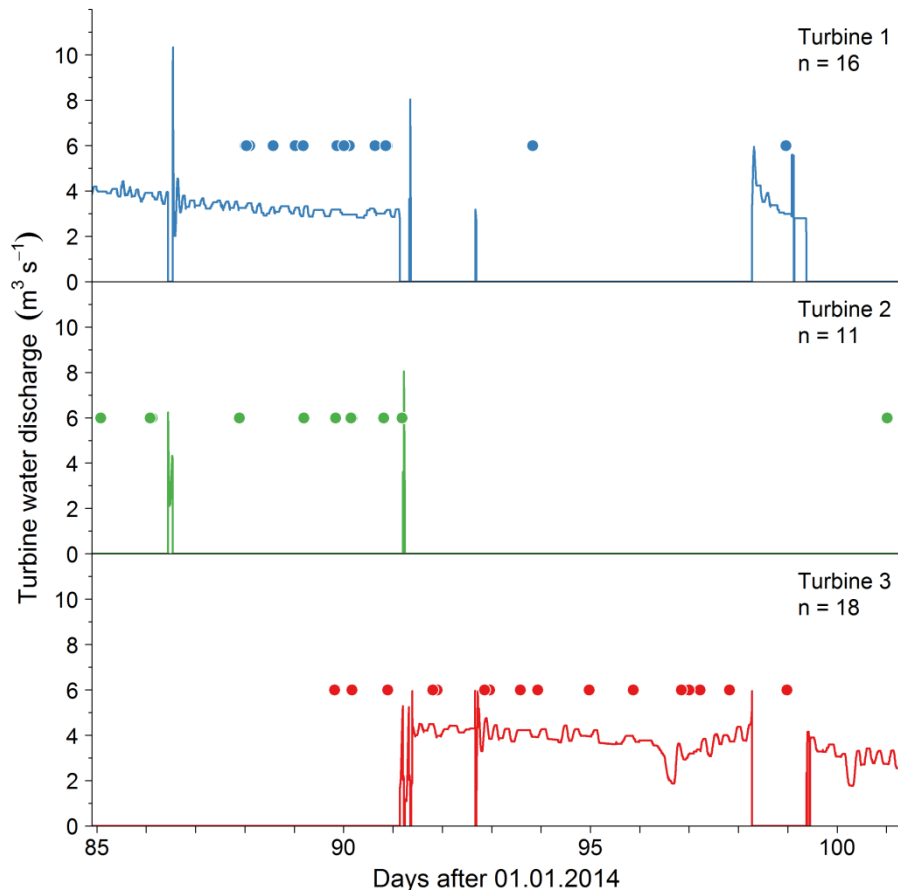


Abbildung 34: Abfluss ( $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ) durch die drei Turbinen während des Untersuchungszeitraumes in 2014 (Linie). Der Zeitpunkt der Kraftwerkspassage für einzelne Smolts ist durch Punkte markiert. Turbine 1 = an der Uferseite gelegen (blaue Punkte,  $N=16$ ), Turbine 2 = mittlere Turbine (grüne Punkte,  $N=11$ ), Turbine 3 = auf der Flussseite gelegene Turbine (rote Punkte,  $N=18$ ).

#### 4.2.2.3 Verluste an der Wasserkraftanlage

Mindestens sechs der 49 Smolts, welche dem Wanderweg 1 folgten, gingen verloren:

- Zwei starben wahrscheinlich im Bereich des Rechens (die Sender verblieben für den restlichen Verlauf der Studie am Rechen).
- Drei passierten erfolgreich den Oberflächenbypass, aber konnten von der am weitesten flussabwärts gelegenen Antenne im Bereich der Wasserkraftanlage (50-100 m unterhalb) nicht mehr detektiert werden. Möglicherweise verblieben sie unmittelbar am Übergang der Geschwemmselrinne ins Mutterbett der Sieg, an dem sich, je nach Wasserstand und

Geschwemmselanfall, konstruktiv bedingt durch die Kreuzung mit der zum Oberwasser geführten Fischaufstiegsanlage (Schlitzpass), entsprechend beobachtete Treibgutpolster bilden können.

- Einer starb wahrscheinlich während oder gleich nach der Passage des Bypasses, da der Sender dauerhaft in einem seichten Bereich kurz unterhalb des Bypassausgangs verblieb.

Zudem wurden zwei markierte Smolts im Monitoringbecken der Oberflächenbypässe in der Zeit des Fangmonitorings zufällig gefangen und anschließend zu Kontrollzwecken entnommen. Diese hatten vor dem Eintritt in den Monitoringbereich die Oberflächenbypässe und den ersten Teil der Geschwemmselrinne ohne äußerlich sichtbare Schädigung passiert.

Mit Ausnahme der 6 im Verlauf der Untersuchung überhaupt nicht registrierten Fische und den 2 Smolts, die im Monitoringbereich gefangen wurden, wurden alle markierten Fische unabhängig des gewählten Wanderwegs von den Antennen ober- und unterhalb der Wasserkraftanlage aufgezeichnet. Für die beiden im Monitoring zufällig gefangenen Fische kann nicht abschließend gesagt werden, ob sie die Anlage erfolgreich passiert hätten oder nicht. Insgesamt belaufen sich die Verluste im Bereich der Wasserkraftanlage auf 6 Fische. Bezieht man die Verluste nun auf die übrigen erfassten Lachse exklusive der 2 entnommenen Fische (N= 57), ergibt sich ein Verlust von 10,5%. Bei Anwendung dieser Verlustwahrscheinlichkeit auf die 2 Fische, bei denen nicht sicher ist, ob sie überlebt hätten oder nicht, zeigt sich, dass die Wahrscheinlichkeit eines erfolgreichen Abwanderns um ein vielfaches höher ist als deren Verlust. Daher werden die 2 zufällig im Monitoring entnommenen Fische für die Berechnung der Verluste als erfolgreich abwandernd gewertet.

Der im Folgenden genannte Verlust stellt einen Mindestwert dar, da die Wanderung der Fische in 2014 aus Kapazitätsgründen (Anzahl verfügbarer Telemetriegeräte) nicht über die Wasserkraftanlage hinaus flussab verfolgt werden konnte. Gegebenenfalls später auftretende Verluste von Fischen, z.B. durch Verletzungen, welche während der Passage der Wasserkraftanlage aufgetreten sind, konnten nicht registriert werden (sogenannte verzögerte Mortalität). Der Mindestverlust von abwandernden Smolts an der Wasserkraftanlage betrug somit 6 von 59 Fischen. Dies entspricht 10,2%. Es bleibt jedoch zu beachten, dass dieser Wert die natürlicherweise auftretenden Verluste (Wert berechnet aus der frei fließenden Siegstrecke) mit umfasst. In diesem Fall beinhalten die „natürlicherweise auftretenden Verluste“ neben Sterblichkeit durch Alter, Krankheit oder Ähnliches, auch die durch Prädation hervorgerufenen Verluste (durch Raubfische oder piscivore Vögel) die in diesem Gewässerabschnitt auftreten. Der natürlich auftretende Verlust kann folgendermaßen herausgerechnet werden:

Die Verluste im freifließenden Abschnitt betragen 1,5% pro km. Basierend darauf kann nun eine Korrektur der in anderen Gewässerabschnitten aufgetretenen Verluste erfolgen, so dass sich die Verluste ergeben, die auftreten, da das Gewässer für Wasserkraftnutzung ausgebaut wurde und nicht mehr frei fließt. Nach Korrektur dieser natürlich auftretenden Einbußen ergibt sich ein Verlust von 9,9% der Lachse im Bereich der Wasserkraftanlage (siehe unten). Die Sender zweier Fische, welche bereits erfolgreich die Wasserkraftanlage passiert hatten, wurden etwa zwei Wochen nach ihrer Passage mittels mobiler Verfolgung in einer Kormorankolonie (*Phalacrocorax carbo*) ungefähr 10 km unterhalb der Wasserkraftanlage gefunden. Wo die Prädation durch die Kormorane nach der Passage der Pilotanlage erfolgt ist, konnte nicht ermittelt werden.

#### **4.2.2.4 Wasserkraftbedingter Verlust von Smolts**

Durch den Vergleich der Verluste abwandernder Smolts im naturnahen Bereich mit den zusammengefassten Verlusten im Staubereich und im Bereich der Wasserkraftanlage, wurden die Einbußen, die mit dem Aufstau und dem Betrieb der Wasserkraftanlage im Zusammenhang stehen, berechnet. Dies basiert auf der Annahme, dass die Verluste pro Flusskilometer im naturnahen Bereich repräsentativ für den nun anthropogen veränderten Bereich des Staus und der Wasserkraftanlage vor seiner Verbauung ist (siehe auch oben).

Basierend auf den oben aufgeführten Ergebnissen gab es 7,2% zusätzlichen Verlust im Staubereich verglichen mit einer freifließenden Referenzstrecke der gleichen Länge (vergleiche Übersichtstabelle Tab. 9). Der zusätzliche Mindestverlust auf Grund des Vorhandenseins (Betrieb) der Wasserkraftanlage beträgt 9,9%. Dies beinhaltet nur den unmittelbaren Verlust im Bereich der Wasserkraftanlage, da aus technischen Gründen im Jahr 2014 unterhalb der Wasserkraftanlage keine weiteren Antennenstationen aufgebaut bzw. nur in geringem Umfang eine mobile Verfolgung durchgeführt wurde (s.o.). Der angegebene Verlustwert muss somit als ein absolutes Minimum angesehen werden, da durch die Passage der Wasserkraftanlage möglicherweise verursachte aber verzögert auftretende Verluste nicht beinhaltet sind. Zusammengefasst ergibt sich aus Staubereich und Wasserkraftanlage ein zusätzlicher Verlust von mindestens 16,0%.

#### **4.2.2.5 Verluste im Vergleich zu Körpergröße**

Es gab keine Unterschiede der Körperlänge von Smolts, welche erfolgreich die Wasserkraftanlage passierten und solchen, die nach dem Besatz nicht mehr registriert wurden und im Staubereich, dem naturnahen Bereich oder bei der Passage des Bypasses verloren gingen (Kruskal-Wallis test,  $n = 77$ ,  $df = 4$ ,  $\chi^2 = 3,2$ ,  $P = 0,52$ ). Auch wenn alle verlorenen Smolts zu einer Gruppe ( $n = 25$ ) zusammengefasst und mit den erfolgreich Abwandernden ( $n = 52$ ) verglichen wurden, gab es weiterhin keinen Unterschied zwischen diesen Gruppen (t-test,  $t = -0,063$ ,  $P = 0,95$ ).

#### **4.2.2.6 Migrationsgeschwindigkeiten / Wanderung im Tagesverlauf**

Die Migrationsgeschwindigkeit der Smolts unterschied sich nicht signifikant im naturnahen Bereich (Median:  $0,31 \text{ km h}^{-1}$ ) und dem Staubereich (Median:  $0,73 \text{ km h}^{-1}$ ) ( $P = 0,56$ ). Während der Passage der Wasserkraftanlage (Median:  $0,03 \text{ km h}^{-1}$ ) waren die Fische jedoch signifikant langsamer als beim Durchschwimmen des naturnahen ( $P < 0,001$ ) und des Staubereichs ( $P < 0,001$ ) (gepaarter Wilcoxon Test mit Bonferroni Korrektur). Nur Smolts, welche erfolgreich die Wasserkraftanlage passierten, wurden in dieser Analyse berücksichtigt ( $n = 50$ ). Das Verhalten der Smolts vor der Wasserkraftanlage und mögliche Gründe für eine Verzögerung wurde im Detail mittels Videoanalysen ausgewertet (siehe hierzu Kapitel 4.3).

Fische, welche erfolgreich den Staubereich durchquerten, hatten im naturnahen Bereich eine schnellere Migrationsgeschwindigkeit ( $n = 58$ ) als die, die im Staubereich verloren gingen ( $n = 7$ , Mann-Whitney U test,  $P = 0,03$ ). Außerdem unterschied sich die Migrationsgeschwindigkeit von den die Wasserkraftanlage erfolgreich passierenden Fischen ( $n = 50$ ) weder im naturnahen, noch im Staubereich, von der Migrationsgeschwindigkeit der in der Wasserkraftanlage verloren gegangenen Fische ( $n = 6$ ) (Mann-Whitney U Test, naturnahe Strecke:  $P = 0,28$ , Staubereich:  $P = 0,82$ ).

Die Aufenthaltsdauer der Lachs-Smolts im Studienabschnitt, also vom Besatz bis zur Passage der Wasserkraftanlage, betrug durchschnittlich 137 Stunden (min. 15 h, max. 329 h, Standardabweichung 85, n = 51). Im Durchschnitt verbrachten sie ca. 46 Stunden (min. 1,7 h, max. 309 h, Standardabweichung 70) mit dem Durchschwimmen des naturnahen Abschnitts, ca. 8 Stunden mit dem Durchschwimmen des Staubereichs (min. 1,4 h, max. 39 h, Standardabweichung 9) und ca. 25 Stunden (min. 0,3 h, max. 161 h, Standardabweichung 42) mit der Passage der Wasserkraftanlage.

Der Großteil der Smolts wanderte in der Abenddämmerung oder in der Nacht ab, nur einige Smolts wanderten am Tag (Abb. 35). Dieses Verhalten zeigte sich in allen untersuchten Flussabschnitten inklusive der Wasserkraftanlage selbst.

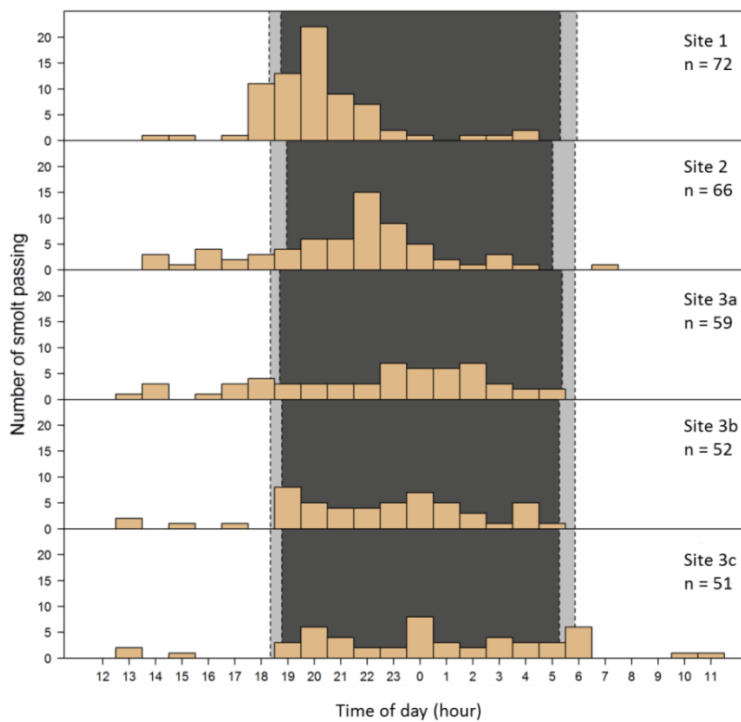


Abbildung 35: Tageszeit zu der Smolts an den einzelnen Empfängerstandorten registriert wurden. Site 1 = Empfängerstandort 1 am Beginn der freifließenden Referenzstrecke, Site 2 = Empfängerstandort 2 am Beginn des Staubereichs. Site 3a-c = Empfängerstandort 3 (Wasserkraftanlage), wobei Site 3a = Ende des Staubereichs, Site 3b = unmittelbar oberhalb der Wasserkraftanlage, Site 3c = unmittelbar unterhalb der Wasserkraftanlage. Grau hinterlegt = Zeiten des Sonnenauf- und -untergangs, Schwarz hinterlegt = Nacht. Die Breite des grauen Bereichs gibt die Spanne zwischen frühestem und spätestem Sonnenauf- oder -untergang der betrachteten Tage wider.

### **4.2.3 Ergebnisse 2015**

#### **4.2.3.1 Ergebnisse allgemein**

Von den 178 markierten Smolts (128 Wildfische, 50 Zuchtfische) wurden nach dem Besatz 19 an keiner der Antennenstationen registriert, 14 gingen in der 5,8 km langen freifließenden Strecke verloren und 30 im 2,3 km langen Staubereich. Somit erreichten 115 Smolts den Bereich der Wasserkraftanlage.

#### **4.2.3.2 Smoltverluste im freifließenden Abschnitt im Vergleich zum Staubereich**

Im freifließenden Bereich ging ein Anteil von 8,8% (14 von 159) der Fische verloren, im Staubereich hingegen ein Anteil von 20,7% (30 von 145 Fischen). Wird miteinbezogen, dass der freifließende Bereich im Vergleich zum Staubereich wesentlich länger ist, zeigt sich der Unterschied der Verluste in beiden Abschnitten wesentlich deutlicher (freifließender Bereich 1,6% der Fische pro km, Staubereich 9,6% der Fische pro km). Demzufolge war der Verlust pro km im Staubereich 6-mal höher als im freifließenden Kontrollbereich.

#### **4.2.3.3 Wanderwege an der Stau- und Wasserkraftanlage**

Von den 115 Smolts, die den Bereich von Wehr bzw. Wasserkraftanlage erreichten, folgten 109 (95%) dem Wanderweg 1 (Obergraben) zum Turbineneingang, einer (1%) benutzte den vorhandenen Ausstieg des Schlitzpasses (Wanderweg 3), einer (1%) gelangte über die Wehrklappe ins Unterwasser (Wanderweg 7), während dagegen 4 (3%) nicht in den Obergraben einschwammen, sondern den Raugerinne-Beckenpass oder die Kanurutsche am linken Siegufer als Abwanderweg nutzten (Wanderweg 4 & 5) (Abb. 33). Für Fische, die diesen Wanderweg benutzen, konnte nicht zwischen den beiden unmittelbar nebeneinander liegenden Alternativen unterschieden werden. Infolge des geringen Stababstandes des Rechens (10 mm) passierte erwartungsgemäß keiner der 109 Smolts, die dem Wanderweg 1 folgten, den Rechen und somit auch nicht die Turbinen.

#### **4.2.3.4 Drift toter Smolts**

Die längste Distanz, welche einer der im Untergraben ausgesetzten toten Fische driftete, betrug 2,4 km flussabwärts der Wasserkraftanlage (folgend als „Driftlimit“ bezeichnet). Dies deutet darauf hin, dass ein Smolt, der unmittelbar bei der Passage der Wasserkraftanlage verendet, bis zu 2,4 km driften kann, bevor Fisch und Sender stationär werden. Wenn Fische im Fließabschnitt oberhalb des Driftlimits verbleiben, wird daher angenommen, dass sie wahrscheinlich während der Passage der Wasserkraftanlage verendet sind. Wenn dagegen Fische unterhalb des Driftlimits verblieben, kann angenommen werden, dass sie erst zu einem späteren Zeitpunkt nach der Kraftwerkspassage verendeten. 4 der toten Smolts verschwanden kurz nach dem Besatz durch Prädation aus dem Fluss (Abb. 36). In den Kormorankolonien konnte jedoch kein Sender toter Smolts gefunden werden.

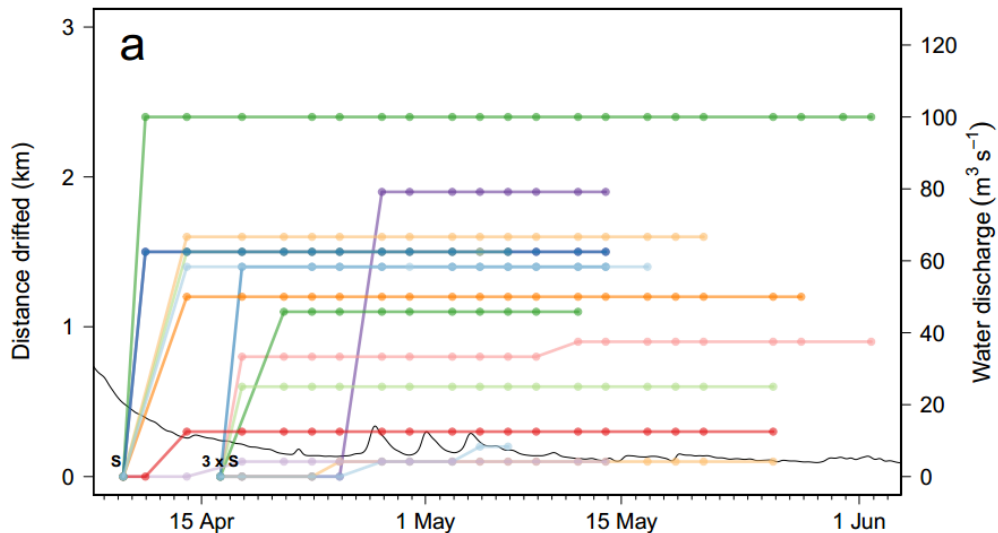


Abbildung 36: Drift toter, in die Sieg entlassener Smolts im Jahr 2015 (n = 20). Die Position der einzelnen Smolts zu Zeiten der manuellen Trackings oder wenn die Smolts eine stationäre Empfängereinheit passierten, sind als farbige Punkte markiert. Die schwarze Linie zeigt den Abfluss der Sieg an der Unkelmühle im entsprechenden Zeitraum. „S“ markiert die letzte Registrierung bevor ein Fisch von einem Räuber erbeutet wurde. Entnommen aus Havn et al. 2017.

#### 4.2.3.5 Verluste an und unterhalb der Wasserkraftanlage

Von den 109 Smolts, die via die Oberflächenbypässe in die Geschwemmselrinne einschwammen, wurden 6 von weiteren Analysen ausgeschlossen, da sie im Fangmonitoring gefangen wurden. Sie haben auf Grund des zusätzlichen Handlings eine potentiell geringere Chance die Passage der Wasserkraftanlage zu überstehen und erfolgreich weiter zu wandern. Somit blieben 103 Fische, die diesen Abwanderweg nutzten, für die anschließende Auswertung.

Von den 103 Smolts, die die Wasserkraftanlage passierten ohne im Monitoring gefangen zu werden, gingen 25 auf der Strecke zwischen der Wasserkraftanlage und Antennenstation 4 (7,5 km unterhalb der Anlage) verloren.

- Ein Smolt, der einen der Oberflächenbypässe nutzte, ging wahrscheinlich unmittelbar bei oder nach der Passage des Bypasses verloren. Dieser Sender verblieb bis zum Ende der Studie im Unterwasser unmittelbar an der Anlage (Tab. 7). Kein anderer Sender, unabhängig vom Wanderweg, verblieb an oder in der Nähe der Wasserkraftanlage.
- Drei Smolts wurden vermutlich direkt an der Wasserkraftanlage gefressen. Sie wurden nach Passage der Wasserkraftanlage wieder oberhalb des Querbauwerks registriert (Tab. 7). Zum Zeitpunkt als sie von einem Räuber gefressen wurden, konnten sie entweder tot oder noch lebendig gewesen sein.
- Vier Smolts verblieben auf der Strecke zwischen Wasserkraftanlage und der maximalen Driftstrecke der toten Smolts bis die Senderbatterien aufgebraucht waren (Tab. 7). Diese Fische könnten möglicher- aber nicht zwangsweise bereits bei der Passage der Wasserkraftanlage verloren gegangen und flussab gedriftet sein, da sie oberhalb des Driftlimit verblieben. Somit kann nicht eindeutig geklärt werden, ob die Fische während der Passage bereits verloren gingen, oder erst unterhalb der Wasserkraftanlage.

- 13 Smolts verschwanden nach der Passage der Wasserkraftanlage aus dem Fluss (Tab. 7), d.h. sie wurden unterhalb der Wasserkraftanlage weder durch stationäre Antennenanlagen, noch durch mobile Verfolgung registriert. Bei 9 dieser Fische deutet die Signatur der Daten auf Prädation hin, d.h. diese Smolts wurden nach der Passage des Querbauwerks oberhalb der Wasserkraftanlage erneut aufgezeichnet. Da keiner dieser Individuen unterhalb des Driftlimits (2,4 km unterhalb der Wasserkraftanlage) registriert wurde, wäre es möglich, dass all diese Fische – tot oder lebendig – bereits unmittelbar nach der Kraftwerkspassage gefressen wurden. Es wäre jedoch theoretisch zwischen ihrem Verschwinden und der nächsten mobilen Verfolgung, bzw. der nächsten Registrierung oberhalb des Kraftwerks genügend Zeit gewesen um das Driftlimit zu erreichen. Daher kann nicht mit absoluter Sicherheit festgestellt werden, ob das Driftlimit passiert wurde oder nicht (da sich am Driftlimit keine Station zur Registrierung befand).
- Vier Smolts stoppten zwischen dem Driftlimit und Antennenstation 4 (Tab. 7). Der Verlust dieser Fische wird somit nicht einer unmittelbar an der Wasserkraftanlage verursachten Mortalität zugerechnet, da diese Smolts sich weiter stromab bewegten, als tote an der Wasserkraftanlage besetzte Fische drifteten.

Die Signale von vier Sendern wurden später in Kormorankolonien wiedergefunden. Ein Sender verschwand zwischen der Wasserkraftanlage und Standort 4 7,5 km unterhalb aus dem Fluss und drei hatten Empfängerstandort 4 passiert bevor sie aus dem untersuchten Gewässerabschnitt verschwanden.

Insgesamt wurde also bei vier von 103 Smolts ein unmittelbarer Verlust auf Grund der Kraftwerkspassage festgestellt (3,9%). Nur dieser Wert ist direkt vergleichbar mit dem 2014 an der Wasserkraftanlage dokumentierten Verlust, da 2014 aus technischen Gründen kein Monitoring von markierten Fischen unterhalb der Wasserkraftanlage durchgeführt werden konnte.

Neben diesem unmittelbaren Verlust, bei dem Fische im direkten Umfeld der Wasserkraftanlage verloren gehen, z.B. durch tödliche Verletzungen die sie sich bei der bei der Kraftwerkspassage zugezogen haben, ist es jedoch auch möglich, dass ein Fisch bei der Kraftwerkspassage geschädigt wurde, jedoch noch einige Zeit weiterschwimmt, bevor er letztendlich im Abschnitt unterhalb der Wasserkraftanlage verendet (verzögerte Mortalität). Um ein vollständiges Bild der Verluste zu erhalten, ist es also notwendig das Monitoring auf die Bereiche unterhalb der Anlage auszudehnen. Dies ist ab dem Jahr 2015 umgesetzt worden, indem die Bewegungen markierter Fische auch unterhalb der Wasserkraftanlage aufgezeichnet wurden.

Für das Jahr 2015 zeigte sich, dass zusätzlich zu den 4 direkt an der Anlage gestorbenen Fischen weitere 17 Smolts im nachfolgenden Streckenabschnitt verloren gingen. Es konnte jedoch nicht genau festgestellt werden wo diese Fische verloren gingen. Im Falle der 4 Fische, die oberhalb des Driftlimits im Gewässer verblieben, ist es möglich, dass sie unmittelbar bei der Passage der Wasserkraftanlage verstorben und anschließend weiter flussab verdriftet worden sind. Es könnte jedoch auch sein, dass diese Fische bei der Passage verletzt wurden und noch einige Zeit flussabwärts schwammen bevor sie verendeten. Im Falle der 13 Fische, die oberhalb des Driftlimits von Räubern erbeutet wurden, kann nicht abschließend festgestellt werden, ob dies unmittelbar mit der Kraftwerkspassage in Verbindung gebracht werden kann. Die Fische könnten von Prädatoren gefressen worden sein, 1) weil sie bei der Kraftwerkspassage starben, 2) weil sie bei der



Kraftwerkspassage verletzt wurden oder 3) weil sie, obwohl sie die Kraftwerkspassage unbeschadet überstanden haben, trotzdem erbeutet wurden.

Obwohl diese Aspekte jedoch nicht im Detail geklärt werden können, ist es dennoch möglich zweifelsfrei die Verluste zu ermitteln, die aufgrund des Vorhandenseins einer Wasserkraftanlage auftreten. Dazu unterliegt der an der Wasserkraftanlage und im Abschnitt darunter auftretende Verlust der Kontrolle durch die in der freifließenden Referenzstrecke ermittelten Werte, die Prädation in diesem Abschnitt beinhalten.

Tabelle 8: Anzahl und prozentualer Anteil von Smolts aus dem Jahr 2015 für die einzelnen Abwanderwege dargestellt.

	<b>Oberflächen- bypässe (Weg 1)</b>	<b>Schlitzpass (Weg 3)</b>	<b>Kanurutsche/ Beckenpass (Weg 4)</b>	<b>Wehrklappe (Weg 7)</b>	<b>Gesamt</b>
<b>Lebend</b>	75 (77%)	1 (100%)	2 (50%)	0 (0%)	<b>78 (76%)</b>
<b>Verlust</b>	22 (23%)	0 (0%)	2 (50%)	1 (100%)	<b>25 (24%)</b>
<b>Summe</b>	<b>97</b>	<b>1</b>	<b>4</b>	<b>1</b>	<b>103</b>

#### 4.2.3.6 Wasserkraftbedingter Verlust von Smolts

Durch den Vergleich der Verluste abwandernder Smolts im freifließenden Bereich mit den Verlusten im Staubereich und im Bereich der Wasserkraftanlage, wurden die Einbußen auf Grund des Betriebs der Wasserkraftanlage berechnet. Dies beruht auf der Annahme, dass die Verluste pro Flusskilometer im freifließenden Bereich repräsentativ für den nun anthropogen veränderten Bereich des Staus und der Wasserkraftanlage vor seiner Verbauung sind (siehe oben).

Basierend auf den oben aufgeführten Ergebnissen gab es 17,1% zusätzlichen Verlust im Staubereich verglichen mit einer freifließenden Referenzstrecke der gleichen Länge (vergleiche Tab. 9). Der zusätzliche Mindestverlust auf Grund des Vorhandenseins der Wasserkraftanlage betrug 12,8%. Dies beinhaltet unmittelbaren Verlust im Bereich der Wasserkraftanlage sowie verzögerten Verlust in der 7,5 km langen Strecke zwischen Wasserkraftanlage und Antennenstation 4. Zusammengefasst ergibt sich aus Staubereich, Wasserkraftanlage und der Strecke unterhalb ein zusätzlicher Verlust von mindestens 25,1%.

#### 4.2.3.7 Migrationsgeschwindigkeiten

Im Durchschnitt brauchten die Smolts 123 Stunden (min. 6 h, max. 449 h, Standardabweichung 82) um die gesamte untersuchte Strecke zwischen Besatzstelle und Antennenstation 4 zu überwinden. Im Mittel brauchten die Fische 41 Stunden (min. 1,4 h, max. 356 h, Standardabweichung 69) für die freifließende Strecke, 5 Stunden für den Staubereich (min. 1 h, max. 44 h, Standardabweichung 9), 14 Stunden (min. 0,4 h, max. 115 h, Standardabweichung 24) für die Wasserkraftanlage und 24 Stunden (min. 2 h, max. 128, Standardabweichung 28) um die Strecke zwischen Wasserkraftanlage und

Station 4 zu durchschwimmen. Für folgende Auswertungen der Wandergeschwindigkeit wurden nur Smolts genutzt, die an allen Stationen registriert wurden und erfolgreich die Wasserkraftanlage passierten ( $n = 78$ ).

Es gab keinen signifikanten Unterschied in der Wandergeschwindigkeit zwischen dem freifließenden Abschnitt (Median:  $0,63 \text{ km h}^{-1}$ ), dem Staubereich (Median:  $1,27 \text{ km h}^{-1}$ ) und der Strecke zwischen der Wasserkraftanlage und Antennenstation 4 (Median:  $0,60 \text{ km h}^{-1}$ , alle  $P > 0,64$ ) (Abb. 7). Jedoch war die Wandergeschwindigkeit während der Passage der Wasserkraftanlage signifikant langsamer (Median:  $0,05 \text{ km h}^{-1}$ ) als in den anderen drei Abschnitten (alle  $P < 0,001$ , paarweiser Wilcoxon test mit gepaarten Stichproben und Bonferroni-Korrektur) (Abb. 37). Das Verhalten der Smolts vor der Wasserkraftanlage und mögliche Gründe für eine Verzögerung wurde im Detail mittels Videoanalysen ausgewertet (siehe hierzu Kapitel 4.3).

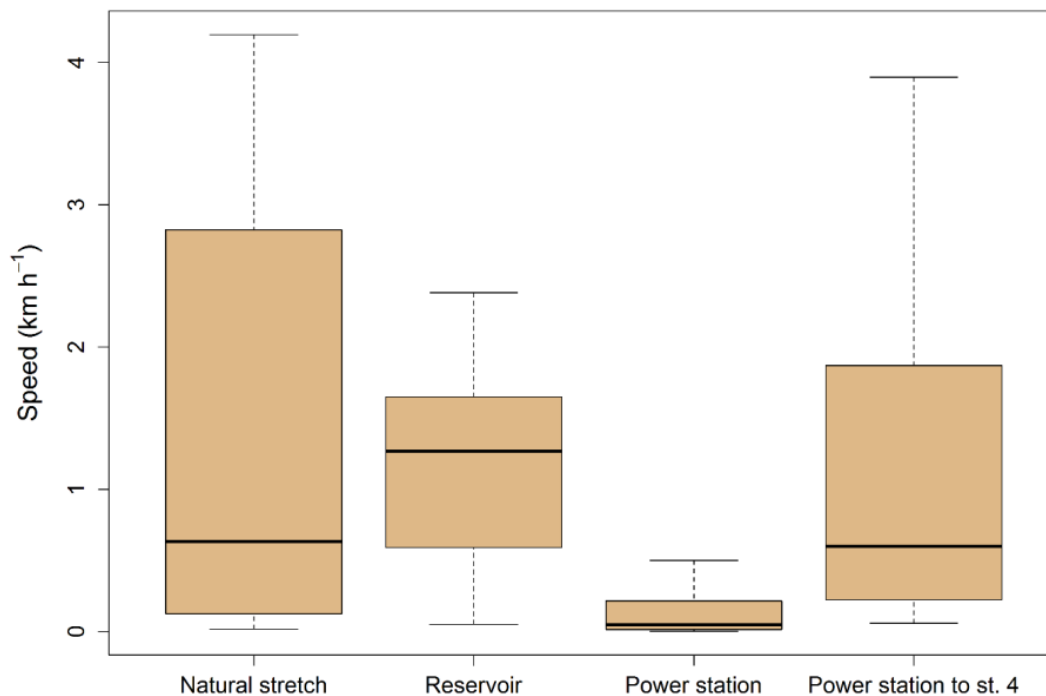


Abbildung 37: Migrationsgeschwindigkeiten radiotelemetrisch markierter Smolts im Jahr 2015 im freifließenden Abschnitt, im Staubereich, an der Wasserkraftanlage und im Abschnitt unterhalb umgerechnet auf Kilometer pro Stunde. Farbiger Bereich = oberes bis unteres Quartil, schwarze Linie = Median, Whiskers = minimaler / maximaler Wert.

#### **4.2.4 Ergebnisse 2016**

##### **4.2.4.1 Ergebnisse allgemein**

Von den 120 markierten Smolts wurden nach dem Besatz 6 an keiner der Antennenstationen registriert, 3 gingen in der 5,8 km langen freifließenden Strecke verloren und 6 im 2,3 km langen Staubereich. Somit erreichten 105 Smolts den Bereich der Wasserkraftanlage.

##### **4.2.4.2 Smoltverluste im freifließenden Abschnitt im Vergleich zum Staubereich**

Im freifließenden Bereich ging ein Anteil von 2,6% (3 von 114) der Fische verloren, im Staubereich hingegen ein Anteil von 5,4% (6 von 111 Fischen). Dies war zwar in beiden Abschnitten deutlich weniger als in den Vorjahren, der Unterschied zwischen dem freifließenden Abschnitt und dem Staubereich blieb jedoch bestehen. So zeigt sich, bei Betrachtung der Verluste je km, dass im Staubereich 2,4%, im freifließenden Bereich 0,5% der Fische pro km verloren gehen. Demzufolge war der Verlust pro km im Staubereich etwa 5-mal höher als im freifließenden Bereich.

##### **4.2.4.3 Wanderwege an der Stau- und Wasserkraftanlage**

Von den 105 Smolts, die den Bereich von Wehr bzw. Wasserkraftanlage erreichten, folgten 63 (60%) dem Wanderweg 1 (Obergraben) zum Turbineneingang, 38 (36%) gelangten mit einem entsprechenden Anfang April registrierten Hochwasserpeak über die Wehrklappe ins Unterwasser (Wanderweg 7), 2 Smolts (2%) benutzten den Schlitzpass (Wanderweg 3), während weitere 2 (2%) nicht in den Obergraben einschwammen, sondern den Raugerinne-Beckenpass oder die Kanurutsche am linken Siegufer als Abwanderweg nutzten (Wanderweg 4 & 5) (Abb. 33). Für Fische, die diesen Wanderweg benutzen, konnte nicht zwischen den beiden unmittelbar nebeneinander liegenden Alternativen unterschieden werden. Von den 63 Smolts, die über die Oberflächenbypässe abwanderten, wurden 6 im biologischen Monitoring gefangen, bevor sie unterhalb der Wasserkraftanlage wieder in den Hauptstrom der Sieg entlassen wurden. Infolge des geringen Stababstandes des Rechens (10 mm) passierte erwartungsgemäß kein Smolt den Rechen und somit auch nicht die Turbinen. Fische, die im Fangmonitoring gefangen wurden, haben auf Grund des zusätzlichen Handlings eine potentiell geringere Chance die Passage der Wasserkraftanlage zu überstehen und weiter zu wandern und wurden daher von der weiteren Analyse ausgeschlossen.

##### **4.2.4.4 Drift toter Smolts**

Die längste Distanz, welche einer der toten Fische driftete, betrug 1,9 km flussabwärts der Wasserkraftanlage (folgend als „Driftlimit“ bezeichnet). Dies deutet darauf hin, dass ein Smolt, der bei der Passage der Wasserkraftanlage verendete, im Jahr 2016 bis zu 1,9 km hätte driften können, bevor Fisch und Sender stationär geworden wären. Wie schon im Vorjahr wird daher angenommen, dass wenn Fische im Fließabschnitt oberhalb des Driftlimits verbleiben, sie wahrscheinlich während der Passage der Wasserkraftanlage verendet sind. Wenn Fische dagegen unterhalb des Driftlimits verblieben, wurde ihr Verlust nicht der Wasserkraftanlage zugerechnet. 8 der 10 toten Smolts wurden nach dem Besatz von Prädatoren erbeutet. In den Kormorankolonien konnte jedoch kein Sender toter Smolts gefunden werden.

#### 4.2.4.5 Verluste an und unterhalb der Wasserkraftanlage

Von den 105 Smolts, die die Wasserkraftanlage passiert haben, wurden 6 von weiteren Analysen ausgeschlossen, da sie im biologischen Monitoring gefangen wurden. Von den verbleibenden, 99 Smolts gingen insgesamt 5 an oder unterhalb der Wasserkraftanlage (bis Standort 4) verloren, 3 davon direkt an der Wasserkraftanlage:

- Ein Smolt, der den Oberflächenbypass nutzte, ging unmittelbar bei oder nach der Passage des Bypasses verloren. Dieser Sender verblieb bis zum Ende der Studie im Unterwasser unmittelbar an der Anlage.
- Ein Smolt wurde von Räufern erbeutet unmittelbar nachdem er die Wasserkraftanlage über die Wehrklappe passiert hatte. Der Sender wurde danach flussauf transportiert und verblieb dann bis zum Ende der Untersuchung oberhalb des Raugerinne-Beckenpasses bzw. der Kanurutsche.
- Ein Smolt passierte einen Oberflächenbypass und wurde direkt im Anschluss von einem Vogel erbeutet, was an ungewöhnlich schnellen ( $50 \text{ km h}^{-1}$ ) flussaufwärts gerichteten Bewegungen festzumachen war. Der Sender dieses Smolts wurde außerdem später in einer Kormorankolonie wiedergefunden.

Die verbleibenden 2 Smolts, von denen einer die Wasserkraftanlage via die Oberflächenbypässe, der andere über das Wehr passierte, sind aus dem Abschnitt unterhalb der Wasserkraftanlage verschwunden, was auf eine Prädation durch Vögel hinweist. Dieser Verlust erfolgte innerhalb des Driftlimits toter Smolts (1,9 km). Für diese Fische kann nicht abschließend festgestellt werden, ob ihr Verlust unmittelbar mit der Kraftwerkspassage in Verbindung gebracht werden kann. Die Fische könnten von Prädatoren gefressen worden sein, 1) weil sie bei der Kraftwerkspassage starben, 2) weil sie bei der Kraftwerkspassage verletzt wurden oder 3) weil sie, obwohl sie die Kraftwerkspassage unbeschadet überstanden haben, trotzdem erbeutet wurden.

Obwohl das genaue Schicksal der erbeuteten Smolts jedoch nicht im Detail geklärt werden kann, ist es dennoch möglich zweifelsfrei die Verluste von Smolts zu ermitteln, die aufgrund des Vorhandenseins einer Wasserkraftanlage auftreten. Dazu unterliegt der an der Wasserkraftanlage und im Abschnitt darunter auftretende Verlust der Kontrolle durch die in der freifließenden Referenzstrecke ermittelten Werte, die Prädation in diesem Abschnitt beinhalten.

Insgesamt sind also 3 Smolts im direkten Bereich der Wasserkraftanlage verloren gegangen und 2 im Abschnitt unterhalb. Dies entspricht einem Verlust von 3,0% an der Wasserkraftanlage und 2,1% im Abschnitt darunter. Das Schicksal der Smolts basierend auf deren jeweiligen Abwanderweg wird in Tab. 8 dargestellt. Die Überlebenswahrscheinlichkeit für Smolts, die über das Wehr abwanderten und solchen, die in den Obergraben einschwammen und an der Wasserkraftanlage abstiegen, unterschied sich nicht signifikant voneinander (Überlebende: 38 von 40 Smolts, die über das Wehr wanderten, und 56 von 59 Smolts, die an der Wasserkraftanlage abstiegen, Fisher's exact test,  $P = 1$ ).

Tabelle 9: Anzahl und prozentualer Anteil von Smolts aus dem Jahr 2016 für die einzelnen Abwanderwege dargestellt.

	<b>Oberflächen- bypässe</b> (Weg 1)	<b>Schlitzpass</b> (Weg 3)	<b>Kanu-rutsche/ Beckenpass</b> (Weg 4)	<b>Wehrklappe</b> (Weg 7)	<b>Gesamt</b>
<b>Lebend</b>	54 (95%)	2 (100%)	2 (100%)	36 (95%)	<b>94 (95%)</b>
<b>Verlust</b>	3 (5%)	0 (0%)	0 (0%)	2 (5%)	<b>5 (5%)</b>
<b>Summe</b>	<b>57</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>38</b>	<b>99</b>

#### 4.2.4.6 Wasserkraftbedingter Verlust von Smolts

Wie auch schon für die Jahre zuvor, wurde durch den Vergleich der Verluste abwandernder Smolts im freifließenden Bereich mit den Verlusten im Staubereich und im Bereich der Wasserkraftanlage, die Verluste von Smolts, die auf Grund des Vorhandenseins einer Wasserkraftanlage auftreten, berechnet. Dies beruht auf der Annahme, dass die Verluste pro Flusskilometer im freifließenden Bereich repräsentativ für den nun anthropogen veränderten Bereich des Staus und der Wasserkraftanlage vor seiner Verbauung ist (siehe auch oben).

Basierend auf den oben aufgeführten Ergebnissen gab es 2016 einen zusätzlichen Verlust von 4,4 % im Staubereich verglichen mit einer freifließenden Referenzstrecke der gleichen Länge (vergleiche Tab. 9). Der zusätzliche Mindestverlust auf Grund des Vorhandenseins der Wasserkraftanlage betrug 2,9%. Zusammengefasst ergibt sich aus Staubereich, Wasserkraftanlage und der Strecke unterhalb der Wasserkraftanlage ein zusätzlicher Verlust von mindestens 7,2%.

#### 4.2.4.7 Migrationsgeschwindigkeiten

Im Durchschnitt brauchten die Smolts ca. 79 Stunden (min. 4 h, max. 466 h, Standardabweichung 100) um die gesamte untersuchte Strecke zwischen Besatzstelle und Antennenstation 4 zu überwinden. Im Mittel brauchten die Fische ca. 7 Stunden (min. 0,7 h, max. 141 h, Standardabweichung 18) für die freifließende Strecke, ca. 4 Stunden für den Staubereich (min. 0,5 h, max. 67 h, Standardabweichung 9), ca. 6 Stunden (min. 0,05 h, max. 137 h, Standardabweichung 18) für die Wasserkraftanlage und ca. 14 Stunden (min. 1 h, max. 142 h, Standardabweichung 30) um die Strecke zwischen Wasserkraftanlage und Station 4 zu durchschwimmen. Für folgende Auswertungen der Wandergeschwindigkeit wurden nur Smolts genutzt, die an allen Stationen registriert wurden und erfolgreich die Wasserkraftanlage passierten (n = 93).

Es gab keinen signifikanten Unterschied in der Wandergeschwindigkeit zwischen dem freifließenden Abschnitt (Median: 4,2 km h<sup>-1</sup>) und dem Abschnitt unterhalb der Wasserkraftanlage (Median: 4,5 km h<sup>-1</sup>) (P = 1, paarweiser Wilcoxon test mit Bonferronikorrektur). Die Geschwindigkeit im Staubereich (Median: 2,5 km h<sup>-1</sup>) und an der Wasserkraftanlage (Median: 0,4 km h<sup>-1</sup>) war jedoch signifikant niedriger als in den freifließenden Abschnitten ober- und unterhalb der Wasserkraftanlage (alle P < 0.01, paarweiser Wilcoxon test mit Bonferronikorrektur). Smolts wanderten signifikant langsamer

durch die Wasserkraftanlage als in allen anderen untersuchten Gewässerabschnitten (alle  $P < 0.01$ , paarweiser Wilcoxon test mit Bonferronikorrektur, Abb. 38). An der Wasserkraftanlage waren Smolts die via den Turbinengraben (also über die Oberflächenbypässe oder den Schlitzpass) abwanderten langsamer (Median  $0,1 \text{ km h}^{-1}$ ,  $n = 56$ ) als Smolts, die über das Wehr, den Raugerinne-Beckenpass oder die Kanurutsche abstiegen (Median  $1,6 \text{ km h}^{-1}$ ,  $n = 38$ , Mann-Whitney U Test:  $P < 0,001$ )

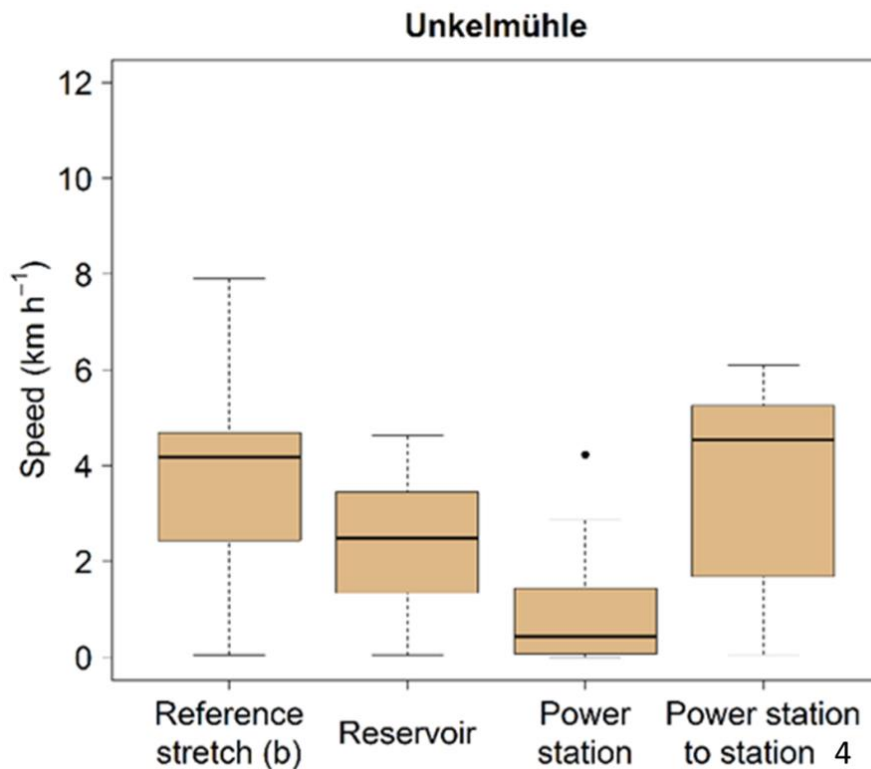


Abbildung 38: Migrationsgeschwindigkeiten radiotelemetrisch markierter Smolts im Jahr 2016 im freifließenden Abschnitt, im Staubereich, an der Wasserkraftanlage und im Abschnitt unterhalb umgerechnet auf Kilometer pro Stunde. Farbiger Bereich = oberes bis unteres Quartil, schwarze Linie = Median, Whiskers = 95% Perzentil, Punkte = Ausreißer.

#### 4.2.5 Verluste 2014-2016 im Vergleich

Da im Jahr 2014 keine Empfängereinheiten unterhalb der Unkelmühle aufgebaut waren, sind die für dieses Jahr angegebenen Werte nicht vollständig und stellen minimal aufgetretene Verluste dar (siehe hierzu auch Diskussion). Das Jahr 2014 ist daher auch nicht direkt vergleichbar mit dem Jahr 2015 und 2016. Die Verluste im Jahr 2016 sind in allen Abschnitten im Vergleich zum Jahr 2015 wesentlich geringer, was höchstwahrscheinlich mit höherem Abfluss während der Untersuchungsperiode zusammenhängt (Tab. 9). Ein erhöhter Abfluss, wie er beispielsweise während eines Hochwasserereignisses auftritt, führt zu einer stärkeren Strömung im Gewässer, was sich wiederum positiv auf die Wandergeschwindigkeit der Smolts auswirken könnte. Außerdem ist bei Hochwasserereignissen mit einer erhöhten Trübung zu rechnen. Beides, schneller wandernde Smolts und trüberes Wasser, vermindern potentielle Kontaktzeiten zu Räubern, was dann zu niedrigeren Verlusten führen kann.

Tabelle 10: Übersicht über die Ergebnisse zu den Verlusten von besetzten Smolts in den drei Studienjahren. WKA = Wasserkraftanlage.

Jahr	Verlust auf der freifließenden Strecke (pro km)	Zusätzlicher Verlust im Staubereich	Zusätzlicher Verlust basierend auf den Aufzeichnungen von Empfängern direkt an der WKA <sup>1</sup>	Zusätzlicher Verlust auf Grund des Betriebens der WKA (Verluste unmittelbar an der WKA und im Gewässerabschnitt unterhalb der WKA)	Gesamt zusätzlicher Verlust auf Grund des Staus und Betriebens der WKA
2014	1,5%	7,2%	9,9%	Nicht bekannt <sup>1</sup>	16,0% <sup>2</sup>
2015	1,6%	17,1%	3,6%	12,8%	25,1%
2016	0,5%	4,4%	2,9%	2,9%	7,2%

<sup>1</sup> Unterhalb der Wasserkraftanlage fand kein Monitoring statt, weswegen die Werte für 2014 nicht vollständig sind und die auftretenden Verluste unterschätzt werden.

<sup>2</sup> Das heißt, Fische, die beispielsweise an der Wasserkraftanlage sterben und dann flussab treiben oder an der Wasserkraftanlage verletzt werden, aber erst später sterben, sind in 2014 nicht in die Berechnung eingeschlossen

#### 4.2.6 Migrationsgeschwindigkeit 2014-2016 im Vergleich

Die Daten des Standortes Unkelmühle an der Sieg verdeutlichen, dass die Wandergeschwindigkeit von Jahr zu Jahr teils stark variieren kann (Tab. 10). Weiterhin zeigte sich, dass die Fische im Jahr 2016 deutlich schneller durch den Studienabschnitt geschwommen sind als in 2014 und 2015, was insbesondere im freifließenden Abschnitt und bei der Passage der Wasserkraftanlage deutlich wurde. Es liegt nahe, dass das im Jahr 2016 auftretende Hochwasserereignis und die im Wanderzeitraum insgesamt höheren Abflussbedingungen mit der schnelleren Abwanderung der Smolts in diesen Abschnitten zusammenhängen. In allen Studienjahren wurde die Wanderung der Fische an der Wasserkraftanlage Unkelmühle stark verzögert, während sich die Geschwindigkeit in den beiden freifließenden Strecken ober- und unterhalb der Wasserkraftanlage nicht signifikant voneinander unterschied. Im Jahr 2016 lag der maximal gemessene Abfluss im Studienzeitraum weit über dem der beiden Vorjahre (2014: <10 m<sup>3</sup>, 2015: 15-20 m<sup>3</sup>, 2016: 60-70 m<sup>3</sup>). In diesem Jahr waren die Fische in allen Flussabschnitten schneller als in den Jahren 2014 und 2015. Allerdings zeigte sich nur 2016 ein signifikanter Abfall der Wandergeschwindigkeit der Fische beim Durchqueren des Staubereiches im Vergleich zur freifließenden Referenzstrecke. Obwohl Smolts also im Vergleich zu den beiden Vorjahren schneller waren, ist die Wanderung im Staubereich anders als 2014 und 2015 im Verhältnis zur freifließenden Referenzstrecke verzögert worden.

Tabelle 11: Median der Wandergeschwindigkeit (km/h) der Smolts an den drei Standorten (Sieg, Kinzig und Diemel). Grau hinterlegte Werte = signifikant verschieden zur freifließenden Referenzstrecke (P<0,05; Sieg und Kinzig: Wilcoxon-Test, Diemel: Friedman-Test).

Fluss	WKA	Jahr	Freifließende Referenzstrecke	Stau	WKA	Strecke unterhalb WKA
Sieg	Unkelmühle	2014	0,31	0,73	0,03	xxxx
Sieg	Unkelmühle	2015	0,63	1,27	0,05	0,60
Sieg	Unkelmühle	2016	4,20	2,50	0,40	4,50

#### 4.2.7 Diskussion

Die Abwanderung der Smolts ist eine kritische Phase im Lebenszyklus des Atlantischen Lachses, in der Verluste nicht nur auf Grund natürlicher Begebenheiten auftreten können, sondern auch bedingt durch anthropogene Einflüsse, wie z.B. Rückstau und Erzeugung von Wasserkraft (Thorstad et al. 2012). In dieser Studie wurde der erhöhte Verlust von Smolts infolge von Wasserkrafterzeugung berechnet, indem man Verluste in einem freifließenden Flussbereich mit dem im Bereich des Staus sowie der Wasserkraftanlage und einem 7,5 km langen Abschnitt unterhalb verglich. Der Verlust von Fischen war im Staubereich sowie dem Bereich der Wasserkraftanlage höher als im freifließenden Bereich.

##### 4.2.7.1 Verluste im Staubereich

Da der Staubereich in diesem Falle nur der Wasserkrafterzeugung dient, können hier die Verluste von Staubereich, direktem Bereich der Wasserkraftanlage und den Verlusten in der Strecke unterhalb aufsummiert werden, so dass sich ein Gesamtverlust ergibt. Im Falle eines Staubereiches, der auch für Schifffahrt, Hochwasserschutz oder Trinkwassergewinnung genutzt wird, kann der vermehrte Verlust von Fischen im Staubereich nicht ausschließlich der Wasserkraftnutzung zugerechnet werden. Dies gilt natürlich auch für Staustrecken ohne Wasserkraftnutzung.

Im Staubereich gibt es keine technischen Bauwerke, welche Schädigungen oder Tod der Fische bedingen könnten. Jedoch ist von anderen Studien bereits hinreichend belegt, dass Staubereiche und strömungsberuhigtes Wasser einen für Raubfische günstigen Lebensraum schaffen können, der ansonsten auf natürliche Weise in schnell fließenden Gewässerabschnitten nicht oder nicht in vergleichbarem Ausmaß vorkäme (Jepsen et al. 2000; Serrano et al. 2009). In solchen, durch die Aufstauung des Querbauwerks bedingt langsam fließenden Bereichen, kann die flussabwärts gerichtete Wanderung zudem verlangsamt werden, was Prädation durch Fische und Vögel weiter verstärken kann. Neben dem für Prädatoren günstigeren Lebensraum führt auch der Besatz von Raubfischen in Staubereiche, wie er auch in der Sieg getätigt wird, zu einer insgesamt höheren Räuberichte. Jepsen et al. (1998) und Aarestrup et al. (1999) stellten beide 90% Verluste bei abwandernden Smolts in einem Staubereich des dänischen Flusses Gudena (Staulänge 8,5 km) fest, größtenteils bedingt durch Prädation von Hechten (*Esox lucius*, 56% Verluste) und fischfressenden Wasservögeln (31% Verluste) wie dem Rothalstaucher (*Podiceps griseigena*) und dem Graureiher (*Ardea cinerea*). Es kann auf der Grundlage der zitierten Studien davon ausgegangen werden, dass der zusätzliche Verlust im Staubereich im Vergleich zu dem des freifließenden Bereichs, im Wesentlichen auf vermehrte Prädation auf Grund einer höheren Räuberichte oder höheren Räubererfolges zurückgeht. In der aktuellen Studie verschwanden im Jahr 2015, in dem ein Monitoring auch unterhalb der Anlage durchgeführt wurde, 10 von 30 (33%) der gestorbenen Fische im Staubereich aus dem Fluss, das heißt die Sender konnten nicht länger im Untersuchungsgebiet detektiert werden. Hingegen waren es 16 von 26 (64%) der Smolts, die im Bereich der Wasserkraftanlage und der Strecke unterhalb aus dem Fluss verschwanden. Dies gilt auch für das Jahr 2016, in dem 2 von 6 (33%) der verloren gegangenen Fische im Staubereich aus dem Fluss verschwanden, während es im Bereich der Wasserkraftanlage und der Strecke unterhalb 4 von 5 (80%) der Smolts waren. Sender, die aus dem Fluss verschwinden, also nicht mehr im Untersuchungsgebiet detektiert werden können, weisen auf eine Prädation durch Vögel hin, da diese nach dem Fraß des Fisches mit dem Sender lange Strecken zurücklegen. Verbleibt der Sender allerdings im Fluss und die Bewegungsmuster zeigen ein für Smolts nicht typisches Verhalten (z.B.



flussaufwärts schwimmen), kann von einem Fraß durch einen Raubfisch ausgegangen werden. Dass in beiden Jahren ein höherer Anteil von Fischen im Bereich der Wasserkraftanlage und darunter aus dem Fluss entfernt wurde, während die Sender von im Staubereich gestorbenen Fischen häufiger im Gewässer verblieben, weist darauf hin, dass die Prädation durch Fische im Staubereich ausgeprägter war als im Bereich der Wasserkraftanlage und der Strecke unterhalb. Dort wurden Fische vermehrt durch piscivore Vögel erbeutet.

#### **4.2.7.2 Wandergeschwindigkeit im Staubereich**

Die Migrationsgeschwindigkeit der Smolts unterschied sich im Jahr 2014 und 2015 nicht zwischen dem freifließenden und dem Staubereich. Im Jahr 2016 jedoch waren die Smolts beim Durchschwimmen des Staubereiches signifikant langsamer als auf der freifließenden Strecke. In allen Jahren gab eine hohe individuelle Variation in der Migrationsgeschwindigkeit, was die Ergebnisse anderer Studien dieser Art widerspiegelt (Thorstad et al. 2012). Insgesamt sind die Fische im Jahr 2016 deutlich schneller durch den Studienabschnitt geschwommen als in 2014 und 2015, was insbesondere in den freifließenden Abschnitten ober- und unterhalb der Wasserkraftanlage und bei der Passage der Wasserkraftanlage deutlich wurde. Es liegt nahe, dass das im Jahr 2016 auftretende Hochwasserereignis und die im Wanderzeitraum insgesamt höheren Abflussbedingungen mit der schnelleren Abwanderung der Smolts in diesen Abschnitten zusammenhängen. Im Jahr 2016 lag der maximal gemessene Abfluss im Studienzeitraum weit über dem der beiden Vorjahre (2014:  $<10 \text{ m}^3$ , 2015:  $15\text{-}20 \text{ m}^3$ , 2016:  $60\text{-}70 \text{ m}^3$ ). In diesem Jahr waren die Fische in allen Flussabschnitten schneller als in den Jahren 2014 und 2015. Allerdings zeigte sich nur 2016 ein deutlicher Unterschied der Wandergeschwindigkeit der Fische beim Durchqueren des Staubereiches im Vergleich zu den freifließenden Strecken. Obwohl sie also im Vergleich zu den beiden Vorjahren schneller waren, ist die Wanderung also im Staubereich anders als 2014 und 2015 im Verhältnis zur freifließenden Strecke verzögert worden. Dies weist darauf hin, dass ein erhöhter Abfluss den Fischen in einem freifließenden Abschnitt helfen kann, schneller voran zu kommen, da sich die erhöhten Abflussbedingungen hier in stärkerer Strömung widerspiegeln, die die Fische zusätzlich zur eigenen Schwimmleistung flussab transportiert. Im erheblich größeren Wasserkörper des Staubereichs jedoch, in dem unter normalen Abflussbedingungen fast keine Strömung auftritt, ist der Anstieg der Strömung bei einem Hochwasserereignis vermutlich wesentlich weniger ausgeprägt als in den freifließenden Bereichen des Flusses. Die Fische profitieren hier also nicht in gleicher Weise von den höheren Abflussbedingungen, bei denen sie zusätzlich zur eigenen Schwimmleistung auch noch mit der Strömung verdriftet werden. Stattdessen müssen sie den Staubereich überwiegend aus eigenem Antrieb durchqueren, was relativ zum freifließenden Abschnitt zu einer Verzögerung der Wanderung führt.

#### **4.2.7.3 Zusätzlicher Verlust im Staubereich aufgrund des Vorhandenseins einer Wasserkraftanlage**

Der zusätzliche Verlust im Staubereich unterschied sich deutlich zwischen den einzelnen Studienjahren. Während die Mortalität im Jahr 2015 erheblich größer als in den anderen beiden Studienjahren war (2014: 7,2%, 2015: 17% , 2016: 4,4%), wurden im Jahr 2016 die niedrigsten Verluste festgestellt. Das zeigt, dass die Mortalität im Staubereich jährlich variieren kann. Die Länge besetzter Smolts scheint nicht der Grund für die unterschiedlichen Verluste im Staubereich zu sein.

Smolts aller Jahre unterschieden sich nur wenig in der Größe und die markierten Smolts aus dem Jahr 2015 waren im Durchschnitt nur 8 mm kleiner als 2014 und 1 mm größer als 2016. Zudem deuten die Ergebnisse in keinem der Jahre auf einen größenabhängigen Verlust im Staubereich hin. Die Abflussbedingungen im Jahr 2016 überstiegen die der Vorjahre deutlich, was höchstwahrscheinlich dazu geführt hat, dass Fische mit einer erhöhten Strömung schneller abwandern konnten. Weiterhin ist mit einer stärkeren Trübung des Wassers zu rechnen. Beides, schneller wandernde Smolts und trübes Wasser, vermindern potentielle Kontaktzeiten zu Räubern, was dann zu niedrigeren Verlusten führen könnte. Allerdings durchwanderten die Smolts den Staubereich im Jahr 2015, in dem die höchsten Verluste auf dieser Strecke auftraten, wesentlich schneller als im Jahr 2014. Die Aufenthaltsdauer im Staubereich, kann also nicht immer den von Jahr zu Jahr variierenden Verlust von Smolts erklären. Es ist weiterhin auch denkbar, dass die Prädatorengemeinschaft im Staubereich während der Smoltabwanderung zwischen den Jahren variiert und so z.B. Unterschiede in Anzahl, Größe und Artzusammensetzung der Prädatoren die Proportion der verloren gegangenen Smolts beeinflusst. Jepsen et al. (2000) fanden zudem, dass für das Überleben von Smolts die zeitliche Überschneidung von Abwanderung und Laichzeit der Räuber ein wichtiger Faktor sein kann, der auch jährlichen Variationen unterliegt.

#### **4.2.7.4 Verluste an der Wasserkraftanlage und zusätzlicher Verlust aufgrund des Vorhandenseins einer Wasserkraftanlage**

Der zusätzliche Verlust von Smolts für den Bereich der Wasserkraftanlage und den 7,5 km bis zur Antennenstation 4 betrug im Jahr 2015 mindestens 12,8% im Vergleich zu der freifließenden Strecke. Wenn Verluste im Staubereich noch hinzugerechnet werden, ergibt sich ein Gesamtverlust von mindesten 25,1%. An Wasserkraftanlagen kann der Verlust von Smolts und anderen Fischen, neben einer erhöhten Prädation, auch durch Verletzungen von Turbinen, oder anderen technischen Bestandteilen der Wasserkraftanlage, sowie während der Passage von Bypässen oder Wehren hervorgerufen werden (Ruggles 1980; Doherty und McCarthy 1997; Hvidsten und Johnsen 1997; Larinier und Travade 2002). In der aktuellen Studie gab es keine von den Turbinen hervorgerufenen Verluste, da kein Smolt die Turbinen passierte, was offensichtlich auf die Barrierewirkung des 10 mm Rechens und damit dem Fischschutzkonzept der Pilotanlage zurückzuführen ist. Der Verlust der Smolts im Bereich der Wasserkraftanlage ist möglicherweise auf Verletzungen zurückzuführen, die entstanden, als die Fische sich vor dem Rechen aufhielten bzw. die Bypässe durchschwammen oder die durch den Kontakt mit anderen Anlagenteilen, die Fische vor der Turbinenpassage bewahren sollen, oder durch Kontakt mit gleichzeitig abgeführtem Geschwemmsel hervorgerufen wurden. Außerdem ist eine erhöhte Prädation, gerade verletzter Fische, in diesem Bereich der Wasserkraftanlage bzw. im Unterwasser nicht auszuschließen.

2014 schien es wahrscheinlich, dass einige an der Wasserkraftanlage auftretenden Verluste durch eine zu beobachtende Geschwemmselansammlung durch die Kreuzung der Fischaufstiegsanlage (siehe Kapitel betriebliches Monitoring) unmittelbar hinter dem Übergang der Geschwemmselrinne in die Sieg bedingt waren. Es bestand die Möglichkeit, dass via die Oberflächenbypässe abwandernde Smolts auf das Geschwemmsel prallten und dort verendeten. 2015 wurde hier eine Kamera installiert, um mögliche Geschwemmselansammlungen zu überwachen. Allerdings konnte im Gegensatz zu 2014 keine solche Ansammlung festgestellt werden und dementsprechend wurden auch in diesem Bereich keine Verluste von Smolts registriert (Abb. 39). Diese Ergebnisse belegen, dass es wichtig ist, Abwanderwege so zu planen und anzulegen und in einem Zustand zu halten, der

das Risiko zusätzlicher Verletzungen und Mortalität ausschließt. In jedem Falle ist während der Abwanderphase eine regelmäßige Überwachung und Unterhaltung der Abwanderwege an der Wasserkraftanlage erforderlich, um zusätzliche Verluste für die empfindlichen Smolts zu vermeiden.



Abbildung 39: Bereich unmittelbar hinter dem Übergang der Geschwemmselrinne in die Sieg in dem sich 2014 (links) Geschwemmsel ansammelte und so wahrscheinlich Verluste verursachte. 2015 (rechts) trat dieses Problem nicht in vergleichbarem Umfang auf. Im linken Bild ist der Wasserstrom zwischenzeitlich unterbrochen gewesen.

Die Verluste im Jahr 2016 lagen in allen untersuchten Flussabschnitten unter denen von 2015 und, so ein Vergleich möglich ist, auch 2014. Während die Frühjahre 2014 und 2015 von niedrigen Wasserständen geprägt waren, gab es im Untersuchungszeitraum 2016 insgesamt höhere Abflüsse und ein Hochwasser mit Abflussspitzen von über  $70 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . Höhere Abflüsse führen zu mehr Trübung des Wassers, was dazu geführt haben könnte, dass Prädatoren weniger gute Jagdbedingungen vorfanden, und abwandernde Smolts daher weniger gefährdet waren.

Die Verluste, die 2014 an der Wasserkraftanlage festgestellt wurden, müssen als ein Minimum angesehen werden, da die Fische unterhalb der Wasserkraftanlage während ihrer Abwanderung nicht weiter verfolgt werden konnten und eventuell auftretende Folgeschäden bedingt z.B. durch die Passage der Bypässe oder erhöhten Prädationsdruck durch Fressfeinde, nicht erfasst wurden (sogenannte „verzögerte Mortalität“). Im Gegensatz dazu wurde 2015 und 2016 ein entsprechendes Monitoring unterhalb der Wasserkraftanlage durchgeführt, so dass die Angaben hinsichtlich der Verluste als umfassender und daher realistischer zu betrachten sind.

Dennoch müssen die Verlustwerte aus 2015 und 2016 ebenfalls als Mindestwerte angesehen werden, da es möglich ist, dass bei der Kraftwerkspassage verletzte Fische die unterhalb gelegene Strecke bis Antennenstation 4 durchwanderten, aber auf Grund von verzögerter Mortalität erst später verendeten. Ein weiterer Grund für eine mögliche Unterschätzung der Mortalität ist, dass der Verlust in durch die Wasserkraftanlage beeinflussten Strecken mit dem Verlust in einem freifließenden Abschnitt verglichen wird, unter der Annahme, dass der im freifließenden Abschnitt

festgestellte Verlust repräsentativ für die anderen Strecken ist. Jedoch ist es möglich, dass erst die „schwachen“ Individuen im freifließenden Abschnitt gefressen wurden und die stärkeren Individuen weiter abwanderten. In dem Fall wäre der Verlust, der als Referenz dient, höher als der, der in den unteren Strecken tatsächlich vorkäme, was zu einer Unterschätzung der Verluste in den anthropogen überformten Strecken führen könnte. Detaillierte Analysen aus dem Jahr 2016, die im Rahmen der Untersuchung des Wehres in Buisdorf und des Vergleichs mit Ergebnissen des Standortes Unkelmühle aus demselben Jahr, gemacht wurden (Økland et al. 2017b), zeigten jedoch, dass es in der Sieg nicht zu solchen selektiven Prozessen kommt.

### **4.3 Ergänzende Untersuchungen in den Frühjahren 2014 bis 2016**

#### **4.3.1 Fangmonitoring 2014-2016**

In den Jahren 2014 bis 2016 wurde ein ergänzendes Monitoringprogramm zu den Telemetriestudien an den eigens dafür vorgesehenen Monitoringeinrichtungen der Wasserkraftanlage Unkelmühle durch die Firma Limnoplan durchgeführt. Alle Fische, die die Oberflächenbypässe passieren, können, anstatt über die Geschwemmselrinne in die Sieg zu gelangen, in ein Sammelbecken geleitet werden. Dort ist es möglich, die Fische zu fangen und ein biologisches Monitoring anzuschließen, das zum Beispiel die Aufzeichnung von Art und Größe, aber auch das Erfassen von Verletzungen beinhaltet. Aufgrund des großen personellen Aufwandes für dieses Fangmonitoring konnte keine kontinuierliche, vollständige Erfassung aller über die Bypässe abwandernder Fische im Untersuchungszeitraum erfolgen. Dies war auch im Hinblick auf die möglichst ungestörte Abwanderung der mit Sender markierten Smolts nicht wünschenswert. Die nachfolgenden Fangzahlen geben daher nur einen Ausschnitt der tatsächlichen Abwanderung von Fischen an den Oberflächenbypässen an der Pilotanlage wieder.

Im Frühjahr 2014 wurden von Mitte März bis Mitte Mai 2014 in regelmäßigen Abständen 8-stündige Monitoringzyklen durchgeführt, bei denen alle 2h das Monitoringbecken geleert wurde, um die darin enthaltenen Fische zu erfassen. Zusätzlich wurden an zwei Tagen 24h-Zyklen durchgeführt. Insgesamt wurden 4.404 Individuen von 25 verschiedenen Fisch- und Rundmaularten (Neunaugen) erfasst, wobei der Lachs die im entsprechenden Zeitraum am häufigsten erfasste Art war (66,4% der erfassten Individuen), gefolgt von den Cyprinidenarten Nase und Barbe. Neben Lachsen wurden mit Meerforellen-Smolts, Meerneunaugen und vereinzelt Flussneunaugen weitere Wanderfischarten mit charakteristischen Abwanderungsstadien erfasst. Die Abwanderung von Lachs-Smolts erfolgte überwiegend in der Dunkelphase mit einem deutlichen Schwerpunkt in der ersten Nachthälfte. Des Weiteren konnte bei den Lachs-Smolts ein teils starker parasitärer Befall mit Egel festgestellt werden, der wahrscheinlich ursächlich für die dokumentierten Fälle von Verpilzung der Smolts ist. Weitere Ergebnisse und Details zu dem durchgeführten Monitoring sind dem Bericht „Kontrolle der Monitoringeinrichtungen an der Pilotanlage Unkelmühle (Sieg)-Lachs-Smoltabwanderung im Frühjahr 2014“ der Firma Limnoplan zu entnehmen (Staas et al. 2014a).

Im Jahr 2015 fand das Monitoring zwischen dem 23. März und dem 13. Mai statt. Dabei wurden in regelmäßigen Abständen 8-stündige Monitoringzyklen durchgeführt, bei denen alle 2h das Monitoringbecken geleert wurde, um die darin enthaltenen Fische zu erfassen. Zusätzlich wurden an vier Tagen 24h-Zyklen durchgeführt und an zwei Tagen 4h-Zyklen. Wegen eines Hochwassers und dem daraus folgenden Stillstand des Kraftwerks wurde das Monitoring vom 27.03. bis zum 06.04.

unterbrochen. Ab dem 07.04. wurde das Monitoring in einem Zeitraum (Summe) von 152 Stunden durchgeführt, was einen Zeitanteil von 17 % für die Monitoringphasen am gesamten Zeitraum ausmacht (Gesamtdauer 37 Tage). Dies bedeutet, dass nur ein Teil der im Frühjahr an der Anlage abwandernden Fische im Monitoring erfasst werden konnte.

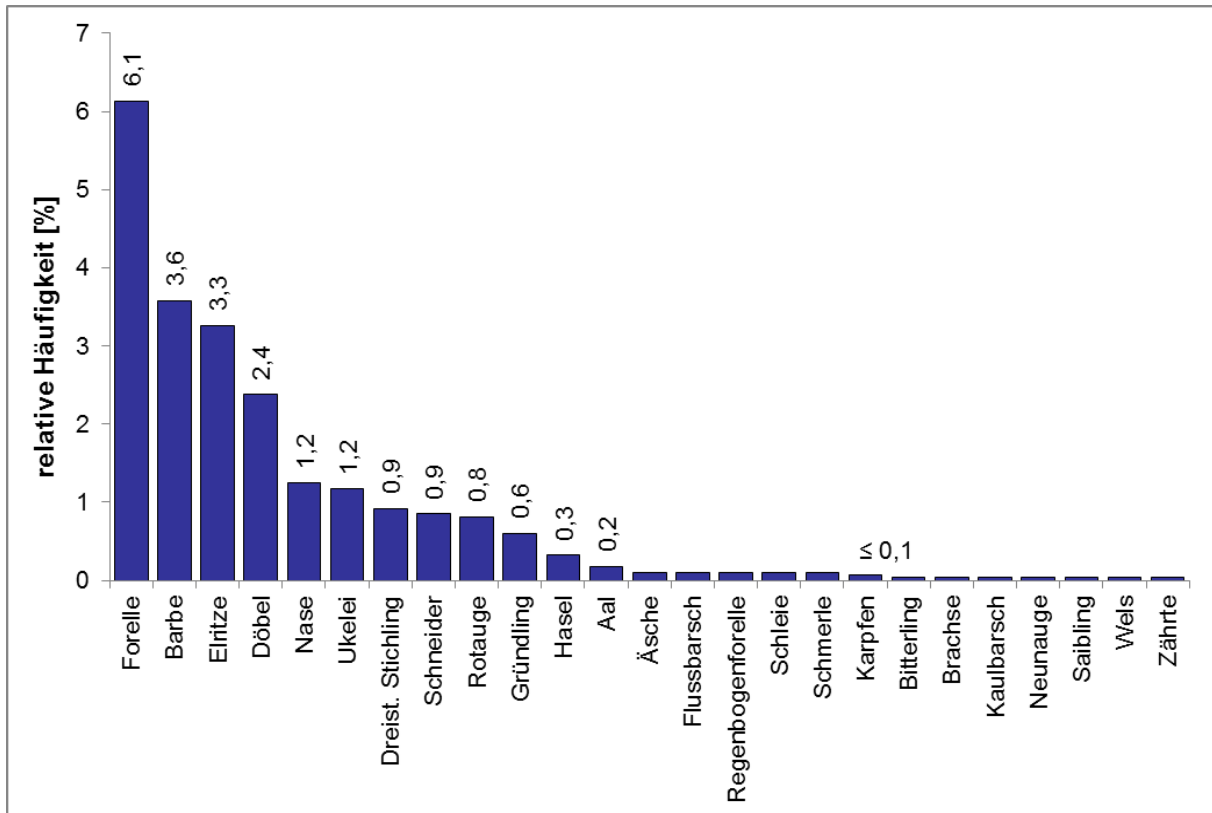


Abbildung 40: Relative Häufigkeit der „anderen“ Fischarten im Fangmonitoring (Frühjahr 2015)

Insgesamt wurden 2.819 Individuen von 26 verschiedenen Fisch- und Rundmaularten (Neunaugen) erfasst, wobei der Lachs die im entsprechenden Zeitraum am häufigsten dokumentierte Art war (77,7% der erfassten Individuen), gefolgt von Forelle, Barbe und Elritze. Daneben wurde noch weitere Arten, wie Nase, Ukelei, Stichling, Schneider, Rotaugen und Gründling, mit mehr als 10 Individuen nachgewiesen (Abb. 40). Neben Lachsen wurden Meerforellen-Smolts als zweithäufigste Art und damit eine weitere Wanderfischart mit charakteristischen Abwanderungsstadien erfasst. Dagegen wurden im Frühjahr 2015 an den Oberflächenbypässen nur 5 abwandernde Aale registriert. Wie in 2014 erfolgte die Abwanderung von Lachs-Smolts überwiegend in der Dunkelphase. Die meisten nachgewiesenen Fische (mehr als 85 % der Fänge) wiesen eine Körperlänge von weniger als 20 cm auf (Abb. 41) Größere Exemplare mit mehr als 50 cm Körperlänge bildeten die Ausnahme.

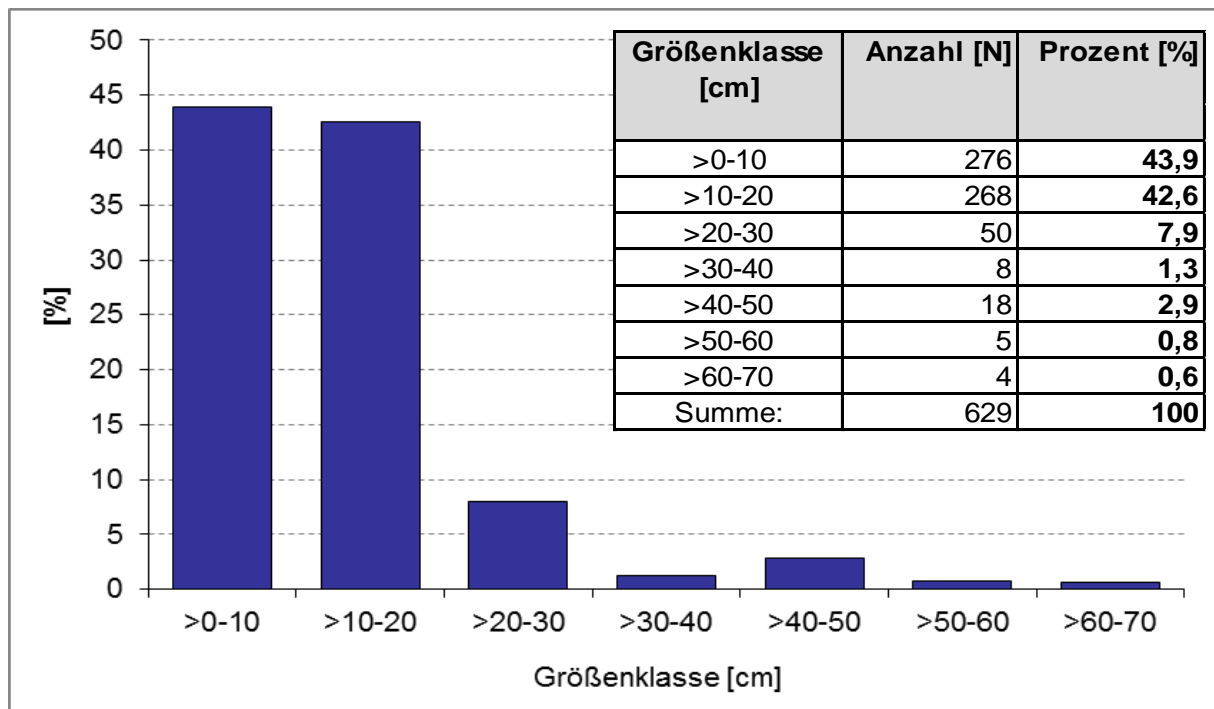


Abbildung 41: Größenverteilung der „anderen“ Fischarten im Fangmonitoring (Frühjahr 2015)

Weitere Ergebnisse und Details zu dem durchgeführten Monitoring sind dem Bericht „Kontrolle der Monitoringeinrichtungen an der Pilotanlage Unkelmühle (Sieg)-Lachs-Smoltabwanderung im Frühjahr 2015“ der Firma Limnoplan zu entnehmen (Staas et al. 2015a).

Im Jahr 2016 wurden von 15. März bis 20. Mai regelmäßig 8-stündige Monitoringzyklen durchgeführt wie auch schon in den Jahren zuvor. Zusätzlich wurden je nach Bedarf 4h-, 6h- und 24h-Zyklen realisiert. So konnte die Fangzahl der Smolts den Begebenheiten der (Telemetrie-) Studie angepasst werden. Insgesamt wurden 1.870 Individuen von 19 verschiedenen Fisch- und Rundmaularten (Neunaugen) erfasst. Lachs-Smolts waren, wie in den vorigen Jahren auch, die mit Abstand häufigste im Monitoring erfasste Fischart. Sie stellten 77,4% der erfassten Individuen. Neben Lachsen wurde eine weitere Wanderfischart mit charakteristischem Abwanderungsstadium erfasst, Meerforellen-Smolts, die im Zuge der Erfassung der Bachforellen registriert wurden. Diese Gruppe mit 9,3% ist die zweithäufigste Art. Die Cypriniden-Arten Barbe und Rotaugen waren mit Anteilen von 2,4% und 2,3% die dritt- und vierthäufigsten Arten. Es wurden insgesamt 6 für das Monitoring besenderte Smolts wiedergefangen. Weitere Ergebnisse und Details zu dem durchgeführten Monitoring sind dem Bericht „Kontrolle der Monitoringeinrichtungen an der Pilotanlage Unkelmühle (Sieg) - Lachs-Smoltabwanderung im Frühjahr 2016“ der Firma Limnoplan zu entnehmen (Staas et al. 2016).

In der Zeit von 2014 bis 2016 wurden insgesamt 6.561 Lachssmolts nachgewiesen. Bei einem Gesamtfang von 9.093 Fischen entspricht das einem Anteil von 72,2 %. Die zweithäufigste Art war die Nase mit knapp 7 % gefolgt von einer weiteren Wanderfischart, der (Meer-) Forelle mit knapp 6 %. Danach folgt die Barbe mit 4 %. Diese 4 Arten erreichen somit fast 90 % Anteil am Gesamtfang der Frühjahrsabwanderung. Insgesamt wurden an der Pilotanlage 32 verschiedene Fisch- und Neunaugenarten registriert. Bemerkenswert ist dabei besonders der Nachweis von Querdern des

Meerneunauges. Neben den Abwanderungsstadien der diadromen Arten wurden ganz überwiegend Klein- und Jungfische (bis maximal 20 cm Körperlänge) registriert. Größere, adulte Fische wurden nur vereinzelt nachgewiesen.

Tabelle 12: Anzahl der an der Pilotanlage nachgewiesenen Fischarten sowie Anteil der Lachssmolts am Gesamtfang.

Frühjahr	Anzahl	Arten	Smolts	Anteil
2014	4.404	25	2.923	66,4%
2015	2.819	26	2.190	77,7%
2016	1.870	19	1.448	77,4%
<b>Summe</b>	<b>9.093</b>	<b>32</b>	<b>6.561</b>	<b>72,2%</b>

#### 4.3.2 Ergänzende Videoaufzeichnungen

Um zusätzliche Informationen über die Abwanderwege an der Wasserkraftanlage zu sammeln, wurden im Frühjahr 2014, 2015 und 2016 zum Zeitpunkt der Smoltabwanderung zwei Videokameras installiert, die zum Aufzeichnen der abwandernden Fische im Bereich der Rechen genutzt wurden. An der oberflächennahen Kante der drei Rechen befinden sich je zwei Aussparungen, die den abwandernden Fischen ermöglichen sollen über den Rechen zu gelangen und ihre Wanderung über die Geschwemmselrinne fortzusetzen. Die Öffnungen der Bypässe sind in der Höhe regulierbar und verschieden tief eingestellt, um eventuelle Unterschiede in der Nutzung durch die Smolts zu prüfen und die Bypässe dann optimal einstellen zu können. Die zwei Videokameras waren derart angebracht, dass sie die beiden verschieden tiefen Bypässe des an der Uferseite liegenden Rechens filmten (Abb. 42). Um Aufzeichnungen während der Nacht zu ermöglichen, wurde im Jahr 2014 zusätzlich am tieferen Bypass ein Infrarotstrahler installiert. Die Aufzeichnungen liefen vom 03. März bis zum 22. Mai und umfassten somit den gesamten Zeitraum der Abwanderung der mit Telemetriesendern ausgestatteten Smolts. Die Daten der Kamera, die durch den Infrarotstrahler 24h pro Tag abwandernde Fische erfassen konnte, wurden im Rahmen einer Bachelorarbeit ausgewertet (Dickert 2015). Die Ergebnisse zeigten, dass sich am Tage vermehrt Schwärme von Fischen vor den Bypässen aufhielten. Die Fische schwimmen dabei entgegen der Strömung und ändern die Schwimmrichtung erst, wenn sie einzeln den Oberflächenbypass passieren. Bei Dunkelheit lösten sich die Schwärme auf und es wurden vermehrt einzelne Individuen detektiert, die sich vor allem entlang der seitlichen Mauer des Turbineneinlaufs, direkt vor dem Rechen und speziell vor den Oberflächenbypässen aufhielten. Auch sie schwammen generell gegen die Strömung bis sie den Oberflächenbypass durchwanderten. Weitere Ergebnisse und Details finden sich in der Bachelorarbeit „Video analysis of smolt behavior facing a surface bypass of the hydropower plant Unkelmühle“ von Marc Dickert (Dickert 2015).

Basierend auf den Erkenntnissen dieser Bachelorarbeit wurden in den Frühjahren 2015 und 2016 beide Bypässe, an denen Kameras installiert waren, durch Infrarotstrahler beleuchtet, was einen Vergleich des Verhaltens von Fischen vor den unterschiedlich tiefen Bypässen ermöglicht. Im Jahr 2015 liefen die Aufzeichnungen vom 08. April bis zum 21. Mai und umfassten somit, wie auch schon 2014, wieder den gesamten Zeitraum der Abwanderung der mit Telemetriesendern ausgestatteten Smolts. Zusätzlich wurden in diesem Jahr im Bereich vor den Rechen und der Bypässe akustische Messungen und Strömungsmessungen durchgeführt. In einer aktuellen Masterarbeit an der Universität zu Köln werden diese Daten mit denen des Verhaltens der abwandernden Fische vor den Rechen verschnitten und analysiert. Erste Ergebnisse zeigen, dass die Tiefe der Bypassöffnungen eine

bedeutender Faktor sein könnte, da sich die akustischen Bedingungen sowie das Strömungsbild mit zunehmender Tiefe der Öffnungen verändern, was zu erhöhter Wahrnehmbarkeit der Öffnung für Fische und somit zu einer besseren Nutzung als Abwanderweg führen könnte.

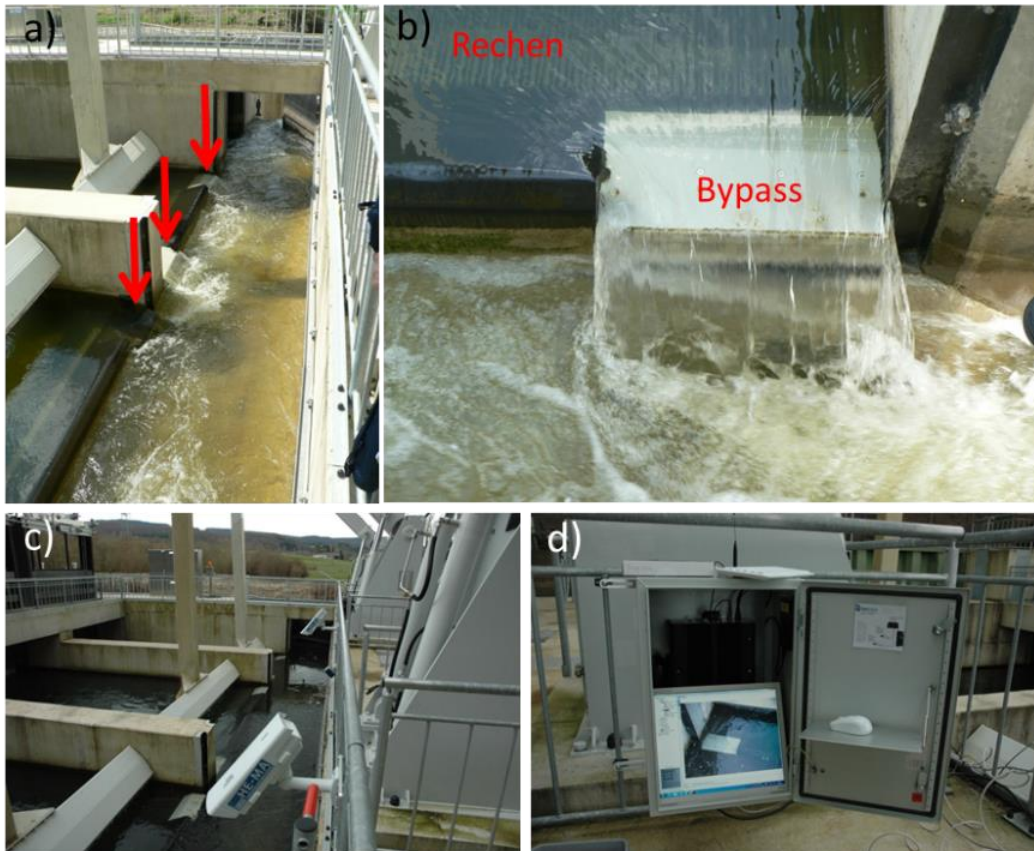


Abbildung 42: a) Oberflächenbypässe an der Wasserkraftanlage Unkelmühle, b) Oberflächenbypass im Detail, c) Videokameras, die je einen der Bypässe filmen, d) Schaltschrank mit Monitor.

#### 4.3.3 Untersuchungen zum kleinräumigen Verhalten abwandernder Lachse

Im Rahmen der Masterarbeit von Jan Lindner (Lindner 2016) wurde die Wanderung von Lachssmolts im Frühjahr 2015 auf Basis der Telemetriedaten detailliert untersucht. Im Fokus stand dabei das Verhalten der Smolts im Bereich der Wasserkraftanlage sowie unmittelbar davor und danach, wobei ausschließlich solche Fische betrachtet wurden, die über die Oberflächenbypässe abwanderten. Wie die Ergebnisse der Telemetriestudie bereits gezeigt haben, wird die Wanderung der Smolts an der Anlage, verzögert. Die Betrachtungen der Telemetriestudie beziehen sich dabei auf die Passage des Abschnittes vom Ende des Staubereichs bis unterhalb der Wasserkraftanlage. Lindner (2016) untersuchte in kleinräumigen Analysen wo genau im Bereich der Wasserkraftanlage diese Verzögerung auftritt (z.B. an den Oberflächenbypässen). Er fand heraus, dass insgesamt 35% der analysierten Fische nicht den direkten Weg durch die Anlage nahmen. So gab es zum Beispiel Smolts, die erst mehrfach von einem zum nächsten Turbineneinlauf schwammen bevor sie letztlich über einen Oberflächenbypass abwanderten. Einige Smolts schwammen sogar von den Turbineneinläufen und Obergraben zurück in den Staubereich und passierten erst nach mehrmaligem Einschwimmen in den Obergraben die Anlage. Dieses Suchen nach dem richtigen Weg kostete die Fische Zeit. Es konnte jedoch gezeigt werden, dass die größte Verzögerung der Smoltwanderung im Bereich direkt unterhalb des Kraftwerks auftrat (Abb. 43).



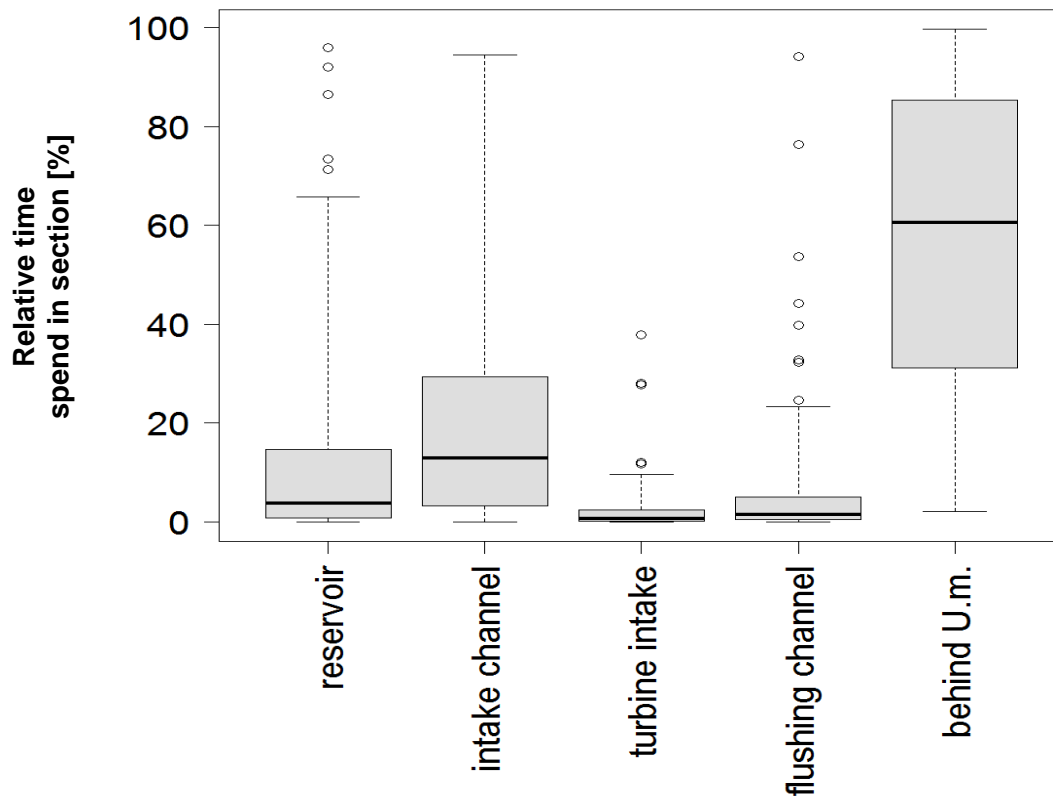


Abbildung 43: Prozentualer Anteil der Wanderzeit, die Smolts in den verschiedenen Bereichen der Anlage verlieren, gemessen an der gesamten Zeit, die die Smolts brauchten um die Wasserkraftanlage zu passieren. Jeder Bereich unterscheidet sich signifikant von den anderen ( $p < 0.05$ ; Wilcox test,  $n = 94$ ). Grauer Bereich = oberes bis unteres Quartil, schwarze Linie = Median, Whiskers = 95% Perzentil, Punkte = Ausreißer. Entnommen aus Lindner 2016.

Smolts, die die Anlage über die Oberflächenbypässe passierten, setzten ihre Wanderung also nicht sofort fort. Dies könnte ein Zeichen dafür sein, dass die Fische, die über die Rutsche der Geschwemmselrinne in die Sieg gelangt sind und sich nun vom Hauptwasserstrom abgeschnitten in einem eher strömungsberuhigten Teil befanden, desorientiert in diesem Bereich verharren. Es wäre dann davon auszugehen, dass nicht nur zeitliche Verluste auftreten, sondern die Fische auch einem erhöhten Prädationsdruck ausgesetzt sind, da desorientierte Fische eine leichte Beute darstellen und somit potentielle Räuber anlocken. Weitere Details zu diesen Ergebnissen finden sich in der Masterarbeit "Downstream migration of juvenile Atlantic salmon smolt (*Salmo salar*) - individual behavior facing a hydroelectric power plant" (Lindner 2016).

## 4.4 Migrationsrouten und Verluste von abwandernden Europäischen Aalen

### 4.4.1 Methoden

Die Pilotanlage Unkelmühle stellt neben den für die Lachssmolts vorgesehenen Oberflächenbypässen auch speziell für abwandernde Blankaale konzipierte Abwanderwege bereit (z.B. „Bottom Gallery“). Als weiterer Wanderfisch wurde daher der Aal in die Untersuchung einbezogen, um auch für diese Art Erkenntnisse zu Wanderverhalten und genutzten Wanderwegen an der Wasserkraftanlage zu sammeln.

#### 4.4.1.1 Fang und Markierung von Blankaalen

Die Aalpopulation in der Sieg weist eine zu geringe Dichte auf, um in angemessener Zeit genügend Tiere für die Telemetriestudie zu fangen. Daher wurden die Blankaale für den Besatz im Herbst 2014 von lokalen Fischern an Rhein und Mosel bezogen, wo sie mittels Elektrofischerei oder durch Reusen gefangen wurden. Die Aale für den Besatz im Herbst 2015 stammten ausschließlich aus dem Rhein und wurden mittels Elektrofischerei gefangen. In beiden Jahren wurden die Aale in aus Lochblech gefertigten Käfigen, die in die Mosel (2014) beziehungsweise in die Sieg (2015) eingebracht waren, gehältert, so dass jederzeit eine optimale Versorgung mit Frischwasser gewährleistet war (Wassertemperatur max. 13 °C). Das operative Einbringen der Telemetriesender erfolgte im Herbst 2014 bei einem Großteil der Aale an der Hälterungsanlage an der Mosel (von wo ein Teil der Aale stammte), wonach die Fische zur Besatzstelle an der Sieg transportiert wurden. Im Herbst 2015 wurden alle Besatzaale von einem Rheinfischer bezogen, so dass sie vom Fangort aus direkt zur Unkelmühle transportiert und dort markiert wurden. Wie auch für die Lachssmolts liegt zu diesem Zweck seit dem 26.02.2014 eine tierschutzrechtliche Genehmigung gemäß § 8 Abs. 1 TierschG i.V.m. § 33 TierSchVersV des Landesamtes für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW vor.

Im Herbst 2014 wurden insgesamt 137 Blankaale mit Sendern versehen und ausgesetzt (Tab. 12). Die Fische wurden an drei Terminen in die Sieg entlassen, 99 Aale am 08. Oktober, weitere 28 Aale am 23. Oktober und die letzten zehn Aale am 14. November. Im Mittel maßen die Aale 82 cm (60-108 cm). Das mittlere Gewicht der Aale lag bei 1096 g (375-2150 g). Im Herbst 2015 wurden insgesamt 134 Blankaale mit Sendern versehen. 70 Aale wurden am 10. Oktober in die Sieg entlassen, weitere 64 am 13. Oktober. Die mittlere Länge der Aale lag bei 82 cm (66-101 cm), das mittlere Gewicht bei 1105 g (479-1944 g).

Tabelle 13: Übersicht über die Anzahl besetzter Blankaale in den Jahren 2014 und 2015 sowie deren Länge und das Datum des Besatzes.

Jahr	Anzahl markierter Aale	Länge (cm) Mittelwert (Min.- Max.)	Besatz
2014	137	82 (60–108)	(08 Oktober n = 99, 23 Oktober n = 28, 14 November n = 10)
2015	134	82 (66–101)	(10 Oktober n = 70, 13 Oktober n = 64)

In beiden Jahren wurden die Telemetriesender, wie zuvor für die Lachs-Smolts beschrieben, operativ in die Körperhöhle der Fische implantiert. Die individuell codierten Sender der Aale waren jedoch mit 9 x 30mm Größe und 4,3g Gewicht größer als die für die Lachse verwendeten (Sender von Lotek Wireless Inc., Canada, Model NTQ-6-2, Frequenz 150.300 MHz und 150.340 MHz, minimale Batterie-Lebensdauer 172 Tage). In beiden Jahren wurden die Aale vor dem operativen Eingriff gemessen (Länge und Umfang), gewogen und die Länge der Brustflossen und der Augendurchmesser wurden erfasst (letzteres mittels direkten Messens oder durch Fotodokumentation). Im Anschluss an die Markierung im Herbst 2014, die an der im ersten Jahr verwendeten Hälterungseinrichtung an der Mosel durchgeführt wurde, wurden die Fische aus logistischen Gründen maximal zwei weiteren Tage gehältert und anschließend zur Besatzstelle transportiert. Im Herbst 2015 wurden die Aale direkt an der Wasserkraftanlage gehältert und besendet, so dass sie nach der Markierung, ohne weitere Hälterung besetzt werden konnten. Alle Aale wurden in mit Sauerstoff belüftete Fischtanks (2 Stück à 600l) zur Besatzstelle gefahren.

#### 4.4.1.2 Aufzeichnung markierter Aale

Um die markierten Aale zu detektieren wurde an der Sieg das bereits bestehende System von Empfängern und Antennen genutzt und durch weitere Empfängerstandorte ergänzt, um optimale Ergebnisse zu erzielen. In beiden Jahren wurden die Aale 9,8 km oberhalb der Wasserkraftanlage besetzt (Abb. 44). Die Empfängereinheiten waren zu Beginn der freifließenden Referenzstrecke (Standort 1), zu Beginn des Staubereichs (Standort 2), im Bereich der Wasserkraftanlage (Standort 3) sowie 7,5 km unterhalb (Standort 4) installiert. Im Jahr 2015 wurden außerdem noch zwei weitere Empfängereinheiten installiert, 19,5 (Standort 5) und 41,2 km (Standort 6) unterhalb der Wasserkraftanlage. Diese beiden Empfängerstandorte wurden hinzugefügt, um die im Vergleich zu Smolts relativ lange Distanz, die ein toter Aal driften kann, bevor er oder sein Sender sich nicht weiter fortbewegt, zuverlässig abzudecken und somit Aussagen über das Schicksal lebend besetzter Aale treffen zu können. Am Ende des Untersuchungszeitraumes (April bis Mai 2016) wurde außerdem noch eine weitere Station 1,9 km unterhalb der Wasserkraftanlage (Standort 3.1), aufgebaut.



Abbildung 44: Karte des untersuchten Abschnitts der Sieg. Dargestellt sind die Besatzstelle der markierten Aale, die Antennenstationen, an denen die Fische registriert wurden, und die Wasserkraftanlage Unkelmühle.

In beiden Jahren wurde die Wanderung der Aale zusätzlich zu den fest installierten Stationen auch durch mobile Verfolgung aufgezeichnet, um detailliertere Ergebnisse des Verhaltens auch außerhalb der stationären Antennenbereiche zu erlangen (Abb. 45). Hierfür wurden in regelmäßigen Abständen vom Boot aus manuelle Überwachungen (Trackings) durchgeführt, wobei sowohl oberhalb als auch unterhalb der Wasserkraftanlage nach Fischen gesucht wurde. In der Regel wurde flussab bis zu einem Wehr (Buisdorf) 29 km unterhalb der Wasserkraftanlage Unkelmühle nach Signalen gesucht, teilweise aber auch bis zur Siegmündung in den Rhein, ca. 44 km unterhalb der Wasserkraftanlage. Die markierten Aale wurden dabei mit einem tragbaren SRX 600 Empfänger und einer 3-Element-Yagi-Antenne erfasst. Im Jahr 2014/15 wurden so von 13.10. – 08.12.2014 und 10.04.2015 - 14.07.2015 insgesamt 42 Trackings ausgeführt. Im Jahr 2015/16 wurden die Aale von 12.10.2015 – 29.05.2016 an insgesamt 31 Terminen aufgezeichnet.

Mittels tragbarer Ausrüstung wurden im April und Mai 2015 und im Dezember 2015 auch drei bekannte Kormorankolonien auf Sender untersucht, eine am Sieglarer See (50°47'24.4"N 7°08'35.3"E), eine am Trerichsweiher (50°48'19.9"N 7°10'55.1"E) und eine am Dondorfer See (50°46'07.8"N 7°19'39.9"E).

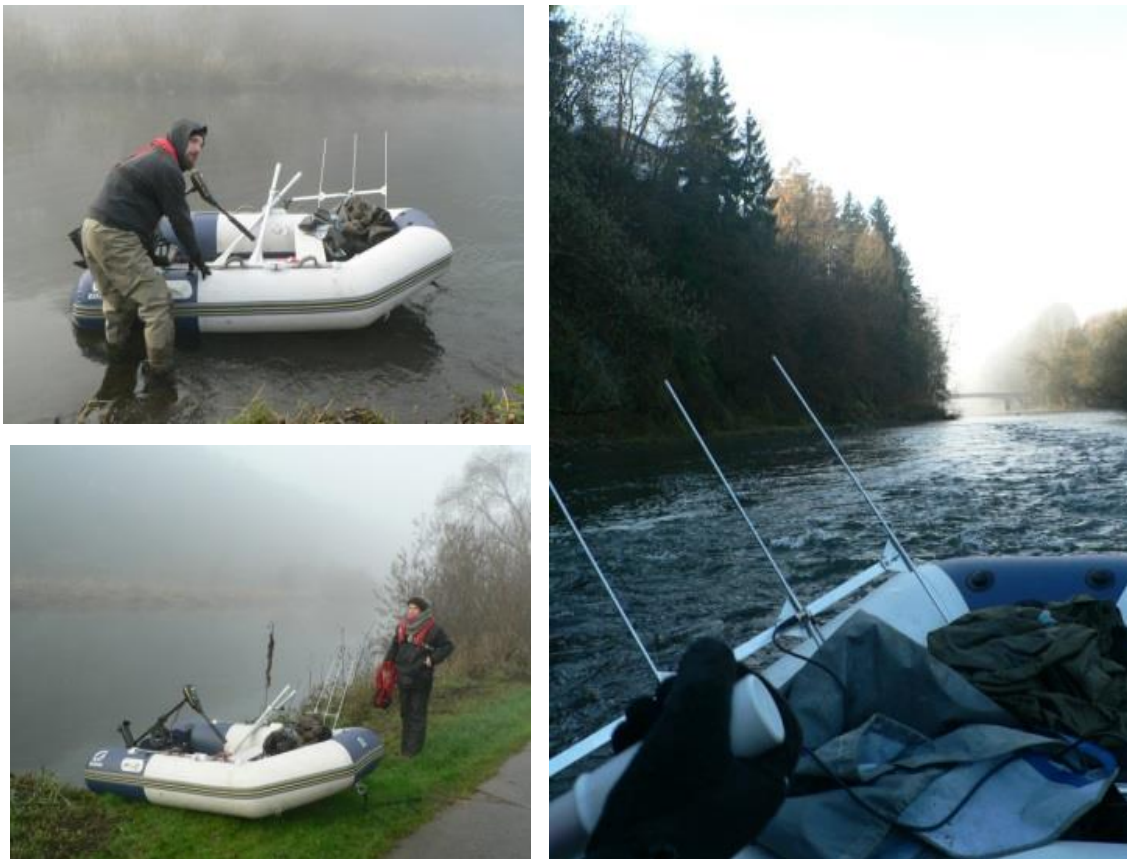


Abbildung 45: Mobile Verfolgung mit Boot und 3-Element-Yagi-Antenne.

#### 4.4.1.3 Drift toter Aale

Wie bei den Smolts wurden tote Aale besondert und besetzt als eine Kontrollgruppe für das Driftverhalten toter Tiere, die helfen sollte zwischen lebenden, schwimmenden Aalen oder toten driftenden Aalen zu unterscheiden. Im Jahr 2014 wurden so 5 tote Aale besetzt (8. Oktober). Die Anzahl der toten Aale wurde im Jahr 2015 auf insgesamt 30 Tiere erhöht, da in diesem Jahr eine Referenzgruppe toter Aale zu jedem Besatztermin erfasst werden sollte, um die Wirkung potentiell

unterschiedlicher Abflussbedingungen zu den einzelnen Besatzterminen auf die Driftlänge toter Aale abzudecken. Außerdem sollten erstmalig auch tote Aale an der Wehrklappe besetzt werden, um auch diesen Wanderweg zu erfassen. So wurden von den insgesamt 30 Tieren 25 in den Turbinenauslass besetzt (wie auch schon die toten Aale im Vorjahr) (10. und 13. Oktober und 21. November) und weitere 5 wurden an der Wehrklappe entlassen (21. November).

#### **4.4.1.4 Datenanalyse**

Die für die Untersuchungsperiode 2014/15 ausgewerteten Daten der stationären Empfänger stammen aus dem Zeitraum von 8. Oktober 2014 bis 21. Mai 2015. Von 8. Oktober bis 15. Dezember 2014 liefen alle Empfänger. Da davon ausgegangen wurde, dass bei niedrigen Temperaturen im Winter wenige bis keine Aale wandern, stand der Aufwand (z.B. für die Hochwassersicherung) für den Betrieb aller meist batteriebetriebenen Empfänger, nicht mehr in Relation zu den erwarteten Ergebnissen. Die meisten Empfänger wurden daher über Winter abgeschaltet, ein Empfänger jedoch, am Standort 3 an der Unkelmühle stationiert, zeichneten über diesen Zeitraum hinaus Daten auf (15. Dezember 2014 bis 20. Februar 2015). Am 20. Februar 2015 wurden dann sämtliche Empfänger wieder in Betrieb genommen, so dass Aale, die nach der Winterpause bei steigenden Temperaturen wieder wandern, aufgezeichnet werden konnten (Tab. 13).

Im Jahr 2015/16 stammen die ausgewerteten Daten der stationären Empfänger aus dem Zeitraum von 10. Oktober 2015 bis 16. Mai 2016. Vom 10. Oktober bis 15. März liefen alle Empfänger. Danach wurden alle Empfänger für die beginnende Wandersaison der Lachssmolts konfiguriert. Bei drei Empfängern wurden die Einstellungen jedoch in der Art vorgenommen, dass sie neben den Smolts auch die noch nicht abgewanderten Aale empfangen konnten. Diese liefen bis zum Ende des Untersuchungszeitraumes am 16. Mai. Zusätzlich wurde zwischen dem 1. April und dem 16. Mai eine Empfängereinheit am Standort 3.1 1,9 km unterhalb der Wasserkraftanlage errichtet, die ebenfalls auf beiden Frequenzen, der für Smolts und der für Aale aufzeichnete (Tab. 14).

Tabelle 14: Untersuchungszeitraum im Jahr 2014/2015. X kennzeichnet den Zeitraum, in dem die entsprechenden Empfängereinheiten aufzeichneten, siehe jedoch die Fußnoten.

		Monitoringzeitraum			
		08.10.14 - 15.12.14	15.12.14 - 20.02.15	20.02.15 - 21.05.15	
<b>Standort 1</b>	<b>Empfänger 1</b>	Beginn der freifließenden Kontrollstrecke	x	-	x
<b>Standort 2</b>	<b>Empfänger 2</b>	Beginn des Staubereichs	x	-	x
	<b>Empfänger 3.1</b>	Ende des Staubereichs, rechtes Ufer	x	-	x
	<b>Empfänger 3.2</b>	Ende des Staubereichs, linkes Ufer	x	-	x
<b>Standort 3 (WKA)</b>	<b>Empfänger 4.1</b>	Wanderwege an der Unkelmühle	x <sup>1</sup>	-	x
	<b>Empfänger 4.2</b>	Wanderwege an der Unkelmühle	x <sup>1</sup>	-	x
	<b>Empfänger 5</b>	Unmittelbar unterhalb der WKA	x	x <sup>2</sup>	x
<b>Standort 4</b>	<b>Empfänger 6</b>	7,5 km unterhalb der WKA	x	-	x

<sup>1</sup> Empfänger 4.1 und 4.2 waren aufgrund technischer Probleme zwischen 10. und 13. Oktober 2014 nicht empfangsbereit. In diesem Zeitraum passierten 13 Aale die Wasserkraftanlage, deren genauer Abwanderweg daher nicht festgestellt werden konnte.

<sup>2</sup> Zwischen 15. Dezember und 20. Februar lief nur Empfängereinheit 5 am Standort 3, Unkelmühle. 14 Aale passierten in dieser Zeit (im Dezember) die Wasserkraftanlage, deren genauer Abwanderweg jedoch nicht festgestellt werden kann.

Tabelle 15: Untersuchungszeitraum im Jahr 2015/16. X kennzeichnet den Zeitraum, in dem die entsprechenden Empfängereinheiten aufzeichneten, siehe jedoch die Fußnoten.

		Monitoringzeitraum			
		10.10.15 15.03.16	- 15.03.16 01.04.16	- 01.04.16 16.05.16	-
<b>Standort 1</b>	<b>Empfänger 1</b>	Beginn der freifließenden Kontrollstrecke	x	-	-
<b>Standort 2</b>	<b>Empfänger 2</b>	Beginn des Staubereichs	x <sup>1,2</sup>	x	x
	<b>Empfänger 3.1</b>	Ende des Staubereichs, rechtes Ufer	x	-	-
	<b>Empfänger 3.2</b>	Ende des Staubereichs, linkes Ufer	x <sup>1</sup>	-	-
<b>Standort 3 (WKA)</b>	<b>Empfänger 4.1</b>	Wanderwege an der Unkelmühle	x <sup>1</sup>	-	-
	<b>Empfänger 4.2</b>	Wanderwege an der Unkelmühle	x <sup>1</sup>	-	-
	<b>Empfänger 5</b>	Unmittelbar unterhalb der WKA	x <sup>1</sup>	-	-
<b>Standort 3.1</b>	<b>Empfänger 5.1</b>	1,9 km unterhalb der WKA	-	-	x
<b>Standort 4</b>	<b>Empfänger 6</b>	7,5 km unterhalb der WKA	x <sup>1</sup>	x	x
<b>Standort 5</b>	<b>Empfänger 7</b>	19,5 km unterhalb der WKA	x <sup>1,2</sup>	-	-
<b>Standort 6</b>	<b>Empfänger 8</b>	41,2 km unterhalb der WKA	x	x	x

<sup>1</sup> Aufgrund von Hochwasser mussten die Empfänger 2, 32, 41, 42, 5 und 6 zwischen 30. November und 4. Dezember 2015 abgebaut werden.

<sup>2</sup> Aufgrund von Hochwasser mussten die Empfänger an den Standorten 2 und 5 zwischen 4. und 9. Februar 2016 abgebaut werden.

Zusätzlich zu den Daten der stationären Empfänger flossen in beiden Untersuchungszeiträumen (2014/15 und 2015/16) alle Daten der mobilen Verfolgung in die Analysen mit ein. Wie bei den Lachssmolts wurde alle Analysen mittels der Software R (R Development Core Team, 2016) durchgeführt.

Die Migrationsgeschwindigkeiten innerhalb der verschiedenen Flussabschnitte basieren auf der letzten Aufzeichnung an Standort 1, der ersten Aufzeichnung an Standort 2, der ersten Aufzeichnung an der am meisten flussaufwärtsgelegenen Antenne an der Wasserkraftanlage (d.h. der am Wehr gelegenen Antenne), der letzten Aufzeichnung an den am weitesten flussabwärts gelegenen Antennen unterhalb der Wasserkraftanlage sowie der ersten Aufzeichnung an Standort 4.

Im Falle von über längere Zeiträume nicht mehr bewegten Sendern kann bei Aalen anders als bei Smolts nicht zwangsläufig davon ausgegangen werden, dass ein Verlust des Fisches vorliegt. Es zeigte sich, dass Aale teils lange pausieren und an einer Stelle verharren. Wurde ein Sender also längere Zeit an derselben Stelle oder im selben Flussabschnitt aufgezeichnet wird im Folgenden von einem „Stoppen“ des Fisches gesprochen, wobei nicht geklärt werden kann, ob es sich um einen pausierenden oder um einen toten Aal handelt. Wurde ein Aal bis in einen bestimmten Abschnitt verfolgt, danach aber nicht mehr gefunden, wird folgend von einem „Verschwinden“ des Fisches aus dem entsprechenden Flussabschnitt gesprochen. In diesem Falle ist es wahrscheinlich, dass der Aal von Räubern aus dem Gewässer entfernt wurde, obwohl theoretisch auch eine Fehlfunktion des Senders möglich ist. Letzteres ist allerdings unwahrscheinlich, da die verwendeten Sender sehr zuverlässig sind.

#### **4.4.2 Ergebnisse des Jahres 2014/2015**

##### **4.4.2.1 Drift toter Aale**

Einer der toten Aale mit einer Länge von 83 cm verschwand kurz nach dem Besatz aus dem Fluss, was auf einen defekten Sender zurückzuführen sein könnte. Da der Sender des betreffenden Aals bei Markierung und an der Besatzstelle jedoch einwandfrei funktionierte, ist davon auszugehen, dass der Aal nach Besatz durch einen Prädator aus dem Untersuchungsgebiet entfernt wurde. Der Sender konnte jedoch nicht in einer Kormorankolonie nachgewiesen werden.

Die 4 übrigen toten, in 2014 besetzten Aale wurden zwischen 2,7 und 21,1 km weit flussab verdriftet. Dabei wurden die toten Aale (3 von 4 Individuen) bereits in den ersten 5 Tagen über einen Großteil der insgesamt gemessenen Strecke transportiert (2,7-14,7 km) (Abb.46).

Wie bei den Smolts sollten die Ergebnisse der Studie zu den toten Aalen dazu dienen, zwischen lebenden Aalen und toten driftenden Aalen zu unterscheiden und somit die Mortalität von lebend besetzten Aalen zu quantifizieren. Aufgrund des Abwanderverhaltens der Aale, die teils längere Pausen im Verlauf der Wanderung einlegen, war dies jedoch nicht in gleichem Maße möglich wie bei den Smolts (siehe hierzu Kapitel 4.2.4.4).



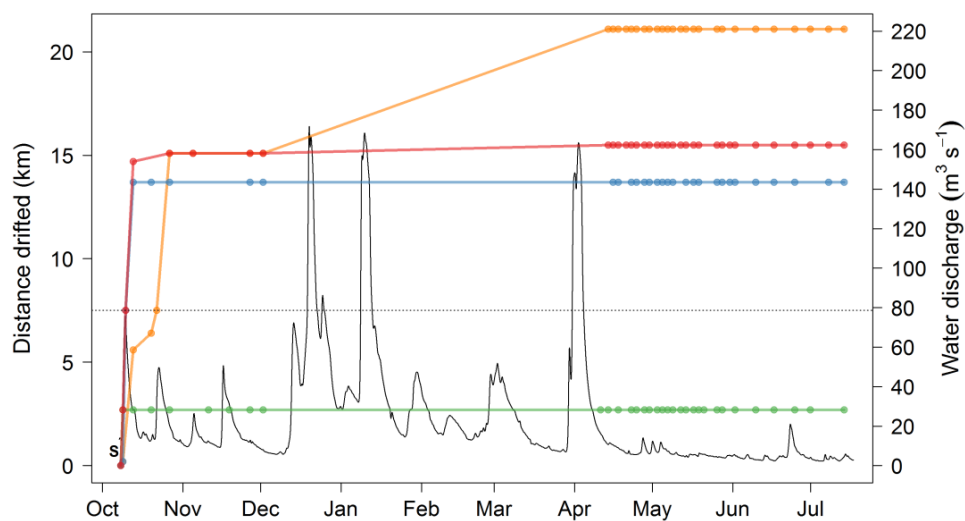


Abbildung 46: Drift toter, in die Sieg entlassener Aale im Jahr 2014 (n = 5). Die Position der einzelnen Aale zu Zeiten der manuellen Trackings oder wenn die Aale eine stationäre Empfängereinheit passierten sind als farbige Punkte markiert. Die schwarze Linie zeigt den Abfluss der Sieg an der Unkelmühle im entsprechenden Zeitraum. „S“ markiert die letzte Registrierung bevor ein Fisch von einem Räuber erbeutet wurde. Entnommen aus Havn et al 2017.

#### 4.4.2.2 Ergebnisse allgemein

Von den 137 im Herbst 2014 markierten Aalen wurde einer wegen technischer Probleme des Senders von den Analysen ausgeschlossen, so dass 136 Aale als Besatzgruppe zählen. Von diesen 136 Aalen hatten am Ende der Studie 122 (90%) die Wasserkraftanlage passiert (Tab. 15).

Von den 14 Aalen, die die Wasserkraftanlage nicht passierten, konnten für 5 Aale (36%) flussaufwärts gerichtete Bewegungen nachgewiesen werden, die ein Zeichen dafür sind, dass diese Aale am Leben waren. 5 weitere Aale (36%) blieben im Bereich der Besatzstelle oder begannen ihre Wanderung, stoppten diese aber vor Erreichen der Wasserkraftanlage und wurden stationär. Die verbleibenden 4 der 14 Aale (29%) verschwanden aus dem Fluss, wobei einer offensichtlich von Prädatoren erbeutet wurde und bei den anderen 3 nicht sicher ist ob sie von Prädatoren aus dem Untersuchungsgebiet entfernt wurden oder flussauf aus dem Monitoringbereich geschwommen sind. Es konnten jedoch keine Sender in Kormorankolonien gefunden werden.

Von den 122 Aalen, die die Wasserkraftanlage erreichten wurden 2 im biologischen Monitoring gefangen und von weiteren Analysen ausgeschlossen. Von weiteren 14 Aalen kann nicht bestimmt werden wie ihr weiteres Schicksal war, da sie in Zeiten mit reduziertem Betrieb von Antennenstationen abgewandert sind. Von den verbleibenden 106 Aalen stoppten 4 ihre Wanderung vor Standort 4 (7,5 km unterhalb der Pilotanlage), wovon für einen Aal flussaufwärts gerichtete Bewegungen registriert wurden und dieser somit als lebend angesehen wird. Bei den anderen 3 Aalen kann nicht sicher gesagt werden ob sie lebten oder tot waren. Ein letzter Aal unterbrach seine Wanderung im Abschnitt zwischen Standort 4 und dem Ende des untersuchten Flussabschnittes, wobei auch bei diesem nicht genau bestimmt werden kann, ob er lebte oder tot war. Insgesamt sind also 101 Aale aus dem Untersuchungsgebiet heraus geschwommen, wovon 2 später (30. Dezember 2014 und 11. Juni 2015) von Fischern im IJsselmeer, Niederlande gefangen wurden (Tab. 15).

Von den 122 Aalen, die die Wasserkraftanlage erreichten (inkl. der beiden im Monitoring entnommenen Aale), passierte die Wasserkraftanlage ein Großteil (N=93; 76%) im Oktober und November 2014, weitere 23 Aale (19%) im Dezember. Die verbleibenden sechs Aale (5%) wurden im Zeitraum von April bis Juli 2015 bei der Kraftwerkspassage registriert. Zwischen Januar und März 2015 bei entsprechend niedrigen Temperaturen fanden keinerlei Kraftwerkspassagen statt. Ein Großteil der Aale wanderte zu Zeiten erhöhten Abflusses bei Hochwasserereignissen ab. (Abb.47).

Tabelle 16: Bewegungsdaten der 136 markierten Aale in der Sieg 2014/15. Die Anzahl der Aale, die in den jeweiligen Abschnitt einschwimmen (Aal rein), und die den Abschnitt verlassen (Aal raus) sind gezeigt sowie die Anzahl der Aale, die ihre Wanderung im jeweiligen Abschnitt unterbrechen oder aus dem Abschnitt verschwanden. Ein Aal der seine Wanderung unterbricht ist nicht zwangsläufig tot, vor allem wenn für ihn flussaufwärts gerichtete Bewegungen registriert werden konnten, kann er als lebend angesehen werden. WKA = Wasserkraftanlage.

Abschnitt	Aal rein	Zuletzt registriert im Abschnitt		Aale verschwunden Aus Abschnitt wegen		Aale in biologischem Monitoring gefangen	Aal raus
		mit flussauf gerichtete Bewegung	ohne	Prädation	nicht sicher †		
<b>Sieg 2014/15</b>							
<b>Besatzstelle</b>	136	3	2		2		129
<b>Freifließende Strecke</b>	129	1	1				127
<b>Stau</b>	127	1	2	1	1		122
<b>WKA</b>	122					2	120
<b>Von WKA bis Standort 4</b>	106*	1	3				102
<b>Von Standort 4 bis Ende Untersuchungsgebiet</b>	102		1				101 ##

† Es ist nicht sicher warum die Fische verschwunden sind und oft sind mehrere Ursachen möglich, wie z.B. nach der Hauptuntersuchungsperiode bereits abgebaute Monitoringstationen, technische Probleme mit einzelnen Stationen, Prädation, flussaufwärts gerichtet Wanderungen aus dem Untersuchungsgebiet heraus und, was weniger wahrscheinlich ist, nicht funktionierende Sender

\* "Aal rein" reduziert, da 14 Aale die Wasserkraftanlage in Zeiten mit eingeschränktem Monitoring passierten

# Jedes # steht für einen Aal, der später von Fischern gefangen wurde

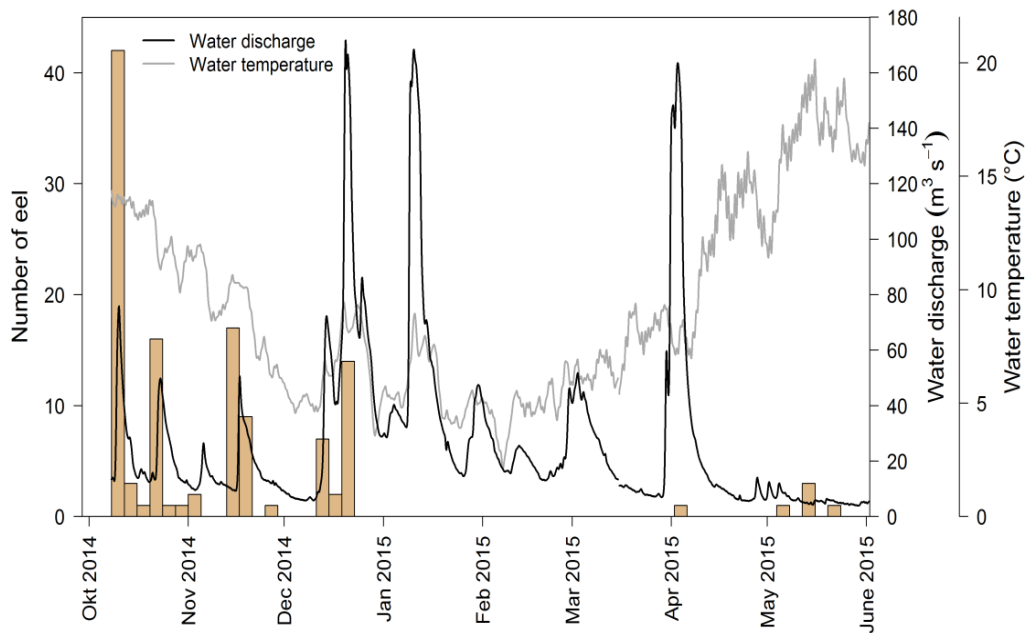


Abbildung 47: Anzahl der Aale (gesamt  $n = 122$ ), die die Wasserkraftanlage Unkelmühle im Untersuchungszeitraum von Oktober 2014 bis Juni 2015 passierten, sowie Abfluss (schwarze Linie) und Temperatur der Sieg (graue Linie) an der Wasserkraftanlage.

#### 4.4.2.3 Wanderwege an der Stau- und Wasserkraftanlage

An der Unkelmühle stehen den abwandernden Aalen theoretisch 10 verschiedene Wanderwege zur Verfügung (Abb. 33). Am Ende des Staubereichs, können sie auf der einen Uferseite entweder über die Kanurutsche oder den Raugerinne-Beckenpass abwandern. Auf der anderen Uferseite haben sie theoretisch die Möglichkeit über die Wehrklappe abzuwandern, oder in den Turbinengraben einzuschwimmen. In der Flussmitte könnten sie bei entsprechenden Abflussbedingungen auch über die Staumauer abwandern. Aale im Turbinengraben können bei abgesenkter Eisklappe theoretisch diesen Wanderweg nutzen, der im gesamten Untersuchungszeitraum allerdings nicht zur Verfügung stand. Am Ende des Turbinengrabens befinden sich die Bottom Gallery und die seitlich angeordneten Aalrohre sowie die Oberflächenbypässe zu beiden Seiten jedes Rechens. Anders als bei der Lachsabwanderung war das Tor zwischen Geschwemmselrinne und Sieg nur zu Zeiten der Rechenreinigung geöffnet. Fische, die den Weg über die Oberflächenbypässe oder über die Rechenkante wählten, konnten also nur zu Rechenreinigungszeiten, wenn sich das Tor zu Sieg öffnete, wieder in den Hauptstrom des Flusses gelangen oder bei höheren Abflüssen, die das Schluckvermögen der Turbinen überschritten, und daher das Tor geöffnet blieb. Ein weiterer Wanderweg ist der über den Schlitzpass oder bei Rechendurchtritt durch die Turbinen. Je nach Abflussbedingungen und Konfiguration der Wasserkraftanlage sind nicht immer alle Wege durchwanderbar.

Von den 122 Aalen, die die Anlage passierten, konnte für 31 kein genauer Wanderweg dokumentiert werden, da diese Aale die Anlage passierten als technische Probleme mit einem der Empfänger vorlagen (13 Aale) oder während alle Empfänger bis auf einen im Winter abgebaut worden waren (17 Aale). Ein weiterer Aal passierte die Anlage nachdem alle Empfänger am Studienende 2015 abgebaut worden waren. Insgesamt ist also von 91 Aalen, die die Wasserkraftanlage passierten der genaue Wanderweg bekannt.

Von diesen 91 Aalen, die die Wasserkraftanlage Unkelmühle passierten, nutzte der Großteil (n = 54, 59%) den Weg über die Wehrklappe, die bei entsprechenden Abflüssen über längere Zeiträume abgesenkt war. Weitere 22 Aale (24%) nahmen den Weg durch den Obergraben und über die Oberflächenbypässe. Dabei passierte kein Aal die Turbinen, was ein deutlicher Hinweis dafür ist, dass der installierte Feinrechen mit einer lichten Weite von 10 mm alle besetzten Aale vor Eintritt in die Turbinen schützte. Die Wanderwege über das Wehr und durch den Turbinengraben entsprechen denen mit dem größten Abfluss. 11 Aale (12%) wanderten außerdem über den Schlitzpass ab, während 2 Aale (2%) den Weg über den Raugerinne-Beckenpass oder die Kanurutsche wählten (diese können beim gewählten Studiendesign nicht voneinander unterschieden werden). 2 Aale (2%) nutzen die BottomGallery und wurden entsprechend im biologischen Monitoring gefangen.

Einige Aale schwammen durch die BottomGallery (3 Aale) oder die Aalrohre (1 Aal), verblieben jedoch nicht in den Monitoringbecken, aus denen sie bei den Kontrollterminen entnommen werden sollten. Stattdessen schwammen diese 4 Aale durch die jeweiligen Bypässe wieder zurück in den Turbinengraben, von wo aus sie dann zu gleichen Teilen (je 2 Aale) entweder über die Oberflächenbypässe oder über das Wehr abwanderten. Wären diese 4 Aale in den Monitoringbecken verblieben, wären insgesamt 5 Aale (6%) über die BottomGallery abgewandert und einer über die Aalrohre (1%). Das würde auch bedeuten, dass die Gesamtzahl der Aale, die die Oberflächenbypässe passierten auf 22% reduziert würde, die Anzahl der Aale die über das Wehr abwanderten auf 57%.

#### **4.4.2.4 Verluste von Aalen im gesamten Untersuchungszeitraum**

Die Ergebnisse der Aalstudie verdeutlichen, dass eine Abschätzung von Verlusten, die im Laufe der Wanderung auftreten, aufgrund von Verhaltensunterschieden wesentlich schwieriger zu treffen ist als im Falle der Lachssmolts. Während Lachssmolts hoch motiviert und zielstrebig flussab wandern, zeigte sich, dass Aale oft über längere Zeiträume ausharren, bevor sie ihre Wanderung z.B. während eines Hochwasserereignisses antreten. Weiterhin bewegten sich manche Aale zwar gerichtet flussab, jedoch unterbrochen von mehr oder weniger langen Pausen. Auch konnten einige Sender über lange Zeiträume (Wochen) an ein und derselben Stelle lokalisiert werden, so dass es sich hierbei dem ersten Anschein nach um einen toten Aal handeln könnte. Es konnte dann aber doch dokumentiert werden, dass einige der bis dato stationären Tiere bei geeigneten Bedingungen ihre Wanderung aufnahmen und sogar zügig bis in den Rhein abwanderten.

Wenn keinerlei Bewegung des Senders mehr erfasst wird, ist es demnach schwierig festzustellen, ob ein Aal lebt und standorttreu an einer Stelle ausharrt, oder ob es sich um einen Verlust eines Fisches handelt und der Sender womöglich auf dem Flussgrund liegt. Unterbricht ein Aal seine Wanderung im Bereich zwischen zwei stationären Empfängereinheiten ist also allein mit den Daten der stationären Empfänger nicht zu unterscheiden, wie der Zustand des Fisches ist. Anhand der Daten der mobilen Mitverfolgung konnten diese Lücken jedoch weitestgehend geschlossen werden, indem zum Beispiel flussaufwärts gerichtete Bewegungen aufgezeichnet wurden, die ein deutlicher Hinweis darauf sind, dass der Fisch am Leben sein dürfte. Eine aufwärtsgerichtete Bewegung, die im Bewegungsmuster denen von Aalen gleicht, könnte in einigen wenigen Fällen jedoch auch durch Prädatoren (Vögel oder Raubfische) hervorgerufen sein, wie dies bei der Analyse der toten besenderten Aale in 7% der Fälle gezeigt wurde (Havn et al. 2017). Rein theoretisch könnte es also sein, dass ein Aal fälschlicherweise als lebend eingestuft wird. Das Driftlimit der toten Aale gibt weitere Hinweise darauf, ob ein Fisch, der lebend besetzt wurde, die Kraftwerkspassage unbeschadet

überstanden hat. Aale, deren Signal unterhalb des maximalen Driftlimits von 21 km aufgezeichnet wurde, sind aller Wahrscheinlichkeit nach am Leben.

Mindestens 96% der Aale, die im Frühjahr 2014 besendert und besetzt wurden, überlebten die Kraftwerkspassage (Tab. 16). Die Analysen hierzu schließen Aale, die die Wasserkraftanlage in den Wintermonaten bei eingeschränktem Monitoring passierten (keine Detektion unterhalb der Anlage) und Aale, die im biologischen Monitoring gefangen wurden, aus. Somit konnten für 106 Aale Aussagen über ihr Überleben nach Kraftwerkspassage getroffen werden. Die Analysen hierzu basieren auf der Annahme, dass Aale, die die Kraftwerkspassage nicht überlebten, nicht über eine längere Distanz verdriftet werden als die toten besetzten Aale. Außerdem wurde angenommen, dass keine nicht als solche erkannte Prädation durch Vögel oder andere Räuber unterhalb der Anlage stattfand, durch die die Sender flussaufwärts transportiert oder aus dem Untersuchungsgebiet entfernt worden wären. Es ist jedoch bekannt, dass Kormorane sowohl verletzte als auch unversehrte Aale erbeuten (Doherty & McCarthy 1997). Die Untersuchungen zu den toten Aalen zeigten darüber hinaus, dass einige durch Prädatoren erbeutet und die Sender flussaufwärts gebracht wurden (7% aller besetzten toten Aale an Sieg, Diemel und Kinzig, Havn et al. 2017). Es kann also nicht mit absoluter Sicherheit davon ausgegangen werden, dass die oben genannten Annahmen immer valide sind. Somit besteht Unsicherheit darüber, ob tote Aale in die Analyse des Überlebens der Aale eingeflossen sind.

Tabelle 17: Anzahl von Aalen, die die Wasserkraftanlage passiert haben, dargestellt für die genutzten Wanderwege sowie prozentuale Aufteilung auf diese. Unbekannt = Wanderweg konnte nicht festgestellt werden aufgrund technischer Probleme oder weil Aale in Zeiten ohne Monitoring wanderten. Die Aale wurden in zwei Kategorien unterteilt: solche, die die Kraftwerkspassage aller Wahrscheinlichkeit nach überlebten und solche, für die nicht bestimmt werden kann, ob sie verlustig gegangen sind oder nicht weil sie innerhalb des maximalen Driftlimits toter Aale stationär wurden. Prozentangaben in der Spalt „Gesamt“ beziehen sich auf die Gesamtanzahl Aale (N=106). Angaben in Klammer beziehen sich auf die genannten Wanderwege in Abb. 33. Weg 6 und 7 konnten mit dem gewählten Studiendesign nicht voneinander differenziert werden.

	<b>Ober- flächen- bypässe (Weg 1)</b>	<b>Schlitz pass (Weg 3)</b>	<b>Kanu- rutsche/ Becken- pass (Weg 4)</b>	<b>Wehr klappe (Weg 7)</b>	<b>Wehr- oder Eisklappe (Weg 6 und 7)</b>	<b>Unbe- kannt</b>	<b>Gesamt</b>
<b>Als Lebend eingestuft</b>	20 (91%)	10 (91%)	2 (100%)	54 (100%)	0 (0%)	16 (94%)	<b>102 (96%)</b>
<b>Nicht feststellbar ob lebend oder tot</b>	2 (9%)	1 (9%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	1 (6%)	<b>4 (4%)</b>
<b>Summe</b>	<b>22</b>	<b>11</b>	<b>2</b>	<b>54</b>	<b>0</b>	<b>17</b>	<b>106</b>

Für die 4 Aale (4%), die nicht als überlebend eingestuft wurden, konnte nicht bestimmt werden, ob sie die Kraftwerkspassage überlebt haben oder nicht (Tab. 16). Dass diese 4 Aale im Bereich der maximal gedrifteten Strecke der besetzten, toten Aale stationär wurden, spricht dafür, dass sie bei der Kraftwerkspassage letal geschädigt wurden. Es könnte jedoch auch sein dass die Aale unbeschadet abgestiegen sind, danach von Räufern erbeutet wurden und der Sender im Gewässer ausgeschieden wurde. Da stationäre Aale potentiell jedoch auch am Leben sein können, kann im

Fälle der 4 vorliegenden Aale keine endgültige Aussage getroffen werden, so dass der Verlust mit einer Spanne von 0 bis 4 % in 2014/15 beziffert wird. 2 dieser 4 Aale wanderten über die Oberflächenbypässe ab, während einer den Schlitzpass nutzte und für den letzten der Wanderweg nicht bestimmt werden konnte.

#### 4.4.2.5 Migrationsgeschwindigkeiten

Wie lange sich die Aale in den einzelnen Gewässerabschnitten aufhielten variierte stark für einzelne Individuen und die jeweiligen Gewässerabschnitte (Tab. 17). Im Bereich der Besatzstelle hielten sich die Aale im Vergleich zu übrigen Gewässerabschnitten am längsten auf. Die Aale benötigten im Schnitt (Median) 0,3 h (Mittelwert 110 h; Bereich 0,05 - 1217 h) um die Unkelmühle zu durchwandern (Tab. 12). Dabei war die Verteilung stark verschoben hin zu schnelleren Individuen (was den großen Unterschied zwischen dem Median und dem Mittelwert erklärt). So passierten die meisten Aale die Anlage innerhalb von 24 h (77%), während wenige Aale deutlich länger benötigten (23%).

Tabelle 18: Aufenthaltszeit der Aale in den einzelnen Gewässerabschnitten. Analysiert wurden die Zeiten von der ersten Detektion an der einen Empfängereinheit bis zur Detektion an der nächsten, flussaufwärts gerichtete Wanderungen zurück in bereits durchschwommene Abschnitte wurden nicht berücksichtigt. Bei der Referenzstrecke und dem Abschnitt unterhalb der Wasserkraftanlage (WKA) handelt es sich um freifließende Gewässerabschnitte. Zahlen hinter Abschnittnamen = Länge des Abschnittes.

<b>Bezeichnung, Streckenlänge</b>	<b>N</b>	<b>Mittelwert (h)</b>	<b>Median (h)</b>	<b>Minimum (h)</b>	<b>Maximum (h)</b>
<b>Besatzstelle - 1,5 km</b>	117	492	51	0.87	5267
<b>Referenzstrecke - 5,8 km</b>	108	95	2.3	0.86	1230
<b>Stau - 2,3 km</b>	107	83	0.8	0.50	4224
<b>WKA - 0,2 km</b>	104	110	0.3	0.05	1217
<b>WKA bis Standort 4 - 7,5 km</b>	94	38	1.3	1.02	897

Die Wandergeschwindigkeit unterschied sich je nach benutztem Wanderweg (Kruskal Wallis test,  $\chi^2 = 17,4$ ,  $P = 0,02$ ), wobei Fische mit unbekanntem Wanderweg oder solche, die über die Wehrklappe wanderten am schnellsten waren (Abb. 48). Wurden Fische mit unbekanntem Wanderweg von den Analysen ausgeschlossen, unterschieden sich die Geschwindigkeiten der Aale je Wanderweg weiterhin signifikant voneinander. Allerdings zeigte sich nun nur bei Aalen, die die Anlage innerhalb von 24 h passierten (schnelle Gruppe) ein signifikanter Effekt des Wanderweges, wobei die Passage über die Wehrklappe nach wie vor am schnellsten war (Kruskal Wallis test,  $\chi^2 = 22,1$ ,  $P < 0.001$ ). Bei Aalen der langsamen Gruppe, die länger als 24 h für die Kraftwerkspassage benötigten, hatte der gewählte Wanderweg keine Auswirkungen auf die Wandergeschwindigkeit (Kruskal Wallis test,  $\chi^2 = 3,7$ ,  $P = 0.16$ ).

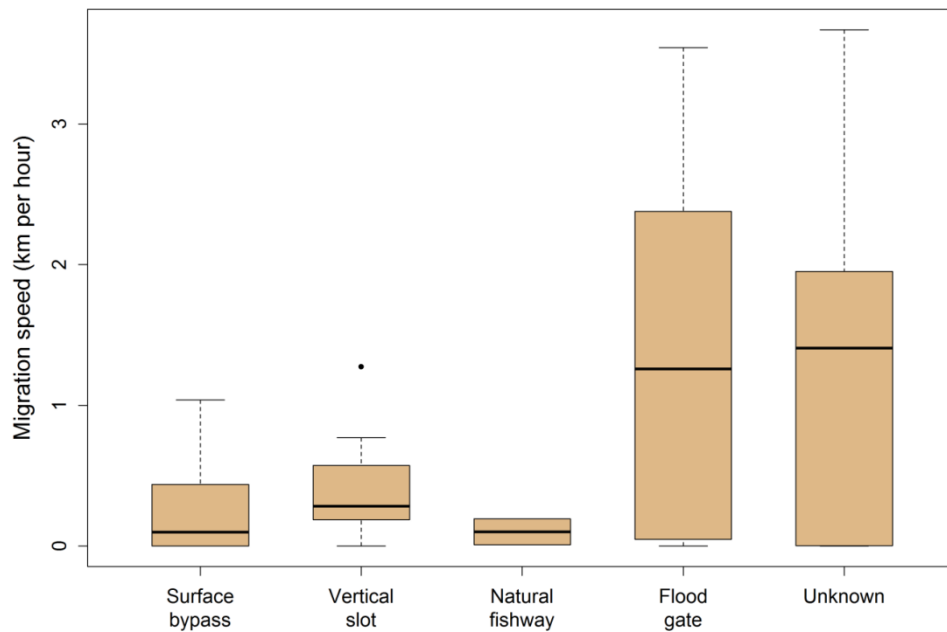


Abbildung 48: Wandergeschwindigkeit (km h<sup>-1</sup>) der Aale bei der Passage der Wasserkraftanlage im Jahr 2014/15 in Abhängigkeit vom gewählten Abwanderweg dargestellt als Boxplot. Brauner Bereich = oberes bis unteres Quartil, schwarze Linie = Median, Whiskers = 95% Perzentil, Punkte = Ausreißer, N=104.

#### 4.4.3 Ergebnisse des Jahres 2015/2016

##### 4.4.3.1 Drift toter Aale

Im Jahr 2015 wurden die 30 toten Aale nach dem Besatz unterhalb der Wasserkraftanlage bis zu 19,7 km weit verdriftet, was in etwa der Distanz aus dem Jahr 2014 entspricht (Tab. 18, Abb. 49). Wie auch schon im Jahr 2014 wurden auch 2015 4 Aale von Prädatoren erbeutet und teilweise aus dem Fluss entfernt. Auch in diesem Jahr konnten keine Sender in Kormorankolonien detektiert werden.

Tabelle 19: Maximal verdriftete Distanz toter Aale in der Sieg im Jahr 2014 und 2015 sowie Anzahl von toten, Aalen, die durch Prädatoren erbeutet und ggf. aus dem Fluss entfernt wurden. Anzahl besetzter Aale im Jahr 2014: n = 5, im Jahr 2015: n = 30.

<b>Besatzdatum</b>	<b>Besatzstelle</b>	<b>Anzahl Aale</b>	<b>Max. verdriftete Distanz (km)</b>	<b>Von Prädatoren erbeutet und aus dem Fluss entfernt #</b>	<b>Von Prädatoren erbeutet, jedoch nicht und aus dem Fluss entfernt #</b>
<b>8 Okt 14</b>	<b>Turbinenauslauf</b>	5	21.1	1	0
<b>10 Okt 15</b>	<b>Turbinenauslauf</b>	10	19.7	0	1
<b>13 Okt 15</b>	<b>Turbinenauslauf</b>	10	15.4	1	0
<b>21 Nov 15</b>	<b>Turbinenauslauf</b>	5	18.5	0	0
<b>21 Nov 15</b>	<b>Wehrklappe</b>	5	12.9	1	1
<b>Summe</b>		<b>35</b>	<b>21.1</b>	<b>3</b>	<b>2</b>

# Dass Aale von Räubern erbeutet wurden, konnte anhand dafür typischer Bewegungsmuster festgestellt werden. In einigen Fällen haben die Räuber den Fisch aus dem Untersuchungsgebiet entfernt (z.B. Vögel), in anderen Fällen verblieb der Sender im Fluss (z.B. nachdem er von den Räubern dort wieder ausgeschieden wurde).

Anfang Dezember fand ein Hochwasserereignis statt mit Abflussspitzen von bis zu 228 m<sup>3</sup>/s. Um den Einfluss dieses Hochwassers auf die Drift toter Aale genauer beschreiben zu können, wurden in die folgenden Detailanalysen nur Aale einbezogen, die am 26. November (kurz vor dem Hochwasser) und am 9. Dezember (kurz nach dem Hochwasser) durch das manuelle Tracking registriert und nicht von Prädatoren erbeutet wurden (N=23).

Aale, die am 10. und 13. Oktober entlassen wurden (N=16) drifteten bis zum 26. November über einen Zeitraum von 47 bzw. 44 Tagen im Schnitt (Median) 3,9 km weit. Die Aale, die am 21. November über der Wehrklappe in die Sieg entlassen wurde, bewegten sich zunächst bis kurz vor dem Hochwasser nur wenig (0 - 2,1 km bis 5 Tage nach Besatz). Nach dem Hochwasserereignis waren 12 der insgesamt 23 Aale weiter verdriftet worden, so dass sie im Schnitt (Median) 3,4 km weiter flussab registriert wurden (Abb. 49).

Insgesamt konnte nach dem Hochwasserereignis für alle toten Aale (N=30) so gut wie keine Drift mehr registriert werden. Die letzte Driftbewegung fand 118 Tage nach Besatz statt. Detaillierte Analysen zu der Drift toter, im Oktober besetzter Aale sind aufgrund technischer Probleme beim manuellen Tracking nicht möglich.



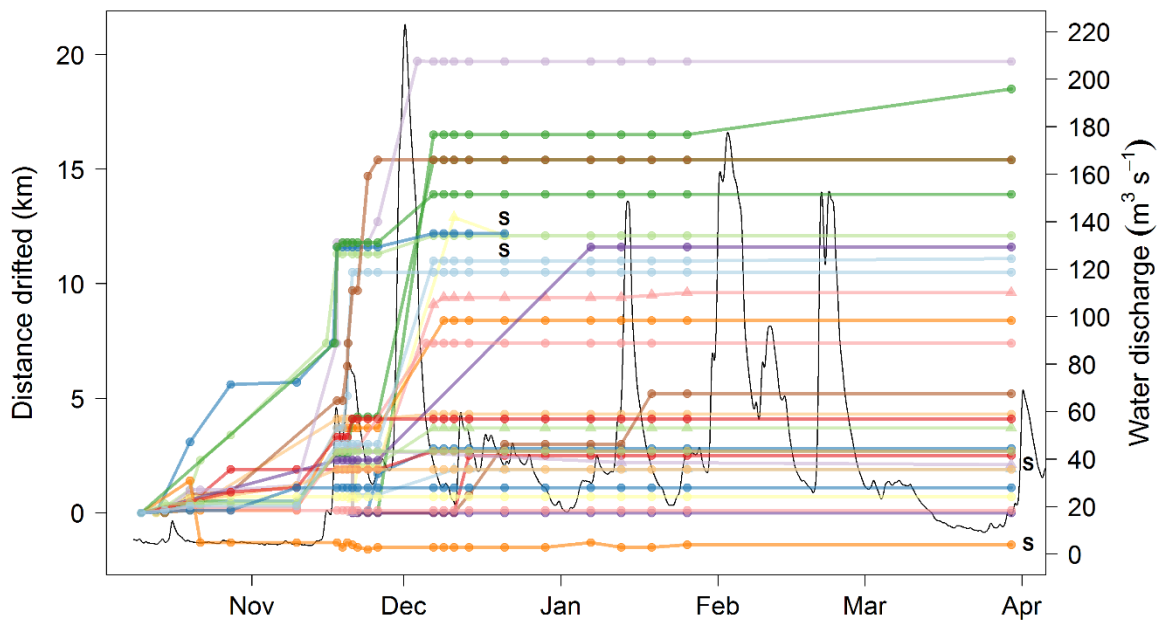


Abbildung 49: Drift toter, in die Sieg entlassener Aale im Jahr 2015 (n = 30). Die Position der einzelnen Aale zu Zeiten der manuellen Kartierung oder wenn die Aale eine stationäre Empfängereinheit passierten sind als farbige Punkte markiert. Die schwarze Linie zeigt den Abfluss der Sieg an der Unkelmühle im entsprechenden Zeitraum. „S“ markiert die letzte Registrierung bevor ein Fisch von einem Räuber erbeutet wurde. Entnommen aus Havn et al 2017.

Die Ergebnisse der Untersuchung zur Drift toter Aale beider Jahre (2014 und 2015) ergab also, dass 1) Aale, die beim Passieren der Wasserkraftanlage getötet wurden noch bis zu 21,1 km weit flussab driften können, 2) dass sie von Prädatoren auch nach ihrem Tod erbeutet und aus dem Gewässer entfernt werden können und 3) dass tote Aale durch Prädatoren in flussaufwärts gelegene Gewässerabschnitte gebracht werden können.

#### 4.4.3.2 Ergebnisse allgemein

Von 134 Aalen, die im Herbst 2015 besetzt wurden, hatten am Ende der Studie 100 (75%) die Wasserkraftanlage Unkelmühle passiert (Tab. 19). Von den 34 Aalen, die die Wasserkraftanlage nicht durchwanderten, konnten für 23 Aale (68%) flussaufwärts gerichtete Bewegungen nachgewiesen werden, die anzeigen, dass diese Aale am Leben waren. Weitere 6 Aale (17%) begannen ihre Wanderung, unterbrachen diese jedoch vor Erreichen der Wasserkraftanlage und wurden stationär. Die verbleibenden 5 Aale (15%) verschwanden aus dem Untersuchungsgebiet, wobei einer von Räubern erbeutet wurde (erkennbar an den dafür typischen Bewegungsmustern), während für 4 nicht genau gesagt werden kann, ob sie von Räubern aus dem Fluss entfernt wurden oder ob sie flussauf aus dem Monitoringbereich heraus gewandert sind. Wie im Vorjahr konnten keine Sender in Kormorankolonien geortet werden.

Tabelle 20: Bewegungsdaten der 134 markierten Aale in der Sieg 2015/16. Die Anzahl der Aale, die in den jeweiligen Abschnitt einschwimmen (Aal rein), und die den Abschnitt verlassen (Aal raus) sind gezeigt sowie die Anzahl der Aale, die ihre Wanderung im jeweiligen Abschnitt unterbrechen oder aus dem Abschnitt verschwanden. Ein Aal der seine Wanderung unterbricht ist nicht zwangsläufig tot, vor allem wenn für ihn flussaufwärts gerichtete Bewegungen registriert werden konnten, kann er als lebend angesehen werden. WKA = Wasserkraftanlage.

Abschnitt	Aal rein	Zuletzt registriert im Abschnitt		Aale verschwunden Aus Abschnitt wegen		Aale in biologischem Monitoring gefangen	Aal raus
		mit flussauf gerichtete Bewegung	ohne	Prädation	nicht sicher †		
<b>Sieg 2015/16</b>							
<b>Besatzstelle</b>	134	5	1		2		126
<b>Freifließende Strecke</b>	126	11	2		1		112
<b>Stau</b>	112	6	3	1	1		101
<b>WKA</b>	101	1				6	94
<b>Von WKA bis Standort 4</b>	87*		3	3			81
<b>Von Standort 4 bis Standort 5</b>	81	2	1				78
<b>Von Standort 5 bis Standort 6</b>	78		1		7		70

† Es ist nicht sicher warum die Fische verschwunden sind und oft sind mehrere Ursachen möglich, wie z.B. bereits abgebaute Monitoringstationen nach der Hauptuntersuchungsperiode, technische Probleme mit einzelnen Stationen, Prädation, flussaufwärts gerichtet Wanderungen aus dem Untersuchungsgebiet heraus und, was weniger wahrscheinlich ist, nicht funktionierende Sender

\* "Aal rein" reduziert, da 6 Aale die Wasserkraftanlage in Zeiten mit eingeschränktem Monitoring passierten

Von den 100 Aalen, die die Wasserkraftanlage passierten, wurden 6 im biologischen Monitoring gefangen und von weiteren Analysen ausgeschlossen. Von weiteren 6 Aalen kann nicht bestimmt werden wie ihr weiteres Schicksal war, da sie in Zeiten mit reduzierten Monitoringbetrieb abgewandert sind. Von den verbleibenden 87 Aalen stoppten 3 ihre Wanderung vor Standort 4, wobei nicht sicher gesagt werden kann, ob sie lebten oder tot waren. Weitere 3 Aale wurden in diesem Abschnitt von Räubern erbeutet. Im weiteren Verlauf des Flusses, zwischen Standort 4 und 5, stoppten 3 Aale ihre Wanderung. Bei 2 Aalen wurden flussaufwärtsgerichtete Bewegungen registriert, sie gelten somit als lebend, bei dem anderen kann keine genaue Aussage über das Überleben getroffen werden. Im letzten Abschnitt des Untersuchungsgebietes (Standort 5 bis 6) stoppte ein Aal seine Wanderung, wobei für ihn keine Aussage zum Überleben getroffen werden kann, weitere 7 Aale wurden aus dem Fluss entfernt. Bei diesen 7 ist nicht sicher, ob sie von Räubern erbeutet wurden oder ob sie flussauf aus dem Untersuchungsgebiet herausgeschwommen sind. Insgesamt 70 Aale haben also den gesamten untersuchten Flussabschnitt komplett durchwandert (Tab. 19).

Von den insgesamt 100 Aalen, die die Wasserkraftanlage passierten (Inklusive der im Monitoring gefangenen und der im Frühjahr 2016 abgewanderten Aale), wanderte ein Großteil (N=75; 75%) zwischen Oktober und November 2015 ab. 17 Aale (17%) passierten die Wasserkraftanlage im Dezember 2015, nur ein Aal (1%) zwischen Januar und März 2016. Weitere 7 Aale (7%) wurden im Zeitraum von April bis Juni 2016 aufgezeichnet (Abb. 50). Die Abwanderung der Aale konzentrierte

sich also auf die Herbstmonate. Wie schon im Vorjahr wanderten die meisten Aale zu Zeiten erhöhten Abflusses bei Hochwasserereignissen.

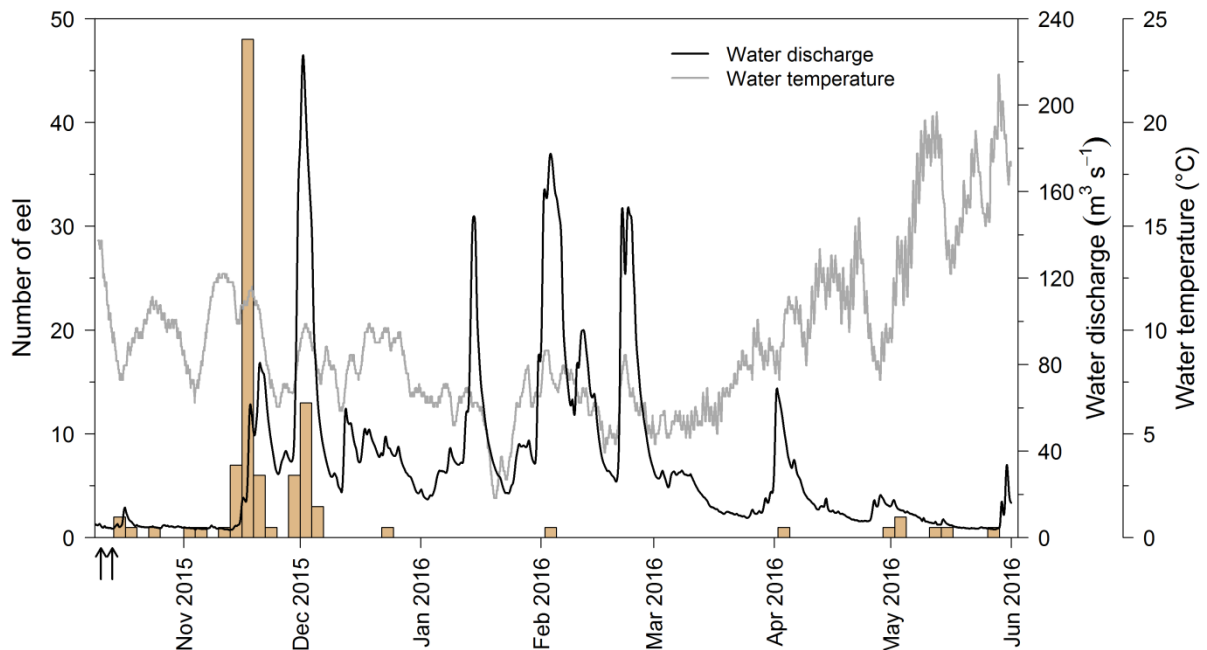


Abbildung 50: Anzahl der Aale (gesamt  $n = 100$ ), die die Wasserkraftanlage Unkelmühle im Untersuchungszeitraum 2015/16 passierten, sowie Abfluss (schwarze Linie) und Temperatur der Sieg (graue Linie) an der Wasserkraftanlage. Pfeile markieren die Besatztermine.

#### 4.4.3.3 Wanderwege an der Stau- und Wasserkraftanlage

Wie auch schon im vorangegangenen Jahr standen Aalen im Untersuchungszeitraum 2015/16 theoretisch 10 verschiedene Abwanderwege zur Verfügung (Abb. 33): die Kanurutsche oder der Raugerinne-Beckenpass am der Unkelmühle gegenüberliegenden Ufer, die Staumauer, die Wehrklappe, die Eisklappe, der Schlitzpass, die Bottom Gallery, die Aalrohre, die Oberflächenbypässe oder theoretisch auch, bei Rechendurchtritt der Weg durch die Turbinen. Je nach Abflussbedingungen sind dabei nicht immer alle Wege durchwanderbar.

Von den 100 Aalen, die in den Bereich der Wasserkraftanlage schwammen, konnte von 26 kein genauer Wanderweg bestimmt werden. Dies war der Fall, da die entsprechenden Aale wanderten, als die Empfängereinheiten aufgrund eines Hochwasserereignisses abgebaut werden mussten (Anfang Dezember, 19 Aale), weil sie die Anlage nach dem eigentlichen Untersuchungszeitraum passierten, als bereits ein Großteil der Empfänger abgebaut worden war (15. März, 6 Aale) oder weil nur unzureichende Detektionen an der Anlage vorliegen (1 Aal). Von insgesamt 74 Aalen ist also der exakte Wanderweg durch die Wasserkraftanlage bekannt.

Von diesen 74 Aalen wanderte der Großteil über die Wehrklappe ab (36 Aale, 49%) oder nutzte den Weg durch den Turbinengraben und über die Oberflächenbypässe (20 Aale, 27%). Diese beiden Wege entsprechen denen mit dem größten Abfluss. 3 Aale (4%) passierten die Anlage, als die Eisklappe geöffnet war. Da aufgrund des Studiendesigns jedoch nicht aufgelöst werden kann, ob ein Aal über die Wehrklappe oder die Eisklappe wanderte, kann über diese 3 Aale nur gesagt werden, dass sie einen der beiden Wege gewählt haben. 6 Aale (8%) wanderten über den Schlitzpass ab, weitere 3

Aale (4%) nutzten den Beckenpass bzw. die Kanurutsche (auch hier ist eine genaue Unterscheidung aufgrund des Studiendesigns nicht möglich). 6 Aale (8%) wanderten durch die BottomGallery und wurden im biologischen Monitoring gefangen. Kein Aal hat den Feinrechen passiert und in die Turbinen gelangen, was aufgrund der geringen lichten Weite von 10 mm zu erwarten war.

Je ein Aal schwamm in die BottomGallery bzw. die Aalrohre, verblieb jedoch nicht in den angeschlossenen Monitoringbecken, sondern verließ diese wieder, indem er über die BottomGallery und die Aalrohre zurück in den Turbinengraben wanderte. Einer der beiden wanderte später über die Oberflächenbypässe, der andere über den Beckenpass bzw. die Kanurutsche. Wären diese beiden Aale nicht zurückgeschwommen, wären insgesamt 7 Aale (9%) über die BottomGallery abgewandert und einer (1%) über die Aalrohre. Dies würde bedeuten, dass dann insgesamt 26% der Aale die Oberflächenbypässe genutzt hätten und 3% den Beckenpass bzw. die Kanurutsche.

#### **4.4.3.4 Verluste von Aalen im gesamten Untersuchungszeitraum**

Wie auch schon 2014/15 kann ein sich nicht mehr bewegendes Sender nicht automatisch als ein toter Aal interpretiert werden.

Wie bereits beschrieben wurden flussaufwärts gerichtete Bewegungen der lebend besetzten Fische sowie das maximale Driftlimit der toten besetzten Fische als Hinweise darauf herangezogen, ob die Aale die Kraftwerkspassage überlebten. Eine aufwärtsgerichtete Bewegung, die im Bewegungsmuster denen von Aalen gleicht, könnte in einigen wenigen Fällen jedoch auch durch Prädatoren (Vögel oder Raubfische) hervorgerufen sein (Havn et al. 2017). Rein theoretisch könnte es also sein, dass ein Aal fälschlicherweise als lebend eingestuft wird. Das Driftlimit der toten Aale gibt weitere Hinweise darauf, ob ein Fisch, der lebend besetzt wurde, die Kraftwerkspassage unbeschadet überstanden hat. Aale, die unterhalb des maximalen Driftlimits beider Jahre von 21 km aufgezeichnet wurden sind aller Wahrscheinlichkeit nach am Leben.

Mindestens 92% (n = 80) und damit ein ähnlich hoher Prozentanteil wie im Jahr 2014/15 überlebte im Jahr 2015/16 die Kraftwerkspassage mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit (Tab. 20), wobei wie im Jahr zuvor Aale, die die Wasserkraftanlage in Perioden mit eingeschränktem Monitoring passierten (z.B. nach Abschluss der Untersuchung) und Aale, die im biologischen Monitoring gefangen wurden, von den Analysen ausgeschlossen wurden (n verbleibend = 87). Wiederum muss berücksichtigt werden, dass alle Aussagen über das Überleben der Aale auf der Annahme beruhen, dass das maximale Driftlimit der toten, besetzten Aale auch für die bei der Passage evtl. (zunächst nur) geschädigten Tiere gilt und dass keine nicht detektierte Prädation der Aale stattfand.

Tabelle 21: Anzahl von Aalen, die die Wasserkraftanlage passiert haben, dargestellt für die genutzten Wanderwege sowie prozentuale Aufteilung auf diese. Unbekannt = Wanderweg konnte nicht festgestellt werden aufgrund technischer Probleme oder weil Aale in Zeiten ohne Monitoring wanderten. Die Aale wurden in zwei Kategorien unterteilt: solche, die die Kraftwerkspassage aller Wahrscheinlichkeit nach überlebten und solche, für die nicht bestimmt werden kann, ob sie verlustig gegangen sind oder nicht, weil sie innerhalb des maximalen Driftlimits toter Aale stationär wurden. Drei Aale sind aller Wahrscheinlichkeit nach von Prädatoren erbeutet worden. Prozentangaben in den Spalten „Gesamt“ beziehen sich auf die Gesamtanzahl Aale (N=87). Angaben in Klammer beziehen sich auf die genannten Wanderwege in Abb. 3. Weg 6 und 7 konnten mit dem gewählten Studiendesign nicht voneinander differenziert werden.

	<b>Ober- flächen- bypässe (Weg 1)</b>	<b>Schlitz pass (Weg 3)</b>	<b>Kanu- rutsche/ Becken- pass (Weg 4)</b>	<b>Wehr klappe (Weg 7)</b>	<b>Wehr-oder Eisklappe (Weg 6 und 7)</b>	<b>Unbe- kannt</b>	<b>Gesamt</b>
<b>als lebend eingestuft</b>	20 (100%)	5 (83%)	3 (100%)	34 (94%)	2 (67%)	16 (84%)	<b>80 (92%)</b>
<b>Nicht feststellbar ob lebend oder tot</b>	0 (0%)	1 (17%)	0 (0%)	1 (3%)	0 (0%)	2 (11%)	<b>4 (5%)</b>
<b>Von Prädatoren erbeutet</b>	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	1 (3%)	1 (33%)	1 (5%)	<b>3 (3%)</b>
<b>Summe</b>	<b>20</b>	<b>6</b>	<b>3</b>	<b>36</b>	<b>3</b>	<b>19</b>	<b>87</b>

Für die verbleibenden 7 der analysierten Aale (8%) kann bei der vorliegenden Datenlage nicht entschieden werden, ob sie die Kraftwerkspassage überlebten (Tab. 20). 4 dieser 7 Aale stoppten ihre Wanderung oberhalb der maximalen Driftdistanz toter Aale (21 km), so dass nicht bestimmt werden kann, ob es sich im Falle dieser stationär gewordenen Sender um tote Aale handelt oder um solche, die ihre Wanderung unterbrochen haben und sich beispielsweise in geeigneten Verstecken aufhalten. 3 der 7 nicht zu klassifizierenden Aale wurden innerhalb des maximalen Driftlimits toter Aale von Räubern erbeutet. Ob dies jedoch mit der Kraftwerkspassage in Verbindung gebracht werden kann bleibt unklar. Die Fische könnten von Prädatoren gefressen worden sein, 1) weil sie bei der Kraftwerkspassage starben, 2) weil sie bei der Kraftwerkspassage verletzt wurden oder 3) weil sie, obwohl sie die Kraftwerkspassage unbeschadet überstanden haben, trotzdem erbeutet wurden.

Von diesen 3 von Prädatoren gefressenen Aalen war einer über die Wehrklappe abgewandert, einer über die Eisklappe bzw. die Wehrklappe (Wanderwege nicht differenzierbar) und für einen ließ sich die Wanderroute nicht bestimmen. Von den 4 Aalen, die stationär wurden, hatte einer die Anlage via den Schlitzpass passiert, einer wählte den Weg über die Wehrklappe und für 2 ist der Wanderweg nicht bekannt.

#### 4.4.3.5 Migrationsgeschwindigkeiten

Auch im Jahr 2015/16 gab es große individuelle und vom Gewässerabschnitt abhängige Unterschiede in der im jeweiligen Abschnitt verbrachten Zeit (Tab. 21). Aale verblieben längere Zeit im Bereich der Besatzstelle und auch im Staubereich. Aale benötigten im Schnitt 1,3 h (Mittelwert 104 h; min. 0,03, max. 3900 h) um die Wasserkraftanlage zu passieren, wobei die meisten Aale die Anlage innerhalb

von 24 h durchschwommen haben (73%), während der Rest (27%) deutlich langsamer war. Diese ungleiche Verteilung erklärt den deutlichen Unterschied zwischen Median und Mittelwert (Tab. 21)

Auch in diesem Jahr unterschieden sich die Wandergeschwindigkeiten der Aale in Abhängigkeit des gewählten Wanderweges (Kruskal Wallis test,  $\chi^2 = 10,5$ ,  $P = 0,03$ ). Aale, die den Weg über die Wehrklappe nutzten waren am schnellsten (Abb. 51). Betrachtet man nur Aale, die die Anlage innerhalb von 24 h passiert haben, zeigt sich, dass für diese Gruppe die Wandergeschwindigkeit weiterhin vom genutzten Wanderweg abhängt (schnellster Weg über die Wehrklappe, Kruskal Wallis test,  $\chi^2 = 16,9$ ,  $P < 0.001$ ), während dies für langsame Aale, die länger als 24 h für die Kraftwerkspassage benötigten nicht der Fall war (Kruskal Wallis test,  $\chi^2 = 3,4$ ,  $P = 0.34$ ).

Tabelle 22: Aufenthaltszeit der Aale in den einzelnen Gewässerabschnitten 2015/16. Analysiert wurden die Zeiten von der ersten Detektion an der einen Empfängereinheit bis zur Detektion an der nächsten, flussaufwärts gerichtete Wanderungen zurück in bereits durchschwommene Abschnitte wurden nicht berücksichtigt.. Bei der Referenzstrecke und dem Abschnitt unterhalb der Wasserkraftanlage (WKA) handelt es sich um freifließende Gewässerabschnitte. Zahlen hinter Abschnittnamen = Länge des Abschnittes.

	N	Mittelwert (h)	Median (h)	Minimum (h)	Maximum (h)
<b>Besatzstelle - 1,5 km</b>	112	501	115	1.3	3680
<b>Referenzstrecke - 5,8 km</b>	94	693	212	0.9	5186
<b>Stau - 2,3 km</b>	81	105	1.3	0.4	1299
<b>WKA - 0,2 km</b>	71	104	1.3	0.03	3900
<b>WKA bis Standort 4 - 7,5 km</b>	59	83	1.7	1.0	3307
<b>Standort 4 bis 5 - 12.2 km</b>	57	42	2.7	2.0	938
<b>Standort 5 bis 6 - 21.8 km</b>	66	78	4.1	2.5	3668

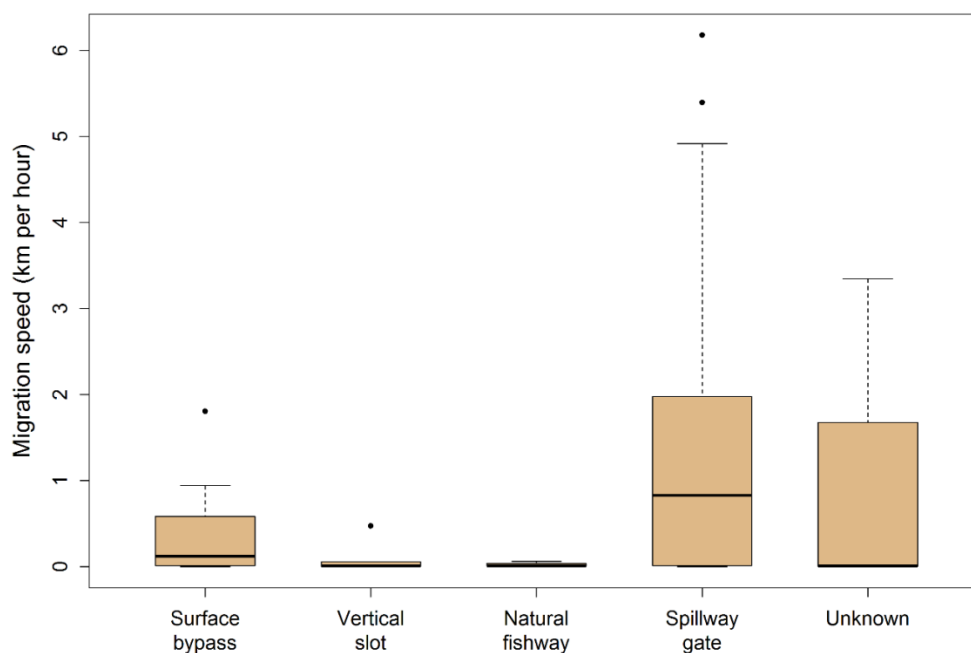


Abbildung 51: Wandergeschwindigkeit (km h<sup>-1</sup>) der Aale bei der Passage der Wasserkraftanlage im Jahr 2015/16 in Abhängigkeit vom gewählten Abwanderweg dargestellt als Boxplot. Brauner Bereich = oberes bis unteres Quartil, schwarze Linie = Median, Whiskers = 95% Perzentil, Punkte = Ausreißer, N=71.

#### 4.4.4 Diskussion

Diese Studie zeigte, dass Aale, die auf ihrer flussabwärts gerichteten Wanderung die Wasserkraftanlage Unkelmühle passierten, dabei relative geringe Verluste erlitten (0-4% und 0-8% in den beiden Studienjahren). Diese Werte machen deutlich, dass durch den gezielten Einsatz entsprechender Fischschutzkonzepte und die Einrichtung von Abwanderwegen an Wasserkraftanlagen, eine Turbinenpassage verhindert und die Mortalität an der Anlage relativ gering gehalten werden kann. An der Unkelmühle wurden vor den Turbinen Rechen mit einem Stababstand von 10 mm und mehrere Bypassmöglichkeiten für abwandernde Fische installiert. Es trat keinerlei durch die Turbinen verursachte Mortalität auf, was durch den geringen Rechenabstand zu erklären ist. Theoretisch sollten bei einem Abstand von 10 mm Stabweite alle Aale, die größer als 33 cm Länge erreicht haben, vor der Turbinenpassage geschützt sein (Adam 2005). Im Falle dieser Studie war der kleinste Aal 60 cm lang, so dass also keiner der besetzten Aale durch die Rechen gelangen konnte.

Die Mortalität, die dennoch durch die Passage des Kraftwerksstandorts ermittelt wurde, kann hier nur als ein Bereich zwischen einem minimalen und einem maximalen Wert angegeben werden (0-4% in 2014/15 und 0-8% in 2015/16). Der Grund dafür ist, dass das Schicksal einiger Aale nach Kraftwerkspassage nicht genau geklärt werden konnte und es daher nicht möglich war, endgültig zu entscheiden, ob die betreffenden Fische nach der Passage tot oder am Leben waren. Weiterhin gab es 3 Individuen, bei denen die aufgezeichneten Bewegungen des Senders darauf hinwiesen, dass sie von Vögeln erbeutet wurden. Es konnte jedoch nicht festgestellt werden, ob sie bereits tot waren, bevor sie von den Vögeln gefressen wurden, ob sie aufgrund der Kraftwerkspassage verletzt waren und darum von Vögeln erbeutet werden konnten oder ob sie die Passage unbeschadet überstanden haben und trotzdem von Vögeln erbeutet worden sind. In letzterem Falle wäre der Verlust des Aals nicht dem Kraftwerk zuzurechnen. Dadurch dass die Gesamtmortalität als eine Spannweite angegeben wird, wird dieser Ungewissheit Rechnung getragen. Dies impliziert, dass in beiden Jahren keinerlei Mortalität aufgetreten sein könnte, aber auch, dass die Verluste, die durch den Betrieb der Wasserkraftanlage verursacht wurden, bis zu 4% im ersten und 8% im zweiten Jahr betragen haben könnten.

Sollten wasserkraftbedingte Verluste aufgetreten sein, müssen diese durch Verletzungen, die die Aale bei der Passage der Bypässe oder der weiteren Wanderwege erlitten haben, entstanden sein. Es ist weiterhin auch möglich, dass es im Bereich der Wasserkraftanlage zu erhöhter Prädation der Aale durch beispielsweise Vögel gekommen ist. Eine erhöhte Prädation kann zum einen auftreten, wenn die Fische an der Anlage verletzt wurden und sie somit zu leichter Beute werden. Zum anderen könnten potentiell verletzte oder auch desorientierte Fische, die leichte Beute sind, vermehrt Prädatoren anlocken, so dass der Prädationsdruck durch eine erhöhte Räuberichte auch für nach der Passage unverletzte Individuen ansteigt. Im Bereich des Untersuchungsgebietes gibt es beispielsweise Kolonien des Kormorans (*Phalacrocorax carbo*), von denen bekannt ist, dass sie auch größere Individuen des Aals erfolgreich erbeuten können. Eine irische Studie zeigte, dass Kormorane unterhalb eines Wasserkraftwerks Aale bis zu einer Länge von 90 cm jagten. Diese Studie zeigte auch, dass sowohl unversehrte als auch verletzte Aale erbeutet wurden. (Doherty & McCarthy 1997).

Die Aale in dieser Studie nutzten überwiegend die Wanderwege mit dem größten Abflussanteil, die Wehrklappe und die Oberflächenbypässe an den Rechen. Nur insgesamt zwei Aale wanderten über die Aalrohre ab (verblieben jedoch nicht in den Monitoringbecken) und ein kleinerer Anteil der Aale (<10%) nutzte die BottomGallery. Fische, die über die Wehrklappe abwandern, laufen Gefahr bei der Wanderung verletzt zu werden, da sie auf Hindernisse im Abstrom auftreffen können, nachdem sie

über das Wehr gespült wurden. Es gab jedoch keinerlei Hinweise darauf, dass die Verluste bei Aalen, die über die Wehrklappe abwanderten, höher waren als bei solchen, die die Oberflächenbypässe nutzten.

## **4.5 Ergänzende Untersuchungen im Herbst 2014 und 2015**

### **4.5.1 Fangmonitoring**

Wie auch schon bei den Lachs-Smolts im Frühjahr wurde die Telemetriestudie auch für die Aale an der Wasserkraftanlage Unkelmühledurch ein biologisches Monitoring ergänzt. Durchgeführt wurden die Untersuchungen von der Firma Limnoplan. Wiederum wurden hierfür die eigens dafür vorgesehene Monitoringeinrichtungen an der Anlage genutzt. Drei Bypässe (vertikal angeordnet Rohröffnungen) sowie die sogenannte BottomGallery ermöglichen den Aalen die Wasserkraftanlage zu umgehen. Bei der BottomGallery handelt es sich um einen halbrunden rohrartigen Unterschlupf, der über die ganze Breite des Turbinengrabens angebracht ist und durch den sich darin versteckende Aale aus dem Turbinengraben gespült werden können. Beide alternativen Abwanderwege mündeten jedoch nicht direkt in die Sieg, sondern in zugängliche Monitoringbecken, die es ermöglichen, gefangene Tiere zu erfassen und ein biologisches Monitoring (z.B. Erfassung von Länge, Gewicht, Allgemeinzustand) an zu schließen. Im Gegensatz zum Fangmonitoring im Frühjahr, dass nur eine zeitweise Erfassung der an den oberflächennahen Bypässen abgewanderten Fische erlaubte, wurde die abwandernden Fische im Herbst quantitativ erfasst, da die Abstiegswege nur in die Fangkammern münden und keine Verbindung zur Sieg vorgesehen war. Das Monitoring der Fangkammern der Aalrohre und der BottomGallery wurden im Jahr 2014 von 11. August bis 15. Dezember im Abstand von zwei bis drei Tagen durchgeführt. Im Jahr 2015 wurden die Kammern von 25. August bis 14. Dezember ebenfalls alle zwei bis drei Tage kontrolliert. Im Jahr 2014 wurden so 2.904 Individuen von 27 Fisch- und Rundmaularten gefangen. Davon waren 11 Aale, was einem Anteil von 0,4% entspricht. 8 der 11 Aale wurden in der Fangkammer der BottomGallery gefunden (2 davon waren mit Telemetriesendern versehene Tiere), die anderen 3 in den Fangkammern der Aalrohre.



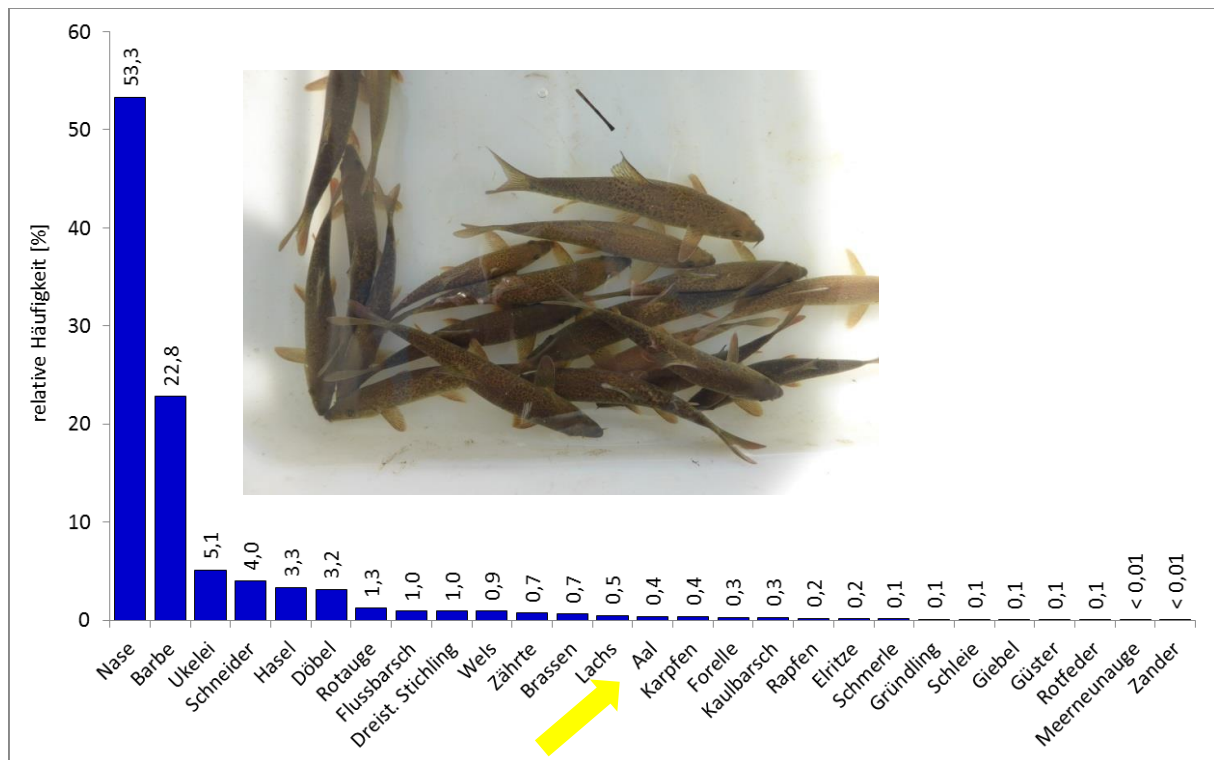


Abbildung 52: Relative Häufigkeiten der im Rahmen des Monitorings zur Aal-Abwanderung im Herbst 2014 (12.08-13.12.) nachgewiesenen Fisch- und Rundmaularten

Die häufigste nachgewiesene Art war die Nase (53 %) und die zweithäufigste Art die Barbe (23 %), die zusammen bereits 76 % des Gesamtfangs ausmachten. Klassische Wanderfischarten, wie Lachs, Aal und Meerneunauge hatten nur einen Anteil von ca. 1 %. Allerdings ist der Herbst im Gegensatz zum Frühjahr nicht die klassische Abwanderperiode für Lachsmolts. Die beiden den Gesamtfang dominierenden Cypriniden-Arten Nase und Barbe wurden sehr regelmäßig in größeren Stückzahlen gefangen. Hohe Fangzahlen waren jedoch nur bis Anfang Oktober zu verzeichnen, danach waren die Fangzahlen signifikant geringer (der Einbruch der Fangzahlen erfolgte, obwohl danach höhere Abflüsse mit deutlichen Abflussspitzen auftraten und bei Wassertemperaturen im Bereich von 12° C). Bei den Nasen handelte es überwiegend um kleine Individuen der Altersgruppe 0 (Größenklassen < 5 cm und >5-10 cm). Erst spät in der Saison ab ca. Mitte Oktober traten gehäuft auch größere Individuen der AG 1+ auf (Größenklasse >10-15 cm). Bei der Barbe dagegen wurden nahezu ausschließlich Individuen der AG 1+ (Größenklassen >10-15 cm und >15-20 cm) gefangen, somit scheint es bei der Barbe eine charakteristische herbstliche Abwanderung von subadulten Individuen der Altersgruppen 1+ und 2+ zu geben.

Der überwiegende Anteil der abwandernden Fische befand sich im Juvenilstadium (Größenklasse bis 20 cm). Nur etwa 2 % der gefangenen Fische hatten eine Körperlänge von mehr als 20 cm. Bei den größeren Fischen handelte es sich fast ausschließlich um Aale; andere Arten in den entsprechenden Größenklassen dürften größtenteils zu hochrückig gewesen sein, um die Rohre zu den Fangkammern passieren zu können.

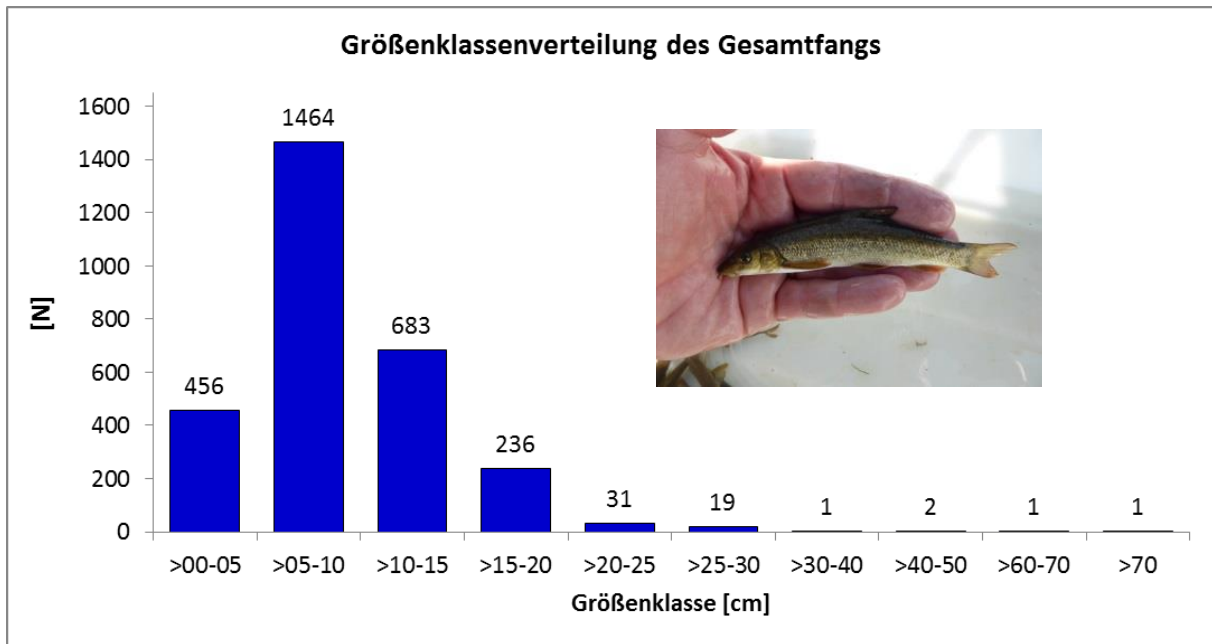


Abbildung 53: Größenverteilung der im Fangmonitoring im Herbst nachgewiesenen abwandernden Fische

Die Aufteilung der gefangenen Fischarten auf die angebotenen Abstiegswege war nicht homogen (Abb. 54). Arten, wie Schneider, Barbe und Aal wurden überwiegend in der BottomGallery nachgewiesen. Während die abwandernden Junglachse, aber auch Döbel, Hasel und Nase überwiegend über die seitlich in der Turbinenkammer 3 angebrachten Aalrohre abgewandert sind. Dabei hatte das in mittlerer Wassertiefe angebrachte Aalrohr für die Cyprinidenarten die größte Attraktivität. Daraus lässt sich aber nicht zuverlässig auf den bevorzugten Abwanderhorizont einzelner Arten schließen, wie das Beispiel der Aale zeigt. Die überwiegende Mehrzahl der besenderten Aale ist oberflächennah abgestiegen, über die geöffnete Wehrklappe oder über die Geschwemmselrinne. Im Herbst fand kein zeitgleiches Fangmonitoring an den oberflächennahen Bypässen statt.

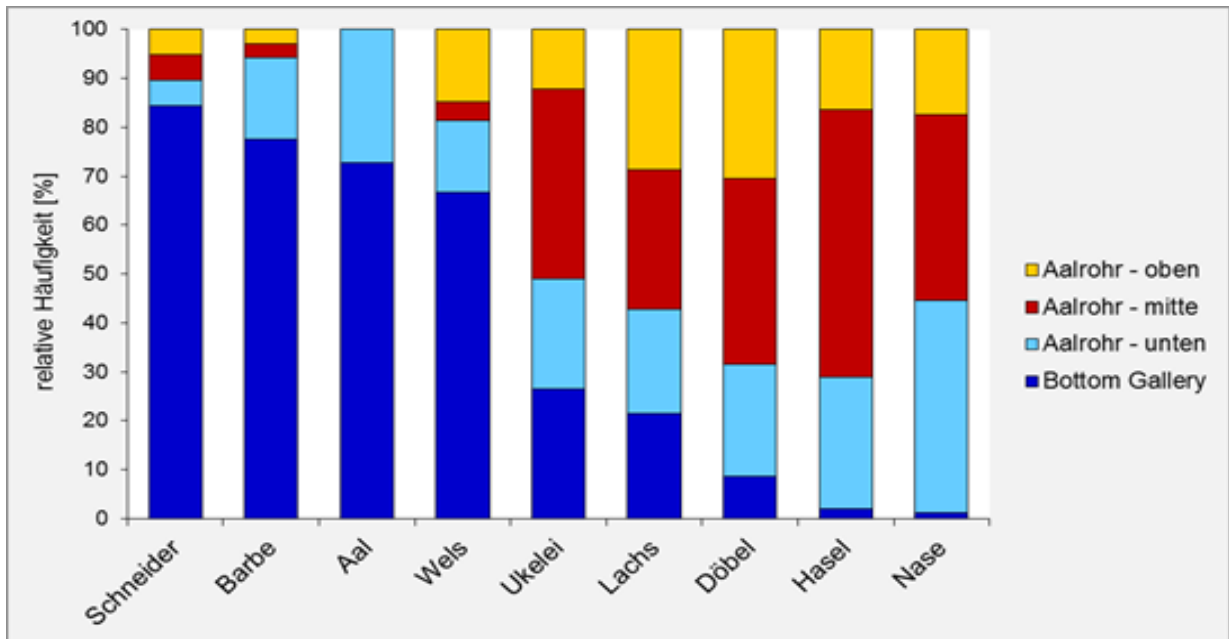


Abbildung 54: Verteilung der häufigsten nachgewiesenen Fischarten auf die Wanderwege.

Im Jahr 2015 wurden im Monitoring 5.905 Individuen von 28 Fisch- und Rundmaularten erfasst, davon 106 Aale (1,8%). Nur 3 dieser Aale nutzten die Aalrohre als Wanderweg, alle Übrigen konnten der BottomGallery zugeordnet werden. 8 der 103 Aale in der Fangkammer der BottomGallery waren besenderte Aale aus der Telemetriestudie.

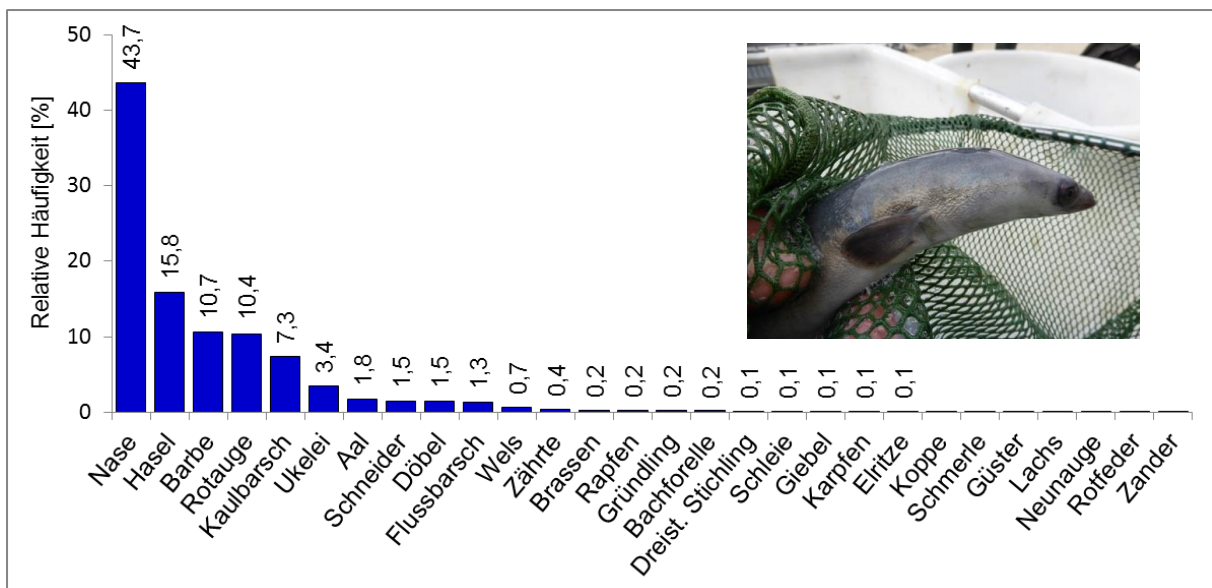


Abbildung 55: Verteilung der Fischarten im Fangmonitoring im Herbst 2015.

Die häufigste, nachgewiesene Art war im Herbst 2015 erneut die Nase (44 %), an zweiter Stelle trat der Hasel (16 %) auf und an die dritte Stelle rückte die Barbe (11 %). Zusammen erreichten diese drei Arten bereits über 70 % des Gesamtfangs. Obwohl deutlich mehr Aale als 2014 nachgewiesen werden konnten, erreicht ihr Anteil am Gesamtfang nur knapp 2 %. Wie 2014 wurde die Herbstabwanderung von potamodromen Fischarten dominiert. Dabei handelte es sich zum

überwiegenden Teil um Fische der Altersklasse 0+, da der Anteil von Fischen zwischen 0-10 cm über 80 % aller nachgewiesenen Individuen betrug.

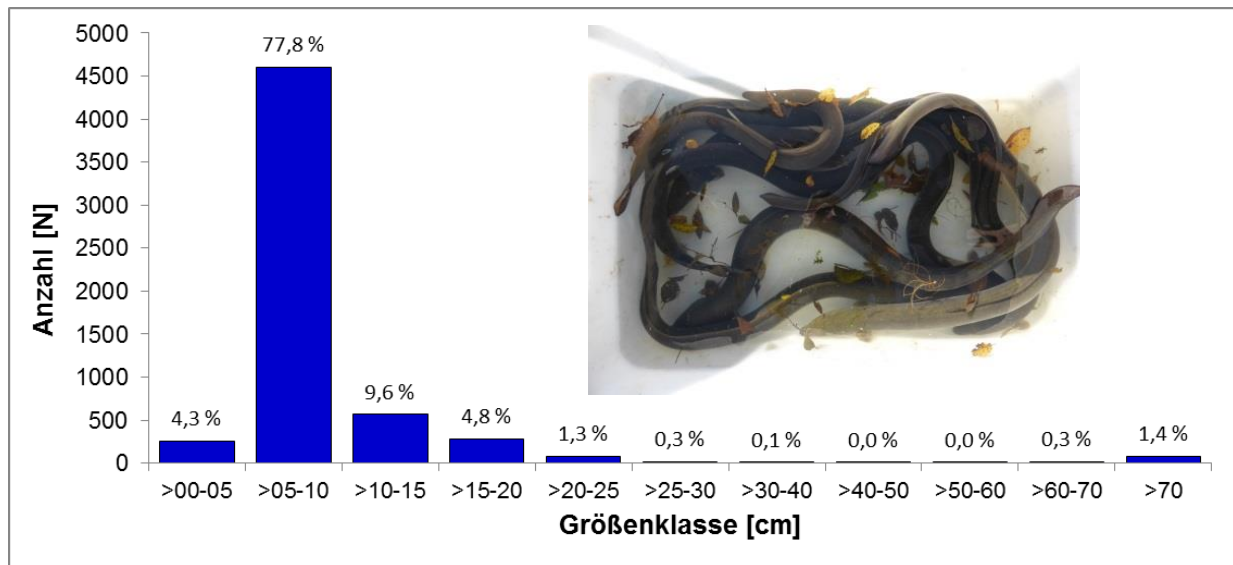


Abbildung 56: Größenverteilung der nachgewiesenen Fischarten im Fangmonitoring Herbst 2015.

In den zwei Untersuchungskampagnen im Herbst 2014 und 2015 wurden insgesamt 8.809 Fische aus 28 Fisch- bzw. Rundmalarten nachgewiesen. Die potamodromen Arten Nase, Barbe und Hasel stellten mit 73 % den Hauptanteil am Gesamtfang. Dagegen bedeuteten 117 Aale einen Fanganteil von 1,3 % des Gesamtfangs.

Weitere Ergebnisse und Details zu dem durchgeführten Monitoring sind den Berichten „Kontrolle der Monitoringeinrichtungen an der Pilotanlage Unkelmühle (Sieg) - Aal-Abwanderung im Herbst 2014“ (Staas et al. 2014b) und „Kontrolle der Monitoringeinrichtungen an der Pilotanlage Unkelmühle (Sieg) - Aal-Abwanderung im Herbst 2015“ der Firma Limnoplan zu entnehmen (Staas et al. 2015b).

#### 4.5.2 Untersuchungen zum kleinräumigen Verhalten abwandernder Aale

Im Herbst 2015 wurden im Rahmen der Masterarbeit von Florian Kreische (Kreische 2015) an der Universität zu Köln Untersuchungen zum Abwanderverhalten der besetzten Aale durchgeführt. Weiterhin wurde die Effizienz der angewandten manuellen Mitverfolgung wissenschaftlich überprüft, sowie die Einteilung der Wanderbereitschaft eines Aales anhand des morphometrisch basierten „silver index“ kritisch hinterfragt. Kreische (2015) konnte zeigen, dass die Methode der manuellen Mitverfolgung mittels tragbaren Empfängereinheiten, die über die gesamte Zeit der Untersuchungen an der Unkelmühle eingesetzt wurde, als sehr geeignet anzusehen ist für die Erfassung auch kleinräumiger Abwanderbewegungen und Verhaltensweisen. So konnten insgesamt 96% der besetzten Aale an mindestens einem Tracking erfasst werden. Es konnten Aussagen über die Wandergeschwindigkeit, den genauen Zeitpunkt der Wanderung und das individuelle Wanderverhalten, wie beispielsweise Orte an denen Aale pausieren oder den „home range“ (Radius in dem sie sich bewegen, ohne eine Wanderung anzutreten) der Individuen, gemacht werden. Detaillierte Analysen der aufgezeichneten Bewegungen ergaben, dass die besetzten Aale in den meisten Fällen in der Nähe der Besatzstelle verharren und auf geeignete Bedingungen warten ehe sie

ihre Wanderung antreten. Solche Bedingungen waren mit steigendem Abfluss bei Hochwasserereignissen, insbesondere im Anschluss an Trockenperioden gegeben. Anhand des Aussehens wurden die Aale als abwanderwillige Blankaale klassifiziert und zum Besatz verwendet. Eine Klassifizierung ist grundsätzlich auch anhand verschiedener zu berechnender Indices möglich, die auf morphologischen Merkmalen (z.B. Augengröße) basieren. Diese können aus Zeitgründen jedoch nicht im Feld verwendet werden, da die Markierung möglichst schnell vorzustattengehen und das Handling der Fische minimal gehalten werden sollte. Im Nachhinein wurden diese Indices, darunter der „silver index“, jedoch für jeden besetzten Aal kalkuliert. Rund 72% der besetzten Aale wurden auch anhand des „silver index“ als Blankaale eingestuft (ein Wert, der im Vergleich mit anderen Studien als gut einzustufen ist). Einige Aale, von denen die meisten anhand des „silver index“ als Gelbaale klassifiziert wurden, zeigten anstatt einer zielstrebigem Abwanderung auch flussaufwärtsgerichtete Bewegungen. Neben diesen „Wandertypen“, Gelbaalen und abwandernden Aalen, die mit einem Hochwasserereignis innerhalb kurzer Zeit aus dem Untersuchungsgebiet verschwanden, gab es auch noch einen dritten Typ. Diese Aale vollzogen diskontinuierliche flussabgerichtete Wanderbewegungen mit Pausen variierender Dauer zwischen aktiven Wanderphasen. Weitere Details zu den Ergebnissen finden sich in der Masterarbeit „Downstream migratory behavior of European Eel (*Anguilla anguilla*) in the River Sieg“ (Kreische 2015).

## 5 Fazit (inkl. Bewertung der Zielerreichung)

### 5.1 Fazit zum betrieblichen Monitoring

Bezogen auf die vertragliche Zielerreichungsmatrix (Abbildung 1) führen die ersten beiden Jahre des Monitoringzeitraums zu einem „akzeptablen Ergebnis“, das dritte Jahr zu einem „bestmöglichen Ergebnis“ bezogen auf den Ertrag der Pilotanlage.

Eine weitergehende Bewertung ist nicht möglich, da die eingesetzte Technik (Rechenreinigungsmaschinen) gegenwärtig noch nicht, wie technisch für die Anlage ausgelegt, funktioniert. Bei der Planung einer solchen Anlage ist eine enge Abstimmung zwischen dem Anlagenbetreiber, der das betriebliche und standortbezogene Know-how einbringen kann, und der Genehmigungsbehörde herbeizuführen, damit Planungsfehler vermieden werden können. Im Betrieb der Pilotanlage ist es gelungen, durch enge Absprache zwischen dem Betreiber und dem Land NRW zu wichtigen betriebstechnischen Nachbesserungen zu kommen. Insbesondere hat sich gezeigt, dass der Rechen mit dem Tropfenprofil besser geeignet ist als das Y-Profil. Durch eine Nachrüstung des Rechens vor der mittleren Turbine ist es daher gelungen, die beobachteten Erzeugungsverluste zu reduzieren und das Ergebnis der Anlage im 3. Betriebsjahr zu verbessern („bestmögliches Ergebnis“).

Die eingesetzten 10 mm Rechenprofile (problematisch waren die nach vorne gezogenen Abstandshalter) in Unkelmühle sind gemäß Zielerreichungsmatrix für die Pilotanlage erfolgreich. Diese Feststellung kann aber nicht ohne weiteres auf größere Kraftwerksstandorte (größerer Volumendurchfluss pro Maschine bzw. pro Rechenfeld oder größere Wassertiefen und Rechenlängen) projiziert werden. Die Rechenreinigungsmaschinen sind in Unkelmühle bei einem maximalen Durchfluss je Maschine und Rechenfeld von 6 bzw. zweimal 10,5 m<sup>3</sup>/s bereits jetzt bei Abflussspitzen im Dauereinsatz. Bei größeren Anlagen sind die Rechenflächen größer, wodurch eine Reinigung entsprechend länger dauern würde, und die Gefahr bestünde, dass sich in dieser Zeit der Rechen entsprechend verlegt. Hier muss weitere Entwicklungsarbeit geleistet werden.

Die Turbineneinlaufschütze sind, wie in Unkelmühle geschehen, vor den Rechen anzuordnen, damit der Aufwand zur manuellen Reinigung oder für notwendige Reparaturen nicht zu groß ausfällt. Wären die Turbineneinlaufschütze hinter den Rechen angeordnet gewesen, hätten entweder Taucher den Rechen reinigen oder der komplette Einlaufgraben trockengelegt werden müssen.

### 5.2 Fazit zur Schutzwirkung des Feinrechens

Als ein bedeutendes Ergebnis der biologischen Erfolgskontrolle ist festzuhalten, dass weder die mit einem Sender markierten Blankaale noch die markierten Lachssmolts den 10 mm Feinrechen passiert haben. Dieser bietet für die getesteten Fischgrößen (ab ca. 13 cm Totallänge für Lachssmolts, Aale ab 60 cm Totallänge\*) einen 100 % wirksamen Fischschutz vor einer Turbinenpassage.

Von den in den sohnahen Abstiegssystemen in Summe gefangenen ca. 9.000 Individuen hatten ca. 76% und von in der oberflächennahen Spülrinne in Summe gefangenen ca. 1.360 Individuen der Beifangarten (ohne Lachssmolts) ca. 69% eine Länge kleiner 10 cm. Daraus könnte vermutet werden, dass der 10 mm Rechen nicht nur als physische Barriere sondern in Kombination mit der flachen Neigung und der moderaten Anströmgeschwindigkeit auch als Verhaltensbarriere für Fische wirkt, die physisch in der Lage wären, den Rechen zu passieren. Ob und zu welchem Anteil dieser Effekt

Fische kleiner 10 cm vor der Rechenpassage schützen kann, ist allein aus den Fangzahlen nicht abzuleiten, da die Gesamtheit anwesender Fische dieser Größenklasse im Einlaufbereich der Wasserkraftanlage und ihre schlussendliche Verteilung auf die anderen vorhandenen Abwanderwege (inkl. Turbinenpassage) unbekannt bleiben musste.

### 5.3 Fazit Smoltabwanderung

Die Beurteilung der Lachsabwanderung an der Pilotanlage Unkelmühle zeigt im Vergleich zur Aalabwanderung ein komplexeres Bild, das sowohl in der Biologie als auch in der unterschiedlichen Abflusssituation zwischen den Jahren begründet liegt. Im Rückstau, der am Standort Unkelmühle eine Länge von 2,2 km Länge aufweist, wurde in allen drei Jahren ein im Vergleich zur frei fließenden, oberhalb gelegenen Referenzstrecke deutlich erhöhter Verlust abwandernder Lachssmolts ermittelt (Kap. 4, Tab. 5). Dieser im strukturarmen und tiefen Rückstau festgestellte Verlust wird bei der Berechnung der Schutzrate der Lachse der Pilotanlage nicht berücksichtigt, da er an einem Stauwehr ohne Wasserkraftnutzung grundsätzlich in ähnlicher Größenordnung auftreten würde.<sup>1</sup>

In der ersten Abwandersaison im Frühjahr 2014 erfolgte die Erfassung abwandernder Lachse aus technischen Gründen nur bis unmittelbar unterhalb der Pilotanlage Unkelmühle. So konnte eine im Zusammenhang mit der Passage der Wasserkraftanlage stehende mögliche Schädigung oder Mortalität abwandernder Lachssmolts im Unterwasser der Pilotanlage nicht erfasst werden (in der Literatur sogenannte „verzögerte Mortalität“).<sup>2</sup>

Wenn man bei der Bewertung der Pilotanlage nur die Abwanderung im unmittelbaren Umfeld der Pilotanlage berücksichtigt, so ergeben sich die in der Abbildung 57 dargestellten Schutzraten zwischen 90,1 % (2014), 96,4 % (2015) und 97,1 % (2016). Dies bedeutet für zwei der drei untersuchten Jahre ein „akzeptables Ergebnis“ gemäß der Zielerreichungsmatrix für die Pilotanlage. Im Handbuch Querbauwerke werden 95 % als optimale Schutzrate angegeben. Das Ergebnis in 2014 lag im Bereich „Anpassung notwendig“. Im Frühjahr 2014 traten Probleme mit der Abfuhr des Geschwemmsels von der Rinne in das Mutterbett der Sieg auf, da der in diesem Bereich verlaufende Fischeaufstieg bei erhöhten Unterwasserständen zu einem „Tauchwandeffekt“ führte, so dass Geschwemmsel am Fuße der Abstiegsrinne akkumulierte und zeitweise eine Barriere für abwandernde Smolts bildete. Diese Problematik konnte 2015 und 2016 entschärft werden, da mit dem zeitlich begrenzten Öffnen des Geschiebeschützes und dem dabei erzeugten Wasserstrom solche Ansammlungen in das Mutterbett abgeführt werden konnten.

---

<sup>1</sup> Dennoch ist ein solcher Verlust, der in der anthropogenen Veränderung des Lebensraums „Fließgewässer“ begründet liegt, grundsätzlich bei der Beurteilung der Abwandersituation in einem durch Rückstau geprägten Fließgewässersystem für den Lebenszyklus des Lachses bedeutsam.

<sup>2</sup> Die Erfassung von mit einem Sender markierten toten Lachssmolts, die unmittelbar im Unterwasser der Anlage ausgesetzt wurden, in maximal 2 km Entfernung unterhalb der Wasserkraftanlage, bestätigt die Möglichkeit, dass bei der Passage der Anlage geschädigte oder getötete Individuen über eine geraume Distanz in der Fließstrecke unterhalb verdriftet werden können. Dieser Sachverhalt wurde allerdings erst in den Frühjahren 2015 und 2016 zusätzlich mitbetrachtet und erfasst.

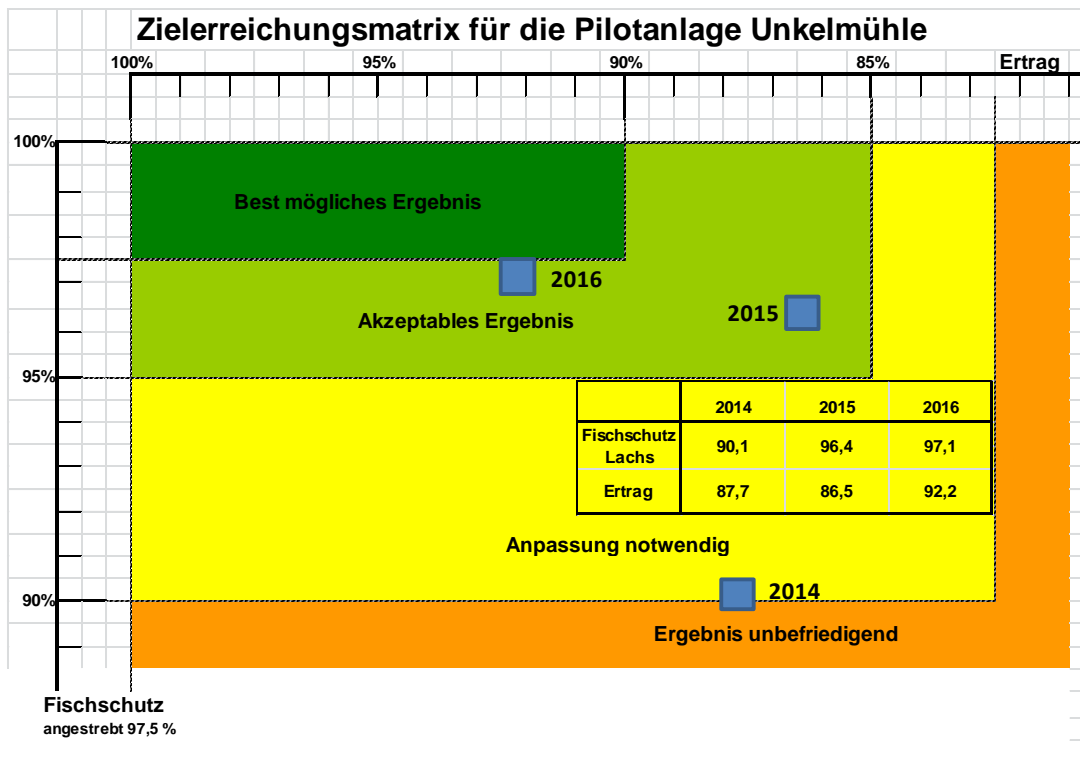


Abbildung 57: Darstellung der Schutzraten (blaue Quadrate) für abwandernde Lachssmolts 2014 - 2016 (ohne „verzögerte Mortalität“, siehe Erläuterung im Text)

Bei der Aufstellung der Zielerreichungsmatrix stand weder fest, mit welcher Methode das biologische Monitoring durchgeführt wird, noch wurde die Möglichkeit einer „verzögerten“ Mortalität einbezogen. Mit dem Einsatz weiterer Empfangsstationen für Sender im Unterwasser gelang die Erfassung dieses Faktors in 2015 und 2016. In 2015 wurde ein deutlicher Anstieg der Verluste nach der Passage der Wasserkraftanlage auf knapp 13 % registriert, so dass die Schutzrate nur noch 87 % erreichte. Im Frühjahr 2016, das im Vergleich zu 2015 durch höhere Abflüsse gekennzeichnet war, trat dagegen keine zusätzliche (verzögerte) Mortalität auf und die Schutzrate für die Lachssmolts blieb damit bei 97,1 %. Damit wurde 2016 ein sehr gutes, in der Zielerreichungsmatrix als „akzeptables“ klassifiziertes Ergebnis für die Pilotanlage erreicht (Abb. 58).

Die Ursache liegt nach Aussage der Wissenschaftler höchstwahrscheinlich in den unterschiedlichen Abflüssen der beiden Frühjahre begründet. In 2015 lag der Abfluss während der untersuchten Wanderperiode deutlich unter Mittelwasser, während 2016 ein mittleres Hochwasser mit einem mehrtägigen Abfluss über die geöffnete Wehrklappe erfolgte. Diese Situation führte zu einer deutlichen Erhöhung der Wandergeschwindigkeiten an der Anlage und im Unterwasser im Vergleich zu den Vorjahren (siehe Kap. 4.2.4), und einem häufig schnellen Abstieg von Smolts über die Wehrklappe. Die dagegen in 2015 auftretende Verzögerung und Desorientierung der Fische im Unterwasser könnte u.a. zu einer erhöhten Mortalität durch fischfressende Tiere geführt haben. Die verlangsamte Abwanderung könnte zusätzlich die Kontaktzeiten zu Fressfeinden erhöht und das Prädationsrisiko somit verstärkt haben. In 2016 hingegen blieben die Verzögerung sowie das Risiko aufgrund günstiger Abflussverhältnisse im Bereich der Wasserkraftanlage vermutlich weitgehend aus.



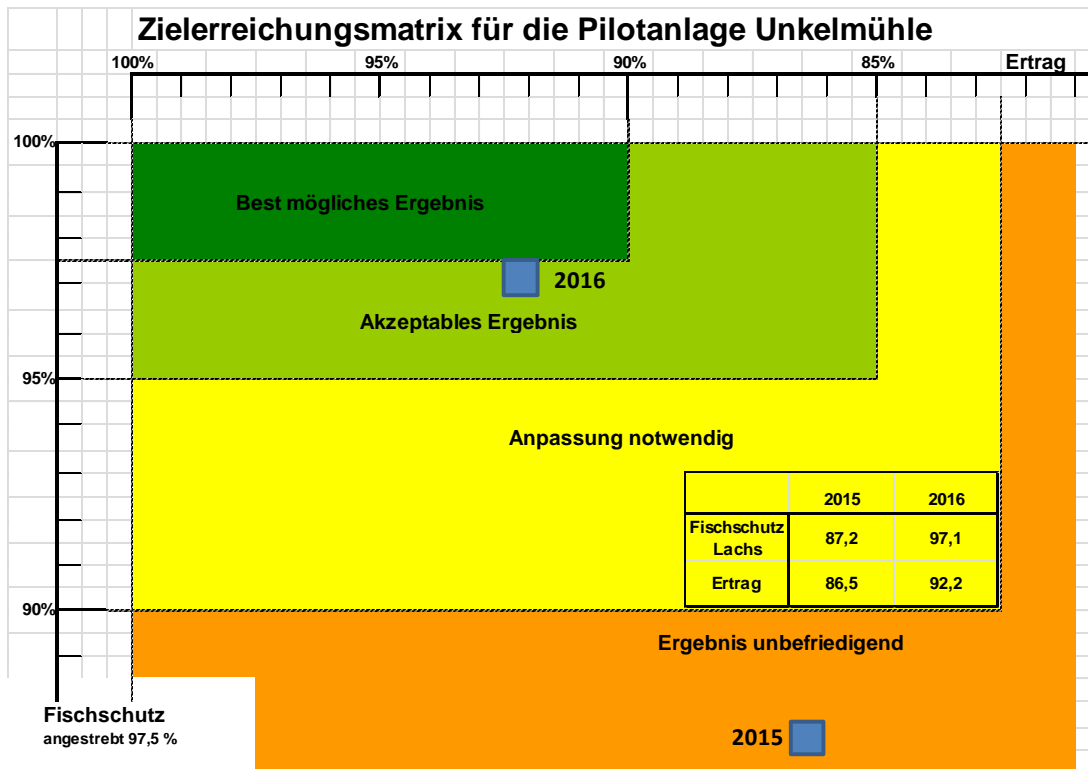


Abbildung 58: Darstellung der Schutzraten (graue blaue Quadrate) für abwandernde Lachssmolts 2015 und 2016 (unter Einbeziehung der „verzögerten Mortalität“, siehe Erläuterung im Text)

#### 5.4 Fazit Blankaalabwanderung

Für die Blankaale liegen die Ergebnisse nur in einer Spanne vor. Der Anteil ausgesetzter Aale, die an der Anlage erfolgreich abgewandert sind, betrug in der Wandersaison 2014/2015 zwischen 96 und 100 % und in der Saison 2015/2016 zwischen 92 und 100 %. Aufgrund der, in der wissenschaftlichen Literatur beschriebenen Fähigkeit der Blankaale, ihre Abwanderung ggf. für die Dauer mehrerer Monate zu unterbrechen und anschließend wieder erfolgreich fortsetzen zu können, kann die Schutzrate nicht genauer eingegrenzt werden, da die Batterielaufzeit der verwendeten Sender limitiert ist. Dies bedeutet, dass mit der gleichen Wahrscheinlichkeit in der Saison 2014/15 mindestens 96 % und maximal 100 % der Blankaale erfolgreich abgewandert sind.

Das Ergebnis ist hinsichtlich Fischschutz und Stromertrag als akzeptabel einzuordnen, da der Stromertrag der Wasserkraftanlage im Untersuchungszeitraum (2014/15) nur bei 86,4 % lag. Der Fischschutz erfüllt mit über 95 % die im Handbuch Querbauwerke formulierten Anforderungen für Zielartengewässer. In der Folgesaison 2015/16 ist die Spanne mit 92-100 % größer ausgefallen. Da der Stromertrag der Anlage im gleichen Zeitraum bei über 92 % lag, ist die Schutzrate der Aale zwischen „bestmöglichem“, „akzeptablem Ergebnis“ und „Anpassung nötig“ einzuordnen (siehe Abb. 59). Die größere Spanne kann bedeuten, dass mehr Aale ihre Abwanderung für eine Saison unterbrochen haben, und somit nicht eindeutig klassifizierbar sind, oder aber, dass es eine Schädigung von bis zu 8 % der abwandernden Blankaalen gegeben haben könnte. In diesem ungünstigen Falle hätte dies in der Beurteilung eine Anpassung der Wasserkraftanlage und Verbesserung des Fischschutzes und Abstiegs zur Folge. Dazu gibt es zwischen Land NRW und innogy

SE entsprechende Überlegungen, die mit der geringen Nutzung der „Bottom Gallery“ durch die telemetrierten Aale zusammenhängen.

Die BottomGallery als sohnaher Abstiegsweg wurde von telemetrierten Blankaalen im ersten Jahr kaum und im zweiten Jahr zwar intensiver genutzt, jedoch im Vergleich zum Abstieg über das Wehr und die Spülrinne als Oberflächenbypass vergleichsweise selten. Bei diesen Ergebnissen ist hinsichtlich der Wirksamkeit der BottomGallery zu bedenken, dass an der Unkelmühle diese gleichzeitig mit einem sehr flach zur Sohle geneigten Rechen betrieben wird. Die erwartete Funktionalität der BottomGallery beruht auf Beobachtungen aus Laborversuchen, bei denen abwandernde Blankaale bei der Annäherung an ein Hindernis umkehrten und sohnah stromaufschwammen. Es ist zu vermuten, dass bei einem so flach geneigten Rechen wie an der Unkelmühle diese Umkehrreaktion weniger ausgeprägt stattfindet als an einem vertikal steiler geneigten Rechen und in den Untersuchungen der Abstieg über die Spülrinne darum häufiger genutzt wurde als die sohnah BottomGallery. Die Ergebnisse können entsprechend nur für den Standort bzw. bei gleichzeitiger Anwesenheit eines flach geneigten Rechens Gültigkeit haben, so dass zukünftig an der Wasserkraftanlage Unkelmühle auf den Betrieb der Bottom Gallery verzichtet werden kann, und den Blankaalen im Herbst die vorhandenen oberflächennahen Bypässe als Abstiegsweg geöffnet werden sollen.

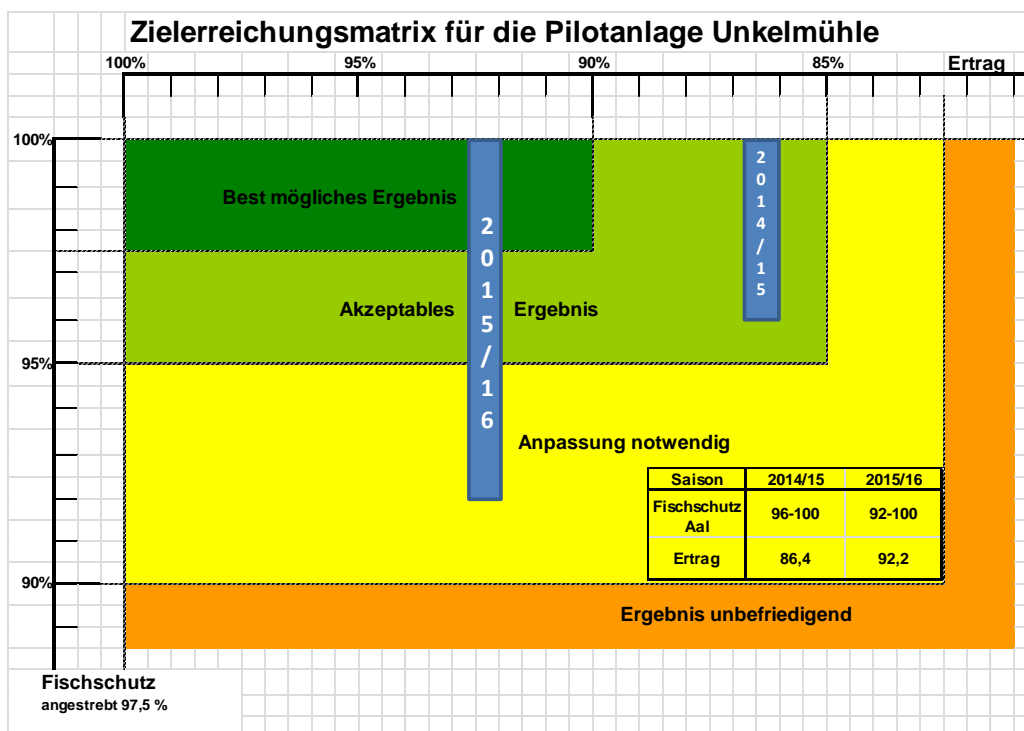


Abbildung 59: Darstellung der Schutzzaten (Spanne grau blau hinterlegt) für Blankaale in den Abwandersaisons 2014/15 und 2015/16

## 6 Ausblick und Empfehlungen

Die mit Hilfe der Radiotelemetrie ermittelten Schutzraten für abwandernde Blankaale und Lachssmolts zeigen ein grundsätzlich positives Bild der Pilotanlage Unkelmühle. Der eingebaute Feinrechen bewirkt einen 100 % wirksamen Schutz vor der Turbinenpassage. Die im Herbst abwandernden Blankaale nutzen an der Sieg Abflussspitzen, um mit dem Hauptstrom des Wassers über das Wehr abzuwandern. Die Individuen, die in den Obergraben einwandern, nutzen hauptsächlich die Oberflächenbypässe und wandern erfolgreich ab, so dass insgesamt sehr zufriedenstellende, hohe Schutzraten erreicht werden können. Es hat sich dabei herausgestellt, dass für die Aale eine Abwanderung am flach geneigten Vertikalrechen entlang in die oberflächennahen Bypässe attraktiver ist, als die Abwanderung über die seitlich angebrachten Aalrohre oder die grundnah verlaufende Bottom Gallery. Daher soll zukünftig in der herbstlichen Wanderperiode die für diese Wege bislang verfügbare Wassermenge (Dotierung) für den Betrieb der oberflächennahen Bypässe zur Verfügung stehen, während die seitlichen Rohre sowie die Bottom Gallery verschlossen bzw. rückgebaut werden können. Dadurch kann voraussichtlich von einer zügigeren Abwanderung der in den Turbinenobergraben eingewanderten Blankaale ausgegangen werden. Ergebnisse aus den ergänzenden Untersuchungen bestehend aus Videoaufzeichnungen, akustischen und hydraulischen Messungen zeigen, dass die Tiefe der Bypassöffnungen ein bedeutender Faktor sein könnte, da sich die akustischen Bedingungen sowie das Strömungsbild mit zunehmender Tiefe der Öffnungen verändern, was zu erhöhter Wahrnehmbarkeit der Öffnung für Fische und somit zu einer besseren Nutzung als Abwanderweg führen könnte.

Bei den Schutzraten für abwandernde Lachssmolts zeigt sich ein deutlich heterogenes Bild, das u.a. von den Abflussbedingungen mitbestimmt wird. Die Schutzrate direkt an der Pilotanlage von 90 % in 2014 ließ sich durch ein angepasstes Geschwemmselmanagement in den Folgejahren 2015 (96 %) und 2016 (97 %) deutlich steigern. Um diesen Effekt zu verstetigen soll bei dem Rückbau der nicht mehr benötigten Monitoringeinrichtungen auch die Abstiegsrinne, die die Fische zurück zur Sieg führt, strömungstechnisch so verbessert werden, dass eine Ansammlung von Geschwemmsel im unteren Teil möglichst vermieden wird.

Ein Problem besteht offensichtlich mit dem Auftreten einer „verzögerten“ Mortalität in abflussschwachen Wanderperioden des Lachses (2015). Hierbei kommt es zu einer Verzögerung der Fische, die nicht über den Hauptwasserstrom, sondern über die Oberflächenbypässe und die Geschwemmselrinne ins abflussarme Mutterbett der Sieg geleitet werden. Dort kann es zu einem längeren Aufenthalt der Fische kommen, bevor diese ihre Abwanderung fortsetzen. Neben dem damit verbundenen Zeitverlust ist möglicherweise eine erhöhte Prädation der Fische im Unterwasser die mittelbare Folge.

Für die Optimierung des Fischschutzes und des Abstiegs an Wasserkraftanlagen wäre es daher in Zukunft sinnvoll, die über die Oberflächenbypässe abwandernden Smolts an geeigneter Stelle in den Untergraben der Wasserkraftanlage zurückzuführen, damit diese die Strömungssignatur aufnehmen und ihre Wanderung im Hauptstrom unmittelbar fortsetzen können. Dies würde vermutlich der Abwandersituation mit hohen Abflüssen, wie in 2016 an der Pilotanlage Unkelmühle, entsprechen, an der keine „verzögerte“ Mortalität im Unterwasser festgestellt wurde.

Bei den Telemetrie-Untersuchungen mit Lachssmolts ergaben sich im Vergleich zur freifließenden Referenzstrecke besonders in den abflussschwachen Jahren erhöhte Verluste im Staubereich. Die

höhere Dichte an Prädatoren liegt möglicherweise zum einen in der aus dem Stau resultierende veränderten Morphologie des Gewässers begründet, andererseits könnte der aktive Besatz von Raubfischen in die Sieg eine Rolle spielen. Der Anteil dieser beiden Effekte an den höheren Verlusten ist bisher unbekannt. Neben dem weiteren Forschungsbedarf zu den Effekten in Staubereichen könnten gezielte Bewirtschaftungsmaßnahmen in diesen Bereichen die Bemühungen zur Wiederansiedlung des Lachses unterstützen.

Auch hinsichtlich der technischen Einrichtungen für den Fischschutz, Abstieg und die damit verbundenen Energieerzeugungsverluste kann die Pilotanlage als erfolgreich eingestuft werden (siehe Zielmatrix in Abb. 57-59). Allerdings bedurfte es des Wechsels eines Rechenfeldes und weiterer technischer Anpassungen, um das Ergebnis signifikant zu verbessern. Es gilt beispielsweise noch die aufgetretenen spezifischen Mängel der Rechenreinigungsmaschinen zu überwinden. Die starke Besiedlung des Flusses Sieg mit Makrophyten (z.B. durch den flutenden Hahnenfuß) bedeutet eine für den störungsfreien Betrieb und damit auch für den Fischschutz der Anlage große Herausforderung.

Der Charakter und das Konzept der Pilotanlage haben sich nach gemeinsamer Auffassung der innogy SE und des Landes NRW bewährt, da für den Umbau und den Betrieb von bestehenden Wasserkraftanlagen in Zielartengewässern des Aales und des Lachses wichtige betriebstechnische Erfahrungen und fischökologische Erkenntnisse gewonnen werden konnten. Das umfangreiche biologische und betriebliche Monitoring hat dazu beigetragen, bestehende Probleme zu erkennen, und weitgehend, im Kontext der baulichen und betrieblichen Grenzen einer Bestandsanlage, zeitnah zu beheben.

## 7 Literaturverzeichnis

- Aarestrup, K., Jepsen, N., Rasmussen, G. & Økland, F. 1999. Movements of two strains of radio tagged Atlantic salmon, *Salmo salar* L., smolts through a reservoir. Fisheries Management and Ecology 6: 97-107.
- Adam, B., Bosse, R., Dumont, U., Haddingh, R., Joergensen, L., Kalusa, B., Lehmann, G., Pischel, R. & Schwevers, U. 2005. Fish protection technologies and downstream fishways. Dimensioning, design, effectiveness inspection. DWA German Association for Water, Wastewater and Waste, Hennef, Deutschland.
- Borcherding, J. & Teichert, M. 2013. Monitoringkonzept WKA Pilotanlage Unkelmühle 2013-16. Konzepterstellung im Auftrag des Landesamtes für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV), University of Cologne, 44 pp.
- Dickert 2015. Video analysis of smolt behavior facing a surface bypass of the hydropower plant Unkelmühle. Bachelor Thesis University of Cologne, 56 pp.
- Doherty, D. & McCarthy, K. 1997. The population dynamics, foraging activities and diet of great cormorants (*Phalacrocorax carbo carbo* L.) in the vicinity of an Irish hydroelectricity generating station. *Supplemento alle Ricerche di Biologia della Selvaggina XXVI*: 133-143.
- Finstad, B., Økland, F., Thorstad, E.B., Bjørn, P.A. & McKinley, R.S. 2005. Migration of hatchery-reared Atlantic salmon and wild anadromous brown trout post-smolts in a Norwegian fjord system. *Journal of Fish Biology* 66: 86-96.
- Havn, T.B., Økland, F., Teichert, M.A.K., Heermann, L., Borcherding, J., Sæther, S.A., Tamberts, M., Diserud, O.H. & Thorstad, E.B. 2017. Movements of dead fish in rivers. *Animal Biotelemetry* 5:7
- Heermann, L., Teichert, M.A.K. & Borcherding, J. 2015. Vorläufiger Jahresbericht 2015 zum Projekt Monitoring an der Pilotanlage für Fischschutz und Abstieg Unkelmühle. Bericht, 22 pp.
- Heermann, L., Teichert, M.A.K. & Borcherding, J. 2016. Vorläufiger Jahresbericht 2015 zum Projekt Monitoring an der Pilotanlage für Fischschutz und Abstieg Unkelmühle. Bericht, 33 pp.
- Hvidsten, N. A. & Johnsen, B. O. 1997. Screening of descending Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) smolts from a hydropower intake in the river Orkla, Norway. *Nordic Journal of Freshwater Research* 73: 44-49.
- Jepsen, N., Aarestrup, K., Økland, F. & Rasmussen, G. 1998. Survival of radio-tagged Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) and trout (*Salmo trutta* L.) smolts passing a reservoir during seaward migration. *Hydrobiologia* 372: 347-353.
- Jepsen, N., S. Pedersen & E. B. Thorstad, 2000. Behavioural interactions between prey (trout smolts) and predators (pike and pikeperch) in an impounded river. *Regulated Rivers: Research & Management* 16: 189-198.

- Kreische, F. 2015. Downstream migratory behavior of European Eel (*Anguilla anguilla*) in the River Sieg. Master Thesis University of Cologne, 63 pp.
- Larinier, M. & Travade, F. 2002. Downstream migration: problems and facilities. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture* 364 (Suppl. 2002-1): 181-207.
- Lindner, J. 2016. Downstream migration of juvenile Atlantic salmon smolt (*Salmo salar*) - individual behavior facing a hydroelectric power plant. Master Thesis University of Cologne, 66pp.
- Molls, F. & Nemitz, A. 2008. Restoration of Atlantic salmon and other diadromous fishes in the Rhine River system. *American Fisheries Society Symposium* 49: 817 -834.
- Monnerjahn, U. 2011. Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) re-introduction in Germany: a status report on national programmes and activities. *Journal of Applied Ichthyology* 27 (Suppl. 3): 33-40.
- Nemitz, A. & Steinmann, I. 2001. Zum Aufkommen und zur Abwanderung von Lachssmolts im Siegsystem. Unveröffentlichte Studie Im Auftrag der LÖBF / LAfAO Nordrhein-Westfalen, 46 pp.
- Økland, F., Teichert, M.A.K., Thorstad, E.B., Havn, T.B., Heermann, L., Sæther, S.A., Diserud, O.H., Tambets, M., Hedger, R.D. & Borcharding, J. 2016. Downstream migration of Atlantic salmon smolt at three German hydropower stations. NINA Report 1203: 1-47. Norwegian Institute for Nature research (NINA), Trondheim, Norwegen.
- Økland, F., Teichert, M.A.K., Havn, T.B., Thorstad, E.B., Heermann, L., Sæther, S.A., Tambets, M. & Borcharding, J. 2017a. Downstream migration of European eel at three German hydropower stations. NINA Report 1355: 53 pages, including appendix. Norwegian Institute for Nature research (NINA), Trondheim, Norwegen.
- Havn, T.B., Økland, F., Heermann L., Thorstad, E.B., Teichert, M.A.K., Sæther, S.A., Tambets, M. & Borcharding, J. 2018. Downstream migration of Atlantic salmon smolt at Unkelmühle power station in 2016. NINA Report 1412: 38 pages . Norwegian Institute for Nature research (NINA), Trondheim, Norwegen.
- R Development Core Team, 2016. R: a Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, ISBN 3-900051-07-0. URL: <http://www.R-project.org/>.
- Ruggles, C.P. 1980. A review of the downstream migration of Atlantic salmon. *Canadian Technical Report on Fisheries and Aquatic Sciences* 952: 1-39.
- Schneider, J. 2011. Review of reintroduction of Atlantic salmon (*Salmo salar*) in tributaries of the Rhine River in the German Federal States of Rhineland-Palatinate and Hesse. *Journal of Applied Ichthyology* 27 (Suppl. 3): 24-32.
- Serrano, I., Rivinoja, P., Karlsson, L. & Larsson, S. 2009. Riverine and early marine survival of stocked salmon smolts, *Salmo salar* L., descending the Testebo River, Sweden. *Fisheries Management and Ecology* 16: 386–394.

- Staas, S., Sommer, M. & Zoschke, A. 2014a. Kontrolle der Monitoringeinrichtungen an der Pilotanlage Unkelmühle (Sieg) - Lachs-Smoltabwanderung im Frühjahr 2014. Untersuchung im Auftrag des Landesamtes für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV), LimnoPlan - Fisch- und Gewässerökologie, Erftstadt, 35 pp.
- Staas, S., Sommer, M. & Zoschke, A. 2014b Kontrolle der Monitoringeinrichtungen an der Pilotanlage Unkelmühle (Sieg) - Aal-Abwanderung im Herbst 2014. Untersuchung im Auftrag des Landesamtes für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV), LimnoPlan - Fisch- und Gewässerökologie, Erftstadt, 21 pp.
- Staas, S., Sommer, M. & Zoschke, A. 2015a Kontrolle der Monitoringeinrichtungen an der Pilotanlage Unkelmühle (Sieg) - Lachs-Smoltabwanderung im Frühjahr 2015. Untersuchung im Auftrag des Landesamtes für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV), LimnoPlan - Fisch- und Gewässerökologie, Erftstadt, 36 pp.
- Staas, S., Sommer, M. & Zoschke, A. 2015b Kontrolle der Monitoringeinrichtungen an der Pilotanlage Unkelmühle (Sieg) - Aal-Abwanderung im Herbst 2015. Untersuchung im Auftrag des Landesamtes für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV), LimnoPlan - Fisch- und Gewässerökologie, Erftstadt, 22 pp.
- Staas, S., Sommer, M. & Zoschke, A. 2016. Kontrolle der Monitoringeinrichtungen an der Pilotanlage Unkelmühle (Sieg) - Lachs-Smoltabwanderung im Frühjahr 2016. Untersuchung im Auftrag des Landesamtes für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV), LimnoPlan - Fisch- und Gewässerökologie, Erftstadt, 35 pp.
- Thorstad, E.B., Whoriskey, F., Uglem, I., Moore, A., Rikardsen, A.H. & Finstad, B. 2012. A critical life stage of the Atlantic salmon *Salmo salar*: behaviour and survival during the smolt and initial post-smolt migration. *Journal of Fish Biology* 81: 500-542.
- Umweltbundesamt 2015. Forum „Fischschutz und Fischabstieg“ Empfehlungen und Ergebnisse des Forums. UBA Texte 97/2015. Dessau-Roßlau, 52pp.

## Veröffentlichungen und Monitoringberichte

Havn, T.B., Thorstad, E.B., Teichert, M.A.K., Sæther, S.A., Heermann, L., Hedger, R.D., Tambets, M., Diserud, O.H., Borcharding, J. & Økland, F. 2017. Hydropower-related mortality and behaviour of Atlantic salmon smolts in the River Sieg, a German tributary to the Rhine. *Hydrobiologia*. DOI 10.1007/s10750-017-3311-3.

<https://link.springer.com/article/10.1007/s10750-017-3311-3>

Havn, T.B., Økland, F., Teichert, M.A.K., Heermann, L., Borcharding, J., Sæther, S.A., Tambets, M., Diserud, O.H., Thorstad, E.B. 2017. Movements of dead fish in rivers. *Animal Biotelemetry* 5:7. DOI 10.1186/s40317-017-0122-2.

<https://animalbiotelemetry.biomedcentral.com/articles/10.1186/s40317-017-0122-2>

Havn, T.B., Sæther, S.A., Thorstad, E.B., Teichert, M.A.K., Heermann, L., Diserud, O.H., Borcharding, J., Tambets, M., Økland, F. 2017. Downstream migration of Atlantic salmon smolts past a low head hydropower station equipped with Archimedes screw and Francis turbines. *Ecological Engineering* 105: 262–275. DOI 10.1016/j.ecoleng.2017.04.043.

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092585741730229X>

Thorstad, E.B., Havn, T.B., Sæther, S.A., Heermann, L., Teichert, M.A.K., Diserud, G.H., Tambets, M., Borcharding, J., Økland, F. 2017. Survival and behaviour of Atlantic salmon smolts passing a run-of-river hydropower facility with a movable bulb turbine. *Fisheries Management and Ecology* 24: 199–207. DOI: 10.1111/fme.12216

<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/fme.12216/abstract>

Økland, F., Teichert, M. A. K., Thorstad, E. B., Havn, T. B., Heermann, L., Sæther, S. A., Diserud, O. H., Tambets, M., Hedger, R. D., Borcharding, J. 2016. Downstream migration of Atlantic salmon smolt at three German hydropower stations. NINA Rapport 1203: 1-47. Norwegian Institute for Nature research (NINA), Trondheim, Norwegen.

<https://brage.bibsys.no/xmlui/handle/11250/2412774>

Økland, F., Teichert, M.A.K., Havn, T.B., Thorstad, E.B., Heermann, L., Sæther, S.A., Tambets, M. & Borcharding, J. 2017a. Downstream migration of European eel at three German hydropower stations. NINA Report 1355: 53 pages, including appendix. Norwegian Institute for Nature research (NINA), Trondheim, Norwegen.

Økland, F., Teichert, M.A.K., Thorstad, E.B., Havn, T.B., Heermann, L., Sæther, S.A., Diserud, O.H., Tambets, M. & Borcharding, J. 2017b. Downstream migration of Atlantic salmon smolt at Unkelmühle power station in 2016. NINA Report 1412: 38 pages . Norwegian Institute for Nature research (NINA), Trondheim, Norwegen.



## 8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Zielerreichungsmatrix für die Pilotanlage Unkelmühle .....	10
Abbildung 2: Wasserkraftanlage Unkelmühle in früherer Zeit, Quelle: innogy SE .....	11
Abbildung 3: Anordnung und Anlagenteile vor dem Umbau zur Pilotanlage, Quelle: innogy SE .....	11
Abbildung 4: Außen- und Innenansicht der Wasserkraftanlage vor dem Umbau als Pilotanlage, Quelle: innogy SE.....	12
Abbildung 5: Grafik der Pilotanlage und Blick in den neuen Vertical-Slot Fischpass.....	13
Abbildung 6: Feinrechenprofil in Tropfenform der Maschine 1 .....	14
Abbildung 7: Feinrechenprofil in Y-Form der Maschine 2 vor Umbau 2015.....	14
Abbildung 8: Feinrechenprofil in Y-Form und Flachstählen der Maschine 3 .....	15
Abbildung 9: Einlaufrechen und Bypass System Oberflächenabwanderer .....	15
Abbildung 10: Rechenreiniger .....	16
Abbildung 11: Fischabstiegsrinne mit Rechenschürze und Rechenreinigern .....	16
Abbildung 12: Detail Rechenreiniger mit Reinigungsleiste und Brüsten .....	17
Abbildung 13: Fischabstieg hinter Geschwemmselrinne mit Schwenktor 1 .....	17
Abbildung 14: Spülpumpe in der Geschwemmselrinne .....	18
Abbildung 15: Bypassöffnungen in der Rechenschürze .....	18
Abbildung 16: Einbau der BottomGallery .....	20
Abbildung 17: Detail der BottomGallery inkl. Antrieb in geschlossenem Zustand .....	20
Abbildung 18: Übersicht der Gesamtanlage mit allen Anlagenkomponenten .....	21
Abbildung 19: Übersicht der Monitoringeinrichtungen Unkelmühle .....	22
Abbildung 20: Monitoringeinrichtungen der Oberflächenbypässe .....	23
Abbildung 21: Monitoringeinrichtungen Aalrohre.....	24
Abbildung 22: Betrieb der Aalrohre in drei verschiedenen Höhen .....	25
Abbildung 23: Monitoringeinrichtungen BottomGallery .....	26
Abbildung 24: Profile der Rechen 1 bis 3 .....	30
Abbildung 25: Abstandshalter mit nach vorn gezogenem Füllelement .....	31
Abbildung 26: Teilverlegter Rechen 2 (Ansicht von vorne, November 2014).....	32
Abbildung 27: An den Füllelementen gehaltenes Geschwemmsel (Ansicht Rechen 2 von hinten, August 2014) .....	32
Abbildung 28: Abstandshalter nur als Hülse ausgeführt.....	33
Abbildung 29: Energieeinbußen am Rechen 2 im Vergleich zu denen am Rechen 1.....	35
Abbildung 30: Geschwemmsel-Ansammlung (hier Wasserpflanzen) hinter dem Schwenktor 1 .....	36

Abbildung 31: Karte des untersuchten Abschnitts der Sieg. Dargestellt sind die Besatzstelle der markierten Smolts, die Antennenstandorte, an denen die Fische registriert wurden sowie die Wasserkraftanlage Unkelmühle .....	46
Abbildung 32: Die Wasserkraftanlage Unkelmühle an der Sieg. Die verschiedenen Abwanderwege sind mit Pfeilen markiert .....	47
Abbildung 33: Dargestellt sind die verschiedenen Wanderwege, über welche abwandernde Fische die Stau- und Wasserkraftanlage passieren können: 1) via die Oberflächenbypässe, 2) durch die Turbinen (im Falle von Rechendurchtritt), 3) durch den Schlitzpass, 4) durch den Raugerinne-Beckenpass, 5) durch die Kanu-Rutsche, 6) über die Eisklappe, 7) über die Wehrklappe, 8) über das Wehr, 9) durch die BottomGallery und 10) durch die Aalrohre. Die beiden letzten in Orange dargestellten Wanderwege stehen nur während der Aalabwanderung im Herbst zur Verfügung. Das Tor zwischen Geschwemmselrinne und Sieg war während der Lachsabwanderung dauerhaft geöffnet, während der Aalabwanderung jedoch nur zu Zeiten der Rechenreinigung. Über das geöffnete Tor (Schwenktor 1) gelangen Fische, die den Weg über die Oberflächenbypässe wählen, wieder in den Hauptstrom der Sieg. Die Oberflächenbypässe können in Höhe und Tiefe angepasst werden. Die Einstellungen für diese Studie können Tabelle 2 entnommen werden. Die Nummern in den Darstellungen beziehen sich auf den jeweiligen Wanderweg. ....	48
Abbildung 34: Abfluss ( $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ) durch die drei Turbinen während des Untersuchungszeitraumes in 2014 (Linie). Der Zeitpunkt der Kraftwerkspassage für einzelne Smolts ist durch Punkte markiert. Turbine 1 = an der Uferseite gelegen (blaue Punkte , N=16), Turbine 2 = mittlere Turbine (grüne Punkte, N=11), Turbine 3 = auf der Flussseite gelegene Turbine(roote Punkte, N=18). ....	50
Abbildung 35: Tageszeit zu der Smolts an den einzelnen Empfängerstandorten registriert wurden. Site 1 = Empfängerstandort 1 am Beginn der freifließenden Referenzstrecke, Site 2 = Empfängerstandort 2 am Beginn des Staubereichs. Site 3a-c = Empfängerstandort 3 (Wasserkraftanlage), wobei Site 3a = Ende des Staubereichs, Site 3b = unmittelbar oberhalb der Wasserkraftanlage, Site 3c = unmittelbar unterhalb der Wasserkraftanlage. Grau hinterlegt = Zeiten des Sonnenauf- und -untergangs, Schwarz hinterlegt = Nacht. Die Breite des grauen Bereichs gibt die Spanne zwischen frühestem und spätestem Sonnenauf- oder -untergang der betrachteten Tage wider.....	53
Abbildung 36: Drift toter, in die Sieg entlassener Smolts im Jahr 2015 (n = 20). Die Position der einzelnen Smolts zu Zeiten der manuellen Trackings oder wenn die Smolts eine stationäre Empfängereinheit passierten, sind als farbige Punkte markiert. Die schwarze Linie zeigt den Abfluss der Sieg an der Unkelmühle im entsprechenden Zeitraum. „S“ markiert die letzte Registrierung bevor ein Fisch von einem Räuber erbeutet wurde. Entnommen aus Havn et al. 2017. ....	55
Abbildung 37: Migrationsgeschwindigkeiten radiotelemetrisch markierter Smolts im Jahr 2015 im freifließenden Abschnitt, im Staubereich, an der Wasserkraftanlage und im Abschnitt unterhalb umgerechnet auf Kilometer pro Stunde. Farbiger Bereich = oberes bis unteres Quartil, schwarze Linie = Median, Whiskers = minimaler / maximaler Wert. ....	58
Abbildung 38: Migrationsgeschwindigkeiten radiotelemetrisch markierter Smolts im Jahr 2016 im freifließenden Abschnitt, im Staubereich, an der Wasserkraftanlage und im Abschnitt unterhalb umgerechnet auf Kilometer pro Stunde. Farbiger Bereich = oberes bis unteres Quartil, schwarze Linie = Median, Whiskers = 95% Perzentil, Punkte =Ausreißer. ....	62

Abbildung 39: Bereich unmittelbar hinter dem Übergang der Geschwemmselrinne in die Sieg in dem sich 2014 (links) Geschwemmsel ansammelte und so wahrscheinlich Verluste verursachte. 2015 (rechts) trat dieses Problem nicht in vergleichbarem Umfang auf. Im linken Bild ist der Wasserstrom zwischenzeitlich unterbrochen gewesen. ....	67
Abbildung 40: Relative Häufigkeit der „anderen“ Fischarten im Fangmonitoring (Frühjahr 2015).....	69
Abbildung 41: Größenverteilung der „anderen“ Fischarten im Fangmonitoring (Frühjahr 2015) .....	70
Abbildung 42: a) Oberflächenbypässe an der Wasserkraftanlage Unkelmühle, b) Oberflächenbypass im Detail, c) Videokameras, die je einen der Bypässe filmen, d) Schaltschrank mit Monitor. ....	72
Abbildung 43: Prozentualer Anteil der Wanderzeit, die Smolts in den verschiedenen Bereichen der Anlage verlieren, gemessen an der gesamten Zeit, die die Smolts brauchten um die Wasserkraftanlage zu passieren. Jeder Bereich unterscheidet sich signifikant von den anderen ( $p < 0.05$ ; Wilcoxon test, $n = 94$ ). Grauer Bereich = oberes bis unteres Quartil, schwarze Linie = Median, Whiskers = 95% Perzentil, Punkte = Ausreißer. Entnommen aus Lindner 2016. ....	73
Abbildung 44: Karte des untersuchten Abschnitts der Sieg. Dargestellt sind die Besatzstelle der markierten Aale, die Antennenstationen, an denen die Fische registriert wurden, und die Wasserkraftanlage Unkelmühle. ....	75
Abbildung 45: Mobile Verfolgung mit Boot und 3-Element-Yagi-Antenne.....	76
Abbildung 46: Drift toter, in die Sieg entlassener Aale im Jahr 2014 ( $n = 5$ ). Die Position der einzelnen Aale zu Zeiten der manuellen Trackings oder wenn die Aale eine stationäre Empfängereinheit passierten sind als farbige Punkte markiert. Die schwarze Linie zeigt den Abfluss der Sieg an der Unkelmühle im entsprechenden Zeitraum. „S“ markiert die letzte Registrierung bevor ein Fisch von einem Räuber erbeutet wurde. Entnommen aus Havn et al 2017. ....	81
Abbildung 47: Anzahl der Aale (gesamt $n = 122$ ), die die Wasserkraftanlage Unkelmühle im Untersuchungszeitraum von Oktober 2014 bis Juni 2015 passierten, sowie Abfluss (schwarze Linie) und Temperatur der Sieg (graue Linie) an der Wasserkraftanlage. ....	83
Abbildung 48: Wandergeschwindigkeit ( $\text{km h}^{-1}$ ) der Aale bei der Passage der Wasserkraftanlage im Jahr 2014/15 in Abhängigkeit vom gewählten Abwanderweg dargestellt als Boxplot. Brauner Bereich = oberes bis unteres Quartil, schwarze Linie = Median, Whiskers = 95% Perzentil, Punkte = Ausreißer, $N=104$ . ....	87
Abbildung 49: Drift toter, in die Sieg entlassener Aale im Jahr 2015 ( $n = 30$ ). Die Position der einzelnen Aale zu Zeiten der manuellen Kartierung oder wenn die Aale eine stationäre Empfängereinheit passierten sind als farbige Punkte markiert. Die schwarze Linie zeigt den Abfluss der Sieg an der Unkelmühle im entsprechenden Zeitraum. „S“ markiert die letzte Registrierung bevor ein Fisch von einem Räuber erbeutet wurde. Entnommen aus Havn et al 2017. ....	89
Abbildung 50: Anzahl der Aale (gesamt $n = 100$ ), die die Wasserkraftanlage Unkelmühle im Untersuchungszeitraum 2015/16 passierten, sowie Abfluss (schwarze Linie) und Temperatur der Sieg (graue Linie) an der Wasserkraftanlage. Pfeile markieren die Besatztermine. ....	91
Abbildung 51: Wandergeschwindigkeit ( $\text{km h}^{-1}$ ) der Aale bei der Passage der Wasserkraftanlage im Jahr 2015/16 in Abhängigkeit vom gewählten Abwanderweg dargestellt als Boxplot. Brauner Bereich = oberes bis unteres Quartil, schwarze Linie = Median, Whiskers = 95% Perzentil, Punkte = Ausreißer, $N=71$ . ....	94

Abbildung 52: Relative Häufigkeiten der im Rahmen des Monitorings zur Aal-Abwanderung im Herbst 2014 (12.08-13.12.) nachgewiesenen Fisch- und Rundmaulararten .....	97
Abbildung 53: Größenverteilung der im Fangmonitoring im Herbst nachgewiesenen abwandernden Fische.....	98
Abbildung 54: Verteilung der häufigsten nachgewiesenen Fischarten auf die Wanderwege. ....	99
Abbildung 55: Verteilung der Fischarten im Fangmonitoring im Herbst 2015. ....	99
Abbildung 56: Größenverteilung der nachgewiesenen Fischarten im Fangmonitoring Herbst 2015. ....	100
Abbildung 57: Darstellung der Schutzraten (blaue Quadrate) für abwandernde Lachssmolts 2014 - 2016 (ohne „verzögerte Mortalität“, siehe Erläuterung im Text) .....	104
Abbildung 58: Darstellung der Schutzraten (graue blaue Quadrate) für abwandernde Lachssmolts 2015 und 2016 (unter Einbeziehung der „verzögerten Mortalität“, siehe Erläuterung im Text) .....	105
Abbildung 59: Darstellung der Schutzraten (Spanne grau blau hinterlegt) für Blankaale in den Abwandersaisons 2014/15 und 2015/16 .....	106

## 9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Erläuterung der ermittelten Verbräuche.....	28
Tabelle 2: Verbräuche der einzelnen Komponenten .....	37
Tabelle 3: Verbräuche der einzelnen Komponenten absteigend sortiert.....	38
Tabelle 4: Arbeitseinsätze prozentual auf die Hauptaktivitäten verteilt .....	40
Tabelle 5: Verbräuche der einzelnen Komponenten im 4. und 5. Monitoringjahr .....	41
Tabelle 6: Übersicht über die Anzahl besetzter Smolts in den Jahren 2014-2016 sowie deren Länge und das Datum des Besatzes.....	45
Tabelle 7: Öffnungswinkel (°) und Öffnungszeiten des Schwenktores 1 am Ende der Geschwemmselrinne an der Wasserkraftanlage Unkelmühle sowie Dimensionen der Bypassöffnungen an den Rechen. Schwimmen abwandernde Fische durch die Bypässe, gelangen sie in die Geschwemmselrinne und dann durch das am Ende befindliche Tor wieder in den Hauptstrom der Sieg. An jedem der drei vor den Turbinen verbauten Rechen befinden sich zwei Bypassöffnungen. Diese sind hier nummeriert (1-6), wobei 1 der Öffnung in Fließrichtung ganz rechts und 6 der Öffnung in Fließrichtung ganz links entspricht. Die Breite der Bypassöffnungen war für alle Studienzeiträume gleich. ....	49
Tabelle 8: Anzahl und prozentualer Anteil von Smolts aus dem Jahr 2015 für die einzelnen Abwanderwege dargestellt. ....	57
Tabelle 9: Anzahl und prozentualer Anteil von Smolts aus dem Jahr 2016 für die einzelnen Abwanderwege dargestellt. ....	61

Tabelle 10: Übersicht über die Ergebnisse zu den Verlusten von besetzten Smolts in den drei Studienjahren. WKA = Wasserkraftanlage. ....	63
Tabelle 11: Median der Wandergeschwindigkeit (km/h) der Smolts an den drei Standorten (Sieg, Kinzig und Diemel). Grau hinterlegte Werte = signifikant verschieden zur freifließenden Referenzstrecke (P<0,05; Sieg und Kinzig: Wilcoxon-Test, Diemel: Friedman-Test). ....	63
Tabelle 12: Anzahl der an der Pilotanlage nachgewiesenen Fischarten sowie Anteil der Lachssmolts am Gesamtfang. ....	71
Tabelle 13: Übersicht über die Anzahl besetzter Blankaale in den Jahren 2014 und 2015 sowie deren Länge und das Datum des Besatzes. ....	74
Tabelle 14: Untersuchungszeitraum im Jahr 2014/2015. X kennzeichnet den Zeitraum, in dem die entsprechenden Empfängereinheiten aufzeichneten, siehe jedoch die Fußnoten. ....	78
Tabelle 15: Untersuchungszeitraum im Jahr 2015/16. X kennzeichnet den Zeitraum, in dem die entsprechenden Empfängereinheiten aufzeichneten, siehe jedoch die Fußnoten. ....	79
Tabelle 16: Bewegungsdaten der 136 markierten Aale in der Sieg 2014/15. Die Anzahl der Aale, die in den jeweiligen Abschnitt einschwimmen (Aal rein), und die den Abschnitt verlassen (Aal raus) sind gezeigt sowie die Anzahl der Aale, die ihre Wanderung im jeweiligen Abschnitt unterbrachen oder aus dem Abschnitt verschwanden. Ein Aal der seine Wanderung unterbricht ist nicht zwangsläufig tot, vor allem wenn für ihn flussaufwärts gerichtete Bewegungen registriert werden konnten, kann er als lebend angesehen werden. WKA = Wasserkraftanlage. ....	82
Tabelle 17: Anzahl von Aalen, die die Wasserkraftanlage passiert haben, dargestellt für die genutzten Wanderwege sowie prozentuale Aufteilung auf diese. Unbekannt = Wanderweg konnte nicht festgestellt werden aufgrund technischer Probleme oder weil Aale in Zeiten ohne Monitoring wanderten. Die Aale wurden in zwei Kategorien unterteilt: solche, die die Kraftwerkspassage aller Wahrscheinlichkeit nach überlebten und solche, für die nicht bestimmt werden kann, ob sie verlustig gegangen sind oder nicht weil sie innerhalb des maximalen Driftlimits toter Aale stationär wurden. Prozentangaben in der Spalt „Gesamt“ beziehen sich auf die Gesamtanzahl Aale (N=106). Angaben in Klammer beziehen sich auf die genannten Wanderwege in Abb. 33. Weg 6 und 7 konnten mit dem gewählten Studiendesign nicht voneinander differenziert werden. ....	85
Tabelle 18: Aufenthaltszeit der Aale in den einzelnen Gewässerabschnitten. Analysiert wurden die Zeiten von der ersten Detektion an der einen Empfängereinheit bis zur Detektion an der nächsten, flussaufwärts gerichtete Wanderungen zurück in bereits durchschwommene Abschnitte wurden nicht berücksichtigt. Bei der Referenzstrecke und dem Abschnitt unterhalb der Wasserkraftanlage (WKA) handelt es sich um freifließende Gewässerabschnitte. Zahlen hinter Abschnittnamen = Länge des Abschnittes. ....	86
Tabelle 19: Maximal verdriftete Distanz toter Aale in der Sieg im Jahr 2014 und 2015 sowie Anzahl von toten, Aalen, die durch Prädatoren erbeutet und ggf. aus dem Fluss entfernt wurden. Anzahl besetzter Aale im Jahr 2014: n = 5, im Jahr 2015: n = 30. ....	88
Tabelle 20: Bewegungsdaten der 134 markierten Aale in der Sieg 2015/16. Die Anzahl der Aale, die in den jeweiligen Abschnitt einschwimmen (Aal rein), und die den Abschnitt verlassen (Aal raus) sind gezeigt sowie die Anzahl der Aale, die ihre Wanderung im jeweiligen Abschnitt unterbrachen oder aus dem Abschnitt verschwanden. Ein Aal der seine Wanderung unterbricht ist nicht zwangsläufig	

tot, vor allem wenn für ihn flussaufwärts gerichtete Bewegungen registriert werden konnten, kann er als lebend angesehen werden. WKA = Wasserkraftanlage..... 90

Tabelle 21: Anzahl von Aalen, die die Wasserkraftanlage passiert haben, dargestellt für die genutzten Wanderwege sowie prozentuale Aufteilung auf diese. Unbekannt = Wanderweg konnte nicht festgestellt werden aufgrund technischer Probleme oder weil Aale in Zeiten ohne Monitoring wanderten. Die Aale wurden in zwei Kategorien unterteilt: solche, die die Kraftwerkspassage aller Wahrscheinlichkeit nach überlebten und solche, für die nicht bestimmt werden kann, ob sie verlustig gegangen sind oder nicht, weil sie innerhalb des maximalen Driftlimits toter Aale stationär wurden. Drei Aale sind aller Wahrscheinlichkeit nach von Prädatoren erbeutet worden. Prozentangaben in den Spalten „Gesamt“ beziehen sich auf die Gesamtanzahl Aale (N=87). Angaben in Klammer beziehen sich auf die genannten Wanderwege in Abb. 3. Weg 6 und 7 konnten mit dem gewählten Studiendesign nicht voneinander differenziert werden. .... 93

Tabelle 22: Aufenthaltszeit der Aale in den einzelnen Gewässerabschnitten 2015/16. Analysiert wurden die Zeiten von der ersten Detektion an der einen Empfängereinheit bis zur Detektion an der nächsten, flussaufwärts gerichtete Wanderungen zurück in bereits durchschwommene Abschnitte wurden nicht berücksichtigt.. Bei der Referenzstrecke und dem Abschnitt unterhalb der Wasserkraftanlage (WKA) handelt es sich um freifließende Gewässerabschnitte. Zahlen hinter Abschnittnamen = Länge des Abschnittes. .... 94