

**Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft**

**Technische Universität Darmstadt**



# **MITTEILUNGEN**

**Heft 155**

**2018**

**Claudia Berger**

**Rechenverluste und Auslegung von (elektrifizierten) Schrägrechen  
anhand ethohydraulischer Studien**



**Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft**  
**Technische Universität Darmstadt**



**Rechenverluste und Auslegung von (elektrifizierten)  
Schrägrechen anhand ethohydraulischer Studien**

Vom Fachbereich Bau- und Umweltingenieurwissenschaften  
der Technischen Universität Darmstadt

zur Erlangung des akademischen Grades  
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation von  
**Dipl.-Ing. Claudia Berger**  
aus Stuttgart

1. Prüfer: Prof. Dr.-Ing. habil. B. Lehmann
2. Prüfer: Univ. Prof. Dr.-Ing. H. Schüttrumpf

Tag der Einreichung: 25. Juli 2017  
Tag der mündlichen Prüfung: 15. Dezember 2017

Darmstadt, im Februar 2018

D 17

Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2018

D18

Mitteilungen des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft  
der Technischen Universität Darmstadt; Heft 155

Diese Mitteilungsreihe hat zwei Wurzeln:

- die **“Wasserbau-Mitteilungen”** (41 Hefte), begründet 1966 von Prof. Dr.-Ing. Friedrich Bassler, später fortgeführt von Prof. Dr.-Ing. Josef Mock,
- die **“Technischen Berichte über Ingenieurhydrologie und Hydraulik”** (54 Hefte), herausgegeben seit 1965 von Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Otto Kirschmer, später fortgeführt von Prof. Dr.-Ing. Ralph C. M. Schröder und Prof. Dr.-Ing. Manfred Ostrowski.

Mit dem Dienstantritt von Prof. Dr.-Ing. Ulrich Zanke als Nachfolger von Prof. Mock sind diese beiden Reihen zusammengeführt worden. Die zwei Fachgebiete des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft

- Ingenieurhydrologie und Wasserbewirtschaftung
- Wasserbau und Hydraulik

dokumentieren damit auch nach außen ihre Zusammengehörigkeit. Die neue Nummerierung ergibt sich aus der Summe der Hefte beider Vorgängerreihen.

Die **“Mitteilungen des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Technischen Universität Darmstadt”** erscheinen in unregelmäßiger Folge im Eigenverlag des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft. Ein Nachdruck, auch auszugsweise, ist nur mit Genehmigung des Geschäftsführenden Institutsdirektors gestattet.

(ISSN 1430-3434)

FG Ingenieurhydrologie  
u. Wasserbewirtschaftung  
Franziska-Braun-Straße 7  
64287 Darmstadt  
Tel.: 0 61 51/16 20860

FG Wasserbau und Hydraulik  
Franziska-Braun-Straße 7  
64287 Darmstadt  
Tel.: 0 61 51/16 21165

E-Mail: [feldmann@ihwb.tu-darmstadt.de](mailto:feldmann@ihwb.tu-darmstadt.de)

E-Mail: [wabau@wb.tu-darmstadt.de](mailto:wabau@wb.tu-darmstadt.de)

Aktuelle Informationen über das Institut und seine Lehrangebote finden Sie im World Wide Web unter: <http://www.iww.tu-darmstadt.de>

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. habil. Boris Lehmann (Wasserbau und Hydraulik)  
Prof. Dr. habil. Britta Schmalz (Ingenieurhydrologie und Wasserbewirtschaftung)

---

## Danksagung

Diese Arbeit entstand während meiner Anstellung bei der Energie Baden-Württemberg AG als nebenberufliche Dissertation am Fachgebiet für Wasserbau und Hydraulik der Technischen Universität Darmstadt. Für das Gelingen dieser Dissertation möchte ich mich bei folgenden Personen und Firmen bedanken:

Bei meinem Doktorvater und Lehrstuhlinhaber des Fachgebietes Wasserbau und Hydraulik Prof. Dr.-Ing. habil. Boris Lehmann bedanke ich mich für die Möglichkeit zur Durchführung einer Dissertation mit einem so spannenden Thema wie der Ethohydraulik und für sein Vertrauen in meine Fähigkeiten. Der regelmäßige fachliche Austausch und sein stets offenes Ohr für meine Fragen trugen maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit bei. Dass wir vieles pragmatisch am Telefon oder per E-Mail regeln konnten, ersparte mir viel staugeplagte Reisezeit von Stuttgart nach Darmstadt.

Des Weiteren möchte ich mich bei dem Leiter des wasserbaulichen Forschungslabors Dr.-Ing. Jens-Uwe Wiesemann bedanken, der mir mit seiner langjährigen Erfahrung rund um die Durchführung der Laborstudien und Messkampagnen stets zur Seite stand und wertvollen Input lieferte. Ebenso möchte ich mich bei Markus Heiligenthal für sein großes Engagement zum Umbau der Schrägrechen bedanken – ohne ihn und seine handwerklichen Fähigkeiten wäre die Untersuchung so vieler Rechen setups in begrenzter Zeit nicht möglich gewesen.

Danke sagen möchte ich auch meinem Korreferenten Univ.-Prof. Dr.-Ing. Holger Schüttrumpf vom Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der RWTH Aachen für seine Bereitschaft meine Dissertation mit seinem Zweitgutachten zu begleiten und an der Disputation mitzuwirken.

Seitens meiner Führungskraft bei der EnBW AG Peter Stiebing fand ich jederzeit Unterstützung für meine nebenberufliche Dissertation. Ein Abbau von Überstunden und Urlaubstagen für die Laborversuche und das Zusammenschreiben der Dissertation wurden anstandslos genehmigt. Mir wurde immer viel Freiraum bei der Gestaltung meiner Termine und bei der Durchführung meiner Projekte gelassen. Ohne diese Unterstützung hätte ich mich nicht derart auf die Dissertation fokussieren können.

Zusätzlich möchte ich mich bei der EnBW AG bei Birgit Gruber bedanken, die als Personalreferentin Sonderurlaubstage für die Dissertation bereitstellte und bei Jochen Benz, der vom Bereich Forschung und Entwicklung das Budget zur Durchführung der Untersuchungen zur Verfügung stellte.

Bei den EnBW-Kollegen aus Forbach Gerhard Urban, Ulrich Rost, Hermann Wunsch und Klaus Uibel möchte ich mich für die Bereitschaft bedanken, die Wasserkraftwerke Ottenau und Rotenfels für die Feldversuche zu verwenden. Die Kollegen begleiteten die Studien mit ihrem fachlichen Know-How rund um die Kraftwerke und das Abflussgeschehen in der Murg sowie mit ihrem bautechnischen Einsatz in Rotenfels.

Bei Uwe Weibel und Steffen Wüst vom Büro IUS Weibel und Ness GmbH möchte ich mich für die tolle, professionelle und angenehme Zusammenarbeit im Projekt bedanken und für den hilfreichen Input, was v.a. die Fischbiologie und das Elektroscheuchen betraf. Ich habe als Ingenieurin durch Euch viel über Fische gelernt.

Für den mathematischen Input und für den Aufruf zur Pause zwischendurch bedanke ich mich bei meiner Kommilitonin und Freundin Iris Boldt, die sich zum Lesen der gesamten Arbeit viel Zeit nahm und so als heutige Berufsschullehrerin wieder mit dem Wasserbau in Berührung kam. Danke sagen möchte ich auch Matthias Boldt, der durch sein theoretisches berufliches Umfeld viele wertvolle Hinweise für die Arbeit liefern konnte.

Meiner Mutter danke ich ganz besonders, da sie meinen schulischen, universitären und beruflichen Weg seit jeher bedingungslos unterstützte. Auch danke ich für das finale Korrekturlesen dieser Arbeit. Meinem Bruder Peter, meiner Schwägerin Katrin und meiner süßen Nichte Emma danke ich für die Ablenkung und die schönen Tage zwischendurch ohne Versuche, Fische und Strömungen.

Besonderen Dank gebührt zuletzt meinem lieben Mann Christian insbesondere für seine IT-Unterstützung – eine eigene persönliche IT-Hotline hat schon seine Vorteile. Auch für die geschaffenen Freiräume, die Arbeit zu meistern, für das Korrekturlesen und für die Rücksichtnahme für fehlende Urlaube oder so manche Nachtschicht danke ich ihm von ganzem Herzen.

---

---

## Kurzfassung

Zur Erreichung der Ziele nach EU-Wasserrahmenrichtlinie und der nationalen Gesetze bedarf es an Gewässern u.a. einer abwärts gerichteten Durchgängigkeit sowie einem ausreichenden Schutz der Fischpopulationen. Um diese Anforderungen zu erfüllen, werden bei bestehenden und neuen Wasserkraftanlagen häufig schräg zur Anströmung gerichtete Rechensysteme mit horizontalen Stäben installiert – sogenannte Schrägrechen. Diese sollen die abwärts wandernden Fische sowohl vor einer Passage durch die Turbinenkammer schützen, als auch in Richtung eines seitlich angeordneten Bypasses leiten. Obwohl bereits Grenzwerte für verschiedene Rahmenbedingungen publiziert und angewandt werden, wurden noch keine wissenschaftlich fundierten Untersuchungen an Schrägrechen durchgeführt. Auch sind die hydraulischen Verluste, welche durch den Schrägrechen entstehen, sogenannte Rechenverluste, bislang unbekannt.

Die vorliegende Arbeit soll bestehende Wissenslücken rund um den Schrägrechen schließen. Dazu wurden hydrometrische Messungen zur Ermittlung der Rechenverluste durchgeführt und mit rechnerischen Ergebnissen aus bekannten Rechenverlustformeln verglichen. Strömungssignaturen im Nahfeld des Schrägrechens wurden ermittelt und als 2D- und 3D-Grafiken dargestellt. Als letzte Säule erfolgten ethohydraulische Studien mit Lachsmolts und Aalen an verschiedenen Schrägrechen mit unterschiedlichen geometrischen und hydraulischen Randbedingungen. Zusätzlich wurde bei den Aalstudien der Einfluss einer Elektrifizierung des Schrägrechens untersucht. Sämtliche Messungen und Studien wurden sowohl im wasserbaulichen Forschungslabor der TU Darmstadt durchgeführt als auch an einem Schrägrechen des Wasserkraftwerks Ottenau an der Murg sowie an einer temporären Elektroscheuchanlage am Wasserkraftwerk Rotenfels an der Murg.

Die Ergebnisse des Vergleichs von hydrometrisch gemessenen und berechneten hydraulischen Verlusten bei Schrägrechen ergaben keine Möglichkeit einer Anwendung der bekannten Formeln auf Schrägrechen. Aufgrund der Stabausrichtung entstand am Schrägrechen gegenüber orthogonal angeströmten Rechen mit vertikal ausgerichteten Stäben eine andere Anströmung, welche mit den bekannten Verlustformeln nicht dargestellt werden konnte. Die Ergebnisse zeigten eine Zunahme der Verluste bei steigender Fließgeschwindigkeit und bei kleiner werdenden Abständen zwischen den Rechenstäben. Die Schrägausrichtung des Rechen beeinflusste ebenfalls die Verluste: je schräger der Rechen aufgestellt ist, desto geringer fallen die Verluste aus. Die in dieser Arbeit dargestellten Grafiken der untersuchten Schrägrechen können zur Verlustermittlung herangezogen werden.

Die Aufnahme der Strömungssignaturen ergab inhomogene Strömungsverhältnisse am Rechen, u.a. hervorgerufen durch die konstruktive Ausbildung des Schrägrechens mit Pfeilern und Stützkonstruktionen, durch Verlandungen aufgrund von Geschwemmsel sowie aufgrund einer seitlichen Anströmung eines Bypasses. In Richtung des Bypasses nahmen die Geschwindigkeiten zu. Strömungsberuhigte Zonen konnten sich durch Getreibsel an der Sohle, durch Leitbleche oder Rechenreinigungsarme ausbilden, an deren Rändern dann erhöhte Strömungen entstanden. In Richtung Oberstrom vereinheitlichten sich die Strömungssignaturen wieder.

Die ethohydraulischen Studien ergaben, dass Fische bei hohen Geschwindigkeiten oftmals in strömungsberuhigten Zonen verharrten, was die Abwanderung zwar nicht verhinderte, aber verzögerte. Bei Lachsmolts wurden Verhaltensweisen beobachtet, welche eine Abwanderung begünstigten und mit einer geeigneten konstruktiven Ausbildung des Schrägrechens gefördert werden konnten. Da bei Aalen eine Auffindbarkeit des Bypasses meist durch den Zufall bestimmt war, war eine Leitwirkung selten bis nicht zu beobachten. Hier muss eine Passage von Aalen durch den Rechen mittels einer geeigneten Rechenkonstruktion verhindert werden. Bei den überprüften Schrägrechen wurden gegenüber konventionellen Rechen mit vertikal ausgerichteten Rechenstäben ohne Schräganströmung nur selten Rechenpassagen bei Aalen beobachtet. Eine schwache Elektrifizierung reduzierte die Rechenpassagen bei großen Stabständen sowie das Verweilen am Schrägrechen von Aalen und kann so zur Reduzierung der Aalmortalität am Rechen beitragen. Ein Andrücken der Fische an den Schrägrechen ohne die Möglichkeit eines selbstständigen Lösens wurde nur in vernachlässigbarer Anzahl beobachtet. Die Ergebnisse der Feldstudien ergab eine hohe Schutzfunktion des untersuchten Schrägrechens, jedoch eine unzureichende Schutzeffizienz der untersuchten Elektroscheuchanlage für Aale.

Aus den ethohydraulischen Studien wurde die Erkenntnis gewonnen, dass ein Schrägrechen nicht nur als reine mechanische Barriere, sondern vielmehr auch als Verhaltensbarriere wirkt. Neue Grenzwerte für die Planung, Bemessung und Auslegung von Schrägrechen wurden aufgestellt. Eine Kombination aus Schrägrechen und Elektrifizierung – ein Hybridrechen – kann eine Lösung für ein wirksames Fischschutzsystem an Flusskraftwerken darstellen.

---

---

## Abstract

To achieve the targets of the of the European Water Framework Directive and national energy acts, amongst others, downstream fish migration connectivities and a sufficient protection of fish populations are needed at water bodies. The installations of trash racks with horizontal bars that are arranged at an angle to the direction of the flow – so-called inclined screens – are seen as a solution at existing and new hydropower plants. These inclined screens shall not only protect the fishes migrating downstream from a passage through the turbine chamber but also lead them into the direction of a laterally positioned bypass. Even though there are several publications and applications of limiting values for different frame conditions, until now, no scientifically sound researches and ethohydraulic evaluations with inclined screens are available. Furthermore, the hydraulic losses, generated by the inclined screens, so-called screen losses, are unknown so far.

The intention of the present thesis is to close knowledge gaps in terms of inclined screens. Therefore, hydrometric measurements for the evaluation of screen losses were taken and compared with the calculated results of known screen-loss formulas. Stream signatures within the close range of the inclined screen were identified and are shown as 2D- and 3D-graphics. Finally, ethohydraulic studies with salmon smolts and eels were conducted at different inclined screens with various geometric and hydraulic conditions. In addition to these ethohydraulic studies, the impact of an electrification of inclined screens was investigated in the studies with eels. All measurements and studies were conducted at the hydraulic research laboratory of Technische Universität Darmstadt, as well as at an inclined screen of the hydropower plant Ottenau at river Murg and at a temporary electric deterrent system at the hydropower plant Rotenfels, also at river Murg.

The results of the comparison of hydrometrically measured and calculated hydraulic losses at inclined screens demonstrated that there is no possibility to apply the known formulas for inclined screens. Due to the orientation of the screen bars, there was a different inflow caused by the inclined screen as compared to screens with vertical bars, which are perpendicular flowed by the stream. These inflows could not be described by means of the known loss formulas. The results showed a rise of losses with increasing flow velocity and with decreasing bar clearance between the screen bars. The inclined orientation of the screen also had an impact on the losses: the more inclined the screen is installed, the lower are the losses. The graphics in this thesis can be used for the evaluation of inclined screen losses.

The measuring of the stream signatures showed non-homogeneous flows at the investigated inclined screen. Amongst others, these flows are generated due to the construction of the screen with several pillars and supporting structures, silting because of floating debris, as well as due to a lateral inflow of the bypass. The velocities increased in direction of the bypass, floating debris at the bottom, baffles or screen cleaners caused the development of slow-flow sections. Flow peaks were generated at the rims of screen cleaners. The stream signatures harmonized again towards upstream.

The ethohydraulic studies showed that at high velocities, fishes often remained in slow-flow sections. Even though this reaction did not avoid a downstream fish migration, it decelerated it. In the studies, salmon smolts showed a behavior that favored a downstream fish migration and that could be supported using a suitable construction of the inclined screen. The detection of the bypass by the eels was merely determined at random so that a guiding effect was observed only rarely or not at all. A screen passage of eels through the bar clearances must thus be avoided by means of a suitable screen construction. Compared to investigations on conventional screens with vertical bars without an inclined streaming eels that passed through the bar clearances of the investigated inclined screens were monitored only rarely. Electrification reduced the number of screen passages of eels at screens with large bar clearances. It also reduced the lingering of eels at the screen. Hence, the electrification can reduce the eel mortality at screens. Fishes which were pressed against the screen due to a high water pressure was only observed in an insignificant number. The results of the field studies showed a high protective function of the investigated screen, but an inadequate protective function of the electric deterrent system for eels.

The results of the ethohydraulic studies demonstrated that inclined screens do not only act as a purely mechanical barrier, but in fact also as a behavioral barrier. New thresholds for planning and design were established in this thesis. A combination of inclined screens and electrification – a so-called hybrid screen – can be a solution for an effective fish protection structure at hydropower plant at big rivers.

---

---

---

## Inhaltsverzeichnis

---

Inhaltsverzeichnis	viii
1. ....Einleitung	1
1.1. Forschungsanlass	3
1.2. Forschungsziele	4
1.3. Methodisches Vorgehen	4
2. ....Grundlagen und Erfahrungen zu Rechenanlagen	6
2.1. Zweck und Verbreitung des Schrägrechens	6
2.2. Aufbau des Schrägrechens	6
2.3. Strömungs- und Rechenhydraulik	9
2.4. Abgrenzung zu anderen Rechentypen	16
2.5. Bisherige Betriebserfahrungen des Schrägrechens hinsichtlich betrieblicher Anforderungen	19
2.6. Energieverluste am Schrägrechen	19
2.6.1. Verlufterzeugende Rechenparameter	20
2.6.2. Formeln zur Rechenverlustberechnung	29
3. ....Physikalische Rechenverlustermittlung an Schrägrechen	39
3.1. Vergleich von experimentell ermittelten Verlusten mit bestehenden Verlustformeln	39
3.2. Vergleich von experimentell ermittelten Verlusten (Ottenau) mit bestehenden Verlustformeln	43
3.3. Rechenverlustermittlung an einem Schrägrechen der TU Darmstadt	45
3.3.1. Methodik und Versuchsaufbau	45
3.3.2. Hydrometrisch ermittelte Rechenverluste	49
3.3.3. Vergleich der hydrometrisch ermittelten Rechenverluste (TU DA) mit bestehenden Verlustformeln	52
3.4. Rechenverlustermittlung an einem alternativen Schrägrechen der TU Darmstadt	54
3.5. Empfehlungen für die Horizontalrechenverlustermittlung in der Praxis	56
4. ....Hydraulische Signaturen an Schrägrechen	57
4.1. Datenaufnahme im wasserbaulichen Forschungslabor der TU Darmstadt	57
4.1.1. Beschreibung des Versuchsaufbaus: Messtechnik und Hydrometrie	57
4.1.2. Beschreibung des Messrasters	58
4.1.3. Ergebnisse	60
4.2. Datenaufnahme im Feld am Wasserkraftwerk Ottenau	64
4.2.1. Beschreibung des Versuchsaufbaus	64
4.2.2. Ergebnisse	69
4.2.3. Vergleichende Messungen in Ottenau durch Hydro-Energie Roth GmbH (2014)	75
4.3. Übertragbarkeit der Ergebnisse aus Labor- und Feldmessungen	75
4.3.1. Unterschiede der Versuchsaufbauten	75
4.3.2. Ergebnisse und Fazit	77
5. ....Ethohydraulik und verhaltensbiologische Grundlagen	78
5.1. Grundlagen	78
5.2. Genehmigungs- und tierschutzrechtliche Grundlagen für die Labor- und Freilandstudien	79
5.3. Biologie und Verhaltensweise der eingesetzten Versuchstiere	81
5.3.1. Atlantischer Lachs	82
5.3.2. Europäischer Aal	84
5.4. Beobachtungsmethodik an der TU Darmstadt	86

---

---

5.5.	Beobachtungsmethodik an den Wasserkraftanlagen Ottenau und Rotenfels	88
6.....	Ethohydraulische Studien an Schrägrechen mit Lachssmolts	92
6.1.	Laborstudien mit Lachssmolts	92
6.1.1.	Versuchsaufbau und -durchführung	92
6.1.2.	Untersuchte Schrägrechenkonfigurationen	93
6.1.3.	Ethohydraulische Befunde mit Lachssmolts	98
6.1.4.	Empfehlungen für die Schrägrechenbemessung anhand der Laborstudien	120
6.2.	Feldversuche mit Lachssmolts am Wasserkraftwerk Ottenau (Schrägrechen)	122
6.2.1.	Versuchsaufbau und -durchführung	122
6.2.2.	Befunde der Feldversuche mit Lachssmolts	125
6.2.3.	Empfehlungen für die Schrägrechenbemessung anhand der Freilandstudien	132
6.3.	Ergebnissynthese aus Labor- und Feldversuchen	133
6.3.1.	Unterschiede der Versuchsaufbauten	133
6.3.2.	Übertragbarkeit der Labor- und Feldbefunde	134
6.4.	Fazit	135
7.....	Ethohydraulische Studien an (elektrifizierten) Schrägrechen mit Aalen	137
7.1.	Laborstudien mit Aalen	138
7.1.1.	Versuchsaufbau und -durchführung	138
7.1.2.	Untersuchte Schrägrechenkonfigurationen	139
7.1.3.	Ethohydraulische Befunde mit Aalen (mit/ohne Elektrifizierung)	142
7.1.4.	Empfehlungen für die Schrägrechenbemessung anhand der Laborstudien	159
7.2.	Feldversuche mit Aalen am Wasserkraftwerk Ottenau (Schrägrechen)	161
7.2.1.	Versuchsaufbau und -durchführung	161
7.2.2.	Befunde der Feldversuche mit Aalen	164
7.2.3.	Empfehlungen für die Schrägrechenbemessung anhand der Freilandstudien	170
7.3.	Ergebnissynthese aus Labor- und Feldversuchen	170
7.3.1.	Unterschiede der Versuchsaufbauten	170
7.3.2.	Übertragbarkeit der Labor- und Feldbefunde	171
7.4.	Elektroscheuchversuche am Wasserkraftwerk Rotenfels an der Murg	172
7.4.1.	Versuchsaufbau und -durchführung	173
7.4.2.	Frühere Elektroscheuchversuche der EnBW AG	176
7.4.3.	Befunde der Elektroscheuchversuche	178
7.4.4.	Empfehlungen für die Installation einer Elektroscheuchanlage	180
7.4.5.	Übertragbarkeit der elektrifizierten Labor- und Feldbefunde	180
7.5.	Fazit	180
8.....	Zusammenfassung & Ausblick	183
8.1.	Rechenverluste an Schrägrechen	183
8.2.	Strömungssignaturen und Strömungshydraulik an Schrägrechen	184
8.3.	Ethohydraulische Versuche mit Lachssmolts	184
8.4.	Ethohydraulische Versuche mit Aalen	187
8.5.	Empfehlungen	189
8.6.	Ausblick und weiterer Forschungsbedarf	191
	Abbildungsverzeichnis	193
	Tabellenverzeichnis	201

---

---

Abkürzungsverzeichnis	203
Symbolverzeichnis	205
Literaturverzeichnis	207
Anhang 1: Verlustbeiwerte der untersuchten Schrägrechen in Kap. 3.1	I
Anhang 2: Hydrometrisch ermittelte Rechenverluste am Schrägrechen im Forschungslabor der TU Darmstadt III	
Anhang 3: Probleme bei der Versuchsdurchführung mit Lachssmolts im Forschungslabor	IV
Anhang 4: Probandenliste der 60 eingesetzten und besenderten Lachssmolts in Ottenau	V
Anhang 5: Probleme bei der Versuchsdurchführung mit Lachssmolts im Feld	VI
Anhang 6: Auswertung der Signaldaten der Lachssmolts vor dem Schrägrechen Ottenau	VII
Anhang 7: Probleme bei der Versuchsdurchführung mit Aalen im Forschungslabor	XIV
Anhang 8: Probandenliste der 124 eingesetzten und besenderten Aale in Ottenau	XV
Anhang 9: Probleme bei der Versuchsdurchführung mit Aalen im Feld	XVII
Anhang 10: Auswertungen der Signaldaten der Aale vor dem Schrägrechen Ottenau	XVIII

---

---

## 1. Einleitung

---

*„Da am alten Rechen des Kraftwerkes Rheinfelden, Rhein, Schweiz, mit 15 mm Spaltweite viele Lachse zugrunde gingen, wurde er auf 38 mm Spaltweite umgebaut. Aus demselben Grund mußte auch die ursprünglich mit 20 mm bemessene Spaltweite der Rechen an den Mainkraftwerken vergrößert werden, da an diesen Aale massenhaft zugrunde gingen.“  
(Mosonyi, 1966).*

Bereits in den 1960er Jahren wurde über den Fischschutz an Wasserkraftanlagen und anderen Querbauwerken diskutiert, wenn auch nach heutigen Gesichtspunkten nicht immer zielführend. So empfahl *Mosonyi* sogar den Entfall eines Fischschutzrechens, wenn durch ihn eine größere Gefahr auf die Fische ausgeht, als durch die Turbine. Untersuchungen an schwedischen Niederdruckkraftwerken ergaben entsprechende Ergebnisse, so dass die schwedischen Behörden sogar Kraftwerke ohne Feinrechen genehmigten (*Mosonyi*, 1966).

Versuche und Studien im Labor und an Feldanlagen ergaben jedoch in den vergangenen 50 Jahren seit Publizierung des Bandes Wasserkraftwerke I von *Mosonyi* erheblich differenzierte Ergebnisse, vor allem hinsichtlich des Fischverhaltens, das in den 1960er Jahren noch nahezu unerforscht war.

Seit Ende der 1970er Jahre verabschiedete die Europäische Wirtschaftsgemeinschaft bzw. die Europäische Union zahlreiche Richtlinien zum Schutz von Oberflächen- und Grundwasser, zur Behandlung von Abwasser, zu Fragen der Haftung bei Umweltschäden sowie zur Thematik und dem Umgang mit Hochwasserrisiken.

Für Betreiber von Wasserkraft- und Stauanlagen hat die Richtlinie 2000/60/EG zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik, die sogenannte EU-Wasserrahmenrichtlinie (EU-WRRL), die höchste Relevanz. Sie wurde von der Europäischen Union u.a. aus Gründen des Wasser- und Tierschutzes am 23.10.2000 verabschiedet. Sie gibt Ziele und Methoden vor, wie eine gute Wasserqualität zu erreichen ist. So soll die biologische, chemische und ökologische Qualität der Gewässer in einen sogenannten guten ökologischen Zustand überführt werden. In Deutschland wurde die Wasserrahmenrichtlinie mittels des Gesetzes zur Ordnung des Gewässerhaushaltes (Wasserhaushaltsgesetz WHG) vom 31.07.2009 in nationales Recht überführt, zuletzt geändert 2016 und ist am 18.10.2016 in Kraft getreten. Die Wassergesetze (WG) der einzelnen Länder wurden ebenfalls angepasst, wie z. B. das aktuelle WG Baden-Württemberg vom 01.01.2015.

Für Stauanlagen und Wasserkraftwerke ist auf nationaler Ebene v.a. das WHG (§§ 33-35) relevant und beinhaltet folgende Vorgaben:

- Auferlegung von Mindestwassermengen bei Ausleitungskraftwerken;
- Forderung zur Realisierung der beidseitig gerichteten Durchgängigkeit an Wanderhindernissen (z. B. an Wehren oder Wasserkraftanlagen) zur Vermeidung von negativen Auswirkungen auf die Reproduktion von Fischen und letztendlich auf die gesamte Fischpopulation (*Schmalz et al.*, 2015 und Abb. 1);
- Vorsehen von Maßnahmen zum Schutz der Fischpopulation, z. B. durch die Installation von feinmaschigen Rechenanlagen, Verhaltensbarrieren, geringen Anströmgeschwindigkeiten vor Rechen und Maschineneinläufen, Frühwarnsystemen und Drosslung der Turbinen.

In den §§ 27-31 des WHG sind die Bewirtschaftungsziele für Gewässer beschrieben und Zeitrahmen für die Umsetzung der Maßnahmen festgelegt. In Ausnahmefällen, wenn bestimmte Voraussetzungen erfüllt sind, können Behörden die Umsetzungs- und Zielerreichungsfrist über den 22.12.2015 hinaus verlängern. Ebenso können Gewässer als künstlich und erheblich verändert eingestuft werden - für sie entfallen dann die Bewirtschaftungsziele.

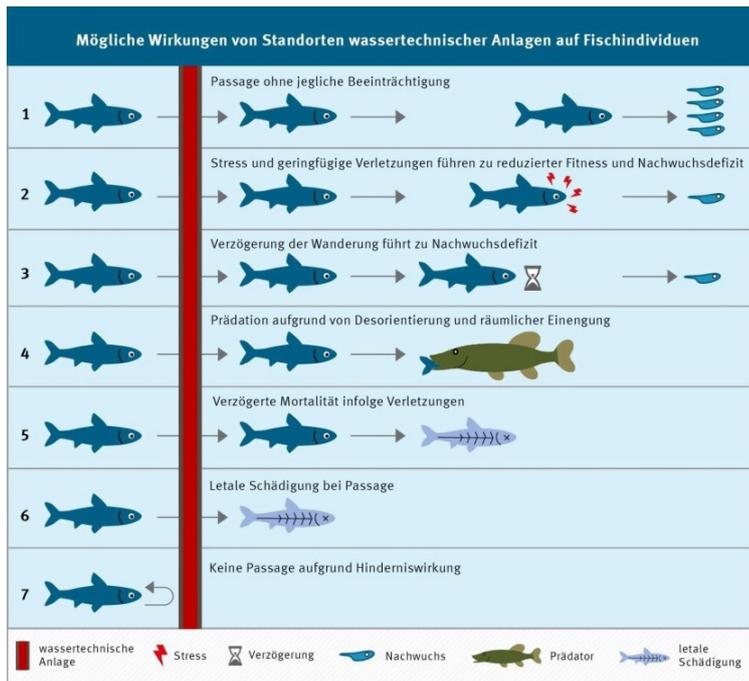


Abb. 1: Einwirkungen auf die Reproduktion von Fischpopulationen (Quelle: 4.0 Ecologic Institut & IGF Jena / FLUSS im Auftrag des Forum Fischschutz, 2015).

Zur Festlegung der Mindestwassermenge in Ausleitungsstrecken werden in der Regel Mindestwassergutachten von Umweltbüros oder fachlich spezialisierten Gutachtern erstellt. Es werden u.a. Laich- und Lebenshabitate bei unterschiedlichen Wassermengen begutachtet und bewertet. Bei der Beurteilung der Qualität der Gewässerstrecke spielt auch die Durchwanderbarkeit an pessimalen Stellen eine Rolle, also die Wassertiefe und Strömungsgeschwindigkeit an flachen und weniger durchwanderbaren Bereichen. Darüber hinaus muss die Ausleitungsstrecke für Fische auch auffindbar sein, was mit baulichen Einrichtungen oder durch Erhöhung der Mindestwassermenge und damit Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit erreicht werden kann.

Die Durchgängigkeit – stromauf und stromab – wird in den überwiegenden Fällen anhand von Fischaufstiegs- und Fischabstiegsanlagen erreicht. Für flussauf wandernde Fische sind Fischaufstiegsanlagen in unterschiedlichen Ausführungen und Anordnungen weit verbreitet – hierzu ist der Stand der Technik gut definiert. Das Merkblatt M-509 der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA, 2014) beinhaltet Bemessungs- und Gestaltungsregeln für Fischaufstiegsanlagen. Zahlreiche Leitfäden, Broschüren, Gutachten und graue Literatur belegen Ausführungsbeispiele und -details.

Für flussab gerichtete Fischwanderungen hingegen liegen bis dato nur wenige wissenschaftlich fundierte Kenntnisse vor. Diese reichen derzeit noch nicht zur Definition allgemeiner Vorgaben zur Bemessung und Planung von Fischabstiegsanlagen aus. Lediglich Empfehlungen aus Betriebserfahrungen werden u.a. bei Ebel (2013) aufgelistet und beschrieben, wie auch bei Dumont *et al.* (2005) im Handbuch Querbauwerke oder bei Dumont *et al.* (2012) in der Publikation des Umweltbundesamtes 21/2012. Empfehlungen zu Planung, Bau und Funktionskontrolle von Fischabstiegsanlagen bietet das DWA-Schriftenheft *Fischschutz- und Fischabstiegsanlagen – Bemessung, Gestaltung, Funktionskontrolle* (DWA, 2005), welches derzeit überarbeitet wird.

Wichtiger Bestandteil einer funktionierenden Fischabstiegsanlage ist nicht nur ein auffindbarer und passierbarer Abwanderungsweg, sondern auch der Schutz abwanderwilliger Fische vor dem Einschwimmen in für sie gefährliche Bereiche, wie z. B. Turbinenkammern an Wasserkraftanlagen oder Kühlwasserentnahmestellen. Daher werden an diesen Bauwerken/Anlagen mechanische Barrieren (z. B. Rechenanlagen) oder Verhaltensbarrieren installiert. Letztere wirken jedoch art- und größenspezifisch unterschiedlich (DWA, 2005). An größeren Wasserkraftanlagen kommen vermehrt Betriebsmanagementsysteme zum Schutz der Fische zum Einsatz. Mittels Frühwarnsystemen werden Maschinen gedrosselt und damit die Geschwindigkeiten vor Rechenanlagen und Einlaufbauwerken verringert.

---

## 1.1. Forschungsanlass

Die Wasserkraft stellt eine wichtige Säule bei der Erzeugung Erneuerbarer Energie in Deutschland, aber auch in vielen anderen Ländern, dar und ist als historisch ausgewachsene Technik weit verbreitet. Oftmals grundlastfähig erzeugt sie deutlich mehr Betriebsstunden im Jahr als Windkraft- oder Photovoltaikanlagen. Der Ausbaugrad in Deutschland ist hoch, stellenweise sind jedoch weitere Potenziale an kleinen bis großen Flüssen vorhanden, welche im Rahmen unterschiedlicher Potenzialstudien ermittelt wurden. So wurden beispielsweise in der Potenzialstudie für das Einzugsgebiet des Neckars (*Heimerl et al.*, 2011) insgesamt 25 MW als technisch-ökonomisch-ökologisch sinnvolles Potenzial ermittelt. Die Wasserkraftpotenzialstudie für Deutschland von *Anderer et al.* (2010) im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit ergab ein ausbaubares technisches Potenzial für die Bundesrepublik Deutschland in Höhe von 968 MW.

Um die Wasserkraft weiterhin als Bestandteil der Erneuerbaren Energien zu erhalten, müssen die bereits erwähnten Vorgaben und Ziele der EU-WRRL in Deutschland und in den anderen Ländern der Europäischen Union eingehalten und umgesetzt werden. Zu zwei der oben genannten Vorgaben des WHG – Mindestwasserabgabe und stromauf gerichtete Durchgängigkeit – liegt eine Vielzahl von Untersuchungen und Erkenntnissen vor. Dies trifft für die stromab gerichtete Durchgängigkeit und den Fischschutz nicht zu, hier sind zahlreiche Wissenslücken vorhanden.

Der derzeit bei Wasserkraftanlagen häufig empfohlene/geforderte Fischschutz mittels sogenannter schräg zur Anströmung angeordneter Horizontalstabrechen (sog. **Schrägrechen**) basiert im Wesentlichen auf Beobachtungen an wenigen bestehenden Wasserkraftanlagen, vorwiegend mit Ausbauwassermengen kleiner als 90 m<sup>3</sup>/s. Solche Schrägrechen werden gegenwärtig als optimale Fischschutzmethode angesehen, da neben der Schutzwirkung auch eine Leitwirkung in Richtung eines Bypasses beobachtet wurde. Bekannt ist über die Wirkungsweise des Schrägrechens jedoch nur wenig: Weder die Strömungssignaturen, noch die hydraulischen Verlusthöhen des Rechens oder das Verhalten von Fischen an der Rechenebene bzw. unter welchen Randbedingungen die sogenannte Leitwirkung bei Fischen verursacht wird, sind gegenwärtig wissenschaftlich durchdrungen. Auch wurden zur Auslegung der Schrägrechen und zur Erforschung der Wirksamkeit einzelner geometrischer oder hydraulischer Parameter noch keine vertieften Untersuchungen, die auf hydraulischen oder gar ethohydraulischen Studien beruhen, durchgeführt.

Eingehender untersucht wurden bislang herkömmliche, weit verbreitete Vertikalstabrechen mit großen Winkeln zur Sohle und einer orthogonalen Ausrichtung zur Hauptströmung. Hierzu wurden mit Aalen ethohydraulische Untersuchungen von u.a. *Adam et al.* (1999) und *Travade et al.* (2010) durchgeführt. Feldstudien hingegen gibt es aufgrund des erheblichen Untersuchungsaufwands und der eingeschränkten Möglichkeit einer Versuchsanlage nur in kleinerem Umfang, z. B. bei *Jansen et al.* (2007) und *Travade et al.* (2010). Die daraus gewonnenen Erkenntnisse bezüglich der Anströmgeschwindigkeit, der Abstände der einzelnen Rechenstäbe sowie deren Anordnung und die daraus abgeleiteten Rechenverlustberechnungen werden gegenwärtig kritiklos auf Schrägrechen adaptiert, ohne zu wissen, ob dies wissenschaftlich zulässig ist.

Die jüngst erschienene Handreichung zum Fischschutz und Fischabstieg an Wasserkraftanlagen (*LUBW*, 2016) bietet eine Zusammenstellung fachlicher Grundlagen für die Bemessung und Planung von Fischabstiegsanlagen sowie von Fischschutzeinrichtungen. Die darin aufgelisteten Grenz- und Richtwerte für einzelne geometrische und hydraulische Parameter gründen jedoch nicht immer auf wissenschaftlich fundierten Ergebnissen oder Monitoringbefunden, sondern sind größtenteils Expertenempfehlungen, die oftmals auf einfache Beobachtungen an Bestandsanlagen fußen. Auch die Empfehlungen des *World Wide Fund For Nature WWF* (2010) zum Fischschutz mittels Rechenanlagen basieren lediglich auf geometrischen Grundlagen, nämlich den Körperdicken und -höhen der relevanten Zielfischarten und nicht auf deren Verhalten an einer Barriere. Das Verhalten der Fische spielt bis dato nur eine untergeordnete Rolle bei der Bemessung von mechanischen Barrieren.

Die vorliegende Arbeit wurde im Rahmen einer Forschungs Kooperation der EnBW Energie Baden-Württemberg AG mit der Technischen Universität Darmstadt (Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft) erstellt und untersucht den Schrägrechen hinsichtlich

- der Rechenverluste, welche durch den Schrägrechen entstehen,
- der hydraulische Strömungssignaturen, welche durch die Anströmung des Schrägrechens entstehen und
- des Verhaltens von Fischen vor dem Schrägrechen unter verschiedenen Randbedingungen.

Damit sollen bestehende Wissenslücken geschlossen und Praxisempfehlungen zur Planung und Gestaltung gegeben werden können. Bei den Empfehlungen waren art-, gewässer- und anlagenspezifische Randbedingungen zu berücksichtigen, welche die Wirkung von Schrägrechen beeinflussen können.

## 1.2. Forschungsziele

Damit in Zukunft Schrägrechen für eine optimale Schutz- und Leitfunktion für Fische korrekt geplant werden können, besteht zunächst das Ziel, den Schrägrechen auf seine hydraulischen Merkmale hin näher zu untersuchen. Dies geschieht anhand der Ermittlung von Rechenverlusten und Strömungssignaturen. Anschließend wird das Verhalten von verschiedenen Fischen vor dem Schrägrechen beobachtet und deren Reaktionen auf den Schrägrechen analysiert. Daraus sollen Schlüsse gezogen werden, unter welchen geometrischen und hydraulischen Randbedingungen die besten Ergebnisse für eine Abwanderung von Fischen entstehen – im Hinblick auf eine Schutz- und Leitwirkung des Schrägrechens.

Anhand dieser Ergebnisse soll es Planern, Behörden und Betreibern ermöglicht werden, Schrägrechen optimal einzusetzen und zu bemessen oder Bestandsrechenanlagen entsprechend umzubauen, um den Anforderungen an den Fischschutz gerecht zu werden.

## 1.3. Methodisches Vorgehen

Um zunächst einen Überblick über vorhandene Untersuchungen und den Stand des Wissens an Schrägrechen zu erhalten sowie um Wissenslücken herauszuarbeiten und zu definieren, wurde zu Beginn der Arbeit eine Literaturrecherche zum Schrägrechen, zu dessen Aufbau und dessen Einsatzorten, zu betrieblichen Erfahrungen sowie zu dessen geometrischen und hydraulischen Parametern durchgeführt (Kap. 2). Zur späteren Berechnung der Rechenverluste wurden die relevanten verlust erzeugenden Rechenparameter auf Basis der Rechen- und Strömungshydraulik erläutert und bisher bekannte Verlustformeln dargestellt und bewertet (Kap. 3). Auf Basis dieser Grundlagen wurde daran anschließend gemäß folgender Projektmethodik (Abb. 2), die sich in drei Schwerpunkte gliedert, vorgegangen, um die oben genannten Wissenslücken zu schließen.



Abb. 2: Aufbau der Methodik in vorliegender Forschungsarbeit.

---

## Hydrometrie

Zur Bestandsaufnahme und Überprüfung bestehender Ansätze zur Ermittlung von Rechenverlusten wurden nach der Literaturrecherche aktuelle Formeln zur hydraulischen Verlustberechnung an verschiedenen Rechanlagen mit horizontaler oder vertikaler Stabausrichtung und unterschiedlicher Schrägstellung oder Neigung zusammengestellt (Kap. 2). Diese Ansätze wurden mit bereits vorliegenden Messungen von Rechenverlusten verglichen (Kap. 3). Im Anschluss daran wurden im wasserbaulichen Forschungslabor der Technischen Universität Darmstadt die tatsächlichen Verlusthöhen an Schrägrechen unter unterschiedlichen Randbedingungen ermittelt. Hier wurde mittels Vergleichs der gemessenen und berechneten Verlusthöhen untersucht, ob die Anwendung von bekannten Formeln auf den Schrägrechen möglich bzw. zulässig ist.

Darüber hinaus wurden für verschiedene Schrägrechen-Randbedingungskonstellationen (sog. **Setups**) die Strömungssignaturen durch hochaufgelöste hydrometrische Geschwindigkeits- und Richtungsmessungen ermittelt, graphisch dargestellt und daraus erkannte Unterschiede zwischen Labor- und Feldmessungen bewertet (Kap. 4). Die Kenntnis der hydraulischen Rechenverluste bzw. deren rechnerische Ermittlung ist für die konstruktive Bemessung von Schrägrechen von zentraler Bedeutung. Die detaillierten Strömungssignaturen bilden hingegen die Basis für ethohydraulische Interpretationen der beobachteten Verhaltensweisen der Fische bei den verschiedenen durchgeführten Labor- und Feldstudien.

## Ethohydraulik

Als zweite Säule der Projektmethodik wurden zur Untersuchung der Schutz- und Leitwirkung von Schrägrechen ethohydraulische Versuche mit Lachssmolts und Aalen im wasserbaulichen Forschungslabor der TU Darmstadt durchgeführt. Die dazu benötigten biologischen und tierschutzrechtlichen Grundlagen und erforderlichen infrastrukturellen Einrichtungen zur Versuchsdurchführung wurden recherchiert und vorbereitet (Kap. 5). Im Zuge der ethohydraulischen Tests wurden verschiedene realitätsnahe Setups mit einer großen Anzahl an Versuchsfischen untersucht (Kap. 6 und 7). Um eine mögliche Kombination einer mechanischen Barriere mit einer Verhaltensbarriere zu untersuchen (sog. **Hybridrechen**), wurde bei einigen Setups im Labor der Schrägrechen während der Aalversuche zeitweise mit einem schwachen Stromfeld belegt.

Zur Analyse und Bewertung des Fischverhaltens wurden die Strömungssignaturen der jeweiligen Setups aus der ersten Säule der Projektmethodik „Hydrometrie“ hinzugezogen.

## Telemetrie

Zur Validierung der ethohydraulischen Laborstudien am Schrägrechen wurden als dritte und letzte Säule Feldversuche mit Lachssmolts und Aalen am EnBW-Wasserkraftwerk Ottenau an der Murg, das seit 2012 über einen Horizontalrechen verfügt, durchgeführt. Diese Versuche erfolgten mittels aktiver Telemetrie (Kap. 6 und 7). Zum näherungsweise Vergleich mit den elektrifizierten Versuchen im Labor wurde am Wasserkraftwerk Rotenfels an der Murg eine elektrische Fischeuchanlage installiert und deren Wirksamkeit mittels aktiv besenderten Aalen getestet.

Aus der Synthese der Erkenntnisse wurde es möglich, Aussagen über die Ursachen der Leit- und Schutzwirkung von Schrägrechen und Bemessungsempfehlungen für die Planung und Auslegung zu geben (Kap. 6 bis 8). Darüber hinaus konnte eine Aussage zur Funktionstüchtigkeit und zu möglichen Einsatzgebieten von Hybridrechen gemacht werden.

## Fazit

Das Fazit der vorliegenden Arbeit basiert auf den vorher genannten drei Säulen der Projektmethodik der „Hydrometrie“, der „Ethohydraulik“ und der „Telemetrie“. Damit wird es möglich, Auswirkungen von geometrischen, hydraulischen und elektrischen Randbedingungen auf Fische an Schrägrechen darzustellen. Hieraus können Aussagen und Empfehlungen zur Bemessung und Auslegung von Schrägrechen gegeben werden.

---

## 2. Grundlagen und Erfahrungen zu Rechenanlagen

---

Wie bereits in Kapitel 1 dargestellt, sind bislang keine ausreichend wissenschaftlich fundierten Grundlagen zu Schrägrechen bekannt, nach denen eine standortspezifische Bemessung erfolgen kann. Dieses Kapitel soll den Schrägrechen in seinem Aufbau und Zweck beschreiben sowie dessen geometrische und verlustbringende Parameter erläutern und damit für die weitere Diskussion die Grundlagen liefern.

### 2.1. Zweck und Verbreitung des Schrägrechens

Eine mechanische Barriere diente zu Beginn des Wasserkraftzeitalters Anfang des 20. Jahrhunderts zum Schutz der Turbine vor Treibgut, Geschiebe, Treibeis sowie zur Vermeidung von möglichen Personenschäden. Seit ungefähr Mitte des 20. Jahrhunderts trat verstärkt der Fischschutz in den Vordergrund: Durch ein Abhalten der Tiere am Rechen sollten Tierschädigungen an Turbinenanlagen vermindert werden, welche durch die Laufschaufeln, den Spalt zwischen Schaufeln und Laufradmantel sowie durch Druckunterschiede im Saugrohr entstehen können. Im Rahmen der EU-WRRL und der Novellen des WHG sollen Fische durch physisch undurchlässige Barrieren vor einem Einschwimmen in die Turbinenkammer geschützt werden. Des Weiteren sollte aber auch der Rechen selbst keine Schäden am Fisch, z. B. durch ein Anpressen des Fisches an die Stäbe aufgrund hoher Anströmgeschwindigkeiten oder durch mechanische Einwirkung der Rechenreinigungsmaschine (RRM), verursachen.

Der Schrägrechen soll in der Lage sein, den Fisch nicht nur zu schützen, sondern ihn auch in Richtung eines seitlich angeordneten Bypasses zu leiten. So soll eine sogenannte „Leitwirkung“ hervorgerufen werden, welche für die ankommenden wanderwilligen Fische einen raschen und gefahrlosen Abstieg gewährleistet. Dieses Leitrechen-Bypass-System wurde erstmals von *Ebel, Gluch & Kehl* (2001) ingenieurbologisch ausgelegt und technisch geplant. Ziel der damaligen Planung war es, nicht nur eine Leitwirkung für Fische in Richtung eines seitlichen Bypasses herzustellen, sondern auch die Rechenverluste zu minimieren und eine horizontale Ableitung des Treibguts zu ermöglichen.

In Deutschland ist dieses Fischschutzsystem in den Bundesländern Sachsen und Sachsen-Anhalt mittlerweile Standard bei Neu- und Umbauten von Wasserkraftwerken (*WWF*, 2010). Dort wurden 2006 die ersten Schrägrechen gebaut, wie bspw. am Wasserkraftwerk Halle-Planena oder am WKW Rothenburg an der Saale, welche nach Inbetriebnahme 2007 und 2008 als Pilotanlagen hinsichtlich der Effizienz der Schutz- und Leitwirkung untersucht wurden (*Ebel*, 2013). Seitdem wird das System in vielen Ländern eingesetzt, was zahlreiche Fachberichte und Referenzen von Stahlwasserbaufirmen belegen.

International findet der Schrägrechen vorwiegend im europäischen sowie nordamerikanischen Raum Anwendung und wurde mit vertikaler Stabausrichtung in den Vereinigten Staaten bereits in den 90er Jahren gebaut (*Taft*, 1986 und *OTA*, 1995), jedoch erst seit 1998 in seiner Wirkungsweise näher untersucht (*EPRI*, 1998).

Eine detaillierte wissenschaftliche Untersuchung von bisher noch nicht untersuchten Aspekten des Schrägrechens soll mit der vorliegenden Arbeit durchgeführt werden.

### 2.2. Aufbau des Schrägrechens

Der Schrägrechen gilt aufgrund seines Aufbaus als mechanische Barriere. Er wird im Gegensatz zu Vertikalstabrechen mit horizontalen Rechenstäben bestückt und vom Gewässer schräg angeströmt. Durch seine Schrägstellung sollen die Fische parallel zur Rechenebene zu einem seitlich angeordneten Bypass geleitet werden und über diesen am Wanderhindernis vorbei abwandern (Abb. 3).

Der Schrägrechen wird orthogonal auf dem Sohlniveau stehend aufgebaut (Abb. 3). Der horizontale Winkel  $\delta$  (= **Anströmwinkel**) beschreibt die Schrägstellung des Rechens zur Hauptanströmung (*Hassinger*, 2016 und Abb. 3).

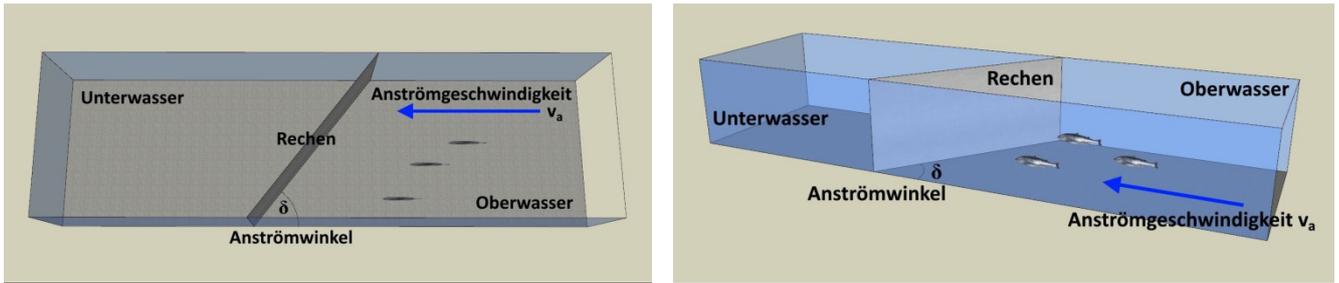


Abb. 3: Systemskizze eines Schrägrehens in 3D-Draufsicht (links) und in 3D-Schrägsicht (rechts) mit Definition des variablen horizontalen Anströmwinkels  $\delta$  und der Anströmgeschwindigkeit  $v_a$ .

Je nach Ausgestaltung der Anströmung und der Anordnung des Schrägrehens herrschen am Rechen keine gleichverteilten und homogenen Strömungsbedingungen. In der Praxis wird daher ein Schrägrehen oftmals ungleichförmig angeströmt, was in der Rechenebene zu Zonen unterschiedlicher Geschwindigkeiten und Anströmrichtungen führen kann (Abb. 4). Eine parallele Anordnung von Bypässen zu den Turbineneinläufen hat eine Einschnürung der Anströmung im Bereich der seitlich angeordneten Turbineneinläufe bzw. im Bereich des Schrägrehens zur Folge (Abb. 4 links und Mitte). Vor allem im Bereich des Pfeilers werden die Stromlinien umgelenkt und strömen den Schrägrehen daher auf seiner gesamten Länge mit unterschiedlichen Anströmwinkeln an. Wird der Bypass seitlich angeordnet, so dass der Abfluss den Schrägrehen gleichförmig anströmt, herrschen an der gesamten Rechenlänge nahezu gleiche Anströmbedingungen (Abb. 4 rechts).

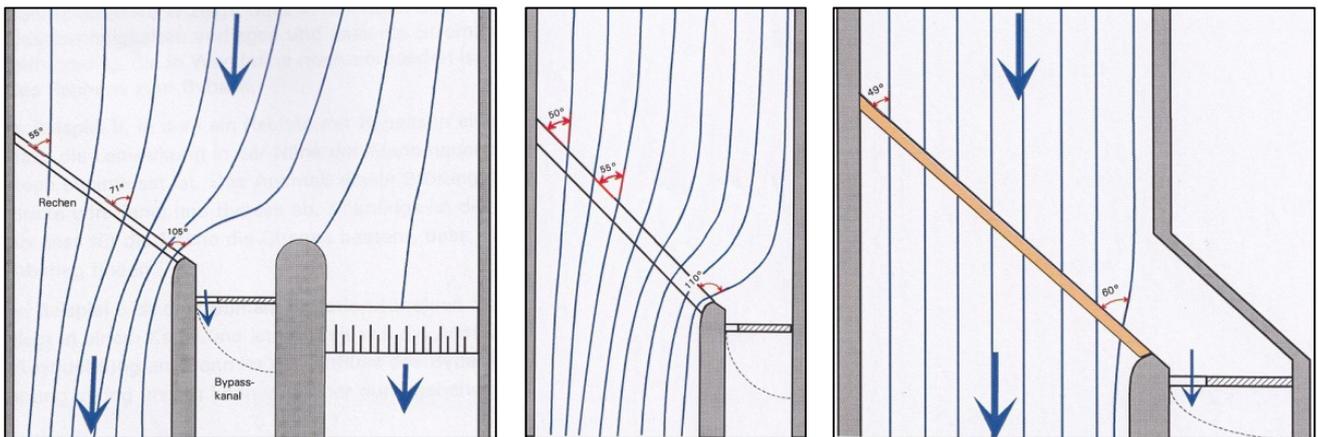


Abb. 4: Verschiedene Anströmsituationen eines 45°-Schrägrehens mit unterschiedlichen Anordnungen. Schrägrehen mit Bypass und Wehr im Kanal (links), Schrägrehen mit Bypass im Kanal (Mitte), Schrägrehen im Kanal mit seitlichem Bypass (rechts) (Quelle: Hassinger, 2016).

Der Anströmwinkel wird oftmals durch bauliche Zwänge in seiner Länge begrenzt. Er liegt bei vielen bisher realisierten Anlagen größtenteils zwischen 30° und 45°, z. B. am WKW Ottenau bei 44°, am WKW Künzelsau bei 42° und am WKW Auer Kotten bei 30°. Behördliche Vorgaben im Rahmen von Genehmigungsverfahren oder behördliche/gutachterliche Empfehlungen (LUBW, 2016) geben stellenweise kleine Anströmwinkel von weniger als 30° vor, sofern es räumlich und bautechnisch möglich ist. Dies wird von den Autoren mit einer erhöhten Leitwirkung begründet. Nach Larinier et al. (2002) soll ein für die Leitwirkung optimaler Anströmwinkel zwischen 20° und 45° betragen.

Zur Festlegung des Anströmwinkels können verschiedene Rechenmodelle zur Beschreibung der Beziehungen zwischen dem artspezifischen Fischverhalten am Rechen, der Schwimmggeschwindigkeit der Zielfischarten und der Anströmverhältnisse (Anströmwinkel und Anströmgeschwindigkeit) herangezogen werden. Diese Modelle wurden z. B. von Pakhorukov & Kuragina (1978), Pavlov (1989) oder O'Keefe & Turnpenny (2005) entwickelt und sind bei Ebel (2013) detailliert beschrieben. In den Bemessungs- und Gestaltungsempfehlungen gibt Ebel weiterhin an, dass der Anströmwinkel kleiner als 45° betragen soll. Auch die ersten Schrägrehen mit vertikalen Stäben, die in den 1990er Jahren im Nordosten der USA realisiert wurden, haben einen Anströmwinkel von 45° (OTA, 1995). Aus diesen Erfahrungen resultiert die weit verbreitete Behauptung, dass Anströmwinkel

möglichst klein gewählt werden müssen. Detaillierte Laboruntersuchungen mit verschiedenen Zielfischarten und unterschiedlichen Anströmwinkeln, die hierzu den wissenschaftlichen Hintergrund liefern könnten, wurden bislang nicht durchgeführt.

Für den Stahlbau kommen bei einem Schrägrechensystem hauptsächlich feuerverzinkte Stahlstäbe, Rahmen und Befestigungsteile zur Anwendung. Eine Ausführung in Edelstahl wird aus Kostengründen nur selten realisiert. Zum Schutz des Schrägrechens vor bodennahem größerem Geschiebe wie Steinen, Müll und zur Sicherstellung der Funktionssicherheit des Rechenreinigers wird üblicherweise an der Sohle des Schrägrechens eine Schwelle vorgesehen, auf welcher der Rechen montiert wird. Diese Schwelle ist bei kleineren Wasserkraftwerken meist zwischen 20 cm bis 30 cm hoch. Bei Flusskraftwerken liegen diese Werte mit 50 cm bis 80 cm höher, da hier durch erhöhte Strömungskräfte größerer Treibgut gegen den Rechen bzw. gegen die Schwelle gedrückt werden kann. Ähnliches gilt für den Schutz des Schrägrechens gegen oberflächennah schwimmendes Treib- und Schwemmgut, wie z. B. Baumstämme. Hierfür wird eine Tauchwand aus Stahlbeton angeordnet. Somit wird der Rechen oben und unten von Stahlbeton eingefasst und deckt nicht die gesamte Wasserhöhe ab (Abb. 5).

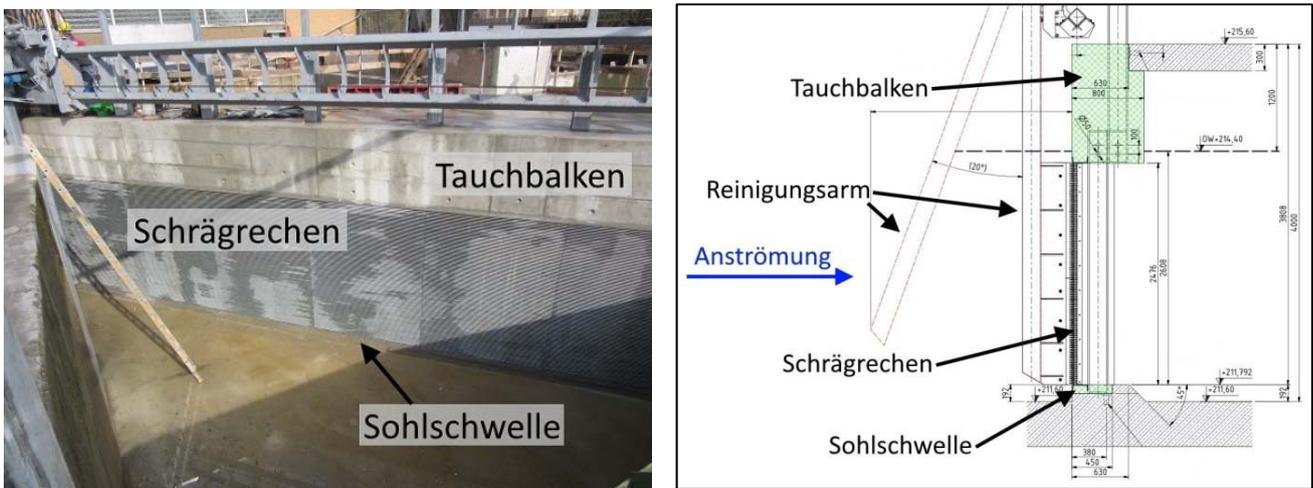


Abb. 5: Neu eingebauter Schrägrechen am WKW Künzelsau mit Tauchbalken und konstruktiv bedingter kleiner Sohlschwelle (links). Planausschnitt (Querschnitt) der gleichen Anlage mit Tauchbalken (obere grüne Schraffur) und kleinem Sohlbalken mit 19,2 cm Höhe (untere grüne Schraffur) (rechts) (Quelle rechts: Jank GmbH im Auftrag der EnBW, 2015).

Zusätzlich kann vor dem Schrägrechen ein Schwimmbalken aus Stahl oder Holz installiert werden, um oberflächliches Geschwemmsel abzuhalten (Abb. 6). Gleichzeitig stellt dies eine Sichtbarriere für den Gefahrenbereich des Kraftwerkseinlaufs gegenüber Wassersportlern und -nutzern dar. Die Geschwemmselbalken schwimmen und folgen somit dem Wasserstand, so dass sie stets oberhalb der Wasseroberfläche sichtbar sind. Stahlgeschwemmselbalken sind größtenteils begehbar und aus Arbeitsschutzgründen mit einem Geländer versehen.



Abb. 6: Geschwemmselbalken aus Holz am WKW Siglingen (links) und begehbarer und höhenverstellbarer Stahlgeschwemmselbalken am Niederdruckwerk Forbach (rechts).

Die nachfolgenden Fotos der Wasserkraftstandorte Künzelsau (Abb. 7) und Ottenau (Abb. 8) zeigen zwei bestehende EnBW Wasserkraftanlagen, welche in den Jahren 2012 und 2016 nachträglich mit Schrägrechen ausgestattet wurden.

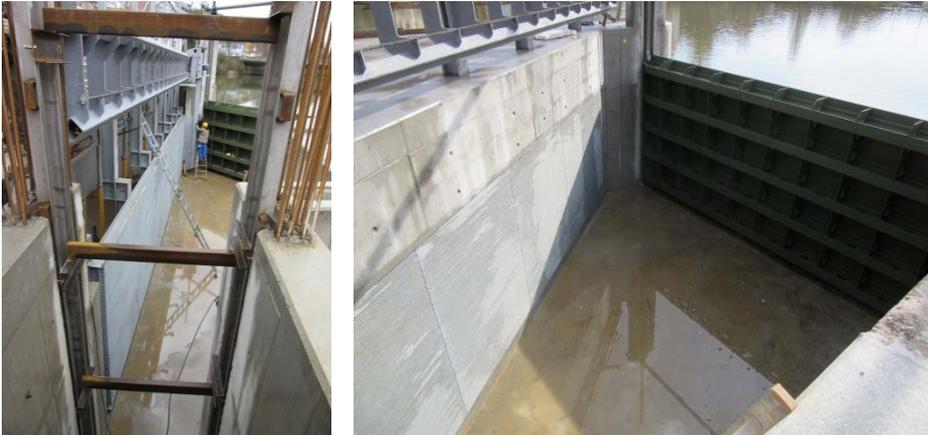


Abb. 7: Schrägrechen am WKW Künzelsau mit 42°-Anströmwinkel und 15 mm Stababstand. Links mit Blickrichtung entgegen der Leitrichtung/Reinigungsrichtung und rechts im fertig gebauten aber noch nicht gefluteten Zustand mit Stahlschütz im Oberwasser.



Abb. 8: Schrägrechen am WKW Ottenau mit 44°-Anströmwinkel und 18 mm Stababstand während der Bauzeit in Blickrichtung Unterwasser (links) und in Blickrichtung Oberwasser (rechts) (Quelle: EnBW, 2012).

### 2.3. Strömungs- und Rechenhydraulik

Strömungsverhältnisse sowie hydraulische Verluste, welche durch den Schrägrechen hervorgerufen werden, sind bisher nicht bekannt und sollen im Rahmen der vorliegenden Arbeit untersucht und dargestellt werden. Im nachfolgenden werden strömungs- und rechenhydraulische Grundlagen erläutert, welche für die weitere Betrachtung des Schrägrechens benötigt werden.

Hydraulik ist die Lehre vom Strömungsverhalten von Flüssigkeiten und der durch sie entstehenden Kräfte und Strömungsvorgänge. Ruhende Flüssigkeiten werden in der Hydrostatik untersucht, bewegte Strömungsmedien in der Hydrodynamik. Um die Auswirkung eines Rechentyps mit seinen spezifischen Parametern auf die Strömung zu untersuchen, bedarf es der Anwendung hydrodynamischer und -energetischer Betrachtungen.

#### Kontinuitätsgleichung

Die mittlere Geschwindigkeit  $v$  in einem senkrecht durchflossenen Gerinnequerschnitt berechnet sich nach der Kontinuitätsgleichung (Gl. 1) und ist abhängig vom Abfluss  $Q$  und der senkrechten Querschnittsfläche  $A$  im Kanal vor dem Rechen (Abb. 9). Der Abfluss wird auch als Volumenstrom  $V$  pro Zeiteinheit  $\Delta t$  bezeichnet.

$$Q = \frac{V}{\Delta t} = A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2 = \dots = A_i \cdot v_i \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (\text{Gl. 1})$$

Q	=	Abfluss vor einem Rechen	[m <sup>3</sup> /s]
v	=	querschnittsgemittelte Anströmgeschwindigkeit	[m/s]
A	=	Querschnittsfläche im Kanal vor dem Rechen	[m <sup>2</sup> ]
V	=	Volumenstrom pro Zeiteinheit	[m <sup>3</sup> ]
Δt	=	Zeiteinheit	[s]

Gleichung 1 gilt insbesondere für Strömungen mit freien Oberflächen, sogenannte Freispiegelabflüsse, und damit für Einlaufkanäle an Wasserkraftanlagen, an denen die Rechen installiert werden. Anhand der Kontinuitätsgleichung können mit der Kenntnis des Einlaufquerschnitts und des Abflusses die Fließgeschwindigkeiten ermittelt werden bzw. umgekehrt auf den Abfluss durch das Wasserkraftwerk geschlossen werden.

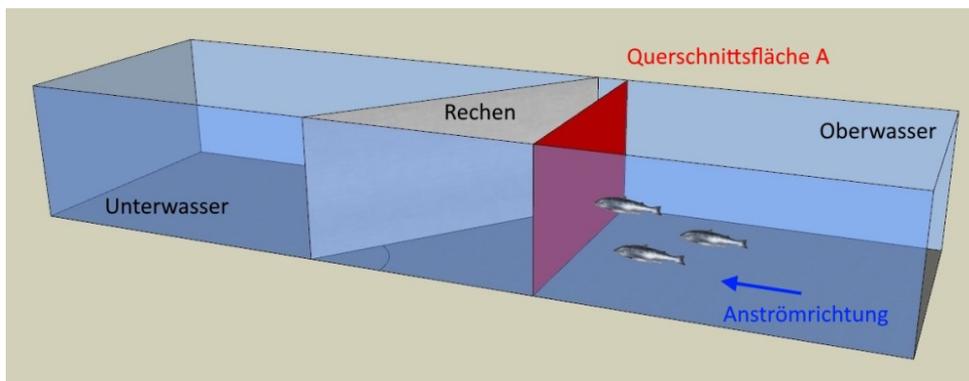


Abb. 9: Querschnittsfläche A (rot) im Kanal bzw. in der Versuchsrinne vor einem Schrägwehrrahmen.

Anhand der Kontinuitätsgleichung (Gl. 1) ist der Durchfluss  $Q$  als Randbedingung für die Rechenauslegung anzusehen und zunächst unabhängig von Rechenfläche, Rechenlänge, Ausführung, Schrägstellung oder Neigung des Rechens gegeben. Nur eine Veränderung der Querschnittsfläche des Gerinnes führt zu einer Veränderung der dortigen Geschwindigkeit. Daraus resultiert eine Zunahme der mittleren Geschwindigkeit an der Querschnittsverbauung durch den Rechen, um die Abflusskontinuität im System zu gewährleisten. Dies geschieht durch die Beschleunigung des Wassers bei der Rechendurchströmung, indem das Wasser vor dem Rechen aufgestaut wird und so zusätzliches Potenzial entsteht, welches für die Beschleunigung benötigt wird. Die Anströmgeschwindigkeit wird daher durch den Aufstau beeinflusst und ist abhängig von der jeweiligen Verbauung des Abflussquerschnittes durch den Rechen.

### Energiegleichung nach Bernoulli

Der Schweizer Mathematiker und Naturwissenschaftler Daniel Bernoulli (1700-1782) formulierte die sog. hydraulische Energiehöhe – ein metrischer Parameter, welcher den Energiegehalt einer Strömung in einem Querschnitt darstellt. Gemäß dem fundamentalen Energieerhaltungssatz gilt, dass die Energie in einem System immer erhalten bleibt – sie kann jedoch von einer zur anderen Form wechseln (bspw. wird hydraulische Energie infolge von Turbulenzen in Wärme und Schall transferiert). Die hydraulische Energiehöhe setzt sich aus drei Komponenten zusammen:

Geschwindigkeitshöhe / kinetische Höhe  $h_K$ : 
$$h_K = \frac{v^2}{2g} \quad [\text{m}] \quad (\text{Gl. 2})$$

Druckhöhe  $h_D$ : 
$$h_D = \frac{p}{\rho g} \quad [\text{m}] \quad (\text{Gl. 3})$$

Geodätische Höhe  $z$ : 
$$z \quad [\text{m}]$$

Die Gesamtenergiehöhe  $h_G$  lautet damit anhand der Bernoulli Energiegleichung:

$$h_G = h_K + h_D + z = \frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\rho g} + z \quad [\text{m}] \quad (\text{Gl. 4})$$

$v$	=	Fließgeschwindigkeit	[m/s]
$\rho$	=	Dichte des Wassers	[kg/m <sup>3</sup> ]
$p$	=	Druck des Wassers	[N/m <sup>2</sup> ]
$g$	=	Erdbeschleunigung	[m/s <sup>2</sup> ]

Bei Gerinnen mit Freispiegelabflüssen, wie bspw. an vielen Rechenanlagen, ist als geodätische Höhe  $z$  das Sohlenniveau einzusetzen.

Bei einer Bilanzierung der Energiehöhen zwischen zwei betrachteten Querschnitten muss bei realen Fluiden die Reibung und Turbulenz berücksichtigt werden. Hieraus resultiert die partielle Umwandlung hydraulischer Energie in Wärme- und Schallenergie. Grundlage dafür bilden die Arbeiten von *Prandtl* (1931) und von *Kolmogorov* (1941) zur Modellierung von Turbulenzenergie. Die dazugehörige Energie-Verlusthöhe wird kurz Verlusthöhe  $h_v$  genannt.

Die Gesamtenergiehöhenbilanz  $h_{Gr}$  für reale Flüssigkeiten zwischen zwei Abschnittsgrenzen lautet demnach nach der erweiterten Bernoulligleichung:

$$h_{Gr} = \frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\rho g} + z + h_v \quad [\text{m}] \quad (\text{Gl. 5})$$

$h_v$	=	Verlusthöhe	[m]
$v$	=	Fließgeschwindigkeit	[m/s]
$\rho$	=	Dichte des Wassers	[kg/m <sup>3</sup> ]
$p$	=	Druck des Wassers	[N/m <sup>2</sup> ]
$g$	=	Erdbeschleunigung	[m/s <sup>2</sup> ]

Für die ingenieurtechnische Planung und Auslegung von Rechenanlagen ist es wichtig, die Aufstauhöhe  $h_v$  (sog. **Verlusthöhe**) bzw. das Aufstau Potenzial (sog. hydraulischer Energieverlust) bei gegebenem Durchfluss vor einem Rechen abzuschätzen oder berechnen zu können.

## Rechenverluste

Rechenanlagen sind Strömungshindernisse für das fließende Wasser, da durch die Rechenanlage der Fließquerschnitt lokal eingeengt wird. Zur Aufrechterhaltung der Abflusskontinuität staut sich – wie bereits erläutert – das Wasser vor dem Hindernis/Rechen an. Die Folge ist eine Wasserspiegeldifferenz  $\Delta h$  ober- und unterwasserseitig des Rechens einhergehend mit einem Gefälle der Energiehöhenlinie und einer entstehenden Energie-Verlusthöhe am Rechen  $h_{v,Re}$  (kurz: **Rechenverlust**, Abb. 10). Zur hydrometrischen Erfassung der Wasserspiegeldifferenz  $\Delta h$  müssen die Wasserspiegellagen ober- und unterwasserseitig des Rechens erfasst werden (*Kirschmer*, 1925; *Kriewitz-Byun*, 2014). An Wasserkraftanlagen geschieht dies bspw. mittels Ultraschallmesspegeln. Bei Erreichen einer definierten Pegeldifferenz meldet die Leittechnik dann automatisch der Rechenreinigungsanlage die Information, mit einem Reinigungsvorgang zu beginnen, um Getreibsel zu entfernen, das eine zu hohe Pegeldifferenz am Rechen verursacht. Des Weiteren fließen die Rechenverluste in die Leistungs- und Erzeugungsberechnung eines Wasserkraftwerks mit ein, weshalb Rechenverluste möglichst gering gehalten werden sollen.

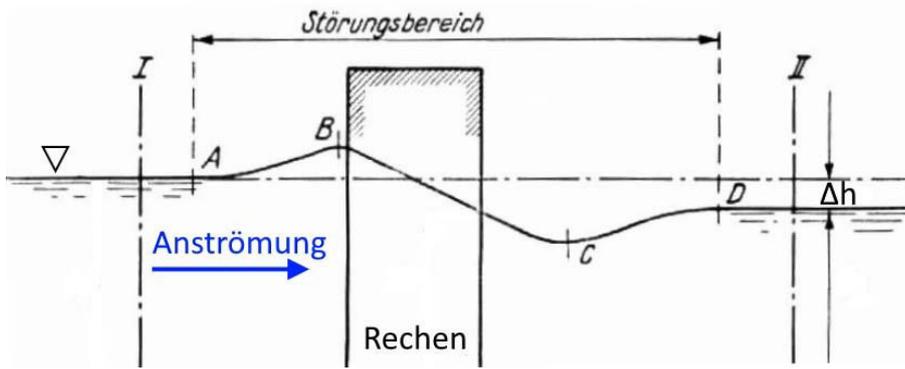


Abb. 10: Wasserspiegellinie im Störungsbereich eines Rechens mit dem Wasserspiegelunterschied  $\Delta h$  ober- und unterwasserseitig des Rechens (Quelle: verändert nach Kirschmer, 1925).

Der Rechenverlust  $h_{v,Re}$  kann auch vereinfacht mit einem empirischen dimensionslosen Verlustbeiwert  $\zeta$  abgeschätzt werden, der alle verlustbestimmenden Einflussfaktoren beinhaltet (Giesecke, 2009):

$$h_{v,Re} = \zeta \cdot \frac{v_a^2}{2g} \quad [m] \quad (Gl. 6)$$

$\zeta$	=	Verlustbeiwert	[-]
$v_a$	=	Anströmgeschwindigkeit	[m/s]
$g$	=	Erdbeschleunigung	[m/s <sup>2</sup> ]

Hieraus wird erkennbar, dass der Rechenverlust quadratisch mit der Anströmgeschwindigkeit  $v_a$  zunimmt. Diese Tatsache führt in der Praxis dazu, Rechen stets nur in großen Gerinnequerschnitten mit möglichst geringen Anströmgeschwindigkeiten (0,5 m/s bis 1,2 m/s) einzubauen, um hohe Rechenverluste zu vermeiden (DWA, 2005).

Um die Beeinflussungen der Anströmung im Stau- und Senkbereich (Bereiche B und C, Abb. 10) sowie mögliche Energieverluste am Rechen zu bewerten, kann folgende Formel für die Rechenverlusthöhe, also die Wasserspiegeldifferenz ober- und unterwasserseitig des Rechens aufgestellt werden:

$$h_{v,Re} = H_{EV} - H_{ED} \quad [m] \quad (Gl. 7)$$

$H_{EV}$	=	Energielinienhöhe vor dem Rechen	[m]
$H_{ED}$	=	Energielinienhöhe nach dem Rechen	[m]

Die Energielinienhöhen vor und nach dem Rechen sind in den vom Rechen unbeeinflussten Bereichen zu ermitteln (Bereiche A und D, Abb. 10). In diesen Bereichen werden auch die Messpegel bei realen Rechenanlagen angebracht. Sie lassen sich mit der Bernoulligleichung wie folgt berechnen:

$$H_{EV} = z_V + \left(\frac{p_V}{\rho g}\right) + \frac{v_a^2}{2g} \quad [m] \quad (Gl. 8)$$

$$H_{ED} = z_D + \left(\frac{p_D}{\rho g}\right) + \frac{v_d^2}{2g} \quad [m] \quad (Gl. 9)$$

$z_V$	=	geodätische Höhe vor dem Rechen	[m]
$z_D$	=	geodätische Höhe nach dem Rechen	[m]
$v_a$	=	unbeeinflusste Anströmgeschwindigkeit vor dem Rechen	[m/s]
$v_d$	=	unbeeinflusste Abströmgeschwindigkeit nach dem Rechen	[m/s]
$\rho$	=	Dichte des Wassers	[kg/m <sup>3</sup> ]
$g$	=	Erdbeschleunigung	[m/s <sup>2</sup> ]
$p_V$	=	Druck des Wassers vor dem Rechen	[N/m <sup>2</sup> ]
$p_D$	=	Druck des Wassers nach dem Rechen	[N/m <sup>2</sup> ]

Bei Gerinnen mit Freispiegelabflüssen, wie bei einigen Rechenanlagen, ist statt der Wasserdrücke  $p_v$  und  $p_d$  vor und nach dem Rechen die Wassertiefe einzusetzen.

Zur Berechnung der Geschwindigkeiten vor und nach dem Rechen kann auf die Kontinuitätsgleichung (Gl. 1) zurückgegriffen werden, wenn der Durchfluss  $Q$  und die durchflossene Querschnittsfläche  $A$  bekannt sind. Alternativ können die Geschwindigkeiten auch durch hydrometrische Messungen im Zu- und Abströmquerschnitt, bspw. durch Vielpunkt-Flügelmessungen (*Morgenschweis, 2010*), ermittelt werden.

### Leistungsberechnung Wasserkraftwerk

Rechenanlagen erzeugen Energieverluste bzw. Rechenverluste  $h_{v,Re}$ , welche die Gesamtleistung und somit die Energieerzeugung einer Wasserkraftanlage beeinflussen. Die Kenntnis dieser Rechenverluste ist daher für die wirtschaftliche Planung einer Rechenanlage wichtig. Die Leistung eines Kraftwerks kann wie folgt berechnet werden:

$$P = \rho \cdot g \cdot h_{brutto} \cdot \eta_{gesamt} \cdot Q \quad [\text{W}] \quad (\text{Gl. 10})$$

Die Leistung setzt sich aus folgenden Parametern zusammen:

$\rho$	=	Dichte des Wassers	[kg/m <sup>3</sup> ]
$g$	=	Erdbeschleunigung	[m/s <sup>2</sup> ]
$h_{brutto}$	=	Bruttofallhöhe	[m]
$\eta_{gesamt}$	=	Gesamtwirkungsgrad des Kraftwerks	[-]
$Q$	=	Abfluss des Wasserkraftwerks bzw. der Maschine	[m <sup>3</sup> /s]

Mit dem kumulierten Wirkungsgrad des Kraftwerks  $\eta_{gesamt}$  werden alle Verlustbeiwerte beschrieben, die von Turbine, Getriebe, Generator, Umspannanlage, Eigenversorgung der WKA und der Triebwasserzuleitung verursacht werden. In den Verlusten der Triebwasserzuleitung, also dem Einlaufkanal, sind auch die Energieverluste als Folge von Strömungsumlenkungen, Rechen, Wandrauheiten, Querschnittsänderungen, Verschluss- und Regelorganen, Nischen in Kanalwänden, usw. enthalten. Hydraulische Verluste durch Rechenanlagen stellen demnach nur einen Teil aller Verluste an einer Wasserkraftanlage dar. Typische Praxiswerte für den Gesamtwirkungsgrad  $\eta_{gesamt}$  liegen im Bereich von 0,7 bis 0,9 (*Giesecke, 2009*).

Bei der Planung von Wasserkraftanlagen ist die vorherige Bestimmung und Festlegung des Gesamtwirkungsgrades oftmals mit Unsicherheiten und Annahmen verbunden. Daher empfiehlt es sich, eine andere Methode zur Quantifizierung der erwarteten Verluste in der Planungsphase zu wählen: Die einzelnen Verlusthöhen können auch von der Bruttofallhöhe  $h_{brutto}$  abgezogen werden, anstatt im Wirkungsgrad kumuliert zu werden. Hieraus ermittelt sich dann eine Nettofallhöhe  $h_{netto}$ , die anstelle der Bruttofallhöhe in Gleichung 10 einzusetzen ist. Die Einzelverluste der Anlagenkomponenten (Turbine, Getriebe, Generator, elektrische Teile) können hinreichend genau durch Herstellerangaben angenommen und in einem Wirkungsgrad kumuliert werden.

Informationen über Abflusswerte für Wasserkraftstandorte können über die Deutschen Gewässerkundlichen Jahrbücher (DGJ), eine Datensammlung zur Gewässerkunde Deutschlands und Datenbank zahlreicher Pegel, bezogen werden. Anhand dieser öffentlich zugänglichen Daten werden die jeweiligen Ober- und Unterwasserstände, d.h. die Fallhöhe am Standort ermittelt. Der Oberwasserspiegel ist meist aus Gründen der Stabilisierung benachbarter Grundwasserspiegel konstant, der Unterwasserspiegel variiert je nach Gewässerabfluss. Daher sind die jeweiligen Fallhöhen abhängig vom entsprechenden Abfluss zu ermitteln. Hieraus errechnet sich eine abflussabhängige Leistung. Unter Berücksichtigung der Häufigkeit der jeweiligen Abflusswerte kann damit das Regelarbeitsvermögen eines Kraftwerks ermittelt werden. Dieses gibt die theoretisch verfügbare Erzeugungsmenge des Kraftwerks an. Für eine realistische Erzeugungsmenge muss die Anlagenverfügbarkeit (Wasserdarbot bei Niedrigwasser, geringe bis keine Fallhöhe bei Hochwasser durch Aufstau des Unterwassers, Ausfall durch zu viel Treibgut am Rechen, geplante Stillstände wie Revisionen, eingeschränkter Betrieb in Fischwanderzeiten, etc.) berücksichtigt werden.

## Strömungskräfte und Strömungsverteilung am Rechen

Wie bereits mit der Kontinuitätsgleichung (Gl. 1) beschrieben, ist die Anströmgeschwindigkeit  $v_a$  vom Durchfluss und der senkrecht durchströmten Fläche des Querprofils vor dem Rechen abhängig ( $Q = v_a \cdot A$ ) (Abb. 9).

Die Anströmgeschwindigkeit kann gemäß dem Stevin'schen Prinzip der Kräftezerlegung vor dem Rechen in Abhängigkeit vom Anströmwinkel theoretisch in zwei Vektoren zerlegt werden (Abb. 11). Die Normalkomponente  $v_N$  zeigt orthogonal auf die Rechenebene und die Tangentialkomponente  $v_T$  ist parallel zur Rechenebene ausgerichtet. Sie sind beide abhängig von der Rechenschrägstellung  $\delta$  und können wie folgt angegeben werden:

$$\text{Normalkomponente } v_N: \quad v_N = \sin \delta \cdot v_a \quad [\text{m/s}] \quad (\text{Gl. 11})$$

$$\text{Tangentialkomponente } v_T: \quad v_T = \cos \delta \cdot v_a \quad [\text{m/s}] \quad (\text{Gl. 12})$$

$$v_a = \text{Anströmgeschwindigkeit vor dem Rechen} \quad [\text{m/s}]$$

$$\delta = \text{horizontaler Anströmwinkel des Rechens} \quad [^\circ]$$

Bei einem Anströmwinkel  $\delta$  von  $45^\circ$  sind die beiden Anströmkomponenten  $v_T$  und  $v_N$  gleich.

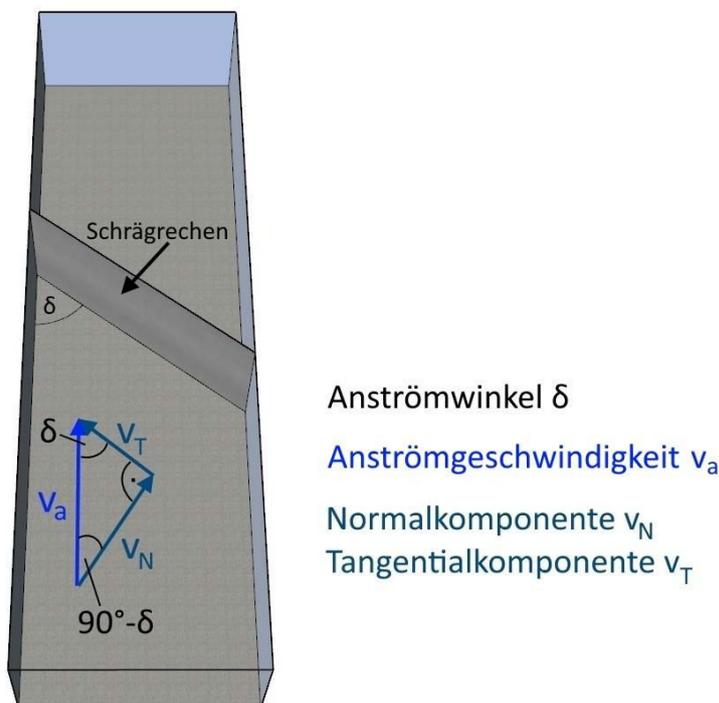


Abb. 11: Normale und tangentiale Komponenten der Anströmgeschwindigkeit bei einem Anströmwinkel  $\delta$ .

Bei *Raynal et al.* (2013a) wird empfohlen, die Tangentialkomponente immer doppelt so groß wie die Normalkomponente der Anströmgeschwindigkeit auszubilden, um eine Leitwirkung des Schrägrechens auszulösen, welche die Fische in ihrer Schwimmrichtung zum Bypass hin beeinflusst. Auch *Ebel* (2013) gibt in seinen Orientierungswerten für die Bemessung von Schrägrechen und Bypasssystemen vor, dass die Tangentialkomponente größer als die Normalkomponente sein soll, damit ein Anströmwinkel von weniger als  $45^\circ$  entsteht. Dies soll nach *Ebel* die Leitwirkung von Schrägrechen auf Fische erhöhen. Darüber hinaus soll nach *Ebel* die Normalgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Zielfischarten maximal  $0,3 \text{ m/s}$  betragen, um Fischen ein sicheres Navigieren und Sondieren am Schrägrechen zu ermöglichen. Diese Zerlegung der Anströmgeschwindigkeit in einzelne Vektoren greift auch die *LUBW* (2016) in ihrer Handreichung auf. Um eine ausreichende Leitwirkung zu erzielen, muss auch hier der tangentielle Vektor größer sein als der normale, woraus sich bei *LUBW* ein maximaler

Anströmwinkel von 30° ableitet. Hydraulische oder ethohydraulische Untersuchungen zur Bestätigung dieser Aussagen wurden bislang von keinem der Autoren durchgeführt.

Beobachtungen mit Fadenharfen am Schrägrechen mit horizontalen Stäben zeigen, dass sich die Fäden vor und am Schrägrechen keinesfalls normal oder tangential zur Rechenebene ausrichten (Abb. 12) – sie bleiben der Hauptströmungsrichtung folgend geradlinig ausgerichtet. Dies ist ein Indiz dafür, dass die theoretisch mögliche Zerlegung der Hauptströmung in die zwei Komponenten real nicht existent ist. Somit kann die Strömung vor dem Schrägrechen von Fischen nicht wahrgenommen werden, geschweige denn sie irgendwohin leiten. Die in der Literatur postulierten Forderungen bzgl. der Mindestwerte tangentialer Anströmkomponenten sind damit unzulänglich.



Abb. 12: Fadenharfe am Schrägrechen im Labor der TU Darmstadt (links) und unterwasserseitige Wollfäden am Schrägrechen im Labor des KIT (Quelle rechts: Nestmann, 2010).

Auf Körper, welche der Strömung ausgesetzt sind oder sich in der Strömung bewegen (z. B. Fische, Brücknpfeiler, Rechen), wirken aufgrund der Druckunterschiede zwischen Lee- und Luvseite Strömungskräfte (Abb. 13).



Abb. 13: Lachssmolt vor einem Schrägrechen, auf dessen Luvseite Überdrücke wirken und auf seine Leeseite Unterdrücke.

Abhängig von der Gestalt und Oberflächerrauheit des angeströmten Körpers und abhängig von der Anströmgeschwindigkeit lässt sich die sog. Widerstandskraft berechnen:

$$F = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_a^2 \cdot c_w \cdot A_K \quad [\text{N}] \quad (\text{Gl. 13})$$

$\rho$	=	Dichte des Wassers	[kg/m <sup>3</sup> ]
$v_a$	=	Anströmgeschwindigkeit	[m/s]
$c_w$	=	dimensionsloser Formwiderstandsbeiwert	[-]
$A_K$	=	angeströmte Fläche beim Fisch	[m <sup>2</sup> ]

Der in der Gleichung 13 enthaltene dimensionslose Formwiderstandsbeiwert ist abhängig von der Form und Oberflächenrauheit des umströmten Körpers, z. B. eines Fisches, und wird aus Versuchen ermittelt.

Es fällt bei dieser Gleichung auf, dass nur die Anströmgeschwindigkeit  $v_a$  und nicht deren stets kleinere vektorielle Komponenten anzusetzen sind. Auch wird deutlich, dass die vektorielle Zerlegung der Geschwindigkeit normal und tangential zur Rechenebene für die Belastung des Fisches durch die Anströmung irrelevant ist – eine Schrägstellung des Fisches drückt sich in Gleichung 13 allenfalls durch die senkrecht angeströmte Körperfläche  $A_K$  und den  $c_w$ -Wert aus. Der Anströmwinkel beim Schrägreden und damit die normalen und tangentialen Geschwindigkeitskomponenten spielen also keine Rolle. Dies bestätigen auch *Hübner et al.* (2011) anhand ethohydraulischer Untersuchungen mit Rotaugen und Brassen.

## 2.4. Abgrenzung zu anderen Rechentypen

Für Behörden und Planer kommen neben dem Schrägreden noch weitere Rechentypen, welche eine ausreichende Schutzwirkung besitzen sowie eine erfolgreiche Abwanderung initiieren sollen, als Schutz- und Leitsysteme in Frage.

### Konventioneller Rechen

Als am weitesten verbreitetes Schutzsystem unter den Rechanlagen kann der leicht zur Sohle geneigte Vertikalstabrechen genannt werden. Die Mehrzahl an Bestandsrechen mit vertikalen Stäben sind mit einem stumpfen Winkel  $\alpha$  (Abb. 14 links) von ca.  $70^\circ$  bis  $80^\circ$  zur Sohle geneigt (*Giesecke, 2009*). Sie werden frontal angeströmt, da sie senkrecht zur Anströmrichtung vor den Turbinenkammern positioniert sind. Für Fische wirkt diese mechanische Barriere als Hindernis und ihnen wird i.d.R. am Rechen auch kein Abwanderungskorridor angeboten. Entfernt davon positionierte Abwanderungswege werden auf diese Weise nur zufällig aufgefunden.

Bei konventionellen Rechen gilt die Vektorenzerlegung (Gl. 11 und Gl. 12) ebenfalls: Der vertikale Anströmwinkel  $\alpha$  zwischen Rechenebene und Sohle (Abb. 15) ist bei konventionellen Rechen in die Gleichungen 11 und 12 einzusetzen.

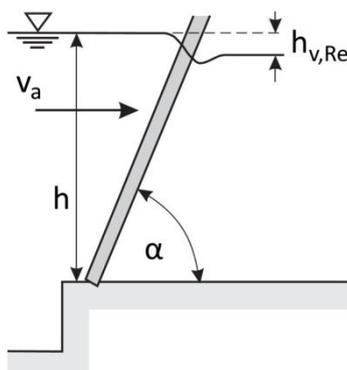


Abb. 14: Links Vertikalrechenquerschnitt mit dem zur Sohle geneigten Winkel  $\alpha$  (*Quelle: verändert nach Giesecke, 2009*). Rechts Foto des Vertikalstabrechens am WKW Ottenau vor den beiden Maschineneinläufen.

### Flachrechen

Ist der konventionelle Rechen flach zu Sohle geneigt ( $\alpha = 20^\circ$  bis max.  $\alpha = 45^\circ$ ) (*Adam et al. 1999, Blasel 2011, Ebel 2013 und Cuchet et al. 2011*), so können Fische an dieser Barriere mit der Strömung in Richtung eines oben angeordneten Bypasses schwimmen und über diesen in Richtung Unterstrom abwandern (Abb. 15). *Adam et al.* untersuchten einen Rechen mit einem Winkel von  $25^\circ$  mittels ethohydraulischer Versuche u.a. mit Aalen und Lachssmolts. *Blasel* führte Untersuchungen an Bestandsanlagen durch und erreichte bei flachen Neigungswinkeln von  $30^\circ$  gute Abwanderungsergebnisse mit Lachssmolts.

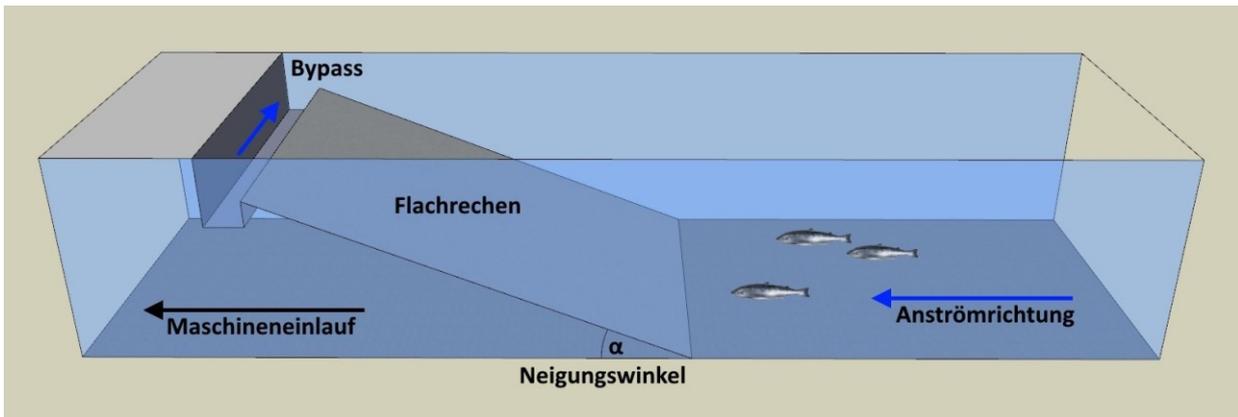


Abb. 15: Flachrechen mit dem vertikalen Anströmwinkel  $\alpha$ .

Als Praxisbeispiel für einen Flachrechen kann die Wasserkraftanlage Esslingen am Neckar genannt werden (Abb. 16). Der vertikale Anströmwinkel der beiden Einlaufrechen beträgt  $45^\circ$ . Aufgrund der Anordnung des Kraftwerks auf einer Halbinsel mit umliegender Bebauung sowie aufgrund benachbarter denkmalgeschützter Gebäude war es nicht möglich, einen flacheren Winkel zu wählen, da sich dadurch die Länge des Kraftwerks vergrößert hätte. Am oberen Ende der beiden Flachrechen wurde eine Sammel- und Bypassrinne aus Stahlbeton mit geglätteter Oberfläche angeordnet, über die die Fische jederzeit abwandern können. Die Rinne wird mit konstanten 200 l/s beaufschlagt und mündet in einer seitlichen Kaskade und anschließend im Unterwasserbereich des Neckars.

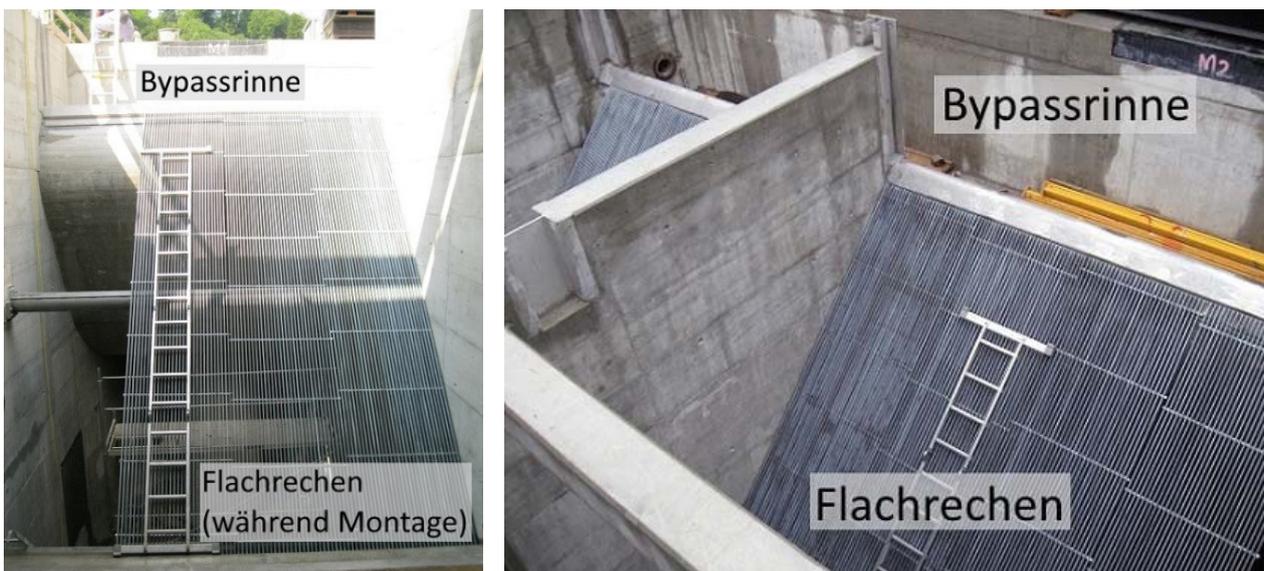


Abb. 16: Flachrechen mit einem vertikalen Anströmwinkel von  $45^\circ$  und einem Stababstand von 20 mm am WKW Esslingen mit oben angeordneter Fischabstiegs-/Sammelrinne.

Die Sammelrinne und der daran anschließende Bypass kann neben den Fischen auch anfallendes Geschwemmsel und Treibgut abspülen. In Esslingen wurde dafür eine Nische für eine zusätzliche Spülpumpe bereits beim Bau vorgesehen, um bei Bedarf die Spülwassermenge erhöhen zu können, um eine Verklausung zu vermeiden (Abb. 17 links). Nachteilig für eine Funktionstüchtigkeit einer derartigen Sammel- bzw. Fischabstiegsrinne sind mit Geschwemmsel und Treibgut verstopfte Bauwerke. Äste und Müll können bei zu geringer Wasserbeaufschlagung der Rinne hängenbleiben, so dass nach und nach die Treibgutmenge anwächst, wie z. B. beim Wasserkraftwerk Künzelsau (Abb. 17 rechts), bei dem das in der Rinne hängengebliebene Geschwemmsel eine Höhe von 3 m erreichte. Auch Hochwasserereignisse, bei denen sich viel Treibgut an den Wehranlagen und Kraftwerken sammelt, können derartige Sammelrinnen verstopfen. Hier muss mit Hilfe großer Wassermengen oder häufig manuell durch Sägen und mit Kranunterstützung gereinigt werden.



Abb. 17: Links Sammelrinne nach Fertigstellung am WKW Esslingen mit Möglichkeit zur Installation einer Spülpumpe (Rohrleitung mit Blindflansch am hinten liegenden Ende der Spülrinne). Rechts verstopfte Sammelrinne mit Ästen und Müll am WKW Künzelsau.

### Louver und Bar Racks

Louver und Bar Racks kommen vorwiegend in Nordamerika zum Einsatz und wurden seit den 1990er Jahren hinsichtlich ihrer Funktion und ihrer Schutzeffizienz untersucht (EPRI, 1998; Amaral et al., 2002).

Bei Louvern handelt es sich um schräg angeströmte Rechenanlagen mit vertikal angeordneten und sehr breitflächigen Stäben/Lamellen und einer orthogonalen Ausrichtung zur Sohle. Sie besitzen einen horizontalen Anströmwinkel und keine Neigung zur Sohle (Abb. 18). Die Stäbe oder Lamellen sind in einem Winkel von  $90^\circ$  zur Anströmrichtung hin gedreht und besitzen lichte Stababstände von meist 25 mm bis 150 mm (DWA, 2005) abhängig von der Zielfischart. Bates et al. (1957) hatten Louver mit einer Stabausrichtung von  $0^\circ$  zur Anströmung untersucht, konnten mit dieser Stabausrichtung aber keine Leitwirkung nachweisen. Der horizontale Anströmwinkel muss für eine funktionierende Leitwirkung zwischen  $10^\circ$  und  $20^\circ$  betragen und liegt im Idealfall bei  $15^\circ$  (Bates et al., 1957). Die Anströmgeschwindigkeit gibt Taft (1986) für junge Lachse mit 0,46 m/s bis 1,11 m/s an – für andere Fischarten kann die Anströmgeschwindigkeit nach seinen Studien jedoch auch kleiner ausfallen.

Bar Racks werden wie Louver ebenfalls schräg angeströmt und orthogonal zur Sohle aufgestellt. Die Rechenstäbe des Bar Rack sind jedoch immer um  $90^\circ$  zur Rechenachse hin gedreht und werden daher mit unterschiedlichen Winkeln angeströmt – je nachdem mit welchem Anströmwinkel der Bar Rack zum Hauptströmung ausgerichtet ist (Abb. 18).



Abb. 18: Links Schemaskizze der Anordnung von Louver und Bar Rack (Quelle: Kriewitz-Byun, 2014). Rechts sohlnaher Ausschnitt eines Louvers in der Versuchsrinne bei ethohydraulischen Versuchen (Quelle: VAW, ETH Zürich, 2017).

Louver mit Anströmwinkel größer als  $0^\circ$  und Bar Racks werden – wie der Schrägrechen – schräg zur Anströmung installiert, weswegen ihnen ebenfalls eine Leitwirkung zugesprochen wird. Kriewitz-Byun (2014) hat insbesondere den Bar Rack hydraulisch und ethohydraulisch untersucht und die Leitwirkung bestätigt. Weitere Untersuchungen an Louvern und Bar Racks führte das ALDEN Research Laboratory in den USA durch. Hier wurden bspw. verschiedene Anströmwinkel und Stababstände konfiguriert und ethohydraulische Studien mit diversen Fischarten durchgeführt (EPRI et al., 2001). Es wurde auch hier die höchste Leitwirkung bei einem

---

Anströmwinkel von 15° erreicht. Qualitative Unterschiede wiesen Louver und Bar Racks hinsichtlich der Leitwirkung nicht auf. Aufgrund der Schrägstellung der Rechenstäbe zur Hauptanströmrichtung sind die hydraulischen Verluste bei Louver und Bar Racks höher als bei konventionellen Rechen oder Schrägrechen (*Kriewitz-Byun*, 2014).

## 2.5. Bisherige Betriebserfahrungen des Schrägrechens hinsichtlich betrieblicher Anforderungen

Die bisherigen Erfahrungen aus betrieblicher Sicht sind an beiden EnBW Schrägrechen (Abb. 7 und Abb. 8 in Kap. 2.2) positiv. Nahezu alles Geschwemmsel und Treibgut kann durch die Rechenreinigungsanlage selbstständig in Richtung Bypass abgereinigt werden. Lediglich Plastiktüten, größeres Treibgut wie Autoreifen, Plastikmüll und Baumstämme sowie Steinblöcke nach einem Hochwasser verfangen sich vor dem Rechen oder im Bypasseinlauf, so dass sie manuell mittels LKW-Greifer, Kran oder Tauchereinsatz beseitigt werden müssen. Aufgrund eines Baumstamms, der den Bypass verstopft, bleibt daran auch kleineres Schwemmgut hängen und türmt sich weiter auf (Abb. 17 rechts).

Aufgrund der Schrägstellung, der horizontalen Stäbe und der besseren Abreinigung werden verlegte Rechenbereiche am Schrägrechen reduziert. Dies verringert die Betriebskosten für die Getreibselbeseitigung sowie die Kosten für die Entsorgung des Geschwemmsels. Ökologisch wertvolles Material wie Blätter, kleine Zweige, etc. verbleiben somit im Ökosystem Fluss und bieten Nährstoffe für Lebewesen. Sand- und Schlammablagerungen können durch ein seitlich angeordnetes Tiefschütz über den Bypass in Richtung Unterstrom abgegeben werden. Damit können Flusserosionen verhindert und Laichhabitate und Lebensräume erhalten bleiben.

Die Rechenverluste an Schrägrechen sind nach Beobachtungen und Aufzeichnungen des EnBW-Betriebspersonals geringer, als bei alten Bestandsrechen (konventionellen Rechen), so dass nach deren Installation oftmals höhere Leistungswerte und bessere Erzeugungsdaten erreicht werden und Schrägrechen ggf. als leistungserhöhende Maßnahmen nach dem Erneuerbaren Energien Gesetz (EEG) anerkannt werden können. Dieses Verfahren sollte aber vorher mit dem jeweiligen Netzbetreiber, über den man die EEG-Vergütung beantragt, abgeklärt werden.

Weitere Erfahrungsberichte können aus *Ebel* (2013) entnommen werden, dem zu mehreren Anlagen in Sachsen-Anhalt mit Abflüssen von 7 m<sup>3</sup>/s bis 88 m<sup>3</sup>/s und Fallhöhen von 1,4 m bis 4,5 m Untersuchungsergebnisse vorliegen. So werden auch hier als Vorteile von Schrägrechen geringere hydraulische Rechenverluste, eine gute Treibgutweiterleitung in Richtung Unterwasser und damit eine Reduzierung der Entsorgungskosten genannt. Nach *Ebel* ist für eine Rechenlänge von bis zu 50 m und einem lichten Stababstand der Rechenstäbe von 20 mm eine einzelne Rechenreinigungsanlage ausreichend. Es muss jedoch beachtet werden, dass diese Empfehlung davon abhängig ist, welchen Betriebsabfluss und welche Rechenhöhe das Kraftwerk besitzt und welche Vegetation und Bebauung sich am Uferand befinden. Hohe Ausbauabflüsse haben in den meisten Fällen einen hohen Geschwemmselandrang zur Folge, v.a. wenn das Ufer oder Zuflüsse bewachsen sind oder wenn dem Gewässer regelmäßig Grasschnitt zugegeben wird, das sich an den Rechen ablegt. Die Frage nach einem oder zwei Rechenreinigungsmaschinen muss standortspezifisch geklärt werden. Zu klären ist dabei auch, ob eine Getreibselweitergabe zwischen zwei Rechenreinigungsmaschinen funktioniert oder ob das Getreibsel durch Rück- oder Querströmungen in andere Richtungen abtreiben kann. Für größere Flüsse müssen derartige Fragen grundsätzlich noch konstruktiv und hydraulisch untersucht und gelöst werden und Erfahrungen an Pilotanlagen gesammelt werden.

Erfahrungen hinsichtlich einer Leitwirkung von Fischen in Richtung eines seitlichen Bypasses sowie dem Verhalten von Fischen vor dem Schrägrechen durch Funktionskontrollen und Monitorings liegen bisher kaum vor und sollen in der vorliegenden Arbeit im Rahmen von ethohydraulischen Untersuchungen im Labor als auch unter Naturbedingungen wissenschaftlich fundiert untersucht werden.

## 2.6. Energieverluste am Schrägrechen

Der Rechen bildet im Gewässer nicht nur für das Treibgut oder für Fische eine Barriere, sondern auch für die Strömung. Aufgrund seiner geometrischen Form und seiner Anordnung im Gewässer entstehen durch ihn hydraulische Verluste, die von vielen einzelnen Parametern und Randbedingungen abhängig sind. Bereits 1925 untersuchte *Kirschmer* als Erster Einflüsse und Ursachen von Rechenverlusten (Abb. 10), stellte eine Rechen-

verlustformel auf und definierte Beiwerte für verschiedene Stabformen. Seitdem wurde die *Kirschmer*-Rechenverlustformel mehrfach erweitert oder angepasst – auch aufgrund neuester Entwicklungen von Rechen-systemen und der gesetzlichen Vorgabe zur Umsetzung des Fischschutzes.

### 2.6.1. Verlusterzeugende Rechenparameter

Ein Rechen stellt eine Querschnittseinengung für die Strömung dar, was wie bereits erläutert, nach der *Bernoulli*-Gleichung zu einer Beschleunigung des Wassers führt (Kap. 2.3). Bei der Durchströmung des Rechens entstehen infolge Turbulenzbildung Strömungsablösungen, welche für die Verluste mitverantwortlich sind. Die Turbulenzen entstehen in drei verschiedenen Zonen des Rechens (*Hübner et al.*, 2011) (Abb. 19):

- **Ablösezone (1):** Sie befindet sich direkt nach dem Eintreten in den Stabzwischenraum und wird beschrieben durch die Einschnürung des Wassers. Sie ist enger als der geometrische Querschnitt („vena contracta“, *Lehmann et al.*, 2016). In der Ablösezone fällt der Druck ab, da die Energie für die Beschleunigung benötigt wird. Ist der Schrägrechen massiv verbaut oder mit Getriebsel verlandet, so steigt der Druckabfall und die Beschleunigung nimmt zu (Kap. 2.3).
- **Grenzschichtbildung (2):** Dieser Bereich entsteht nachdem sich die Stromlinien nach der vena contracta wieder an die Rechenstäbe angelegt haben. Die Stromlinien werden von der Oberflächenrauheit der Rechenstäbe beeinflusst und engen den Fließquerschnitt zwischen den Stäben ein.
- **Ablösung am Ende des Zwischenraumes (3):** Die letzte Ablösezone entsteht durch die plötzliche Aufweitung am Ende des Rechenstabzwischenraumes. Hier entstehen Wirbel, welche durch die Ablösung und Aufweitung verursacht werden (Abb. 21).

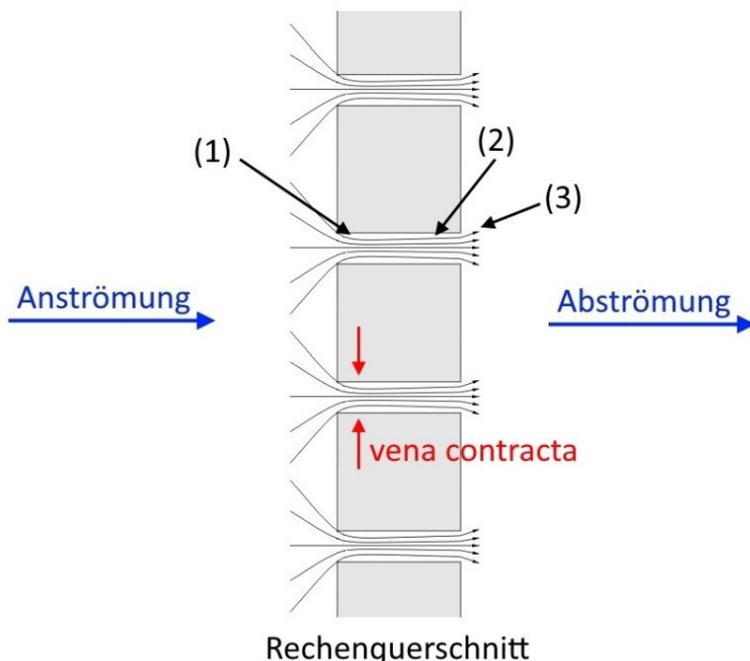


Abb. 19: Schema eines Rechenquerschnitts mit Stromlinien durch die Stabzwischenräume mit den drei Zonen, welche für die Turbulenzbildung verantwortlich sind.

Die Rechenverluste werden durch verschiedene geometrische und hydraulische Rechenparameter mehr oder weniger stark beeinflusst: Geometrische Verlustparameter werden allein von der Konstruktion des Rechens bestimmt, hydraulische von der Anströmung durch das Wasser (Tab. 1).

Tab. 1: Verlustrelevante Rechenparameter.

Geometrische Parameter	Rechenstabdicke	$d$	[m]
	Rechenstablänge	$l$	[m]
	Stababstand	$s$	[m]
	Rechenstabform	$k_s$	[-]
	Verbauungsgrad	$P_{Re}$	[-]
	Rechenneigung	$\alpha$	[°]
Hydraulische Parameter	Anströmgeschwindigkeit	$v_a$	[m/s]
	Horizontaler Anströmwinkel	$\delta$	[°]
	Verlegungsgrad	$V_{Re}$	[-]

## Geometrische Parameter

Folgende Parameter tragen aufgrund ihrer Geometrie zu den Rechenverlusten  $h_{v,Re}$  bei (Tab. 1):

### Rechenstabdicke

Die Rechenstabdicke  $d$  eines einzelnen Rechenstabes wird zum einen durch die Statik des Gesamtrechensystems bestimmt. Zum anderen ist die Rechenstabdicke abhängig von der Statik der Einzelstäbe. Einzelstäbe müssen einem Aufprall durch großes Schwemmgut und Eis sowie der Rechenreinigung und dem Wasserdruck auch bei Hochwasserereignissen standhalten. Gerade bei höheren Abflüssen mit viel Geschwemmsel kann der Rechen schnell verlegt sein. In diesem Fall wirken große Wasserdrücke bzw. Kräfte auf den Rechen, welche über die Rechenstäbe in die seitlichen Flanken der Pfeiler oder Uferwände abgetragen werden müssen. Für die statische Bemessung wird eine Verlegung von 70% der Rechenfläche angenommen (*Wickert et al., 1971*). Bei Extremereignissen kann der Rechen sogar überspült werden. Auch hier muss die Standsicherheit und anschließende Funktionstüchtigkeit gewährleistet sein. An Rechensystemen werden daher größtenteils 6 mm bis 10 mm breite Rechenstäbe vorgesehen (Abb. 20).

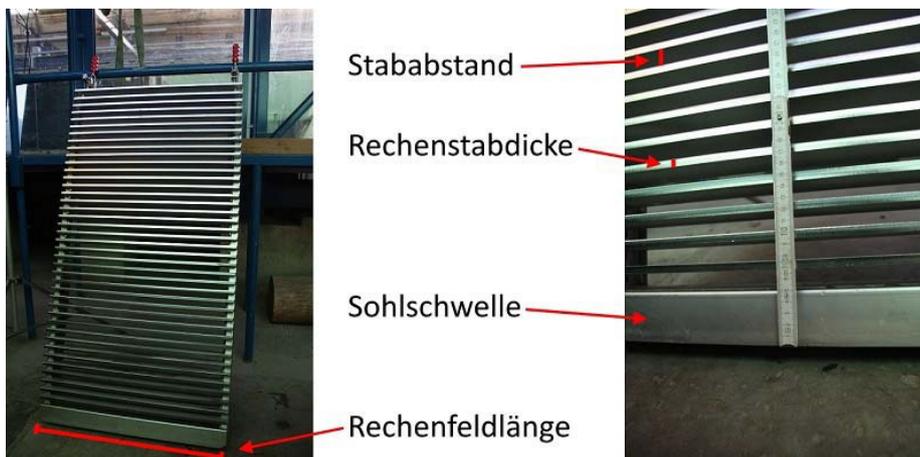


Abb. 20: Geometrische Parameter am Versuchsrechen mit Stababstand  $s$ , Rechenstabdicke  $d$  und der Rechenfeldlänge (Letztere hängt von den Modulen des Laborrechens ab).

### Stablänge

Die Rechenstablänge  $l$  ist abhängig von der Rechenstabdicke  $d$ . Sie beträgt gemäß *Kirschmer* (1925) für Rechteckprofile ( $5 \cdot d$ ) (Abb. 24). Auch sie wird bestimmt durch die Statik des Rechensystems, da der Wasserdruck und ggf. der vorhandene Geschwemmseldruck auf die Rechenstablängsachse wirkt. Eine Verlängerung des Rechenstabes erfordert eine Erhöhung des Widerstandsmoments. Dies verursacht jedoch eine Verlängerung der Strömungseinschnürung (Ablösezone 2, Abb. 19) und somit eine Erhöhung der Rechenverluste. In den Rechen-

stabzwischenräumen im Bereich der Stablänge  $l$  wird die Strömung aufgrund des geringeren Fließquerschnitts beschleunigt und es entstehen Ablösungen sowie Energieverluste (Abb. 19 und Kap. 2.3).

### Stababstand

Unter Stababstand oder Stabweite versteht man den lichten Abstand  $s$  zwischen zwei Rechenstäben (Abb. 20). Er muss so gewählt werden, dass die Turbinen vor Treibgut geschützt und Fische von einem Eindringen in die Maschinenkammer abgehalten werden. Daher orientieren sich die Stababstände meist an den Körperdimensionen der Zielfischarten (Ebel *et al.*, 2015) oder wurden durch ethohydraulische Versuche bestimmt (Adam *et al.*, 1999). Die Rechenstäbe lösen aufgrund ihrer Anströmung Verwirbelungen aus, welche bei engerem Stababstand größer werden (Abb. 21). Je enger der Stababstand, also je stärker die Verwirbelungen ausfallen, desto mehr kinetische Energie des Wassers wird durch die Turbulenzen in Wärme umgewandelt, weshalb die Rechenverluste dann ebenso zunehmen.

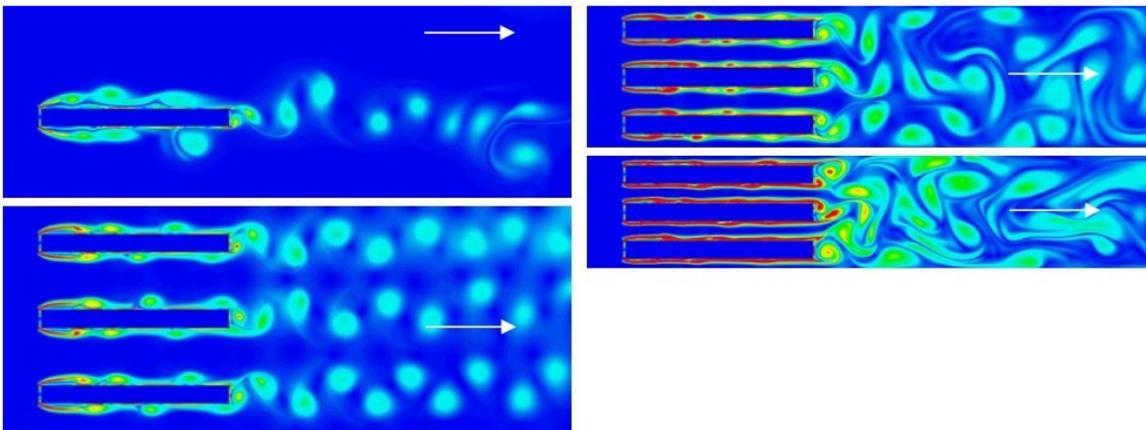


Abb. 21: Zunahme der energiezehrenden Wirbel durch Ablösungen zwischen und am Ende der Stäbe in Abhängigkeit des Stababstands (Quelle: Meusbürger, 2002).

Bei hohem mechanischen Schutz eines Rechens liegt der Stababstand bei 8 mm bis 10 mm, man spricht hier von Feinstrechen. Bei älteren Bestandsanlagen mit Ausbaugraden größer  $100 \text{ m}^3/\text{s}$  liegen die Stababstände bei 40 mm bis 60 mm und entsprechen damit in ihren Dimensionen nahezu einem Grobrechen, welcher über einen Stababstand von 50 mm bis 100 mm definiert ist. Feinrechen nennt man Rechensysteme mit einem Stababstand von 10 mm bis 30 mm (Giesecke *et al.*, 2009) und werden derzeit an Wasserkraftanlagen zum Schutz der Fische gefordert (Abb. 22). Feinstrechen werden vorwiegend bei Kühlwasserentnahmen eingesetzt, um das zur Kühlung von thermischen Erzeugungsanlagen verwendete Kühlwasser von kleinsten Lebewesen und Pflanzenteilen zu reinigen.



Abb. 22: Links Stababstand am Schrägrehen Ottenau und in der Mitte Übersichtsbild des Schrägrechens am WKW Ottenau (Quelle: EnBW, 2012). Rechts Stababstand des Schrägrechens im wasserbaulichen Forschungslabor Darmstadt mit 18 mm.

Aktuell werden je nach Zielfischart für Bestands- oder Neuanlagen in Deutschland Stababstände von 10 mm bis 18 mm bei Flach- oder Schrägrechen gefordert (HFO, 2008 und LUBW, 2016). Häufig liegt der geforderte Wert bei 15 mm und orientiert sich damit an den Vorgaben von Dumont *et al.* (2012), die sowohl die Schädigung von Fischen an Wasserkraftanlagen untersuchten, als auch Empfehlungen für einen ausreichenden Fischschutz durch Rechenanlagen lieferten.

Je kleiner der Stababstand aus fischökologischen Gründen gewählt wird, desto höher ist die Gesamtanzahl der Rechenstäbe und somit die daraus entstehenden Ablösungen und die Rechenverluste. Daher sind Wasserkraftbetreiber bestrebt, einen möglichst großen Stababstand zu wählen, um Rechenverluste gering zu halten. Auch wird bei kleinem Stababstand mehr Treibgut und Geschwemmsel vor einem Eindringen in die Turbine ferngehalten, obwohl diese jedoch den Laufschaufeln keinen Schaden zufügen würden. Die Folge sind höhere Entsorgungs- und damit Betriebskosten. Unabhängig ob das Geschwemmsel entsorgt oder am Schrägrechen Richtung Unterwasser weitergeschoben wird, ist bei kleinem Stababstand mit einem häufigeren Einsatz der Rechenreinigungsmaschine (RRM) bis hin zu einem Dauerbetrieb im Herbst bei Laubabfall auszugehen. Dies kann man in Herbstmonaten bspw. an der Wasserkraftanlage Ladenburg am Neckar oder am WKW Mühlhausen an der Enz beobachten (Abb. 23). Die Reinigungsmaschinen laufen im Herbst bei hohem Laubabfall zeitweise in Dauerbetrieb. Bei gleichzeitigem, etwas erhöhtem Abfluss muss die Turbine im WKW Ladenburg teilweise abgeschaltet und vom Netz genommen werden, da die RRM trotz Dauerbetrieb die Pegeldifferenz ober- und unterwasserseitig des Rechens nicht unter den für die Standsicherheit des Rechens zulässigen Wert reduzieren kann.



Abb. 23: Geschwemmsel-, Laub- und Geästandrang am WKW Ladenburg am Neckar (links) und am WKW Mühlhausen an der Enz (Mitte) sowie am Schrägrechen des WKW Künzelsau im Frühjahr mit großen Holzstämmen und Zivilisationsmüll (rechts).

### Stabform

Relevant für die Rechenverluste sind auch die unterschiedlichen Stabformen, auch Stabprofile genannt. Kirschmer (1925) untersuchte als Erster die Auswirkungen unterschiedlicher Stabformen und versah diese nach seinen Versuchen mit einem Beiwert  $\beta$ , der direkt in die von ihm entworfene Rechenverlustformel eingeht. Der Beiwert  $\beta$  entspricht dem heute verwendeten Stabprofilbeiwert  $k_s$  (Abb. 24, links).

An bestehenden Anlagen ist vorrangig eine Rechteckform (Nr. 1 in Abb. 24 links) verbaut, wo hingegen bei neueren Anlagen immer häufiger auch vorne abgerundete Profile (Nr. 2 in Abb. 24 links) oder das sogenannte Fischbauchprofil (Nr. 4 in Abb. 24 links) zum Einsatz kommen. Stabprofile mit großen Ablösungen in den drei bereits erwähnten Rechenstabzonen besitzen einen großen Stabprofilbeiwert, z. B. beträgt der Profilbeiwert bei Rechteckprofilen 2,42. Abgerundete Profile wie Fischbauchprofile verursachen geringere Strömungablösungen und geringe Rechenverluste und weisen daher einen Beiwert von 1,04 auf. Profile, welche im unterstromigen Teil dünner werden, haben den Vorteil der langsamen Aufweitung des Stabzwischenraumes: Rechenverluste im Bereich der Grenzschicht fallen damit geringer aus.

Stahlwasserbauunternehmen entwickeln häufig eigene Profile, welche ebenfalls eine Verjüngung in Richtung Unterstrom aufweisen, jedoch in Richtung Oberstrom nicht abgerundet sind und damit leichter, schneller und kostengünstiger herzustellen sind (Abb. 24, rechts).

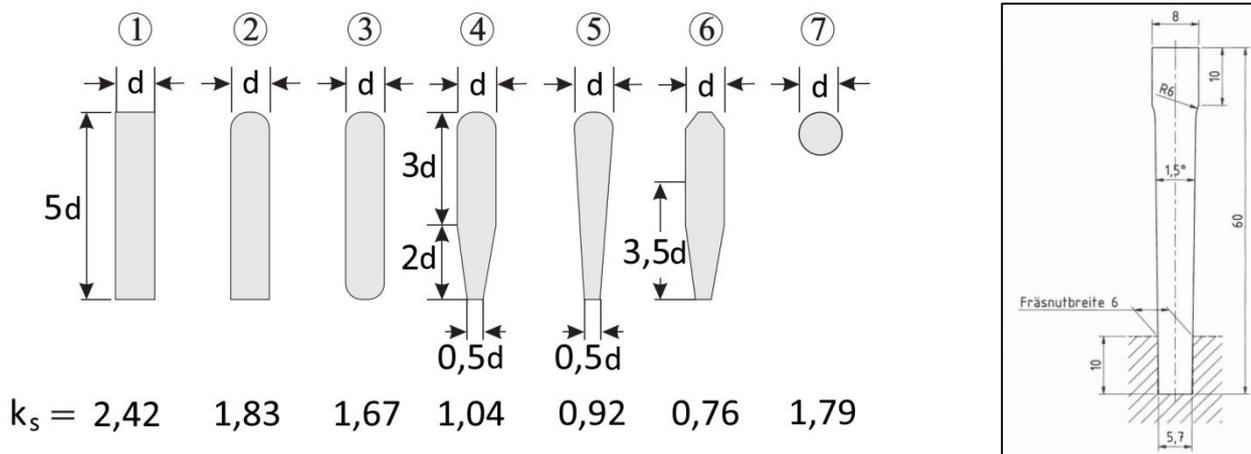


Abb. 24: Links Stabprofile, Beiwerte und Abmessungen nach Kirschmer (1925) (Quelle: verändert nach Giesecke verändert, 2009). Rechts von Fa. Jank entwickeltes Stabprofil, Angaben in mm (Quelle: Firma Jank per E-Mail, 2017).

Oberstrom abgerundete Profile können das Verletzungsrisiko von Fischen, wenn diese aufgrund Erschöpfung oder zu hoher Anströmung an den Rechen gedrückt werden, vermindern. Derartige Profile werden vermehrt von Behörden vorgeschrieben wie bspw. im Zuge des Genehmigungsverfahrens zur Neukonzessionierung des Wasserkraftwerks Künzelsau in 2015. Am Schrägrechen Ottenau wurde 2012 hingegen ein Rechteckprofil eingesetzt.

Laut Angabe des Stahlwasserbau- und Turbinenherstellers Wiegert und Bähr liegen die reinen Rechenkosten ohne Montage und ohne Befestigungskonsolen und Befestigungsmittel bei einem Fischbauchprofil (Abb. 24, links, Nr. 4) um 24% über den Kosten eines Rechteckprofils aus Flacheisen. Für einen Beispiel-Schrägrechen von 15 m Länge, 1,60 m Höhe und 18 mm Stababstand führen abgerundete Stabprofile bei der Stahlwasserbaufirma Jank zu ca. 10.000,- € Mehrkosten gegenüber den Kosten für ein Rechteckprofil. Für viele Kleinwasserkraftbetreiber sind die Investitionskosten ein entscheidendes Kriterium für die Wahl des Rechenstabprofils. Dennoch sollte im Vorfeld eines Neubau- bzw. Umbauprojekts abgewogen werden, welche hydraulischen Vorteile die abgerundeten Profile und die daraus resultierende höhere Energieerzeugung gegenüber den geringeren Investitionskosten haben. Mittlerweile stellen viele Rechenlieferanten Fischbauchprofile, welche in Walzwerken maschinell gefertigt werden, her.

Ein weiteres Beispiel für eine strömungsbegünstigte Form ist der Rechenstab des Oppermann-Rechens, welcher als sogenannter FischSchonRechen (FSR) bezeichnet wird und mit geringem Stababstand von 10 mm und darunter zum Einsatz kommen kann (Hassinger, 2009). Hierzu wurden an der Versuchsanstalt und Prüfstelle für Umwelttechnik und Wasserbau der Universität Kassel zahlreiche Untersuchungen und Versuche durchgeführt, u.a. auch zur Verlustbeiwertermittlung. Die einzelnen Stäbe bestehen aus umgeschlagenen Edelstahl-Blechstreifen, welche auf querliegenden Spannstäben befestigt sind (Abb. 25).



Abb. 25: Oppermann-Stabprofil, Quelle links: Fa. Klawa (Homepage 2017), Quelle rechts: Schmitt (2015).

Der Vorteil der Oppermann-Stäbe gegenüber Rechenstäben mit Rechteckprofilen liegt im geringeren Materialverbrauch. Jedoch werden Rechteckprofile aus kostengünstigem verzinktem Stahl, die Oppermann-Stäbe aus Edelstahl hergestellt – dies relativiert die reine Kostenbetrachtung. Darüber hinaus werden die Oppermann-Profile nur von wenigen Stahlwasserbauunternehmen hergestellt, die Preise liegen daher im Vergleich zu herkömmlichen Profilen höher. Der Hersteller KLAWA bietet FSR mit lichten Stababständen von 8 mm bis 30 mm an und beruft sich auf die Versuchsergebnisse der Universität Kassel.

Die Abrundung der Oppermann-Stäbe hat zur Folge, dass die engste Stelle zwischen den Stäben nur in etwa 3 mm bis 4 mm stromabwärts der Rechenoberfläche liegt. Geschwemmsel kann somit nicht weiter in den Zwischenraum der Rechenstäbe eindringen und bleibt an der Oberfläche des Rechens hängen. Eine Reinigung erfolgt durch das Abstreifen mit einer zahnlosen Kunststoffleiste (*Hassinger, 2009*). Ein Verkleben von Geschwemmsel tief in den Zwischenräumen wird damit vermieden und das Getriebsel bleibt für die Rechenreinigungsmaschine erreichbar. Die Gefahr eines Verklebens von Getriebsel im Rechen erkannte auch bereits *Kirschmer (1925)*. Er riet deshalb zu Rechenstäben, deren kleinster Stababstand nahe der Rechenoberfläche liegt (wie bei den Oppermann-Stäben), damit das Geschwemmsel nicht zu weit in die Stabzwischenräume dringen kann.

Bei einem Einsatz der Oppermann-Stäbe mit einem lichten Stababstand von 15 mm bis 20 mm ist es jedoch fraglich, ob sich unter Wasserdruck bzw. Strömungsdruck verkeilende Äste, Plastikmüll und v.a. Plastiktüten durch eine zinkenlose Rechenleiste entfernen lassen. Deshalb rät *Hassinger* zu einem zusätzlichen Grobrechen mit einem Stababstand von 100 mm bis 150 mm, der Oberstrom eines Oppermann-Rechens installiert werden muss. Dies bedeutet für einen Betreiber jedoch zusätzliche Kosten für Installation und Betrieb eines Zweitrechens – und erfordert ausreichend Platz für die Errichtung, der bei Bestandsanlagen in beengten Verhältnissen häufig nicht vorhanden ist.

Von einem Einbau von Oppermann-Profilen an Schrägrechen wird aus Sicht von Stahlwasserbauunternehmen abgeraten, da diese Profile keine ausreichende Steifigkeit besitzen und es durch Wasser- und Geschwemmseldruck zu unzulässigen Verformungen kommen kann (*Jank per E-Mail, 2017*). Dies gilt auch für andere strömungsbegünstigte Stäbe. Eine Bemessung im Einzelfall ist daher immer zwingend durchzuführen und an die örtlichen Verhältnisse anzupassen. Eine horizontale Anordnung der Oppermann-Stäbe kombiniert mit einer Schräganordnung des Rechens und einem Bypass wurde an der Versuchsanstalt Kassel nicht untersucht.

Grundsätzlich kann eine Verdickung der Stäbe im strömungszugewandten/oberwasserseitigen Bereich die Reinigung des Rechens erleichtern, da sich Treibgut in diesem Falle auch im oberwasserseitigen Rechenabschnitt verfängt und dieses mittels Zackenleiste der RRM einfach abgereinigt werden kann. Wird die strömungszugewandte Seite des Rechenstabes gleichzeitig abgerundet, so kann dies bei schräger Anströmung von Vertikalstäben die Rechenverluste durch Anströmung reduzieren (*Kirschner et al., 2015*).

### Rechenfelder

Ein Gesamtrechensystem ist zur Ableitung von Flächenlasten sowie zur Reduzierung der Transportlasten für die Anlieferung und Montage in einzelne Rechenfelder unterteilt (Abb. 26). Des Weiteren lassen sich beschädigte Rechenfelder einzeln leichter austauschen und in beengtem Raum mühelos demontieren und abtransportieren.



Abb. 26: Links Rechenfelder des Schrägrechens am WKW Ottenau mit Blick auf die uw-seitige Rechenebene (*Quelle: EnBW, 2012*). Rechts Rechenfelder des Schrägrechens im wasserbaulichen Forschungslabor.

Die Abmessungen der Felder ergeben sich aus der Statik des Gesamtsystems und der erforderlichen Gesamtrechenlänge. Ebenso orientiert sich die Geometrie der Felder an örtlichen Platzverhältnissen hinsichtlich Montage und Zuwegung zum Einbauort. Die Rechenfelder sind aus einem Rahmen mit darin liegenden einzelnen Rechenstäben gefertigt. Je kleiner die einzelnen Rechenfelder gewählt werden, desto mehr Querverstrebungen und Rahmenteile werden benötigt, welche wiederum Rechenverluste erzeugen, da sie den Fließquerschnitt einengen. Sie tragen aber zu einer ausreichenden Stabilität des Rechensystems bei – hier muss eine detaillierte Planung zu einem wirtschaftlichen Kompromiss aus Standsicherheit, Rechenverlusten und den Kosten führen.

### Verbauungsgrad

Die Kombination aller verbauten Einzelkonstruktionsteile, wie Rechenstäbe, Abstandshalter, Querverstrebungen, Pfeiler und Rahmen werden zum Verbauungsgrad  $P_{Re}$  zusammengefasst. Der dimensionslose Verbauungsgrad beschreibt den Quotienten aus verbauter Fläche und der gesamten Bruttorechenfläche und wird nach *Giesecke et al.* (2009) wie folgt berechnet:

$$P_{Re} = \frac{(A_{VS} + A_{VA})}{A_{Re}} \quad [-] \quad (Gl. 14)$$

$A_{VS}$	= verbaute Fläche durch Stäbe	[m <sup>2</sup> ]
$A_{VA}$	= verbaute Rechenfläche durch Abstandshalter, Querstreben, Pfeiler, statische Elemente, etc.	[m <sup>2</sup> ]
$A_{Re}$	= Gesamtbruttorechenfläche	[m <sup>2</sup> ]

Der Verbauungsgrad ist bei größeren Anlagen aus statischen Gründen größer, da hier über eine größere Wassertiefe stabile Träger und Pfeiler vorgesehen werden müssen. Der Verbauungsgrad kann je nach Rechengestaltung variieren und liegt in der Regel zwischen 0,2 bis 0,7. Aufgrund der realen Begebenheiten und der Konstruktion von Schrägrechen ist der Verbauungsgrad Bestandteil diverser Rechenverlustformeln.

### Rechenneigung

Unter der vertikalen Rechenneigung  $\alpha$  (= vertikaler Anströmwinkel) versteht man die Schrägstellung zur Sohle. Es handelt sich dabei um den Winkel, welcher zwischen Rechenebene und Sohle eingeschlossen wird (Abb. 14 und Abb. 15).

Bei einem Schrägrechen beträgt die Rechenneigung 90°, da der Schrägrechen nicht geneigt, sondern senkrecht auf dem Sohniveau installiert ist. Dies trifft auch auf den Laborrechen und den Schrägrechen in Ottenau zu.

### **Strömungsbedingte Parameter**

Nicht nur geometrische, sondern auch strömungsbedingte Parameter verursachen Rechenverluste  $h_{v,Re}$  und beeinflussen damit letztendlich auch die Energieerzeugung. Dazu gehören die Anströmgeschwindigkeit, der Anströmwinkel sowie der Verlegungsgrad (Tab. 1).

### Anströmgeschwindigkeit

Die Anströmgeschwindigkeit  $v_a$  und ihre theoretische Zerlegung in eine tangentielle und eine normale Komponente ( $v_T$  und  $v_N$ ) wurden bereits erläutert (Kap. 2.3). Es handelt sich bei der Anströmgeschwindigkeit um die Geschwindigkeit Oberstrom des Rechens bzw. im Rechenquerschnitt A ohne Rechenstäbe (Abb. 9). Diese wird mit der Kontinuitätsgleichung (Gl. 1) berechnet. Durch die Schrägstellung zur Anströmung besitzt der Schrägrechen i.d.R. eine größere Rechenebene als der senkrecht durchströmte Gerinnequerschnitt.

Die Aufnahmen von Strömungssignaturen an einem Schrägrechen unter Naturbedingungen (Rechenlänge 13,50 m, Anströmwinkel 44°, Stababstand 18 mm, Anströmgeschwindigkeit 0,8 m/s) zeigen Bereiche mit höherer bzw. niedrigerer Geschwindigkeit (Abb. 27). Verlegte oder verbaute Rechenflächen schaffen strömungsberuhigte Zonen, wodurch die freien Rechenflächen umso stärker angeströmt werden und damit Bereiche mit erhöhter Geschwindigkeit ausbilden. Eine homogene Anströmung im Nahbereich des Schrägrechens besteht somit in der Realität häufig nicht.

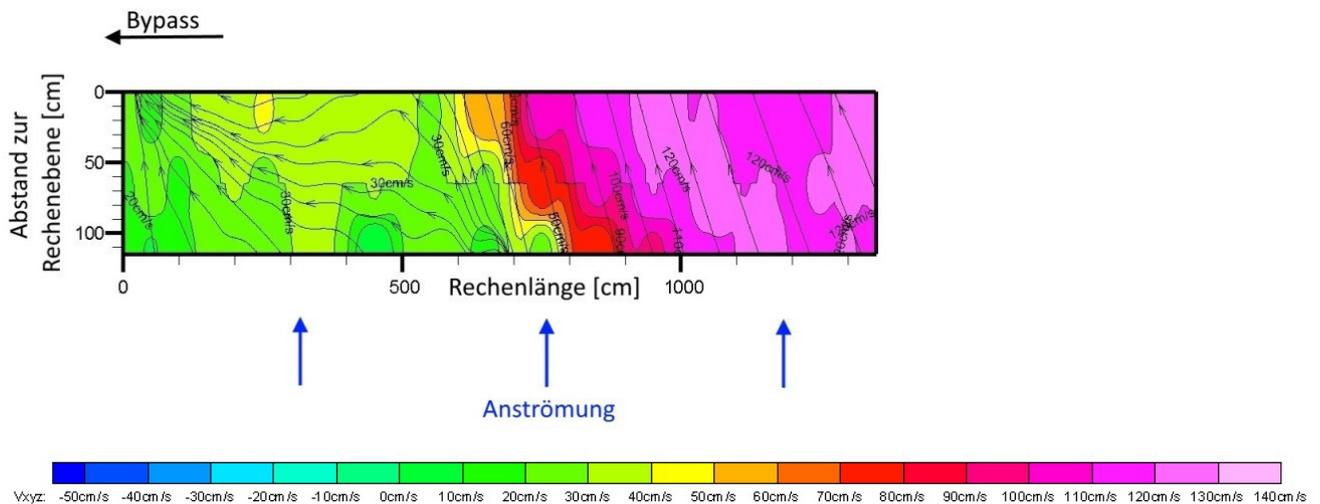


Abb. 27: Beispiel einer inhomogenen Anströmung eines Schrägrechens anhand einer Strömungssignatur. Die Signatur stellt die Verteilung der Strömungsgeschwindigkeiten vor dem Rechen in einer Tiefe von 30 cm unterhalb des Wasserspiegels im Grundriss dar. Dargestellt sind die Strömungsverteilungen an der Rechenebene bis zu einer Entfernung von 1,15 m Richtung Oberstrom in der Draufsicht. Der Bypass liegt außerhalb des dargestellten Bereichs auf der linken Seite. Die Stromlinien zeigen die Strömungsrichtungen mit ihren Pfeilen an, die Farbunterscheidung die Höhe der einzelnen Geschwindigkeiten (*Quelle: verändert nach Schwab, 2016*).

Nach *Giesecke et al.* sollte die gemittelte Anströmgeschwindigkeit vor einer mechanischen Barriere zwischen 0,8 m/s bis 1,2 m/s betragen, in Sonderfällen auch 0,5 m/s bis 1,5 m/s. Damit wird nach *Giesecke et al.* ein möglichst geringer Geschiebegang an der Sohle erzeugt, um Ablagerungen vor dem Rechen zu vermeiden. Des Weiteren müssen die Rechenstäbe abhängig von der Anströmgeschwindigkeit bemessen werden, da bei höheren Fließgeschwindigkeiten periodische Störungsablösungen stattfinden, welche zu einer erhöhten Schwingungsgefahr führen können (*Meusburger, 2002*). Viele Bestandsanlagen sind nach dieser Faustformel angelegt und besitzen eine Anströmgeschwindigkeit zwischen 0,8 m/s bis 1,0 m/s vor dem Rechen, wie z. B. in Ottenau und in Künzelsau. *Giesecke et al.* (2009) beschreiben weiterhin, dass diese geringen Anströmgeschwindigkeiten den Fischen eine Fluchtmöglichkeit in Richtung Oberstrom bieten. In den letzten Jahren wurden hierzu zahlreiche Studien durchgeführt (z. B. durch *Adam et al.* 1999), die zu der Erkenntnis führten, dass diese Anströmgeschwindigkeiten v.a. für Aale und kleinere Fische als zu hoch erscheinen.

### Anströmwinkel

Der horizontale Anströmwinkel  $\delta$  ist der Winkel, unter dem die Anströmung auf den Schrägrechen trifft (Abb. 3). Je schräger und somit länger der Rechen, desto kleiner der Anströmwinkel. Bei orthogonal aufgestellten konventionellen Rechen oder bei Flachrechen beträgt der Anströmwinkel  $90^\circ$ . Nicht zu verwechseln ist dieser Anströmwinkel mit dem von *Meusburger* (2002) definierten Anströmwinkel  $\delta'$ . Bei ihm handelt es sich um den Komplementärwinkel des Anströmwinkels  $\delta$  (Abb. 28). Die Summe von Anströmwinkel  $\delta$  und Komplementärwinkel  $\delta'$  beträgt  $90^\circ$ .

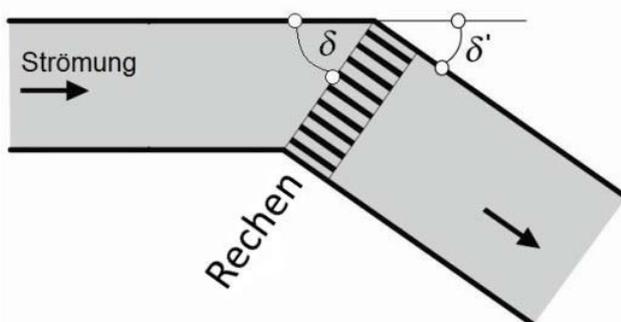


Abb. 28: Definition des Anströmwinkels  $\delta$  und des Komplementärwinkels  $\delta'$  nach *Meusburger* (*Quelle: Meusburger, 2002; verändert von Glock 2017*).

### Verlegungsgrad

Nicht mit dem Verbauungsgrad zu verwechseln ist der dimensionslose Verlegungsgrad  $V_{Re}$ . Er beschreibt die verlegte Rechenfläche infolge von u.a. Geschwemmset, Müll, Treibgut, Algen, Schlamm, Muscheln und Grasnchnitt und wird nach *Giesecke et al.* angegeben mit

$$V_{Re} = \frac{A_{VT}}{A_{Re}} \quad [-] \quad (Gl. 15)$$

$A_{VT}$  = verlegte Rechenfläche [m<sup>2</sup>]  
 $A_{Re}$  = Gesamtbruttorechenfläche [m<sup>2</sup>]

Der Verlegungsgrad ist abhängig von der Getreibselmenge sowie der Reinigungsfrequenz der RRM. Je nachdem in welchem Bereich sich die Verlegung auf der Rechenebene hauptsächlich befindet, unterscheidet man nach *Meusburger (2002)* zwei verschiedene dimensionslose Verlegungsfaktoren  $k_{v,i}$ . Diese Unterscheidung wird vorgenommen, da die Faktoren für unterschiedliche Verlegungsarten am Rechen zur Berechnung der Rechenverluste verwendet werden. Sie können sowohl grafisch (*Meusburger, 2002*) als auch rechnerisch ermittelt werden und sind abhängig von Verbauungsgrad und Verlegungsgrad des Rechens:

$$\text{Verlegungsgruppe 1: } k_{v,1} = 1 + 5,2 \cdot P_{Re}^{-1,5} \cdot \left(\frac{V_{Re}}{1-V_{Re}}\right)^2 \quad [-] \quad (Gl. 16)$$

$$\text{Verlegungsgruppe 2: } k_{v,2} = 1 + 1,8 \cdot P_{Re}^{-1,2} \cdot \left(\frac{V_{Re}}{1-V_{Re}}\right)^{1,2} \quad [-] \quad (Gl. 17)$$

$P_{Re}$  = Verbauungsgrad des Rechens [-]  
 $V_{Re}$  = Verlegungsgrad des Rechens [-]

Der Verlegungsfaktor der Gruppe 1 ist größer als der der Verlegungsgruppe 2. Dies liegt an der gleichmäßigen Verlegung der Gruppe 1 in den stärker angeströmten Bereichen des Rechens.

Eine exakte Verortung der beiden Verlegungsfaktoren an der Rechenfläche ist schwierig, da sie jahreszeitlich- und abflussbedingt – und auch in Kombination – auftreten können. Anhand der nachfolgenden schematischen Abbildungen können der Verlegungsfaktor sowie die Verlegungsgruppe für Neuanlagen anhand der örtlichen Rahmenbedingungen und Anströmverhältnisse sowie vorhandener Betriebserfahrungen am selben Standort abgeschätzt werden. Der Verlegungsgrad liegt zwischen 12,5% und 25% der Gesamtrechenfläche (Abb. 29).

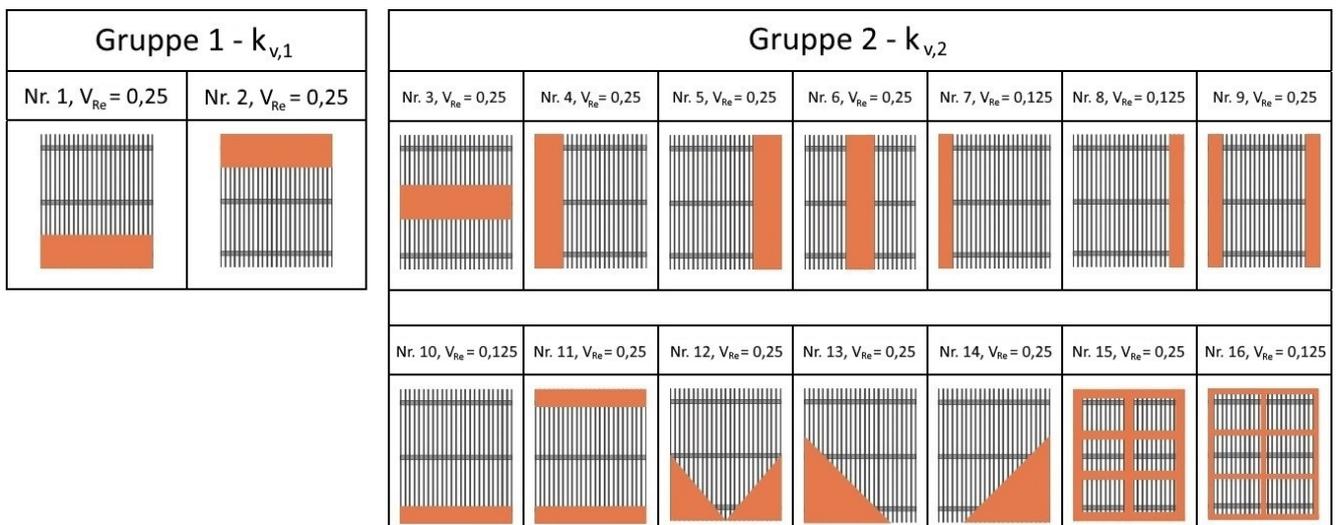


Abb. 29: Verlegungstypen 1-16 und Verlegungsgrade der Gruppe 1 und 2 (*Quelle: verändert nach Meusburger, 2002*).

Im Normalfall – ohne hochwasserbedingte Häufung von Geschwemmsel und Treibgut im Herbst bei einem Hochwasser – kann ein Verlegungsgrad von 0,05 bis 0,1 angenommen werden. Dies ist anhand der Erfahrungswerte am spezifischen Gewässer und des Uferbewuchs abzuschätzen (*Giesecke et al.*, 2009).

Der Verlegungsgrad ist damit eine Größe, welche meistens abgeschätzt werden muss, da er von vielen äußeren Faktoren abhängt. Mit dem Verlegungsgrad und dem Verbauungsgrad des Rechens können dann die Verlegungsfaktoren bestimmt werden, welche damit sowohl die Verlegung beinhalten, als auch die Verbauung des Rechens.

### 2.6.2. Formeln zur Rechenverlustberechnung

Der Gesamtverlustbeiwert  $\zeta$  in Gleichung 6 beinhaltet verschiedene verlustbestimmende Einflussfaktoren (Kap. 2.6.1), welche häufig unbekannt sind oder eine aufwändige Berechnung erfordern. Seit *Kirschmer* (1925) wurden zahlreiche Ansätze der Rechenverlustbestimmung von verschiedenen Autoren untersucht, in denen der Gesamtverlustbeiwert variiert wurde. Dies führte zu unterschiedlichen Verlustformeln, mit denen der Rechenverlust  $h_{v,Re}$  berechnet werden kann. Es wurde von den Autoren ebenfalls untersucht, ob auch andere Einflussfaktoren als die Anströmgeschwindigkeit, welche quadratisch in die Formel eingeht und die Rechenverluste erheblich beeinflusst, relevanten Einfluss auf die Rechenverluste haben. Ob diese Formeln auch auf Schrägrechen mit horizontal ausgerichteten Stäben angewandt werden kann, soll in dieser Arbeit untersucht werden.

Nach Gleichung 6 wird der Gesamtverlustbeiwert  $\zeta$  beschrieben mit:

$$\zeta = \frac{2gh_{v,Re}}{v_a^2} \quad [-] \quad (Gl. 18)$$

$h_{v,Re}$	=	Rechenverlust	[m]
$v_a$	=	Anströmgeschwindigkeit	[m/s]
$g$	=	Erdbeschleunigung	[m/s <sup>2</sup> ]

Der Gesamtverlustbeiwert kann physikalisch bestimmt werden, indem der Rechenverlust  $h_{v,Re}$  sowie die Anströmgeschwindigkeit  $v_a$  hydrometrisch ermittelt werden. Bei einer Neuentwicklung von Rechenstabprofilen können die Gesamtverlustbeiwerte bestimmt und mit anderen Stabformen verglichen werden (Abb. 30).

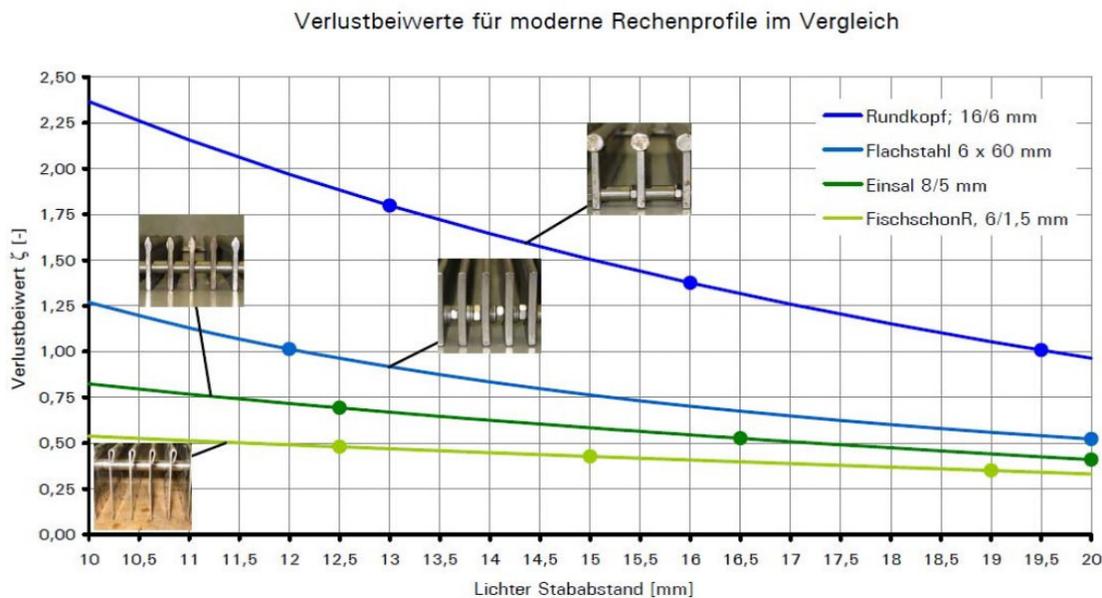


Abb. 30: Gesamtverlustbeiwerte für verschiedene Stabprofile in Abhängigkeit des Stababstands (*Quelle: Hübner et al.*, 2011).

Da die hydrometrische Ermittlung von Rechenverlusten jedoch einen hohen Kosten- und Zeitaufwand aufgrund der benötigten Laborstudien erfordert und somit nicht für jedes Bauvorhaben im Vorfeld durchgeführt werden

kann, bedarf es an Formeln, mit denen die auftretenden Rechenverluste im Zuge der Planung berechnet oder zumindest hinreichend genau abgeschätzt werden können.

Im nachfolgenden werden Aufbau, Anwendungsgrenzen und verlustbestimmende Einflussfaktoren einiger ausgewählter und häufig verwendeter Rechenverlustformeln dargestellt und auf eine mögliche Anwendung bei Schrägrechen hin untersucht.

### Kirschmer (1925)

Die ersten Untersuchungen zu Verlusten durch Rechenanlagen führte *Kirschmer* 1925 mit seiner Dissertation *Untersuchungen über den Gefällsverlust an Rechen* an der Technischen Hochschule München durch. Die von ihm untersuchten Rechen wurden frontal angeströmt, besaßen daher einen horizontalen Anströmwinkel von 90°. Schräge Anströmungen (Anströmwinkel kleiner als 90°) wurden nicht untersucht. Er variierte seine Versuchsrechen hinsichtlich des Stabprofils, der Stablänge und -dicke, des Stababstands und der Rechenneigung zur Sohle (= vertikaler Anströmwinkel) (Kap. 2.6.1). Anhand seiner Ergebnisse konnte er Stabprofilbeiwerte für verschiedene Stabformen identifizieren und zeigte auf, dass sich die Verluste durch eine Variation der Profile hin zu einem abgerundeten oder fischbauchigen Stabprofil reduzieren lassen (Abb. 24, links). Ihm gelang es, eine Formel aufzustellen (Gl. 19), welche die Verluste in Abhängigkeit verschiedener Parameter berechnet und die viele Jahre bei der Rechenverlustbestimmung verwendet wurde. Sie ist maßgeblich bestimmt durch den Einfluss der Stabprofilbeiwerte.

$$h_{v,Re} = k_s \cdot \left(\frac{d}{s}\right)^{\frac{4}{3}} \cdot \frac{v_a^2}{2g} \cdot \sin\alpha \quad [\text{m}] \quad (\text{Gl. 19})$$

$k_s$	=	Stabprofilbeiwert	[-]
$d$	=	Stabdicke	[m]
$s$	=	Stababstand	[m]
$v_a$	=	Anströmgeschwindigkeit	[m/s]
$\alpha$	=	vertikaler Anströmwinkel	[°]
$g$	=	Erdbeschleunigung	[m/s <sup>2</sup> ]

Nach *Kirschmer* unterteilt sich der Rechenverlust in drei Hauptverluste:

- ein Kontraktionsverlust vor dem Rechen,
- ein Verlust durch Oberflächenreibung im Rechen und
- ein Mischverlust nach dem Rechen.

Heute nennt man diese Zonen Ablösezonon, in denen die verlusterzeugenden Verwirbelungen entstehen (Kap. 2.6.1, Abb. 21). *Kirschmers* Untersuchungen zur Oberflächenreibung ergaben, dass diese nur geringen Einfluss auf die Rechenverluste haben und daher zu vernachlässigen sind.

Mit seinen Studien bewies *Kirschmer* auch, dass die Rechenneigung zur Sohle einen erheblichen Anteil an den Rechenverlusten hat und mit  $\sin\alpha$  bei kleinerem vertikalen Anströmwinkel abnimmt. Somit kann nach dem *Kirschmer*-Ansatz bereits qualitativ die Aussage getroffen werden, dass Flachrechen geringere Rechenverluste  $h_{v,Re}$  besitzen als steilere konventionelle Rechen. Bei einem Schrägrechen mit einer Neigung von 90° geht  $\sin\alpha = 1,0$  unbeeinflusst in die Rechenverlustformel ein und lediglich die Anströmgeschwindigkeit sowie die Rechenstäbe in Form und Abmessungen tragen zu den Rechenverlusten bei. Weitere Einflussfaktoren bleiben unberücksichtigt.

Bereits 1925 erwähnte *Kirschmer* den Aspekt des Fischschutzes mit einem kleinen Stababstand und empfahl aus diesem Grund abgerundete Profile, um die Rechenverluste möglichst gering zu halten. Trotzdem wurden jahrzehntelang Rechteckprofile bevorzugt, was voraussichtlich an den geringen Herstellungskosten und an der einfachen Herstellungsweise lag.

Eine Untersuchung mit horizontalen Stäben und einer Schrägstellung mit einem Anströmwinkel kleiner 90° (Schrägrechen) wurde von *Kirschmer* nicht durchgeführt.

Die *Kirschmer*-Rechenverlustformel bildet die Basis für alle Weiterentwicklungen der Rechenverlustformel der letzten Jahrzehnte.

### Spangler (1928)

Eine Weiterentwicklung der *Kirschmer*-Rechenverlustformel führte *Spangler* (1928) in Rahmen seiner Dissertation *Untersuchung über den Verlust an Rechen bei schräger Zuströmung* durch. Er untersuchte die Anströmverhältnisse und damit die Rechenverlustermittlung bei schräg angeströmten Rechen mit vertikalen Stäben, da eine Schräganströmung von *Kirschmer* bis zu diesem Zeitpunkt nicht untersucht wurde. Betrachtet wurden horizontale Anströmwinkel von  $0^\circ$  bis  $60^\circ$ . Das Ergebnis war eine Zunahme der Rechenverluste aufgrund der Schrägstellung (Abb. 31). Dies liegt daran, dass die Anströmung der vertikal ausgerichteten Rechenstäbe nun nicht frontal erfolgt, wie bei einem Anströmwinkel von  $90^\circ$ , sondern schräg. Damit wird ein größerer Querschnitt direkt angeströmt und der Verbauungsgrad (vgl. Kap. 2.6.1) nimmt zu. Bei *Kirschmer* wurde der Verbauungsgrad hingegen nicht berücksichtigt.

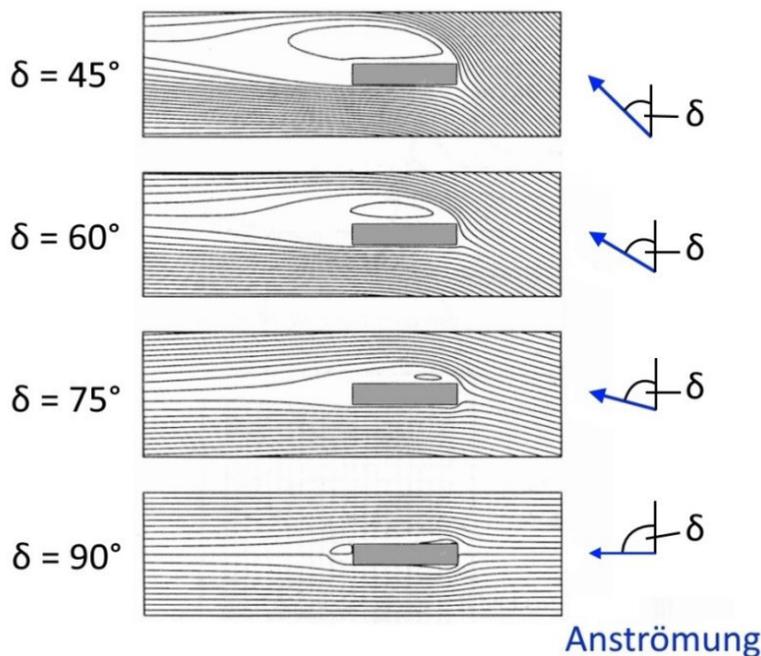


Abb. 31: Zunahme der Strömungsablösungen und der Verluste an den Rechenstäben mit Abnahme des horizontalen Anströmwinkels  $\delta$  (Quelle: verändert nach Göde et al., 2002).

Da Einlaufgeometrien und Anströmwinkel von Rechen in der Realität standortabhängig variieren, verwendete *Spangler* die Geschwindigkeit nach dem Rechen (= Abströmung) als Bezugsgeschwindigkeit. Aufgrund der bereits erläuterten Beschleunigung des Wassers Unterstrom des Rechens und der Abnahme der Energielinienhöhe (Kap. 2.3) lag *Spanglers* Wassertiefe damit etwas niedriger als bei der Anströmgeschwindigkeit Oberstrom des Rechens. Dies ergab gegenüber *Kirschmer* leicht geringere Stabprofilbeiwerte  $k_s$  für verschiedene Stabformen (Tab. 2).

Tab. 2: Stabprofilbeiwerte für die Rechenstabformen (Abb. 32) nach *Spangler* bei einer frontalen Anströmung (Quelle: *Spangler*, 1928).

Rechenstabform (Abb. 33)	a, h, i, k, l	b	c	d	e	f	g
Rechenstabprofilbeiwert [-]	2,34	1,77	1,60	1,00	0,87	0,71	1,73

Die von *Spangler* entwickelte Rechenverlustformel ist abhängig vom Gesamtverlustbeiwert, welcher nach *Spangler* eine Funktion des horizontalen Anströmwinkels und eines dimensionslosen Durchflussverhältnisses darstellt. Das Durchflussverhältnis wird wie folgt angegeben:

$$\varepsilon = \frac{s}{(d+s)} \quad [-] \quad (\text{Gl. 20})$$

$\varepsilon$  = Durchflussverhältnis [-]  
 $s$  = Stababstand [m]  
 $d$  = Stabdicke [m]

Anhand des Durchflussverhältnisses und dem gegebenen horizontalen Anströmwinkel  $\delta$  können die Verlustbeiwerte  $\zeta$  anhand der von *Spangler* aufgestellten Diagramme für verschiedene Stabformen (a) bis (l) (Abb. 32) ermittelt werden (Abb. 33).

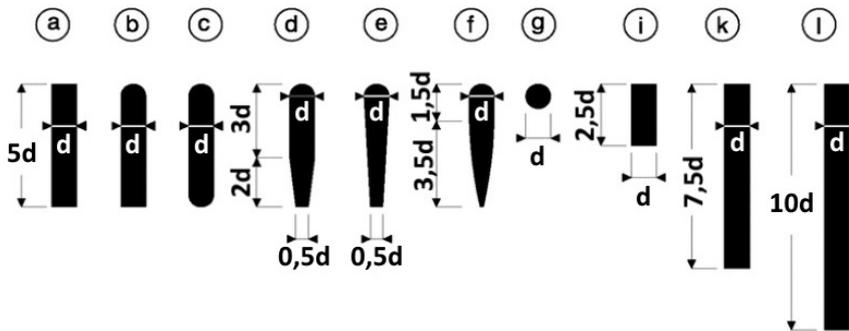


Abb. 32: Stabformen nach *Kirschmer* (1925), welche bei *Spangler* untersucht wurden (*Quelle: Meusburger, 2002*).

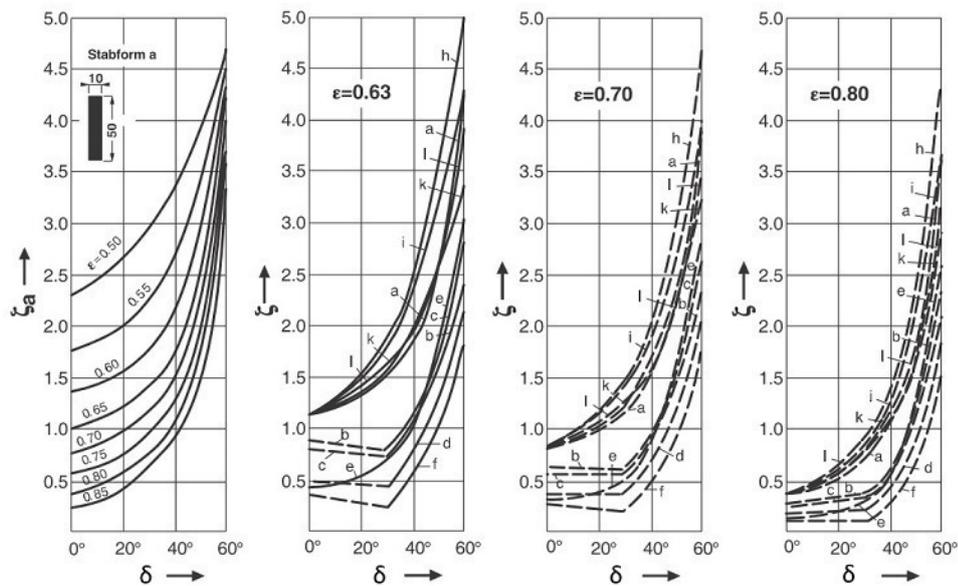


Abb. 33: Diagramme zur Bestimmung des Verlustbeiwertes  $\zeta$  in Abhängigkeit des Durchflussverhältnisses  $\varepsilon$  und des Anströmwinkels  $\delta$  nach *Spangler*. Schaubild links zeigt lediglich die Verlustbeiwerte für das Rechteckprofil (a), die anderen drei Diagramme führen alle Stabformen auf für drei verschiedene Durchflussverhältnisse  $\varepsilon$  (*Quelle: verändert nach Spangler, 1928*).

Mit den aus diesen Diagrammen (Abb. 32 und Abb. 33) ermittelten Werte können die Rechenverluste für konventionelle, schräg angeströmte Rechen berechnet werden:

$$h_{v,Re} = \zeta \cdot \frac{v_d^2}{2g} \quad [\text{m}] \quad (\text{Gl. 21})$$

$v_d$  = Abströmgeschwindigkeit nach dem Rechen [m/s]  
 $\zeta$  = Verlustbeiwert nach *Spangler*, zu ermitteln anhand Abb. 33 [-]  
 $g$  = Erdbeschleunigung [m/s<sup>2</sup>]

Eine Betrachtung von horizontalen Rechenstäben wurde von *Spangler* nicht durchgeführt.

### Kirschmer-Mosonyi (1966)

*Mosonyi* entwickelte anhand der Rechenverlustformel von *Kirschmer* und eigenen Naturmessungen an Kraftwerken einen Beiwert  $\beta$ , welcher die horizontale Schräganströmung berücksichtigt. Die daraus resultierende *Kirschmer-Mosonyi-Formel* lautet:

$$h_{v,Re} = \beta \cdot k_s \cdot \left(\frac{d}{s}\right)^{\frac{4}{3}} \cdot \frac{v_a^2}{2g} \cdot \sin\alpha \quad [\text{m}] \quad (\text{Gl. 22})$$

$\beta$	=	Faktor für die Schräganströmung	[-]
$k_s$	=	Stabprofilbeiwert	[-]
$d$	=	Stabdicke	[m]
$s$	=	Stababstand	[m]
$v_a$	=	Anströmgeschwindigkeit	[m/s]
$\alpha$	=	vertikaler Anströmwinkel	[°]
$g$	=	Erdbeschleunigung	[m/s <sup>2</sup> ]

Der Faktor  $\beta$  für die Schräganströmung ist abhängig von der Stabdicke und dem Stababstand sowie dem Komplementärwinkel  $\delta'$  des Anströmwinkels  $\delta$  (Abb. 28). Daraus lassen sich die Beiwerte  $\beta$  ermitteln (Tab. 3).

Tab. 3: Beiwerte  $\beta$  in Abhängigkeit des Anströmwinkels  $\delta$  sowie des Quotienten  $d/s$  aus Rechenstabdicke und Stababstand (*Quelle: verändert nach Mosonyi, 1966*).

Quotient aus $d/s$	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2
Anströmwinkel $\delta$	90°	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	80°	1,06	1,07	1,08	1,09	1,10	1,11	1,12	1,14
	70°	1,14	1,16	1,18	1,21	1,24	1,26	1,31	1,43
	60°	1,25	1,28	1,31	1,35	1,44	1,50	1,64	1,90
	50°	1,43	1,48	1,55	1,64	1,75	1,88	2,10	2,56
	40°	1,75	1,85	1,96	2,10	2,30	2,60	3,00	3,80
	30°	2,25	2,41	2,62	2,90	3,26	3,74	4,40	6,05

Bei einem Schrägrechen beträgt der vertikale Anströmwinkel 90°, damit entfällt der Term  $\sin\alpha = 1$  und ist nur bei zur Sohle geneigten, konventionellen Rechen und Flachrechen relevant. Auch *Mosonyi* führte keine Untersuchung mit horizontalen Rechenstäben durch.

### Zimmermann (1969)

Eine Weiterentwicklung der Rechenverlustformel mit horizontaler Schräganströmung erfolgte in der Dissertation von *Zimmermann* (1969). Anstatt der Verwendung einer Tabelle mit experimentell ermittelten Beiwerten  $\beta$  auf Basis von Naturmessungen wie *Mosonyi*, parametrisierte *Zimmermann* den Beiwert  $\beta$ , welcher die Schräganströmung berücksichtigt. Die Rechenstäbe im Modell von *Zimmermann* waren vertikal ausgerichtet und konnten durch ein Drehen ähnlich wie bei einer Jalousie eine Schräganströmung von 0° bis 90° simulieren.

In Abhängigkeit der Stablänge und des Stababstands gibt *Zimmermann* zwei verschiedene Formeln A und B zur Rechenverlustermittlung an. Formel A kennzeichnet eine unvollkommene Umlenkung der Anströmung in Stablängsachse, Formel B hingegen die vollkommene Strömungsumlenkung in Stablängsachse.

$$\text{A: } l < s \text{ (selten)} \quad h_{v,Re} = [3,87 \left(\frac{d}{s}\right)^{\frac{4}{3}} \cdot \tan^{\frac{7}{4}} \delta + k_s] \cdot \left(\frac{d}{s}\right)^{\frac{4}{3}} \cdot \frac{v_a^2}{2g} \cdot \sin\alpha \quad [\text{m}] \quad (\text{Gl. 23})$$

$$\text{B: } l > s \text{ (häufig)} \quad h_{v,Re} = \frac{v_a^2}{2g} \cdot [3,87 \cdot \tan^{\frac{7}{4}} \delta + k_s \cdot \left(\frac{d}{s}\right)^{\frac{4}{3}} + \frac{k_s}{\cos^3 \delta} \cdot \left[\left(\frac{d}{s}\right)^{\frac{4}{3}} - \left(\frac{d}{l}\right)^{\frac{4}{3}}\right]] \quad [\text{m}] \quad (\text{Gl. 24})$$

$k_s$	=	Stabprofilbeiwert	[-]
$d$	=	Stabdicke	[m]
$s$	=	Stababstand	[m]
$l$	=	Stablänge	[m]
$\delta$	=	horizontaler Anströmwinkel	[°]
$v_a$	=	Anströmgeschwindigkeit	[m/s]
$\alpha$	=	vertikaler Anströmwinkel	[°]
$g$	=	Erdbeschleunigung	[m/s <sup>2</sup> ]

Die Beziehung „Stablänge kleiner als der Stababstand“ kommt bei Rechenanlagen nur selten vor, da die Stababstände bei Wasserkraftanlagen aktuell häufig kleiner als 18 mm ausgelegt werden, die Stablängen jedoch zur Lastabtragung verwendet werden und damit groß und stabil genug sein müssen. Die zweite Beziehung „Stablänge größer als der Stababstand“ kommt hingegen in der Realität häufiger vor und ist in den überwiegenden Fällen anzuwenden.

### Meusburger (2002)

Da die Ansätze und Beiwerte von *Kirschmer-Mosonyi* und den anderen Autoren die tatsächlichen Rechenverluste von Rechen mit einem horizontalen Anströmwinkel teilweise weit unterschätzten und nicht alle wesentlichen Verlustparameter berücksichtigten, wurden aufbauend auf den Rechenverlusten  $h_{v,Re}$  und initiiert durch den Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW, damals noch VDEW) weitergehende Untersuchungen durch die Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH) Zürich an konventionellen Rechen durchgeführt (1999). Diese Studien erfolgten durch *Meusburger* im Rahmen seiner Dissertation (2002), welche eine Datensammlung von Schweizer Kraftwerksbetreibern, Modellversuche, die Entwicklung eines neuen Berechnungsansatzes und Naturmessungen beinhaltet.

Die neu entstandene Rechenverlustformel von *Meusburger* beinhaltet im Gegensatz zu *Kirschmer*, *Spangler*, *Kirschmer-Mosonyi* und *Zimmermann* auch die nicht zu unterschätzenden Beeinflussungen durch die Verlegung  $V_{Re}$  des Rechens, die Rechenverbauung  $P_{Re}$  und die schräge Anströmung mit einem horizontalen Anströmwinkel  $\delta'$ , welcher den Komplementärwinkel von  $\delta$  darstellt (Abb. 28). Anhand zahlreicher physikalischer Studien gelangte *Meusburger* zu folgender Rechenverlustformel:

$$h_{v,Re} = k_s \cdot \left( \frac{P_{Re}}{1-P_{Re}} \right)^{1,5} \cdot \left( 1 - \frac{\delta'}{90^\circ} \right) \cdot P_{Re}^{-1,4 \cdot \tan \delta'} \cdot k_{v,i} \cdot \sin \alpha \cdot \frac{v_a^2}{2g} \quad [m] \quad (\text{Gl. 25})$$

$k_s$	=	Stabprofilbeiwert	[-]
$\delta'$	=	Komplementärwinkel des horizontalen Anströmwinkels	[°]
$v_a$	=	Anströmgeschwindigkeit	[m/s]
$k_{v,i}$	=	Verlustfaktor für Rechenverlegung	[-]
$P_{Re}$	=	Verbauungsgrad des Rechens	[-]
$\alpha$	=	vertikaler Anströmwinkel	[°]
$g$	=	Erdbeschleunigung	[m/s <sup>2</sup> ]

Die Formel von *Meusburger* ist heute in der Praxis weit verbreitet und kommt damit hauptsächlich zur Anwendung. Dies liegt an den Verbauungsgraden und Verlegungsgraden, welche bisher noch keine Berücksichtigung in Rechenverlustformeln fanden, jedoch unter Naturbedingungen einen erheblichen Anteil an den Rechenverlusten verursachen und damit die Rechenverluste realistisch abbilden.

Der Verlustfaktor der Rechenverlegung durch Geschwemmsel und Treibgut  $k_{v,i}$  ist abhängig von der Verlegungsart und wird nach den Gleichungen 16 und 17 bestimmt (Abb. 29). Geometrische Parameter wie Stablänge, Stababstand und Stabdicke sind im Term des Verbauungsgrads enthalten (Gl. 14).

Anhand der *Meusburger*-Formel wird aufgezeigt, dass Rechenverluste maßgeblich vom Verbauungsgrad, Rechenstabform, Rechenneigung und Anströmwinkel abhängig sind. Der Verbauungsgrad liegt nach *Meusburger* im Normalfall bei 30% bis 50% (bis max. 70%) und wirkt sich daher erheblich auf die Einschnürung des Wassers im Bereich des Rechens und damit auf die Rechenverluste aus.

*Meusburger* zeigte in seinen Untersuchungen darüber hinaus auf, dass lokale Geschwindigkeitsspitzen deutlich über der mittleren Anströmgeschwindigkeit liegen können und dass die Verlegung durch Geschwemmsel und Treibgut wesentlich zum Verlustbeiwert beiträgt.

Diese von *Meusburger* entwickelte Formel (Gl. 25) findet nach *Giesecke et al.* (2009) die weiteste Verbreitung, obwohl für ihre Anwendung folgende Grenzen, welche eingehalten werden müssen, gesetzt sind:

- Verbauungsgrad  $P_{Re} = 0,19$  bis  $0,55$
- Verhältnis  $0,70 < l/s < 10$
- Anströmwinkel  $\delta' < 45^\circ$  (Komplementärwinkel zu  $\delta$ ), damit  $\tan\delta' \leq 1,0$

Eine Anwendbarkeit dieser Rechenverlustformel auf eine horizontale Stabanordnung wurde bisher nicht wissenschaftlich untersucht, obwohl die *Meusburger*-Formel bei Planern, Betreibern und Herstellern von Schrägrechen bereits zur Anwendung kommt.

### Raynal (2013)

Im Gegensatz zu den bisherigen Betrachtungen hinsichtlich der hydraulischen Verluste untersuchte *Raynal* (2013) in seiner Dissertation Leitreckenkonfigurationen mit horizontalen und vertikalen Stäben sowie mit vertikaler und horizontaler Schräganströmung. Er orientierte sich an den Rechenkonfigurationen von *Meusburger* und führte numerische Simulationen als Basis der Untersuchungen durch, in denen Parameter wie Stababstand, Anströmgeschwindigkeit und Anströmwinkel sowie die Rechenneigung zur Sohle untersucht wurden. Darüber hinaus wurden Studien an physikalischen Modellen durchgeführt, wobei der Schwerpunkt auf Leitreckenkonfigurationen des Bar Racks lag (Kap. 2.4).

*Raynal* stellte fest, dass ein schräg angeströmter Bar Rack in einem geraden Gerinne andere Verluste erzeugt, als ein Rechen in einem schräg verlaufenden Einlaufkanal (Abb. 34).

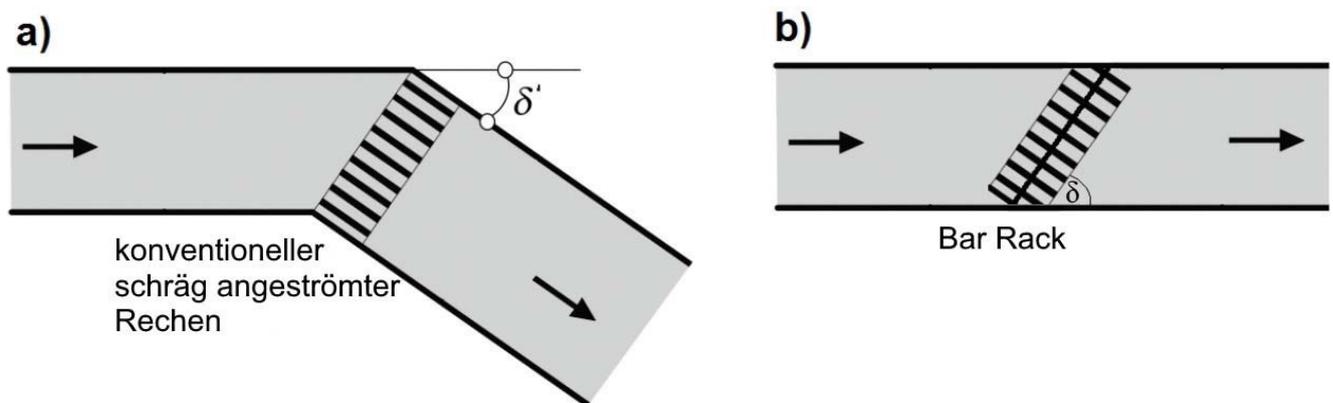


Abb. 34: Vergleich der Rechenkonfigurationen. a) Anströmung eines Rechens mit vertikalen Stäben mit Komplementärwinkel  $\delta'$  nach *Meusburger* (2002) und b) Anströmung eines Bar Racks nach *Raynal* (2013) (Quelle: verändert nach *Raynal*, 2013).

Daraufhin entwickelte *Raynal* eigene Rechenverlustbeiwerte sowie eine Formel zur Bestimmung des Gesamtverlustbeiwerts  $\zeta$  für Bar Racks:

$$\zeta = K_i \cdot \left( \frac{P_{Re}}{1-P_{Re}} \right)^{1,6} \cdot k_\delta \quad [-] \quad (\text{Gl. 26})$$

Der horizontale Anströmwinkel  $\delta$ , welcher die Schräganströmung abbildet, geht mit dem dimensionslosen Verlustfaktor  $k_\delta$  in die Formel ein. Der Verlustfaktor wird wie folgt bestimmt:

$$k_\delta = 1 + k_i \cdot \left( \frac{90^\circ - \delta}{90^\circ} \right)^{2,35} \cdot \left( \frac{P_{Re}}{1-P_{Re}} \right)^3 \quad [-] \quad (\text{Gl. 27})$$

$k_\delta$	=	Verlustfaktor des horizontalen Anströmwinkels	[-]
$K_i$	=	Verlustfaktor der Rechenstabform in Abhängigkeit des Verbauungsgrades $P_{Re}$	[-]
$k_i$	=	Verlustfaktor der Rechenstabform in Abhängigkeit des Anströmwinkels $\delta$	[-]
$P_{Re}$	=	Verbauungsgrad des Rechens	[-]
$\delta$	=	horizontaler Anströmwinkel	[°]

Im Gegensatz zum Verlustfaktor  $k_\delta$ , welcher mit Gleichung 27 berechnet werden kann, wurden die Verlustfaktoren  $K_i$  (Verlustfaktor der Rechenstabform in Abhängigkeit des Verbauungsgrades) und  $k_i$  (Verlustfaktor der Rechenstabform in Abhängigkeit des Anströmwinkels) von *Raynal* experimentell ermittelt. Für Rechteckstabformen gibt *Raynal* für die Verlustfaktoren  $K_i = 2,89$  und für  $k_i = 1,67$  an. Zusätzlich zur Rechteckform bestimmte er die Verlustfaktoren für ein vorne abgerundetes Profil, welches in Richtung Unterstrom trapezförmig zuläuft (analog Profil Nr. 4 von *Kirschmer* in Abb. 24 und Abb. 35). Für diese vorne abgerundete Profilform lauten die Werte der Verlustfaktoren für  $K_i = 1,70$  und für  $k_i = 2,69$  (*Raynal*, 2013).

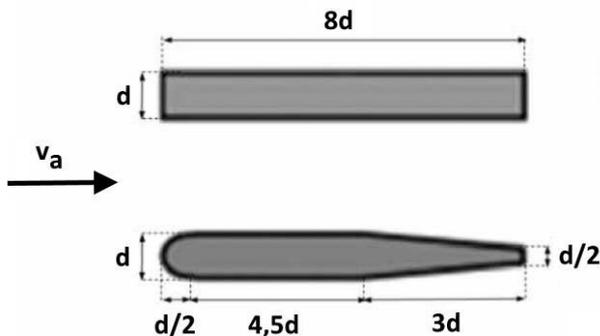


Abb. 35: Untersuchte Stabprofile bei *Raynal* (2013): oben Rechteckprofil und unten abgerundetes Profil, – jeweils mit der Stabdicke  $d$  und der Anströmgeschwindigkeit  $v_a$  (*Quelle: verändert nach Raynal et al. 2013a*).

Die Rechenverlegung wird bei *Raynal* nicht berücksichtigt, es wird stets von einer freien und gesäuberten Durchströmfläche über die gesamte Rechenebene ausgegangen. Somit ist ein Vergleich mit entsprechenden Laborversuchen möglich, jedoch nicht unter realen Bedingungen an einem Gewässer.

*Raynal* kam im weiteren Verlauf seiner Arbeit zum Ergebnis, dass die tangentielle Strömungskomponente bei Schrägrecken mit horizontalem Anströmwinkel doppelt so hoch sein muss, wie der Vektor der Normalgeschwindigkeit, um eine Leitwirkung auf Fische auszuüben. Gleichzeitig soll die Normalkomponente maximal 0,5 m/s bei einem Anströmwinkel von maximal 45° oder kleiner betragen, um ein Impingement (= Andrücken eines Fisches an die Rechenebene ohne Möglichkeit einer selbstständigen Flucht) zu verhindern.

Neu war die Erkenntnis, dass die Rechenverlustbeiwerte bei schräg angeströmtem Rechen mit steigendem horizontalen Anströmwinkel ansteigen: Je kleiner der Anströmwinkel, desto geringer die Energieverluste aufgrund der Rechenhydraulik und der Anströmsituation des Bar Racks.

#### Kriewitz-Byun (2014)

Die Weiterentwicklung schräg angeströmter konventioneller Rechen veranlasste *Kriewitz-Byun* (2014) zu einer detaillierten Untersuchung, v.a. im Hinblick auf einen Einsatz zum Fischschutz und zur Verbesserung der Leiteffizienz von Fischen in Richtung eines seitlichen Bypasses an größeren Wasserkraftanlagen mit Ausbauabflüssen größer 100 m<sup>3</sup>/s. Hierbei konzentrierte sich *Kriewitz-Byun* auf den Einsatz von Louver-Rechen und Bar Racks (Kap. 2.4). Aufgrund der Schrägstellung der Rechenachse und der Rechenstäbe zur Anströmungsrichtung werden die Fische in die jeweilige Richtung eines angeordneten Fischabstiegs geleitet, was die Versuche von *Kriewitz-Byun* bestätigen. Jedoch zeigt sich bei diesen Leitreckenarten auch die Entstehung hoher und kommerziell nicht vertretbarer hydraulischer Verluste. Durch eine Variation von Rechen- und Stabausrichtung versuchte *Kriewitz-Byun* die Rechen so zu variieren, dass Rechenverluste minimiert, die Leiteffizienz jedoch nicht nachteilig verändert wird. Daraus entwickelte *Kriewitz-Byun* eine Verlustformel für diese Leitrecken:

$$\zeta_{Re} = \zeta_B + C_l + C_E + C_{ks} \quad [-] \quad (\text{Gl. 28})$$

Mit folgenden Einzeltermen der Verlustbeiwerte und Verlustfaktoren:

- Dimensionsloser axialer Rechenstababstand in Abhängigkeit von der Rechenstabdicke  $d$  und dem Stababstand  $s$ :

$$\sigma = \frac{d}{s} \quad [-] \quad (\text{Gl. 29})$$

- Basisverlustbeiwert  $\zeta_B$  in Abhängigkeit des Anströmwinkels  $\delta$ , des Stabwinkels  $\beta$  und des dimensionslosen Stababstands  $\sigma$ :

$$\zeta_B = 245 \cdot \left[ 0,0275 + (\sigma - 0,0815) \cdot \left( \frac{\delta}{90^\circ} \right) \right] \cdot \left( \frac{\beta}{90^\circ} \right)^{5\delta^{0,44}} \quad [-] \quad (\text{Gl. 30})$$

- Verlustfaktor  $C_l$  für den Stababstand in Abhängigkeit des Anströmwinkels  $\delta$ , des dimensionslosen Stababstandes  $\sigma$  und der dimensionslosem Stababstand  $\varepsilon$ :

$$C_l = \varepsilon \cdot \left[ 1 + 9,4\sigma \cdot (1 - \varepsilon) - 3,8 \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \left( \frac{\delta}{90^\circ} \right) \right] \quad [-] \quad (\text{Gl. 31})$$

- Verlustfaktor  $C_E$  für die Eintauchtiefe in Abhängigkeit des dimensionslosen Stababstandes  $\sigma$  und der dimensionslosen Eintauchtiefe  $\kappa$ :

$$C_E = \kappa^{6,6\sqrt{\sigma}} \quad [-] \quad (\text{Gl. 32})$$

- Verlustfaktor  $C_{ks}$  für die Stabform in Abhängigkeit des dimensionslosen Stababstandes  $\sigma$  und des Anströmwinkels  $\delta$ :

$$C_{ks} = \left[ 0,75 + \frac{(62^\circ - \delta)}{90^\circ} \cdot 4,5\sigma \right] \quad [-] \quad (\text{Gl. 33})$$

Die weiteren Parameter lauten (siehe auch Abb. 36):

$\beta$	=	Stabwinkel	[°]
$d$	=	Rechenstabdicke	[m]
$\delta$	=	horizontaler Anströmwinkel des Rechens	[°]
$\varepsilon$	=	dimensionslose Rechenstabtiefe	[-]
$\kappa$	=	dimensionslose Eintauchtiefe	[-]
$s$	=	axialer Rechenstababstand (= Stababstand)	[m]

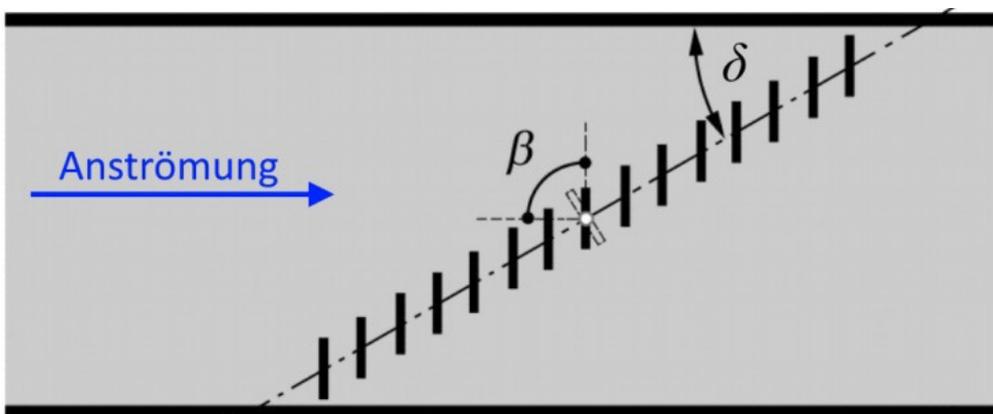


Abb. 36: Grundrisskizze des Stabwinkels  $\beta$  und des horizontalen Anströmwinkels  $\delta$  bei Kriewitz-Byun (*Quelle: verändert nach Kriewitz-Byun, 2014*).

---

Aufgrund der Untersuchungskampagne von *Kriewitz-Byun* kann die Formel nur innerhalb der untersuchten Randbedingungen angewandt werden und zeigt deshalb folgende Grenzen auf:

- Anströmwinkel  $\delta$ :  $15^\circ \leq \delta \leq 45^\circ$
- Stabwinkel  $\beta$ :  $45^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$   
Dieser Parameter ist lediglich bei Schrägrechen mit vertikalen Stäben relevant, nicht jedoch für die in dieser Arbeit untersuchten Schrägrechen.
- Stababstand  $s$ :  $60 \text{ mm} \leq s \leq 240 \text{ mm}$   
Die Anwendung der Rechenverlustformel gilt demnach nur für Grobrechen bzw. Louver und Bar Racks, welche entsprechend große Stababstände besitzen (Kap. 2.4).

Aufgrund der Aussagen von *Kriewitz-Byun* und der oben aufgeführten Grenzwerte für die Rechenverlustformel, kann diese für die in dieser Forschungsarbeit untersuchten Schrägrechen mit Stababständen von 10 mm bis 30 mm nicht angewandt werden. Der Verlustfaktor  $C_E$  für die Eintauchtiefe gilt nur für vertikale Stäbe, ebenso der Basisverlustbeiwert  $\zeta_B$ , welcher vom Stabwinkel  $\beta$  abhängt, also von einer Drehung der vertikalen Stäbe.

### Anwendbarkeit der Rechenverlustformeln bei Schrägrechen

Auf Basis reiner Literaturangaben der oben vorgestellten Autoren ergibt sich folgende Ersteinschätzung auf die Anwendbarkeit der Rechenverlustformeln bei Schrägrechen:

- Kirschmer: wahrscheinlich nicht – Verlustformel berücksichtigt keine Schräganströmung
- Spangler: möglich – Verlustformel berücksichtigt Schräganströmung, Kenntnis der Abströmgeschwindigkeit nach dem Rechen notwendig
- Kirschmer-Mosonyi: möglich – Verlustformel berücksichtigt Schräganströmung
- Zimmermann: möglich – Verlustformel berücksichtigt Schräganströmung
- Meusburger: möglich – Verlustformel berücksichtigt Schräganströmung, Anwendungsgrenzen beachten
- Raynal: wahrscheinlich nicht – Verlustformel wurde speziell für Bar Racks und Louver aufgestellt, nur für Rechteck- und Fischbauchprofil
- Kriewitz-Byun: wahrscheinlich nicht – Verlustformel wurde speziell für Bar Racks und Louver aufgestellt, Anwendungsgrenzen beachten

Obwohl einige Autoren die Schräganströmung untersucht haben, wurde jedoch keine Rechenverlustformel speziell für horizontale Stäbe entwickelt. Die Anwendbarkeit der Formeln auf Schrägrechen mit horizontalen Stäben muss daher überprüft werden.

Weitere Rechenverlustformeln anderer Autoren sind u.a. bei *Meusburger* (2002) zu finden sowie bei *Raynal* (2013).

### 3. Physikalische Rechenverlustermittlung an Schrägrechen

Die Grundlagen der Rechenhydraulik sowie der Rechenverlustermittlung wurden bereits erläutert (Kap. 2). Eine mögliche Anwendung der vorgestellten Rechenverlustformeln auf Schrägrechen soll in diesem Kapitel durch Vergleich der verschiedenen hydrometrisch ermittelten Rechenverluste mit den rechnerischen Rechenverlusten untersucht werden. Hierfür wurden folgende Formeln auf eine mögliche Anwendung bei Schrägrechen ausgewählt:

- Kirschmer (Gl. 19): erste Rechenverlustformel und Basis aller Weiterentwicklungen
- Kirschmer-Mosonyi (Gl. 22): berücksichtigt eine Schräganströmung
- Zimmermann (Gl. 23 und 24): berücksichtigt eine Schräganströmung
- Meusburger (Gl. 25): berücksichtigt eine Schräganströmung
- Raynal (Gl. 26): berücksichtigt eine Schräganströmung für Bar Racks und Louver

Eine Untersuchung nach der *Spangler*-Verlustformel (Gl. 20 und 21 sowie Abb. 33) entfällt, da hierfür die Kenntnis der Abströmgeschwindigkeit  $v_d$  nach dem Schrägrechen notwendig ist. Diese wurde jedoch bei den nachfolgend beschriebenen hydrometrisch ermittelten Rechenverlusten im Labor und im Feld nicht aufgenommen. Dies hängt zum einen an den für die *Spangler*-Formel nicht speziell angepassten Messkampagnen und Untersuchungen (Kap. 3.1) und zum anderen an der Unzugänglichkeit der Abströmbereiche an der Feldanlage (Kap. 3.2).

Eine Auswertung nach der *Kriewitz-Byun*-Formel (Gl. 28) wurde ebenfalls nicht durchgeführt, da die Randbedingungen hinsichtlich des Stababstands mit  $60 \text{ mm} \leq s \leq 240 \text{ mm}$  bei allen in dieser Arbeit untersuchten Schrägrechenkonfigurationen nicht eingehalten werden konnten und damit eine Anwendung der Formel ausscheidet.

#### 3.1. Vergleich von experimentell ermittelten Verlusten mit bestehenden Verlustformeln

Eine physikalische Untersuchungskampagne an verschiedenen Schrägrechentypen führte das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) im Rahmen des Neubaus der Fischaufstiegsanlage Geestacht durch. Nach Fertigstellung der Fischaufstiegsanlage Geestacht wurde ein Monitoring an der dortigen Beobachtungsstation durchgeführt. Bei der damaligen Planung des Einlaufbereichs der Reusenfangkammer wurden verschiedene Typen von Schrägrechen in die engere Wahl genommen. Im Zuge einer Forschungsarbeit wurden am KIT die jeweiligen Rechenverluste der vorgesehenen Schrägrechen bei unterschiedlichen Anströmgeschwindigkeiten und -winkeln hydrometrisch ermittelt (*Nestmann et al., 2010*).

Insgesamt wurden am KIT Schrägrechen von vier verschiedenen Herstellern mit jeweils zwei Varianten untersucht, bei denen Stababstände, Anströmwinkel und Verbauungsgrade variiert wurden (Tab. 4). Die Rechen wurden in einer 12 m langen und 0,50 m breiten Rinne eingesetzt und mit verschiedenen Anströmgeschwindigkeiten durchströmt. Die Rechenverluste wurden mittels Messung der Wasserstände anhand Wasserstandsmesssonden, welche eine Genauigkeit von  $\pm 0,5 \text{ mm}$  besitzen, 3 m Oberstrom und 3 m Unterstrom des Schrägrechens aufgenommen.

Tab. 4: Messkonzept zur Untersuchung der insgesamt 8 Laborrechen (*Quelle: verändert nach Nestmann et al., 2010*).

Schrägrechen im KIT-Forschungslabor	Anströmwinkel $\delta$	Hersteller und Stababstand							
		APA		MUHR		WA-Tech		SAB	
		8 mm	10 mm	8 mm	10 mm	8 mm	10 mm	8 mm	10 mm
	30°	Anströmgeschwindigkeiten 0,3 m/s - 0,45 m/s - 0,6 m/s - 0,8 m/s							
	50°								
	90°								

Die Rechenhersteller verwendeten für die Laborrechen der KIT-Untersuchungen unterschiedliche Stabprofile: Fa. APA und Fa. SAB verbauten ein Rechteckprofil, Fa. WA-Tech und Fa. Muhr ein Trapezprofil. Für das Tra-

pezprofil liegen von *Kirschmer* oder anderen Autoren, welche Profilbeiwerte zu Rechenstäben ermittelt haben, keine Werte vor. Eine Anwendung der vorhandenen Formelwerke war damit für die Trapezprofile nicht möglich. Es wurden daher nur die Rechen der Firmen APA und SAB näher betrachtet (Tab. 5).

Tab. 5: Rechenparameter der untersuchten Schrägrechen der Firmen APA und SAB bei der Untersuchung von *Nestmann et al.* (2010)

	Stababstand s [mm]	Rechenstabdicke d [mm]	Rechenstablänge l [mm]	Verbauungsgrad $P_{Re}$ [-]
APA 1.1	8 mm	10 mm	60 mm	0,57
APA 1.2	10 mm	10 mm	60 mm	0,57
SAB 4.1	8 mm	10 mm	40 mm	0,64
SAB 4.2	10 mm	10 mm	40 mm	0,59

Für jede der vier Rechenkonfigurationen der KIT-Untersuchungen wurden die Rechenverlusthöhen und die Rechenverlustbeiwerte mittels Formeln von *Kirschmer*, *Kirschmer-Mosonyi*, *Zimmermann*, *Meusburger* und *Raynal* berechnet, soweit es die Randbedingungen und Grenzen der Formeln erlaubten. Pro Schrägrechenvariante wurden für die Verlusthöhen drei Diagramme erstellt – eines für jeden der drei Anströmwinkel (30°, 50° und 90°, Abb. 37 bis Abb. 40). Die x-Achse bezeichnet dabei die Anströmgeschwindigkeit, die y-Achse die Rechenverlusthöhen. Farblich aufgetragen wurden die mit den oben genannten Formelwerken rechnerisch ermittelten Rechenverlusthöhen. Die Schaubilder der dazugehörigen Verlustbeiwerte sind in Anhang 1 dargestellt.

Die Ergebnisse (Abb. 37 bis Abb. 40) zeigen auf, dass die Rechenverlusthöhen  $h_{v,Re}$  aufgrund der quadratischen Proportionalität zur Anströmgeschwindigkeit  $v_a$  ansteigen: Je höher die Anströmgeschwindigkeit am Rechen, desto stärker macht sich deren Einfluss auf die Rechenverlusthöhen bemerkbar.

Bei den Verlustbeiwerten (Anhang 1) ist zu erkennen, dass die Anströmgeschwindigkeit bei der rechnerischen Ermittlung der Verlustbeiwerte hingegen keine Rolle spielt, und dass die Rechenverlustbeiwerte bei jeder Anströmgeschwindigkeit gleich hoch sind. Dies liegt am Term der Geschwindigkeitshöhe ( $v_a^2/2g$ ), welcher in den Rechenverlusten  $h_{v,Re}$ , als auch im Verlustbeiwert  $\zeta$  vorhanden ist (Gl. 18).

Zu erkennen ist weiterhin, dass die errechneten Verlusthöhen und -beiwerte nur selten einen ähnlichen Wert wie die experimentell ermittelten Verlustbeiwerte annehmen. Damit bildet scheinbar keine Formel die realen Rechenverluste korrekt ab:

- Bei einem **Anströmwinkel von 30°** liegen die hydrometrisch ermittelten Rechenverlusthöhen – und damit auch die Verlustbeiwerte – bei allen Schrägrechenvarianten deutlich niedriger als die rechnerisch ermittelten Verlusthöhen. Der Einfluss des Rechens auf die Hydraulik wird demnach mit den vorhandenen Formeln bei kleinen Anströmwinkeln überschätzt. Die tatsächlichen Rechenverluste fallen niedriger aus, als bisher mit den bekannten Formeln berechnet.
- Mit einem mittleren **Anströmwinkel von 50°** ist auffällig, dass die physikalischen Verlusthöhen nahe denen von *Kirschmer* liegen, obwohl dieser keine Schräganströmung berücksichtigt hat und die Formel für vertikale Stäbe entwickelt wurde. Wie bereits bei einem Anströmwinkel von 30° werden auch hier die Rechenverlusthöhen mittels der bekannten Formelwerke überschätzt. Die *Zimmermann*-Formel weicht hier von den tatsächlichen Verlusten stark ab, da sie eine vollkommene Strömungsumlenkung an den Rechenstäben berücksichtigt. Sie ist deshalb nicht verwendbar für Schrägrechen.
- Bei einer senkrechten Anströmung, also einem **Anströmwinkel von 90°**, nähern sich die Formelergebnisse von *Kirschmer* und *Raynal* bzw. *Meusburger* den tatsächlich ermittelten Rechenverlusten am nächsten an, da es hier keinen Einfluss einer Schräganströmung mehr gibt. Trotzdem liegen die Werte so weit voneinander entfernt, dass auch bei einer senkrechten Anströmung keine Formel die tatsächlichen Rechenverluste an Schrägrechen korrekt abbildet. Die Formeln von *Kirschmer* und *Kirschmer-Mosonyi* liegen aufgrund der fehlenden Schräganströmung gleich auf. Da hier keine Schräganströmung vorliegt, handelt es sich hierbei auch nicht mehr um Schrägrechen; lediglich der Einfluss der horizontalen Stäbe im Vergleich zu vertikalen Stäben ist hier erkennbar.

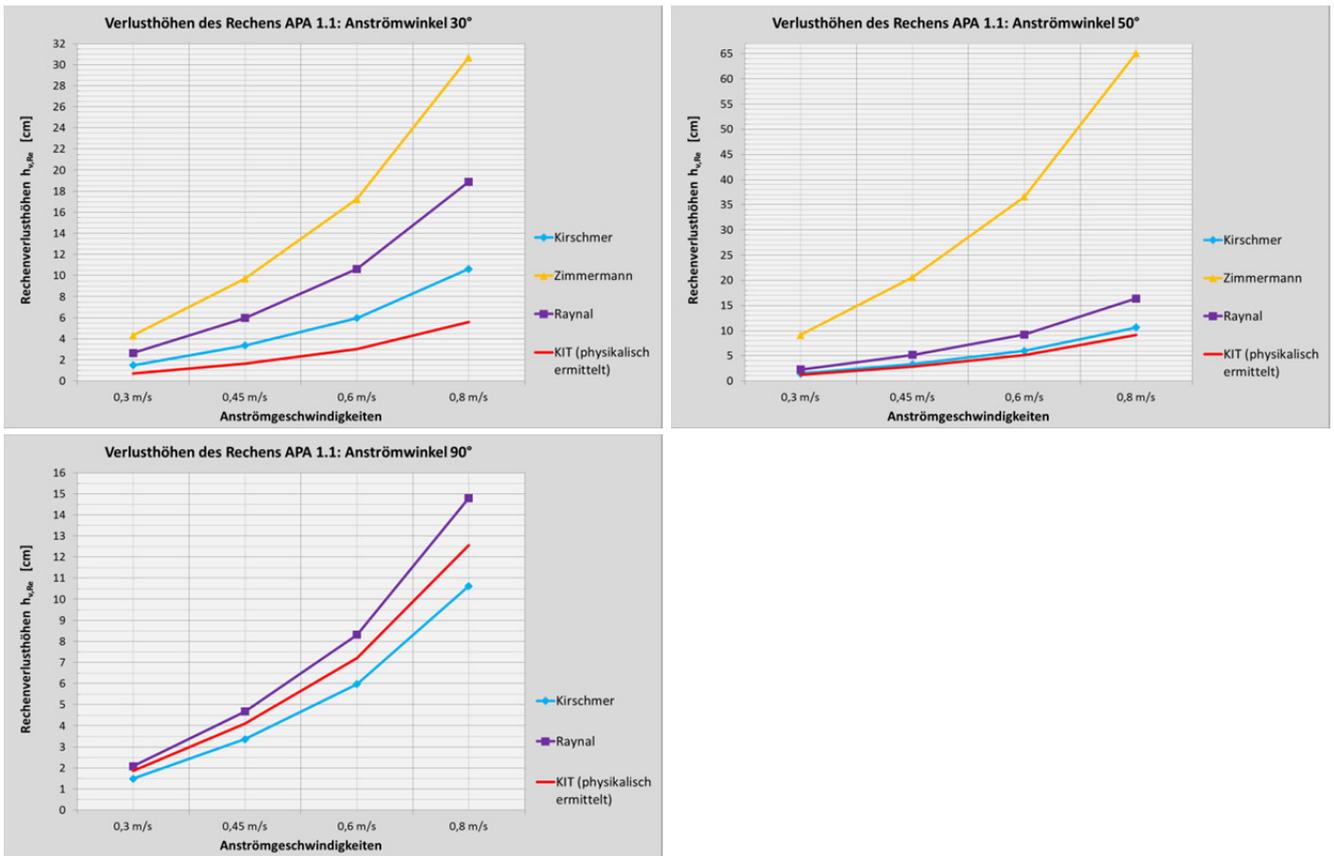


Abb. 37: Verlusthöhen der Rechenkonfiguration APA 1.1 für die Anströmwinkel 30°, 50° und 90°

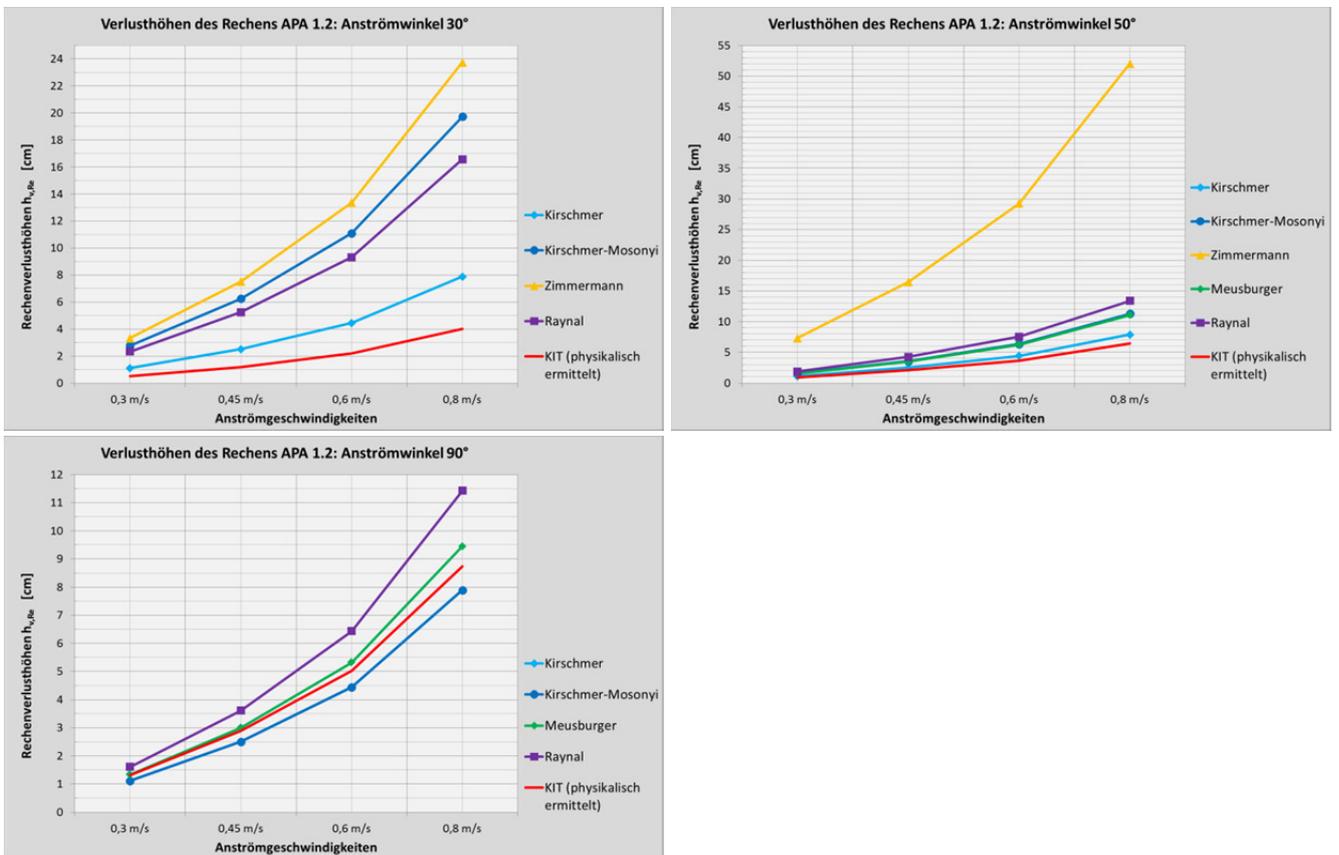


Abb. 38: Verlusthöhen der Rechenkonfiguration APA 1.2 für die Anströmwinkel 30°, 50° und 90°

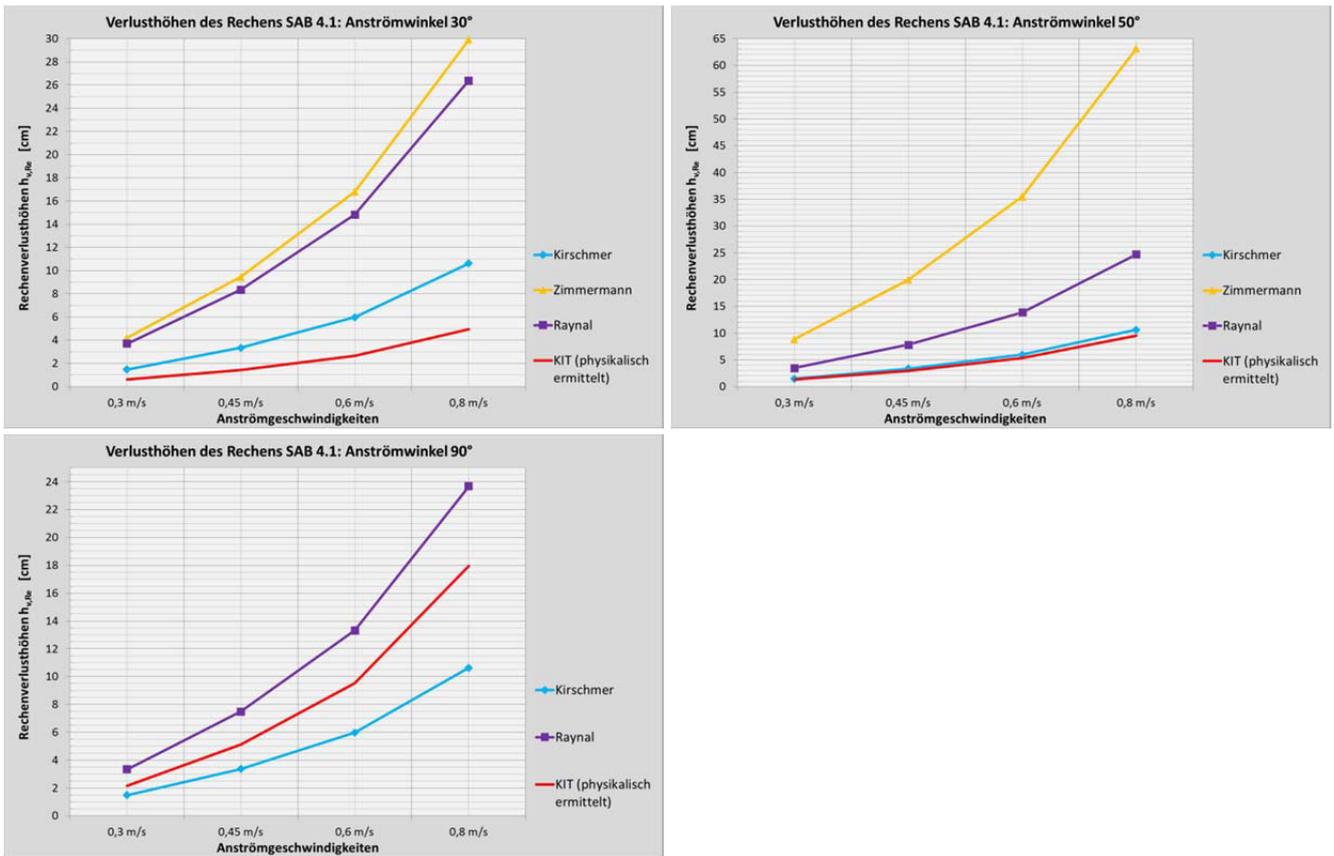


Abb. 39: Verlusthöhen der Rechenkonfiguration SAB 4.1 für die Anströmwinkel 30°, 50° und 90°

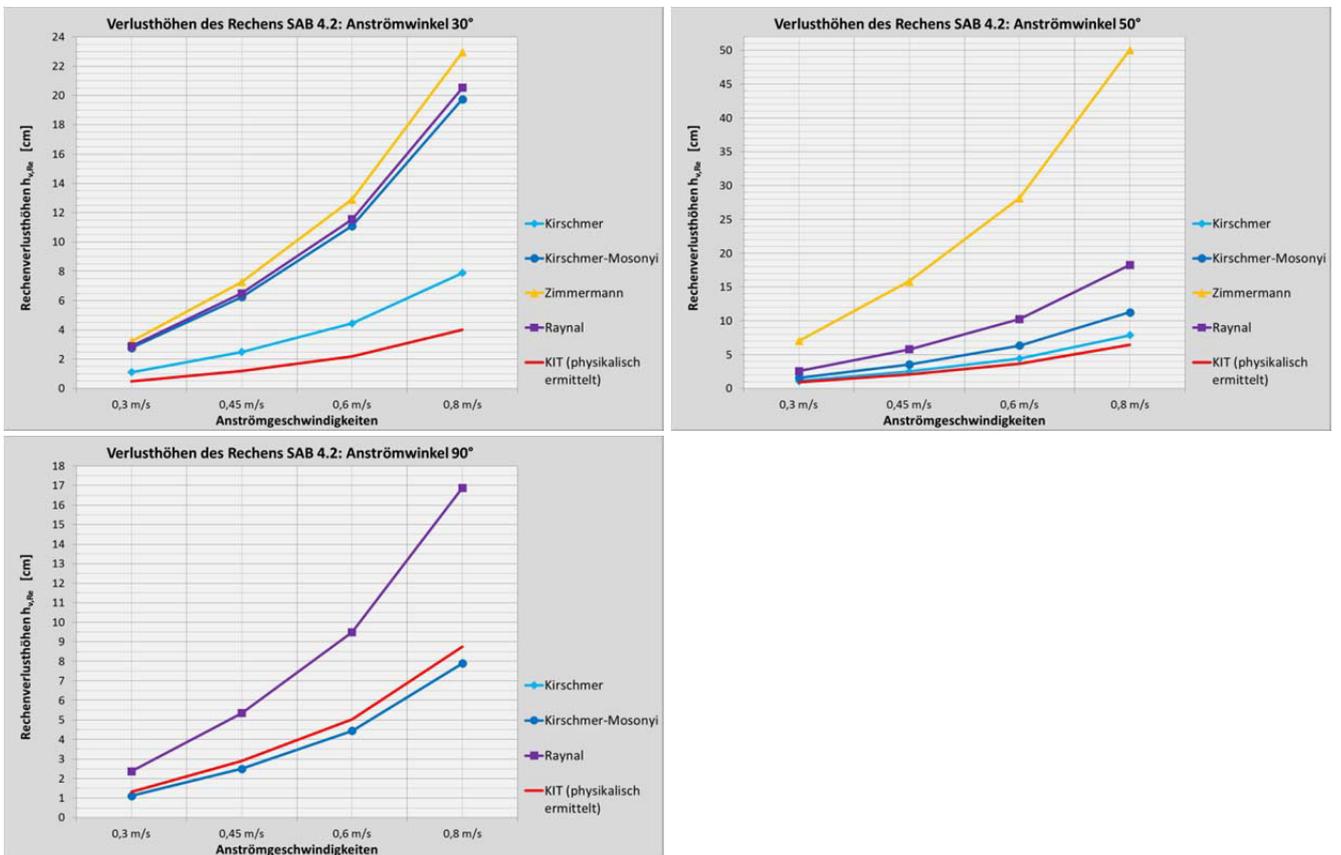


Abb. 40: Verlusthöhen der Rechenkonfiguration SAB 4.2 für die Anströmwinkel 30°, 50° und 90°

Die Ergebnisse zeigen auch, dass keine bekannte Rechenverlustformel die tatsächlichen Rechenverlustbeiwerte, welche bei einem Schrägrechen mit horizontalen Stäben entstehen, universell – also unabhängig von den Rechen- und Strömungsparametern – nachbilden kann (Anlage 1). Von der Anwendung einer der bekannten und oben aufgeführten Rechenverlustformeln sollte daher abgesehen werden. Bei kleinen und mittleren Anström-winkeln von 30° bis 50° werden die Rechenverluste derzeit mit den Rechenverlustformeln überschätzt, bei einer senkrechten Anströmung von 90° ergibt keine Verlustformel für alle untersuchten Rechentypen eine sinnvolle Näherung an die experimentell ermittelten Rechenverluste.

### 3.2. Vergleich von experimentell ermittelten Verlusten (Ottenau) mit bestehenden Verlustformeln

Im Rahmen seiner Master-Thesis ermittelte *Schwab* (2016) an einem Schrägrechen des Wasserkraftwerks Ottenau die dortigen Rechenverluste bei verschiedenen Anströmgeschwindigkeiten auf hydrometrische Art. Der Schrägrechen in Ottenau besitzt folgende Randbedingungen:

- Anströmwinkel  $\delta = 44^\circ$
- Rechenstabform: Rechteckprofil
- Stababstand  $s = 18 \text{ mm}$
- Rechenstabdicke  $d = 8 \text{ mm}$
- Rechenstablänge  $l = 60 \text{ mm}$
- Anströmgeschwindigkeiten  $v_a = 0,4 \text{ m/s}, 0,5 \text{ m/s}, 0,7 \text{ m/s}$  und  $0,8 \text{ m/s}$
- Verbauungsgrad  $P_{Re} = 0,54$  (anhand der Montagepläne des Rechens ermittelt)
- Verlegungsgrad konnte nur abgeschätzt werden – zu Beginn jeder Messung wurde der Schrägrechen abgereinigt, daher werden 5 cm Verlegung über die gesamte Breite angenommen, was einem Verlegungsgrad von ca. 4% entspricht und damit einen niedrigen Wert darstellt
- Verlegungsfaktor des Rechens nach Gruppe 2 aufgrund inhomogener Anströmung des Rechens (*Meusburger*, 2002) mit  $k_{v,2} = 1,08$

Anhand der oben aufgeführten geometrischen und hydraulischen Rechenparameter in Ottenau wurden Rechenverluste und deren Verlustbeiwerte rechnerisch ermittelt und mit den hydrometrisch ermittelten Rechenverlusten und Verlustbeiwerten von *Schwab* (2016) verglichen (Tab. 6) sowie grafisch dargestellt (Abb. 41). Verwendet wurden die bereits vorgestellten Rechenverlustformeln von *Kirschmer*, *Kirschmer-Mosonyi*, *Zimmermann*, *Meusburger* und *Raynal* (Kap. 2.6.2). Die rechnerischen Rechenverlustbeiwerte  $\zeta$  liegen zwischen 0,82 und 6,22, die hydrometrisch ermittelten im Schnitt höher und zwischen 2,49 und 7,49.

Tab. 6: Rechnerische und hydrometrisch ermittelte Rechenverluste und Rechenverlustbeiwerte am Schrägrechen Ottenau unter verschiedenen Anströmgeschwindigkeiten.

Turbinenabfluss [m³/s]	7,20		9,00		12,60		14,56	
Anströmgeschwindigkeit [m/s]	0,4		0,5		0,7		0,8	
	Verluste [cm]	Verlustbeiwert $\zeta$ [-]						
Kirschmer	0,70	0,82	1,05	0,82	2,05	0,82	2,73	0,82
Kirschmer-Mosonyi	1,59	1,95	2,49	1,95	4,88	1,95	6,51	1,95
Zimmermann	6,22	6,22	7,93	6,22	15,54	6,22	20,76	6,22
Meusburger	3,25	3,99	5,08	3,99	9,96	3,99	13,30	3,99
Raynal	3,70	4,54	5,78	4,54	11,33	4,54	15,14	4,54
Ottenau (hydrometrisch)	6,11	7,49	6,17	4,84	6,22	2,49	9,00	2,76

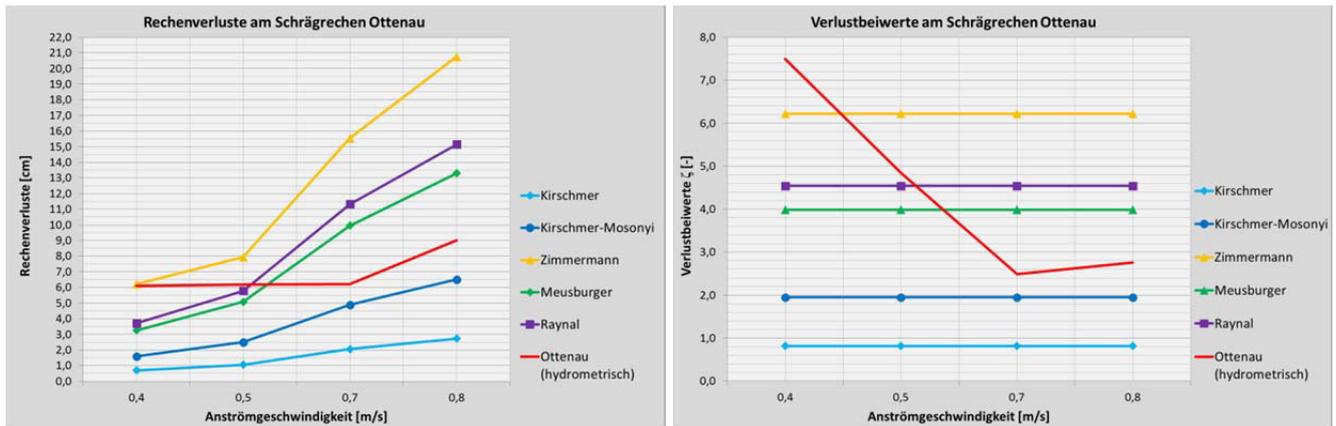


Abb. 41: Rechenverluste bei verschiedenen Anströmgeschwindigkeiten am Schrägrechen in Ottenau.

Der Vergleich von hydrometrisch und rechnerisch ermittelten Rechenverlusten zeigt über alle Anströmgeschwindigkeiten betrachtet keine Annäherung an eine Formel und deckt sich mit den zuvor gemachten Untersuchungen mit KIT-Schrägrechen.

Zu erkennen ist die Unterschätzung der tatsächlichen Verluste nach *Kirschmer*, da dieser die Schräganströmung nicht berücksichtigt. Dies bestätigt die Aussagen von *Giesecke et al.* (2009), welche sich jedoch auf vertikale Stabausrichtungen beschränkten. Die Unterschätzung der Rechenverlustbeiwerte bei Schrägrechen ist anhand der durchgeführten Untersuchungen nun auch bestätigt. Die *Kirschmer*-Formel kann bei Schrägrechen nicht angewandt werden.

Die Verluste nach *Kirschmer-Mosonyi* sind gegenüber *Kirschmer* zwar höher, was auf den Versuch zur Berücksichtigung der Schrägstellung zurückzuführen ist, liegen jedoch weiterhin unter den tatsächlich ermittelten Rechenverlusten. Demnach bildet auch die *Kirschmer-Mosonyi*-Formel die Rechenverluste bei Schrägrechen nicht ausreichend gut ab. Von einer Anwendung dieser Formel sollte daher ebenfalls abgesehen werden.

*Zimmermann* weicht bei niedrigen Anströmgeschwindigkeiten (0,4 m/s und 0,5 m/s) nur wenig von den hydrometrisch ermittelten Verlusten ab. Diese Formel zeigt die besten Ergebnisse in der Annäherung an die tatsächlich ermittelten Rechenverluste (Tab. 6) bei niedrigen Geschwindigkeiten. Bei höheren Anströmgeschwindigkeiten (0,7 und 0,8 m/s) zeigt die Formel mit Abstand die größten Rechenverluste und überschätzt die hydrometrisch ermittelten Verluste deutlich. Dies liegt an der Berücksichtigung einer Strömungsumlenkung, die aus dem damaligen Versuchsaufbau mit vertikalen Stäben herführt. Die *Zimmermann*-Formel ist daher nicht universell für Schrägrechen mit horizontalen Stäben anwendbar.

Die Formeln von *Meusburger* und *Raynal* besitzen größere Verluste als die *Kirschmer*-Varianten, da sie die Verbauung berücksichtigen sowie die Verlegung (nur bei *Meusburger*) und damit realistische Verhältnisse abbilden. Die Ergebnisse liegen damit im Mittelfeld der getesteten Formeln, jedoch bei geringen Anströmgeschwindigkeiten unter den tatsächlichen Rechenverlusten und bei höheren Anströmgeschwindigkeiten über diesen. Daher ist eine Anwendung der *Meusburger*- und *Raynal*-Formel ebenfalls nicht zu empfehlen.

Auffällig sind in Ottenau die konstanten Verluste bei Geschwindigkeiten von 0,4 bis 0,7 m/s. Erst bei Anströmgeschwindigkeiten größer 0,7 m/s stiegen die Verluste an (Abb. 41 links). Dies kann an der größeren Geschwemmselzufuhr bei höheren Anströmgeschwindigkeiten liegen oder an einer schlechten Abreinigung bei geringen Anströmgeschwindigkeiten. Für letzteres sprechen die Ergebnisse der Verlustbeiwerte (Abb. 41 rechts), welche bei niedrigeren Anströmgeschwindigkeiten größer sind als bei hohen Anströmgeschwindigkeiten. Dies deutet auf eine unregelmäßige Verlegung hin, über deren Höhe und Verlegungstyp nur spekuliert werden kann. Zudem fand eine Woche vor den Messungen ein Hochwasserereignis statt (Abb. 42), durch das viel Treibgut und Getreibsel antransportiert wurde. Reste davon könnten in unregelmäßigen Abständen den Schrägrechen verlegt haben. Durch eine regelmäßige Rechenreinigung während der Messkampagne wurde versucht, den Einfluss der Verlegung zu minimieren.

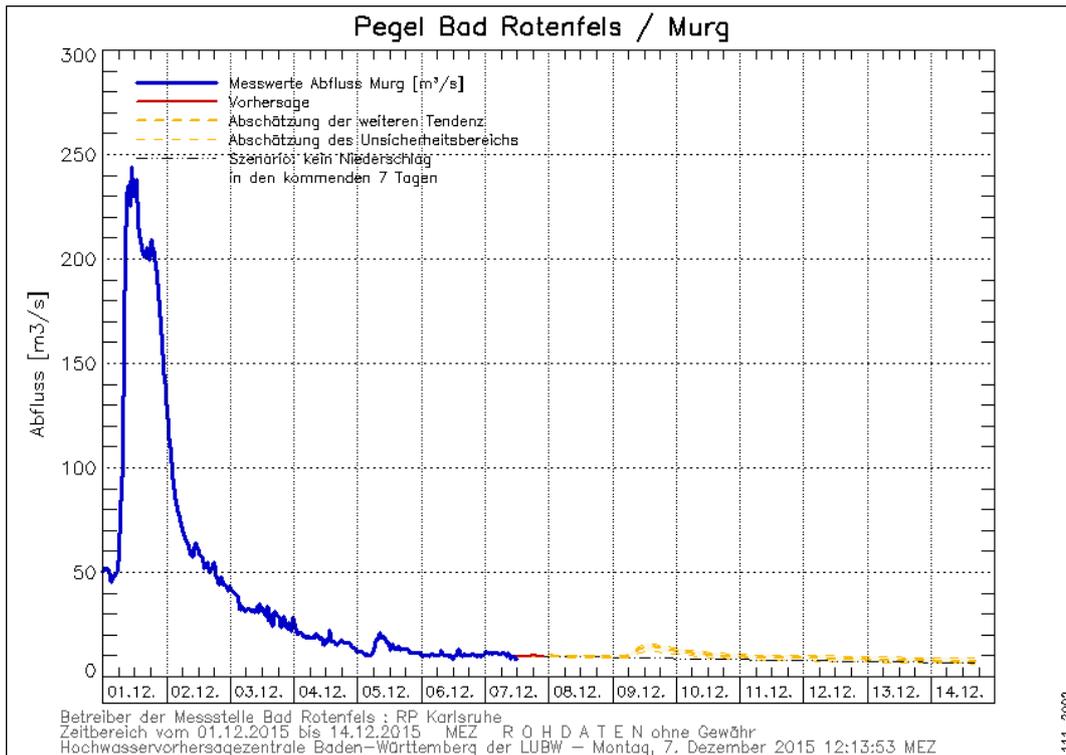


Abb. 42: Abflussverhalten vor der Messkampagne mit einem Hochwasser am 01.12.2015 und Normalabflüsse während der Messkampagne am 07.-10.12.2015 (Quelle: LUBW, Hochwasservorhersagezentrale Baden-Württemberg, 2015).

Es kann aufgrund der Untersuchungsergebnisse am Schrägrechen Ottenau keine der untersuchten Rechenverlustformeln uneingeschränkt zur Verlustberechnung empfohlen werden.

### 3.3. Rechenverlustermittlung an einem Schrägrechen der TU Darmstadt

Zur Ermittlung weiterer Rechenverluste und Verlustbeiwerte für andere Rechen setups wurden mit einem Schrägrechen im wasserbaulichen Forschungslabor hydrometrische Versuche durchgeführt. Dieser Schrägrechen wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit auch für die Ermittlung von Strömungssignaturen (Kap. 4) sowie bei den ethohydraulischen Studien (Kap. 6 und Kap. 7) verwendet.

#### 3.3.1. Methodik und Versuchsaufbau

##### Wasserkreislauf und Messrinne im Labor

Das wasserbauliche Forschungslabor der TU Darmstadt besitzt zur Speisung diverser Versuchsrinnen drei Wasserkreisläufe, welche über 2 Pumpensümpfe, 2 Hochbehälter und 6 Pumpen geführt werden. Eine detaillierte Beschreibung der Wasserkreisläufe und Laboreinrichtungen wurde von Schwab (2016) und Glock (2017) vorgenommen, so dass an dieser Stelle darauf verzichtet wird.

Die hier verwendete 40m-Versuchsrinne im Labor wird von drei Leitungen bzw. Pumpen gespeist: Pumpe 1 mit ca. 700 l/s, Pumpe 3 mit knapp 80 l/s und die mobile Pumpe mit ca. 180 l/s. Die Rinne hat eine Breite von 2 m und eine mögliche Wassertiefe von 1 m (Abb. 43). Mittels eines höhenverstellbaren Auslaufwehrs können verschiedene Wassertiefen und damit verschiedene Anströmgeschwindigkeiten eingestellt werden. Mit einer für Fische noch ausreichenden Wassertiefe von 60 cm kann für die nachfolgenden ethohydraulischen Studien eine maximale Anströmgeschwindigkeit von 0,8 m/s erreicht werden. Die seitlichen Wände sind aus Plexiglas hergestellt, um z. B. Beobachtungen bei Fischversuchen durchführen zu können.



Abb. 43: Übersichtsbild der Versuchsrinne im wasserbaulichen Forschungslabor der TU Darmstadt mit dem Messwagen für die hydro-metrischen Aufnahmen (in Ruheposition).

### Modulares Rechensystem

Die Messungen wurden an einem modularen und mobilen Schrägrechen durchgeführt, welcher von der Firma Steinhardt hergestellt wurde (Abb. 44). Aufgrund seiner Modularbauweise mit einzelnen Rechenfeldern und Rechenstäben konnte er mittels Hallenkran schnell und unkompliziert umgebaut werden. Schrägrechen werden an realen Wasserkraftanlagen ebenfalls aus einzelnen Rechenfeldern hergestellt (Kap. 2.6.1), so dass die Rechensysteme in Labor und Feld in dieser Hinsicht vergleichbar aufgebaut waren.

In den durchgeführten Laborversuchen wurde der Schrägrechen in der 40m-Rinne neben einem seitlich angeordneten und offenen Bypass angeordnet. Der Schrägrechen wird daher auf gesamter Länge einheitlich, d.h. mit dem gleichen Anströmwinkel, vom Wasserweg angeströmt (Abb. 4 rechts).

Auf ca. 2/3 der Rinnenlänge wurde der Versuchs-Schrägrechen mittels Sohlschiene und seitlichen Klemmvorrichtungen sowie Stützarmen eingebaut. Das Rechensystem bestand aus insgesamt 5 einzelnen Modulen: 4-mal 600 mm Breite sowie 1-mal 850 mm Breite. Somit konnten verschiedene Rechenlängen und damit unterschiedliche Anströmwinkel als Rechenkonstellation (= Rechensetup) aufgebaut und untersucht werden. Als seitliche rechte Abgrenzung zur Rinnenwand wurde von den Technikern des wasserbaulichen Forschungslabors ein Leitblech für jede Anströmwinkelkonfiguration hergestellt, um seitliche Ablösungen zu verhindern und um möglichst geringe strömungsberuhigte Nischen für Fische als Rückzugsorte zu gestalten.

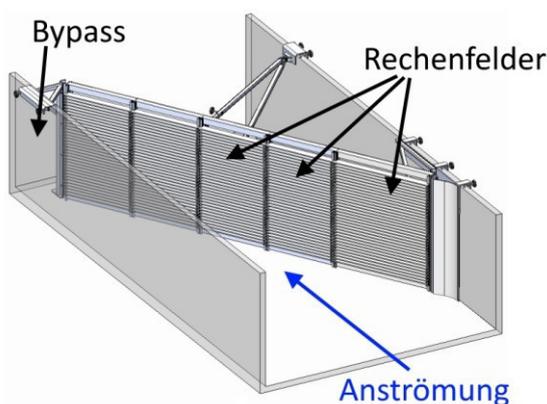


Abb. 44: Systemskizze des modularen Rechensystems für die Laborrinne (links) mit einem Anströmwinkel von  $30^\circ$  (Quelle: Steinhardt, 2015). Ansicht des eingebauten Schrägrechens mit einem Anströmwinkel von  $30^\circ$  mit Blick in Fließrichtung (rechts).

Modular aufgebaut waren auch die Stababstände: Mit verschiedenen Abstandshaltern konnten sie in ihrer Größe variiert werden. Die Abstandshalter waren 8 mm, 10 mm und 15 mm dick und konnten beliebig kombiniert werden, um verschiedene Stababstände zu erhalten. So konnten unterschiedliche Anforderungen der Genehmigungsbehörden sowie Stababstände von Bestandsanlagen nachgebaut und analysiert werden (Abb. 20).

Die im Rahmen dieser Forschungsarbeit im Labor durchgeführten Studien wurden an einem Rechteckprofil mit einem Stabprofilbeiwert von 2,42 (Abb. 24 links Nr. 1) durchgeführt, da der Schrägrechen an der Feldanlage Ottenau ebenfalls ein Rechteckprofil besitzt. Es sollte zwischen Labor- und Feldrechen eine situative Ähnlichkeit hergestellt werden, um eine Übertragbarkeit der Laborergebnisse auf die Realität zu gewährleisten. Dieses Profil wird auch heute noch aufgrund seiner gegenüber abgerundeten Spezialanfertigungen einfachen Herstellung und den damit verbundenen geringen Kosten häufig in der Praxis eingesetzt. Weitere Stabprofile konnten aus Kosten- und Zeitgründen im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht werden.

Die Rechenstabdicke am Schrägrechen im Labor beträgt 8 mm, die Stablänge des Schrägrechens 60 mm (Abb. 45) und entspricht damit der Ausbildung der Rechenstäbe des Schrägrechens in Ottenau.



Abb. 45: Rechenstablänge des Laborrechens.

Im Labor wurden anhand des modularen Rechensystems und den verschiedenen Rechenfeldelementen Anströmwinkel von  $\delta = 30^\circ, 45^\circ, 55^\circ$  und  $70^\circ$  realisiert und untersucht. Mit diesen Werten konnte eine große Bandbreite von spitzen Anströmwinkeln aus behördlichen Vorgaben (LUBW, 2016), von mittleren Anströmwinkeln analog der Feldanlage Ottenau sowie von stumpfen Anströmwinkeln zur Erweiterung des Erkenntnisgewinns hergestellt und ausgewertet werden. Das Untersuchungsprogramm geht damit über die derzeit üblichen behördlichen Vorgaben fischökologisch bedingter Forderungen für den Bau von Schrägrechen hinaus.

Die hydrometrischen Untersuchungen in der vorliegenden Arbeit wurden ohne einen Verlegungsgrad  $V_{Re}$  durchgeführt. Wird der Verlegungsgrad nicht berücksichtigt, so können die Verlegungsfaktoren  $k_{v,i}$  mit 1,0 vernachlässigt werden und haben damit keinen Einfluss auf die Rechenverluste.

Anhand der Geometrien der einzelnen Bauteile des Rechens können die Verbauungsgrade in Abhängigkeit des Anströmwinkels und des Stababstands bestimmt werden (Tab. 7). Der Anströmwinkel bestimmt die Rechenlänge und damit die Anzahl der Rechenfelder und Stützelemente.

Tab. 7: Verbauungsgrade  $V_{Re}$  des Schrägrechens im Forschungslabor in Abhängigkeit des Anströmwinkels und des Stababstands.

Schrägrechen im Forschungslabor	Stababstand s		
	10 mm	18 mm	30 mm
Anströmwinkel $\delta$	Verbauungsgrad $P_{Re}$		
30°	0,57	0,45	0,36
45°	0,51	0,40	0,32
55°	0,57	0,45	0,36
70°	0,54	0,45	0,34

Neben dem Schrägrechen wurde im Labor an dessen linke Seite bzw. am unterstromigen Ende ein 20 cm breiter Bypass angeordnet, welcher über die gesamte Wassertiefe offen gehalten wurde. Er soll später den Fischen als Abwanderungsweg (= Bypass) zur Verfügung stehen.

### Messtechnik

Ober- und Unterstrom des Rechens wurden als berührungslose Pegelsysteme Ultraschall-Abstands-Sensoren (UAS) installiert, welche auf quer über der Rinne liegenden Alustangen montiert waren. Die UAS funktionieren mit der Impulsschichtmethode, bei der über die Laufzeit eines Schallimpulses vom Sensor bis zur Wasseroberfläche und zurück die Entfernung zur Wasseroberfläche gemessen wird (Schwab, 2016). Solche UAS kommen auch bei Wasserkraftwerken zum Einsatz, dort messen sie den Wasserstand ober- und unterwasserseitig des Rechens und liefern Parameter für die Turbinen- und Rechensteuerung über die maximal definierte Pegeldifferenz. In der Realität ist ein konstanter Oberwasserspiegel häufig behördlich vorgegeben, der durch die Turbine und deren Pegel gehalten wird.

Der Abstand des Sensors zur Wasseroberfläche kann mittels der Schallgeschwindigkeit  $c$  in der Luft bestimmt werden ( $c = 343,2$  m/s bei  $20^\circ\text{C}$ ).

$$D = c \cdot \frac{t}{2} \quad [\text{m}] \quad (\text{Gl. 34})$$

D	=	Abstand des Sensors zur Wasseroberfläche	[m]
t	=	Laufzeit	[s]
c	=	Schallgeschwindigkeit	[m/s]

Der Abstand vom Sensor bis zur Rinnensohle wurde im Labor ermittelt und die vom UAS gemessenen Werte abgezogen. Damit erhielt man die Wassertiefe Ober- und Unterstrom des Rechens.

Auswirkungen auf die Fehleranfälligkeit können die Raumtemperatur, Luftfeuchte, Luftdruck und Luftturbulenzen haben. Daher wurden Temperaturfühler installiert, um den Einfluss auf die Ergebnisse entsprechend den Empfehlungen des Sondenherstellers berücksichtigen zu können.

### Rechenkonfigurationen

Für die hydrometrische Ermittlung der Rechenverluste am Schrägrechen im Forschungslabor wurden 48 verschiedene Rechen setups untersucht, bei denen Stababstand, Anströmwinkel und Anströmgeschwindigkeit variiert wurden (Tab. 8). Für diese Rechen setups wurden sowohl die Rechenverluste ermittelt als auch die Verlustbeiwerte bestimmt.

Tab. 8: Untersuchte Rechen setups am Schrägrechen im Forschungslabor, für die Rechenverluste ermittelt und Verlustbeiwerte bestimmt wurden.

Rechen setups		Stababstand		
		10 mm	18 mm	30 mm
Anströmwinkel	30°	Anströmgeschwindigkeiten 0,4 m/s - 0,5 m/s - 0,7 m/s - 0,8 m/s		
	45°			
	55°			
	70°			

### Weitere Energieverluste

Um den Einfluss der Geschwindigkeitshöhe auf die Rechenverlusthöhen zu ermitteln, wurden diese von Glock (2017) anhand einer Rechenkonfiguration (Anströmwinkel  $70^\circ$ , Stababstand 10 mm) im Forschungslabor ermittelt. Dazu wurden die Anströmgeschwindigkeiten Ober- und Unterstrom des Schrägrechens hydrometrisch ermittelt. Aus den gemessenen Werten wurden die Geschwindigkeitshöhen ( $v^2/2g$ ) vor und nach dem Rechen

berechnet. Aus der Differenz der Geschwindigkeitshöhen vor und nach dem Rechen erhält man die Geschwindigkeitshöhen. Dies wurde für vier verschiedene Anströmgeschwindigkeiten durchgeführt. Je höher die Anströmgeschwindigkeit, desto höher auch die Geschwindigkeitshöhen. Diese Geschwindigkeitshöhen waren aber auch bei hohen Anströmgeschwindigkeiten von 0,8 m/s (max. Rinnendurchfluss 960 l/s) mit 0,17 mm sehr gering. Diese Ergebnisse bestätigen damit die Aussage von *Kirschmer* (1925), nach welchem der Einfluss der Geschwindigkeitshöhe auf die Rechenverluste zu vernachlässigen ist.

Zur Ermittlung der Rechenverluste sind des Weiteren sonstige Verluste, welche nicht durch den Rechen entstehen sondern bspw. durch den Bypass, ebenfalls zu ermitteln und von den Gesamtverlusten abzuziehen. *Glock* (2017) ermittelte diese Umlenkverluste, welche in der vorliegenden Laborkonstellation durch den Bypassverschluss hervorgerufen wurden. Hierzu wurde der Wasserstand bei offenem und geschlossenem Bypassverschluss aufgenommen. Die Wasserspiegeldifferenz gibt damit den Einfluss des Bypassverschlusses und damit die Umlenkverluste an (Abb. 46). Die in den nachfolgenden Kapiteln erwähnten Rechenverluste sind daher die, welche tatsächlich nur durch den Schrägrechen entstanden sind.

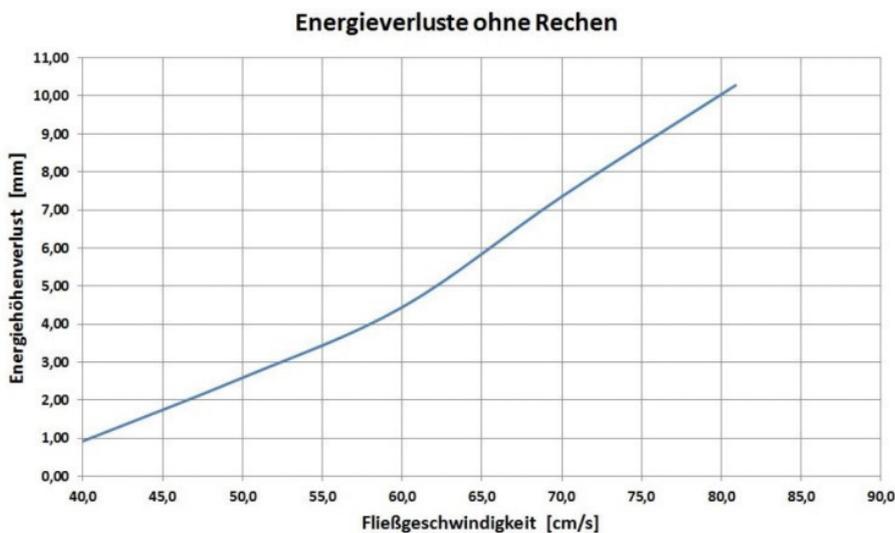


Abb. 46: Umlenkverluste, welche durch den Bypass hervorgerufen wurden (*Quelle: Glock, 2017*).

### 3.3.2. Hydrometrisch ermittelte Rechenverluste

Für die dargestellten Rechen setups des Schrägrechens (Tab. 8) mit einem Rechteckstabprofil wurden die Rechenverluste hydrometrisch ermittelt und nach Stababstand, Anströmwinkel und Anströmgeschwindigkeit ausgewertet. Bereits visuell waren während der Versuchsdurchführung Unterschiede im Strömungsbild zu erkennen (Abb. 47), wie Aufstau vor dem Schrägrechen, Umlenkungen an den Stützpfählern, Abnahme des Wasserspiegels sowie eine Geschwindigkeitszunahme nach dem Schrägrechen.

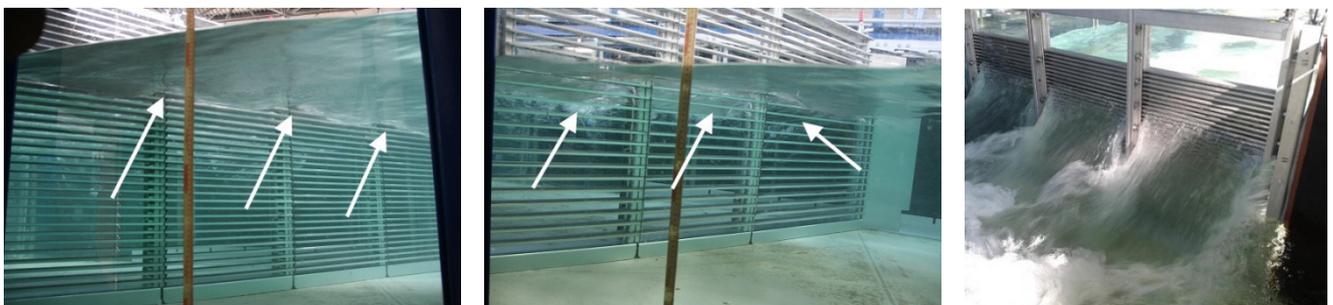


Abb. 47: Änderungen des Strömungsbildes am Schrägrechen. Links Umlenkungen und Aufstau an den Pfeilern (Rechen setup 18mm/45°/0,7m/s). In der Mitte Turbulenzen und Ablösungen unterwasserseitig des Rechens (Rechen setup 30mm/55°/0,8m/s). Rechts Gefälle des Wasserspiegels unterwasserseitig des Rechens (Rechen setup 10mm/70°/0,7m/s) (*Quelle rechts: verändert nach Glock, 2017*).

Erwartungsgemäß waren die Rechenverluste abhängig vom Anströmwinkel, von der Anströmgeschwindigkeit und vom Stababstand. Es wurden verschiedene Diagramme erstellt, um den Einfluss der einzelnen Parameter im Detail darstellen zu können.

### Rechenverlustkurven nach Anströmwinkel

In den nachfolgenden Diagrammen werden zunächst die Rechenverlustkurven der unterschiedlichen Anströmwinkel  $\delta$  dargestellt (Glock, 2017), aufgetragen nach steigender Anströmgeschwindigkeit (Abb. 48). Die einzelnen Rechenverlustkurven geben die unterschiedlichen Stababstände wieder.

Je kleiner der Stababstand, desto größer werden die Verluste. Sie können sich um mehrere Zentimeter unterscheiden. Dies liegt an der Strömungsbeschleunigung im Zwischenraum der Stäbe bei engem Stababstand, den damit verbundenen Turbulenzen, Verwirbelungen und Ablösungen zwischen und am Ende der Stäbe und den daraus resultierenden hohen Druckverlusten (Abb. 21 und Abb. 47). Die Rechenverlustkurve mit 18 mm Stababstand nähert sich grundsätzlich mehr der Kurve mit 30 mm Stababstand an, als der Kurve mit 10 mm. Die Rechenverluste steigen bei kleinerem und engmaschigem Stababstand (Feinrechen  $\rightarrow$  Feinstrechen) stärker an. Diese Kenntnis ist für Kraftwerksbetreiber wichtig, da die Verluste die Energieerzeugung negativ beeinflussen. Des Weiteren ist zu erkennen, dass die Rechenverluste bei kleinem Anströmwinkel ebenfalls kleiner werden und die Rechenverlustkurven verschiedener Stababstände sich annähern. Die Verlustkurve von 30 mm ändert sich nahezu nicht, die beiden anderen Verlustkurven nähern sich an diese an. Damit ist ersichtlich, dass der Anströmwinkel bei einem großen Stababstand einen geringeren Einfluss ausübt, als bei kleineren Stababständen. Mit steigender Anströmgeschwindigkeit steigen auch die Verluste exponentiell an. Wobei auch hier beobachtet werden kann, dass bei kleineren Anströmwinkeln die Verluste bei höheren Anströmgeschwindigkeiten weniger stark ansteigen, als bei großen Anströmwinkeln.

Somit trägt der Anströmwinkel maßgeblich zu den Rechenverlusten an Schrägrechen bei, sie nehmen bei kleineren Winkeln deutlich ab. Engere Stababstände verstärken diesen Effekt, ebenso höhere Anströmgeschwindigkeiten. Dies war bereits bei den Auswertungen der KIT-Versuche ersichtlich und bestätigt die dort gemachten Aussagen (Kap. 3.1).

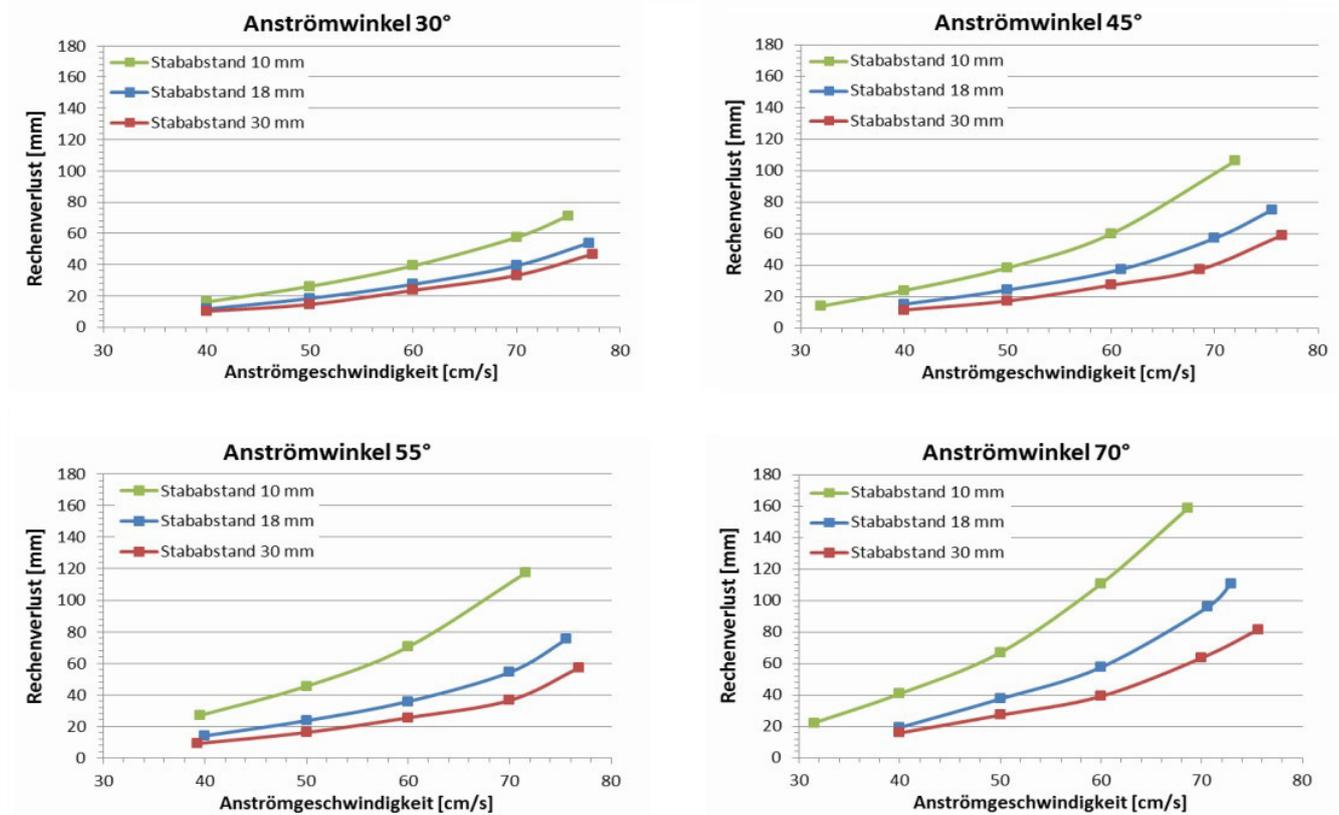


Abb. 48: Rechenverlustdiagramme für die vier untersuchten Anströmwinkel in Abhängigkeit von Anströmgeschwindigkeit und Stababstand (Quelle: Glock, 2017).

Diese Erkenntnisse bestätigen ebenfalls die von *Raynal et al.* (2013a) durchgeführten Studien an schräg angeordneten Rechen: Geschwindigkeitszunahmen, Ablösungen und strömungsberuhigte Zonen Unterstrom vom Rechen und an Pfeilern nehmen mit steigendem Anströmwinkel  $\delta$  zu (Abb. 49). Bei einem senkrecht angeströmten Rechen mit einem horizontalen Anströmwinkel von  $90^\circ$  fallen diese Ablösungen und ruhige Zonen am stärksten aus. Da sich diese Ablösungen am Ende des Rechenstabes nach *Hübner et al.* (2011) auf die Verluste auswirken und in den Verbauungsgrad eingehen, kann anhand der Versuche von *Raynal et al.* (2013a) die Abhängigkeit der Rechenverluste vom Anströmwinkel ebenfalls bestätigt werden: Je kleiner der horizontale Anströmwinkel, desto kleiner sind auch die Rechenverluste – bei gleichem Verbauungsgrad.

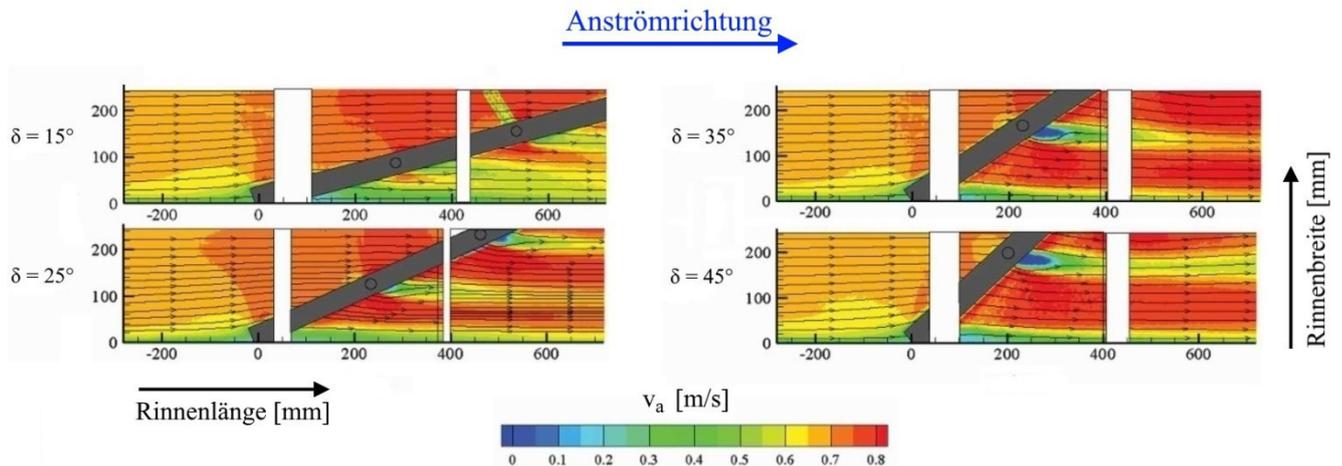


Abb. 49: Strömungssignaturen im Grundriss mit Anströmgeschwindigkeiten  $v_a$  [m/s] ober- und unterwasserseitig von schräg angeströmten Rechen bei unterschiedlichen Anströmwinkeln  $\delta$  nach *Raynal* (Quelle: verändert nach *Raynal et al.*, 2013a).

### Rechenverlustkurven nach Stababstand

Erfolgt die Auswertung getrennt nach den Stababständen mit der Anströmgeschwindigkeit auf der x-Achse sowie der Rechenverluste auf der y-Achse, so können die Verlustkurven der Anströmwinkel dargestellt werden (Abb. 50).

Auch hier wird bestätigt, dass die Verluste bei niedrigeren Stababständen höher sind als bei größeren Stababständen mit 30 mm. Die Verlustkurven sind gestaffelt nach dem Anströmwinkel: Je größer der Anströmwinkel, desto größer sind auch die Verluste. Dieses Phänomen ist bei großen Stababständen weniger ausgeprägt als bei kleinen Stababständen mit 10 mm.

Auffällig ist hier, dass die Verlustkurve des Anströmwinkels von  $45^\circ$  die des Anströmwinkels von  $55^\circ$  leicht übersteigt – bei Stababständen von 18 und 30 mm. Der Verbauungsgrad besitzt demnach einen größeren Einfluss auf die Verluste als der Anströmwinkel. Diese Erkenntnis wird von den Aussagen von *Meusburger* (2002) unterstützt, der den Verbauungsgrad bei konventionellen Rechen als maßgeblichen Faktor für die Rechenverluste ausmachte. Dies trifft demnach auch für Schrägrechen zu.

Die vorgestellten Verlustkurven können in der Praxis für die Planung und Auslegung von Schrägrechen mit Rechteckprofilen verwendet werden. Im Anhang 2 sind alle ermittelten Rechenverluste tabellarisch aufgelistet.

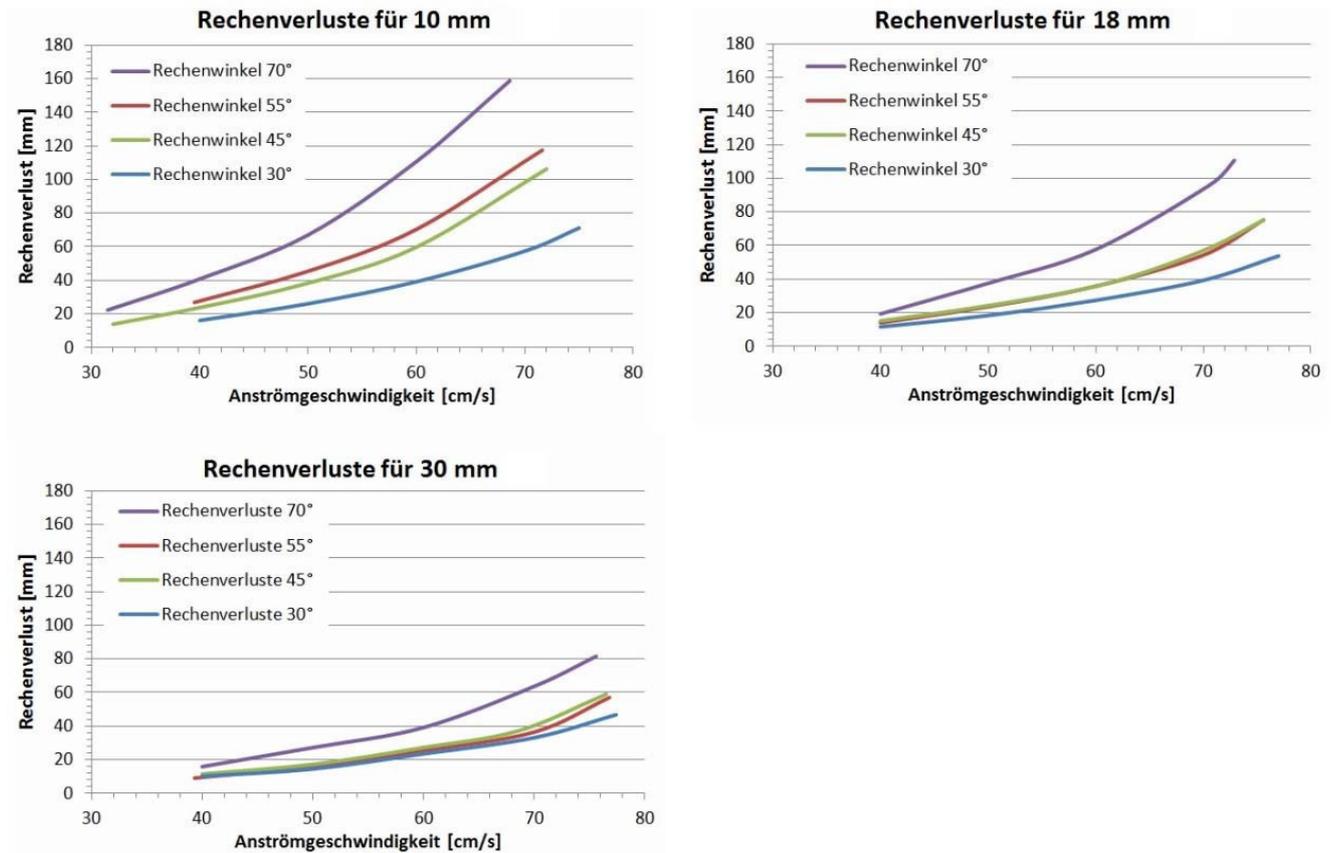


Abb. 50: Rechenverlustdiagramme für die drei untersuchten Stabstände (10 mm, 18 mm, 30 mm) in Abhängigkeit von Anströmgeschwindigkeit und Anströmwinkel (*Quelle: Glock, 2017*).

### 3.3.3. Vergleich der hydrometrisch ermittelten Rechenverluste (TU DA) mit bestehenden Verlustformeln

Die hydrometrisch ermittelten Rechenverluste (Kap. 3.3.2) wurden in einem zweiten Schritt mit den bereits vorgestellten Rechenverlustformeln (Kap. 2.6.2) verglichen. Betrachtet wurden alle vorgestellten Anströmgeschwindigkeiten und Anströmwinkel (Tab. 8), jedoch nur der mittlere Stababstand von 18 mm. Dieser Stababstand wurde auch am Vergleichs-Schrägrechen in Ottenau verwendet. Für die Verwendung der meisten Formeln ist die Kenntnis des Verbauungsgrads notwendig, welcher von *Glock* (2017) für alle Anströmwinkel, also für die unterschiedlichen Rechenlängen, ermittelt wurde (Tab. 7).

#### Vergleich mit Kirschmer-Mosonyi-Formel (1966)

Die von *Mosonyi* ergänzte *Kirschmer*-Formel beinhaltet den Beiwert  $\beta$ , welcher die Schräganströmung beschreibt. Dieser ist tabellarisch zu ermitteln (Tab. 3). Zu beachten ist auch die Verwendung des Komplementärwinkels  $\delta'$  bei *Kirschmer-Mosonyi*, welcher aus dem Anströmwinkel  $\delta$  umgerechnet werden muss.

Für die vier untersuchten Anströmwinkel  $\delta$  sowie die vier Anströmgeschwindigkeiten erhält man unter Anwendung der *Kirschmer-Mosonyi*-Formel folgende Verlustbeiwerte  $\zeta$  [-] sowie Rechenverluste  $h_{v,Re}$  [mm] (Tab. 9).

Tab. 9: Rechenverluste [cm] und Verlustbeiwerte [-] nach der *Kirschmer-Mosonyi*-Formel in Abhängigkeit von Anströmwinkel und Anströmgeschwindigkeit bei einem Stababstand von 18 mm (*Quelle: verändert nach Glock, 2017*).

Anströmwinkel $\delta$ [°]	Verlustbeiwert $\zeta$ [-]	Rechenverluste [cm] in Abhängigkeit von der Anströmgeschwindigkeit			
		0,4 m/s	0,5 m/s	0,7 m/s	0,8 m/s
30°	3,33	2,71	4,24	6,10	8,31
45°	1,96	1,60	2,49	3,59	4,89
55°	1,45	1,19	1,85	2,67	3,63
70°	1,05	0,86	1,34	1,93	2,62

Die Tabellenwerte zeigen auf, dass die Verluste mit steigendem Anströmwinkel kleiner werden, was im Widerspruch zu den physikalisch ermittelten Verlusten steht, welche mit steigendem Anströmwinkel größer wurden. Gründe dafür liegen in der Ausrichtung des Rechens: Die *Kirschmer-Mosonyi*-Formel wurde für vertikale Stäbe aufgestellt, also auch für schräg angeströmte Vertikalstabrechen, wie Louver und Bar Racks – und nicht für Schrägrechen mit horizontalen Stäben. Stellt man einen konventionellen Rechen schräg, so entsteht eine Strömungsumlenkung aufgrund der Stabausrichtung (Abb. 51). Je kleiner der Anströmwinkel wird, desto größer sind die Strömungsumlenkungen und damit auch die Verluste. Dieses Phänomen erklärt die größer werdenden Rechenverluste mit kleinerem Anströmwinkel.

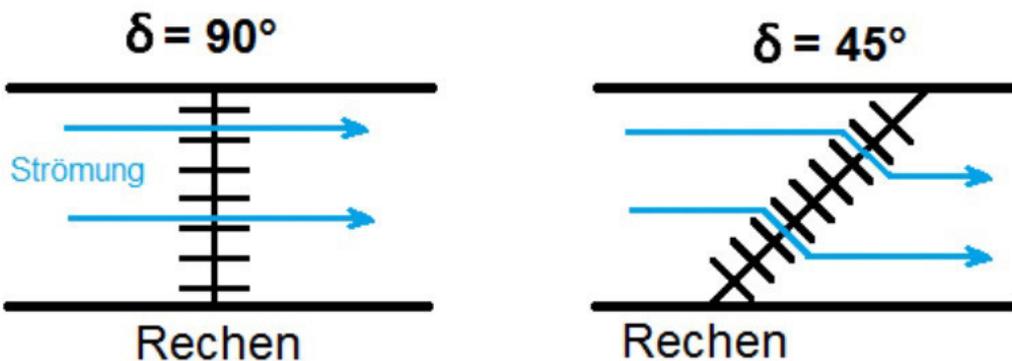


Abb. 51: Schräganströmung von Rechen mit vertikalen Stäben mit Strömungsumlenkung im Grundriss (*Quelle: Glock, 2017*).

Die *Kirschmer-Mosonyi*-Formel kann daher bei Schrägrechen nicht angewandt werden.

### Vergleich mit Meusburger-Formel (2002)

Wie bereits erwähnt, stellte *Meusburger* (2002) fest, dass der Verbauungsgrad einen maßgeblichen Einfluss auf die Rechenverluste hat. Für die Vergleiche mit den Rechenverlusten im Labor entfällt zum einen der Verlustfaktor  $k_a$  in Abhängigkeit des vertikalen Anströmwinkels  $\alpha$  ( $\sin \alpha$  für  $90^\circ = 1$ ), als auch der Verlegungsgrad, da im Labor ohne Rechenverlegung gemessen wurde. *Meusburger* stellte seine Formel für konventionelle Rechen auf. Es ist zu beachten, dass bei *Meusburger*, wie bereits bei *Kirschmer-Mosonyi*, mit dem Komplementärwinkel  $\delta'$  gearbeitet wurde.

Wie bei *Kirschmer-Mosonyi* ergeben sich auch bei *Meusburger* größer werdende Rechenverluste mit kleiner werdendem Anströmwinkel (Tab. 10). Dies liegt erneut an der eigentlich für konventionelle Rechen aufgestellten Formel und der Schräganströmung vertikaler Stäbe durch die Schrägstellung des Rechens. Des Weiteren liegen die Rechenverluste über denen von *Kirschmer-Mosonyi*, da bei *Meusburger* der Verbauungsgrad mit einfließt und dieser durch die Einengung des Fließquerschnitts die Rechenverluste beeinflusst.

Tab. 10: Rechenverluste [cm] und Verlustbeiwerte [-] nach der *Meusburger*-Formel in Abhängigkeit von Anströmwinkel und Anströmgeschwindigkeit bei einer Stababstand von 18 mm (*Quelle: verändert nach Glock, 2017*).

Anströmwinkel $\delta$ [°]	Verlustbeiwert $\zeta$ [-]	Rechenverluste [cm] in Abhängigkeit von der Anströmgeschwindigkeit			
		0,4 m/s	0,5 m/s	0,7 m/s	0,8 m/s
30°	4,09	3,33	5,21	7,50	10,20
45°	2,70	2,20	3,44	4,95	6,74
55°	2,01	1,64	2,56	3,68	5,01
70°	2,06	1,68	2,63	3,78	5,15

Die *Meusburger*-Formel kann bei Schrägrechen nicht angewandt werden.

### Vergleich mit Raynal-Formel (2013)

Für die Verwendung der *Raynal*-Formel ist zunächst die Ermittlung des Verlustfaktors  $K_a$  notwendig, welcher abhängig von der Stabform ist (Kap. 2.6.2).

Die nach *Raynal* ermittelten Rechenverluste liegen wiederum höher als die von *Meusburger* und nehmen ebenfalls mit kleiner werdendem Anströmwinkel  $\delta$  zu (Tab. 11). Dies liegt erneut an der Formel, welche für konventionelle Rechen sowie für Louver und für Bar Racks aufgestellt wurde.

Tab. 11: Rechenverluste [cm] und Verlustbeiwerte [-] nach der *Raynal*-Formel in Abhängigkeit von Anströmwinkel und Anströmgeschwindigkeit bei einer Stababstand von 18 mm (*Quelle: verändert nach Glock, 2017*).

Anströmwinkel $\delta$ [°]	Verlustbeiwert $\zeta$ [-]	Rechenverluste [cm] in Abhängigkeit von der Anströmgeschwindigkeit			
		0,4 m/s	0,5 m/s	0,7 m/s	0,8 m/s
30°	5,93	4,83	7,55	10,87	14,8
45°	3,35	2,73	4,27	6,15	8,37
55°	2,44	1,99	3,10	4,47	6,08
70°	2,28	1,86	2,91	4,19	5,70

Die *Raynal*-Formel kann daher bei Schrägrechen nicht angewandt werden.

### Vergleich mit Zimmermann-Formel (1969)

Bereits *Meusburger* (2002) stellte fest, dass *Zimmermann* (1969) die tatsächlichen Rechenverluste massiv überschätzt. Dies wurde in der vorliegenden Arbeit bestätigt (Kap. 3.1 und Kap. 3.2). Es wird daher auf die weitere Untersuchung der Rechenverlustformel von *Zimmermann* verzichtet, da davon ausgegangen werden kann, dass die Rechenverluste stark von den hydrometrisch ermittelten abweichen.

## 3.4. Rechenverlustermittlung an einem alternativen Schrägrechen der TU Darmstadt

Zur Verifizierung der bereits ermittelten Rechenverluste am Schrägrechen im wasserbaulichen Forschungslabor wurden von *Glock* (2017) weitere Untersuchungen an einem Alternativrechen (Abb. 52) durchgeführt, welcher beim vorangegangenen Forschungsprojekt zum Einsatz kam (*Lehmann et al., 2016*). Die Studien fanden erneut im Labor statt, ebenfalls in der 2 m breiten und 40 m langen Versuchsrinne. Der Schrägrechen in dieser zusätzlichen Untersuchung wird einfachheitshalber Alternativrechen genannt. Dieser Alternativrechen besitzt gegenüber den vorherig beschriebenen Schrägrechen andere Rechenparameter (Tab. 12). Die Stabdicke ist mit 3 mm dünn, wodurch der Alternativrechen filigran wird. Die Pfeiler sind rund ausgebildet und haben einen Durchmesser von 3 cm. Der Alternativrechen kann vertikal oder horizontal eingebaut werden, untersucht wurde er von *Glock* im horizontal eingebauten Zustand.



Abb. 52: Alternativrechen mit filigranen Rechenstabdicken (hier wurde die vertikale Ausrichtung fotografiert).

Tab. 12: Parameter des Alternativrechens im wasserbaulichen Forschungslabor

Anströmwinkel $\delta$ [°]	Stababstand $s$ [mm]	Stabdicke $d$ [mm]
45	12	3

Die Position der UAS wurde im Vergleich zum vorherigen Schrägrechen nicht verändert, ebenso die eingestellten Anströmgeschwindigkeiten und die Subtraktion der Umlenkverluste durch die Bypassöffnung. Mit dem zuvor untersuchten Schrägrechen wurden keine Stababstände von 12 mm getestet. Es wurden daher die Untersuchungen mit einem Stababstand von 10 mm zum Vergleich herangezogen. Der Anströmwinkel betrug 45°.

Die Auswertung (Abb. 53) ergab beim Alternativrechen geringe Rechenverluste als beim vorherigen Schrägrechen.

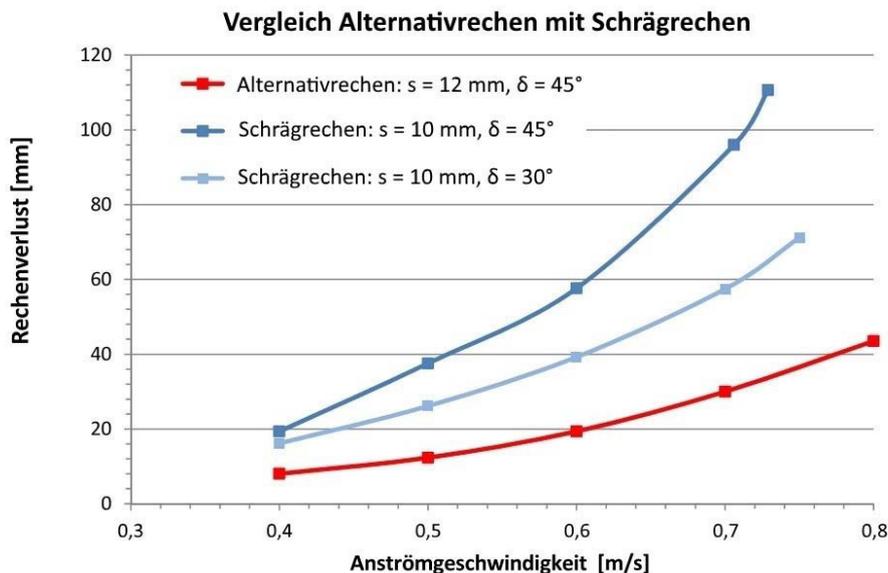


Abb. 53: Rechenverluste des Alternativrechens im Vergleich zu zwei Setups des vorher untersuchten Schrägrechens. *Quelle: verändert nach Glock (2017).*

Die Bauart und damit der Verbauungsgrad spielt bei den Rechenverlusten eine große Rolle – auch bei Schrägrechen. Dies wird nochmalig durch die Ergebnisse bestätigt (Abb. 53). Filigrane Schrägrechen mit einem geringen Verbauungsgrad erzeugen geringe Rechenverluste. Die beim Alternativrechen verbauten dünnen Rechenstäbe und Rechenpfeiler machen einen Einsatz des Schrägrechens im Gewässer unmöglich. Die dünnen Rechenstäbe wären nicht ausreichend stabil für Lasten aus Eisdruck, Wasserdruck bei Hochwasser und Druck durch Treibgut

und Verlegung. Eine weitere Ursache für die geringeren Rechenverluste des Alternativrechens gegenüber dem Schrägrechen bilden die abgerundeten Rechenpfeiler.

Der hier im Labor eingesetzte Alternativrechen ist eher als idealer Rechen anzusehen, welcher zu Laborzwecken eingesetzt werden kann und nicht unter realen Bedingungen. Die geringeren Rechenverluste lassen sich mit dem geringeren Verbauungsgrad des Alternativrechens erklären, wodurch sich eine Beeinflussung der Rechenverluste an Schrägrechen durch den Verbauungsgrad zeigt.

### 3.5. Empfehlungen für die Horizontalrechenverlustermittlung in der Praxis

Aufgrund der Ergebnisse der vergleichenden Untersuchungen am WKW Ottenau und der KIT-Versuche sowie der hydraulischen Messkampagne an der TU Darmstadt mit einem Schräg- und einem Alternativrechen kann eine Verwendung der bekannten und oben aufgeführten Rechenverlustformeln (*Kirschmer*, *Kirschmer-Mosonyi*, *Zimmermann*, *Meusburger*, *Raynal*, *Kriewitz-Byun*) für Schrägrechen nicht empfohlen werden. Eine Übertragbarkeit der für konventionelle Rechen oder Louver und Bar Racks aufgestellten Formeln auf Schrägrechen mit horizontalen Stäben ist nicht zulässig. Die Gründe liegen teils in der Geometrie bzw. Auslegung des Rechens (vertikale Stäbe ↔ horizontale Stäbe), als auch in den gegebenen Randbedingungen zur Anwendung der Formeln.

Die aufgestellten Grafiken (Abb. 48 und Abb. 50) für die jeweiligen Rechenparameter und hydraulischen Randbedingungen können zur Rechenverlustermittlung bei gleichen Rechen setups herangezogen werden. Dies verdeutlicht der Vergleich (Tab. 13) des in Ottenau aufgemessenen Schrägrechens (Abb. 41) mit den Grafiken der Labormessungen (Abb. 48 und Abb. 50). Eine Verwendung der aufgestellten Grafiken (Abb. 48 und Abb. 50) ist damit zulässig.

Tab. 13: Vergleich der Rechenverluste des Schrägrechens in Ottenau und der Rechenverluste aus dem vergleichbaren Rechen setup im Forschungslabor

Rechen setup	Ottenau (Abb. 42)	Laborrechen (Abb. 48)	Laborrechen (Abb. 50)
Anströmwinkel $\delta$	44°	45°	45°
Stababstand $s$	18 mm	18 mm	18 mm
Anströmgeschwindigkeit $v_a$	0,8 m/s	0,8 m/s	0,8 m/s
<b>Rechenverluste <math>h_{v,Re}</math></b>	<b>ca. 9 cm</b>	<b>ca. 9 cm</b>	<b>ca. 9 cm</b>

Sollen die Rechenverlustbeiwerte weiterer Rechen setups für planerische Zwecke benötigt werden, so müssen diese ebenso wie die der Geestachter Monitoringstation hydrometrisch im Forschungslabor ermittelt werden.

Anhand der durchgeführten Studien ist zu erkennen, dass sich die Rechenverluste bei kleiner werdendem Stababstand, bei größer werdendem Anströmwinkel und bei steigender Anströmgeschwindigkeit erhöhen. Alle drei Parameter wirken sich demnach auf die Rechenverluste aus. Die Ergebnisse bestätigen auch die von *Raynal* (2013a) an Bar Racks gemachte Erkenntnis, dass mit kleiner werdendem Anströmwinkel die Rechenverluste abnehmen. Daher gilt diese Erkenntnis für alle Leitrechen, egal ob mit vertikalen oder mit horizontalen Stäben.

Da die Rechenverluste von baulichen Randbedingungen wie Verbauungsgrad, Anströmwinkel und Stababstand abhängen, ist bei der Planung von Schrägrechen eine Gegenüberstellung von Rechenverlusten (und damit Erzeugungseinbußen) und Baukosten durchzuführen, um eine technisch und kommerziell optimale Rechenauslegung festzulegen. Bei Bestandsanlagen ist die Anströmgeschwindigkeit durch die festgelegte und in der Regel genehmigte Maximalausbauwassermenge der Turbine vorgegeben. Auch die Wahl des Anströmwinkels ist häufig lokal baulich eingeschränkt. Fischökologische Anforderungen müssen immer zusätzlich zu baulichen Randbedingungen standortspezifisch bei der Planung berücksichtigt werden. Für reale Rechenanlagen sind daher standortabhängige Kompromisse zwischen Statik, Rechenverlusten und ökologische Anforderungen zu treffen.

## 4. Hydraulische Signaturen an Schrägrechen

Eine weitere Wissenslücke bei der Betrachtung von Schrägrechen besteht hinsichtlich seiner Anströmung und hinsichtlich der Einflüsse der Rechenanströmung auf das Verhalten von Fischen im Nahfeld des Schrägrechens. Zur grafischen Darstellung der Strömungen vor dem Schrägrechen wurden hydraulische Strömungssignaturen erstellt. Es werden nachfolgend die Ergebnisse der hydrometrischen Messungen am Schrägrechen im wasserbaulichen Forschungslabor sowie die vom Schrägrechen in Ottenau vorgestellt und erläutert. Anschließend wird aufgezeigt, welche Ähnlichkeiten beide Messkampagnen haben, aber auch welche Unterschiede sich bei den Messungen und dem Rechenaufbau ergaben und wie dies zu bewerten ist. Die Strömungssignaturen an den Schrägrechen sollen zum Verständnis des Fischverhaltens vor dem Rechen beitragen. Mögliche Hindernisse oder begünstigende Strömungsverteilungen für Fische bei der Abwanderung entlang der Rechenebene können auf diese Weise identifiziert und somit bei der Planung von Schrägrechensystemen vermieden bzw. berücksichtigt werden.

### 4.1. Datenaufnahme im wasserbaulichen Forschungslabor der TU Darmstadt

Die hydrometrische Messkampagne am Schrägrechen wurde im wasserbaulichen Forschungslabor der TU Darmstadt durchgeführt. Hierzu wurde der Schrägrechen (Kap. 3.3.1) mit einem seitlich angeordneten Bypass in die 40m-Rinne eingebaut. Es wurden die gleichen Rechenetups ausgewählt, die bei den ethohydraulischen Studien im Forschungslabor zum Einsatz kamen (Kap. 6 und Kap. 7) und die dem Schrägrechen in Ottenau ähneln.

#### 4.1.1. Beschreibung des Versuchsaufbaus: Messtechnik und Hydrometrie

Die Versuchsrinne samt Einbauten und Randbedingungen wurde bereits erläutert (Kap. 3.3.1). Nachfolgend wird lediglich auf die Messtechnik eingegangen, welche für die Ermittlung der Strömungssignaturen eingesetzt wurde.

Die Messungen der Fließgeschwindigkeiten und Strömungsverteilungen wurden mittels Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) durchgeführt. Zur Anwendung kam der Vectrino Standard Profiler der Firma Nortek. ADVs können dreidimensionale Strömungsgeschwindigkeiten berührungslos und ohne Beeinflussung der Strömung erfassen, in dem sie akustische Signale mit einer vorgegebenen Frequenz aussenden, welche von kleinen Partikeln im Wasser gestreut und reflektiert werden. Aufgrund dieser Streuung und Reflexion verändert sich die Signalfrequenz proportional zur Geschwindigkeit der Partikel im Wasser, was als Doppler-Effekt bezeichnet wird. Anhand des reflektierten Signals wird dessen veränderte Frequenz aufgenommen und daraus die Geschwindigkeit ermittelt. Grundlage bildet die Annahme, dass sich die Partikel genauso schnell bewegen, wie das sie umgebende Gewässer (BAW, 2014).

Den Sender oder Sensor bildet der Messstab, welcher senkrecht ins Wasser getaucht wird. Unten angeordnet („down-looking“) sind beim Nortek Vectrino vier Empfänger, welche die drei Komponenten der Geschwindigkeitsvektoren aufnehmen, indem immer ein Sender-Empfänger-Paar gebildet wird. Die z-Komponente wird dabei doppelt aufgenommen, die x- und y-Komponenten jeweils 1-mal (Abb. 54). Das Nortek Vectrino besitzt einen rot markierten Sender, welcher die x-Richtung vorgibt.



Abb. 54: Links Empfängeranordnung des Nortek Vectrino und die Ausrichtung des Koordinatensystems (Quelle: BAW verändert nach Nortek, 2014). Rechts Nortek Vectrino im Einsatz vor dem Schrägrechen im Forschungslabor (Quelle: Schwab, 2016).

Der Vectrino Standard wurde mittels Haltevorrichtung auf ein höhenverstellbares Schienensystem auf den Rinnenwänden befestigt (z-Richtung), von wo aus die verschiedenen Messpunkte innerhalb des Messrasters in x-, y- und z-Richtung angefahren wurden. Es wurde eine Abtastrate von 25 Hertz eingestellt. Dies entspricht 25 Messwerte in der Sekunde. Ein Messintervall pro Messpunkt war 30 Sekunden lang. So erhielt man 750 Messwerte pro Messpunkt.

#### 4.1.2. Beschreibung des Messrasters

Das Messraster wurde an die aufzunehmenden Rechenetups angepasst. Die Strömungssignaturen wurden innerhalb von zwei Messkampagnen ermittelt (*Schwab*, 2016 und *Glock*, 2017). *Schwab* konzentrierte sich auf die Rechenetups des vergleichenden Schrägrechens in Ottenau, welcher einen Anströmwinkel von  $44^\circ$  und einen Stababstand von 18 mm besitzt. *Glock* hingegen untersuchte eine Vielzahl unterschiedlicher Rechenetups mit verschiedenen Anströmwinkeln und Stababständen, welche auch in nachfolgenden ethohydraulischen Untersuchungen am Schrägrechen zum Einsatz kamen.

Es wurden Anströmgeschwindigkeiten von 0,4 m/s, 0,5 m/s, 0,7 m/s und 0,8 m/s aufgenommen (vgl. Kap. 3.2), bei *Schwab* als Zwischenmessung zusätzlich 0,6 m/s. Die Rechenetups im Labor wurden ohne Verlegung des Rechens untersucht. Als Hindernis im Fließgewässer ist lediglich der Verbauungsgrad des Rechens mit seinen Stäben, Rechenfeldern, Pfeilern und Abstützungen maßgebend.

##### Messraster nach Schwab (2016)

Die Ausrichtung des von *Schwab* (2016) gewählten und standortspezifischen Koordinatensystems (0/0/0) entspricht nicht der festgelegten und systembedingten Ausrichtung des Nortek Vectrino.

Es wurde daher von *Schwab* die durch den Sender vorgegebene x-Richtung (rot markierter Sender) orthogonal auf den Schrägrechen ausgerichtet. Damit entspricht die x-Richtung der Richtung der Normalkomponente der Anströmung. In dieser x-Richtung wurden drei Ebenen vor dem Schrägrechen aufgenommen.

Daraus resultierend zeigte die y-Richtung des Nortek parallel zum Schrägrechen und positiv in Richtung Bypass und nicht wie im Koordinatensystem orthogonal zur Anströmung. Damit bildet die y-Richtung mit insgesamt 9 Messpunkten die Tangentialkomponente der Anströmung (vgl. Kap. 2.3, Gl. 12). Es war mit dieser Methode möglich, direkt und ohne Umrechnung die Normal- und Tangentialkomponenten aufzunehmen.

In der Wassertiefe nach unten (z-Richtung) wurden wiederum 3 Ebenen aufgenommen (Abb. 55).

Der Ursprung des Koordinatensystems (0/0/0) befindet sich an der Rinnenwand des Bypasseinlaufs an der Wasseroberfläche. Für die spätere Auswertung in Tecplot mussten die Geschwindigkeitskomponenten auf das festgelegte Koordinatensystem ausgerichtet werden, also eine Drehung um  $45^\circ$  nach links.

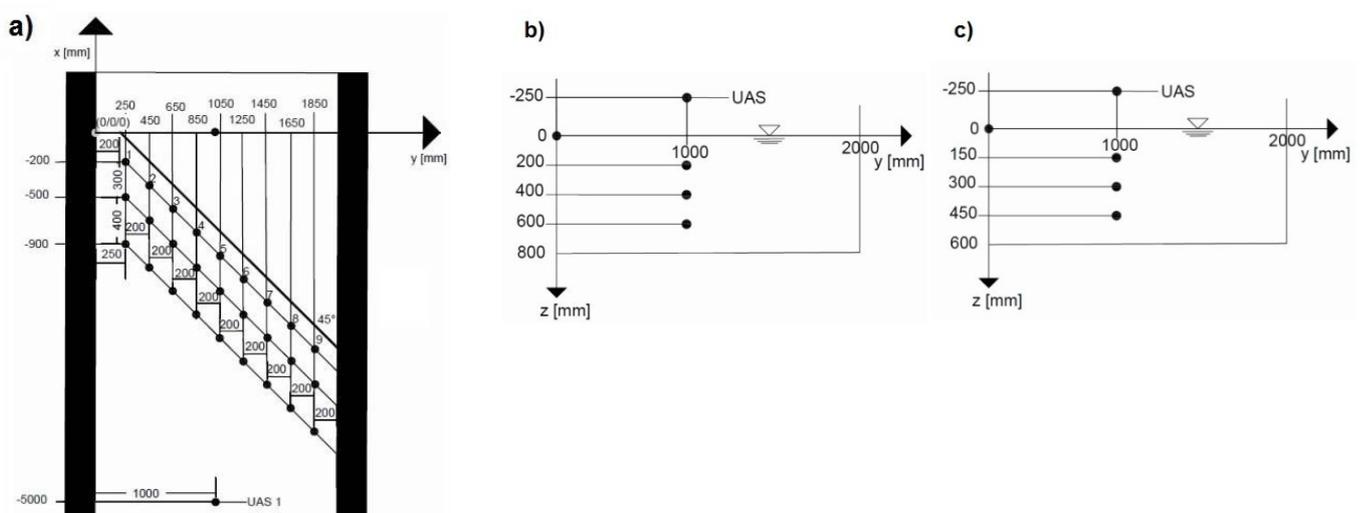


Abb. 55: Raster der hydrometrischen Messungen am Schrägrechen im wasserbaulichen Forschungslabor mit dem festgelegten Koordinatensystem nach *Schwab* (nicht maßstäblich). Draufsicht auf die Versuchsrinne a), Messebenen in z-Richtung bei Anströmgeschwindigkeiten von 0,4 m/s bis 0,7 m/s in b) und bei einer Geschwindigkeit von 0,8 m/s bei c). (Quelle: verändert nach *Schwab*, 2016).

Von *Schwab* wurden fünf verschiedene über den Rinnenquerschnitt gemittelte Anströmgeschwindigkeiten bei einem Anströmwinkel von  $45^\circ$  und einem Stababstand von 18 mm aufgenommen (Tab. 14). Dieses Messprogramm bildet alle Rechenetups des Schrägrechens Ottenau ab, so dass hier vergleichende Untersuchungen von Laborrechen und realem Schrägrechen durchgeführt werden können, um mögliche Unterschiede zu erkennen und deren Ursache zu erklären. Die Grenzen der situativen Ähnlichkeit von Labornachbauten realer Anlagen können mit diesen Vergleichen aufgezeigt werden.

Tab. 14: Durchgeführte hydrometrische Messungen zur Ermittlung der Strömungssignaturen (*Quelle: verändert nach Schwab, 2016*).

Anströmwinkel	Stababstand	gemittelte Anströmgeschwindigkeit
$45^\circ$	18 mm	0,4 m/s
		0,5 m/s
		0,6 m/s
		0,7 m/s
		0,8 m/s

Die Bypassöffnung war während der Messungen geöffnet, so dass ein Vergleich mit den ethohydraulischen Studien erfolgen kann, bei denen der Bypass für die Fische als Abwanderungsweg angeboten wurde.

### Messraster nach *Glock* (2017)

Anders als bei den Aufnahmen von *Schwab* setzte *Glock* den Ursprung seines Koordinatensystems (0/0/0) nicht an die Rinnenwand neben den Bypass, sondern 25 cm von der Rinnenwand und 26 cm vom Bypass entfernt sowie 78,5 cm oberhalb der Sohle (Abb. 56). Der Ursprungspunkt ist damit nicht Teil des Messrasters. Der Bypass wird mit diesem Messraster nicht abgebildet. Das Vectrino-Koordinatensystem wird an die untersuchten Rechenwinkel ausgerichtet und ist daher für jeden Anströmwinkel anders ausgerichtet. Das Koordinatensystem der Untersuchungskampagne liegt hingegen immer gleich.

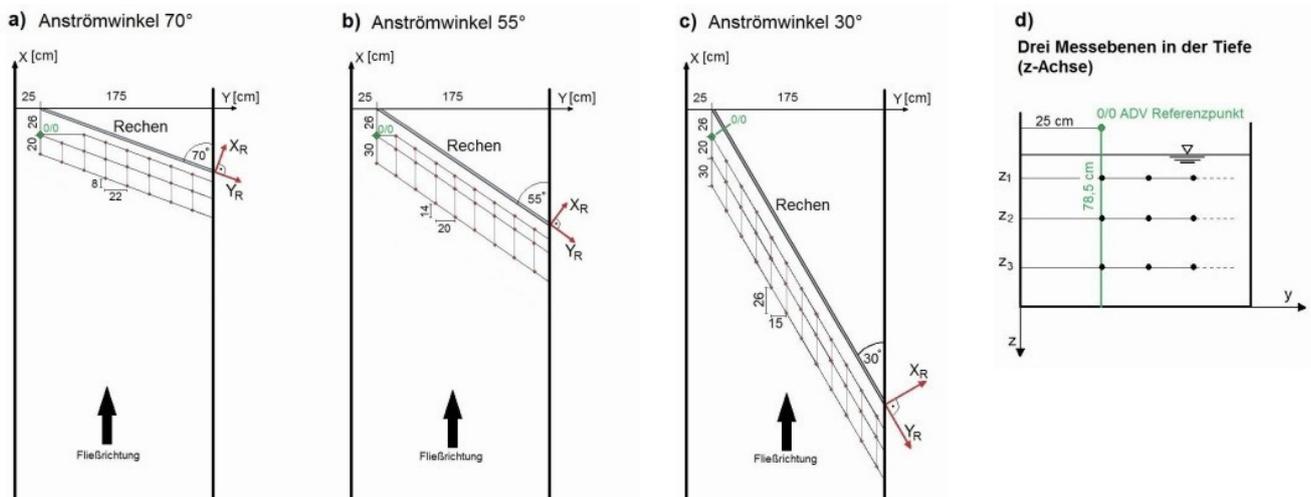


Abb. 56: Raster der hydrometrischen Messungen am Schrägrechen im wasserbaulichen Forschungslabor nach *Glock*. Rot dargestellt ist jeweils das Koordinatensystem des ADV-Sensors. Die Messraster in Abhängigkeit des Anströmwinkels sind in a) bis c) abgebildet, d) zeigt die drei Messebenen in z-Richtung, welche für alle Anströmwinkel gelten (*Quelle: Glock, 2017*).

Die Achsen des Vectrinos liegen bei *Glock* analog den Achsen bei *Schwab* (2016): Die z-Achse definiert die Tiefe nach unten hin in drei Ebenen. Die y-Achse des Vectrinos hingegen verläuft zwar wie bei *Schwab* parallel zur Rechenebene, jedoch nicht Richtung Bypass, sondern Richtung oberstromigem Rechenende. Die Anzahl der Messpunkte variiert je nach Rechenlänge, ebenso ihr Abstand zueinander. Die x-Richtung zeigt senkrecht zur Rechenebene, also in Richtung der Normalkomponente der Anströmung, und besitzt drei Messebenen.

Glock führte in seiner Master-Thesis Messungen der Anströmgeschwindigkeiten an verschiedenen Rechen-  
setups aus und variierte damit auch den Anströmwinkel  $\delta$  und den Stababstand  $s$  (Tab. 15). Auch hier war wie  
bei Schwab und den nachfolgenden ethohydraulischen Studien (Kap. 6 und Kap. 7) die Bypassöffnung über den  
gesamten Wasserstand geöffnet.

Tab. 15: Durchgeführte hydrometrische Messungen zur Ermittlung der Strömungssignaturen (Quelle: verändert nach Glock, 2017).

Anströmwinkel	Stababstand	gemittelte Anströmgeschwindigkeit
30°	10 mm	0,8 m/s
		0,4 m/s
	18 mm	0,5 m/s
		0,7 m/s
		0,8 m/s
	30 mm	0,5 m/s
0,8 m/s		
55°	10 mm	0,8 m/s
		0,4 m/s
	18 mm	0,5 m/s
		0,7 m/s
		0,8 m/s
	30 mm	0,5 m/s
0,8 m/s		
70°	18 mm	0,4 m/s
		0,5 m/s
		0,7 m/s
		0,8 m/s

### 4.1.3. Ergebnisse

Aufgrund des umfangreichen Messrasters (Abb. 55 und Abb. 56) mit mehreren Ebenen und zahlreichen Mess-  
punkten gibt es eine Vielzahl von 2D- und 3D-Darstellungen, welche mit Tecplot erstellt wurden. Nachfolgend  
ist eine Auswahl dieser Strömungsgrafiken dargestellt, welche die wichtigsten Ergebnisse widerspiegeln.

#### Geschwindigkeitsprofile

Geschwindigkeitsprofile, welche über die z-Richtung (= Wassertiefe) ermittelt wurden zeigen, dass sich mit  
zunehmender Tiefe das Fließverhalten im Labor bei einer Wassertiefe von 60 cm bis 83 cm bei unterschiedli-  
chen Anströmgeschwindigkeiten nicht ändert: Die resultierende Geschwindigkeitskomponente  $v_{xyz}$  bleibt über  
die Tiefe konstant (Abb. 57). Die resultierende Geschwindigkeitskomponente bildet die gemittelte Anströmge-  
schwindigkeit  $v_a$  ab, welche über den Fließquerschnitt angegeben wird.

Es wird vermutet, dass die über die Tiefe betrachtete konstante Geschwindigkeit mit der geringen Wassertiefe  
im Labor zusammenhängt. Bei größeren Wassertiefen wie am Schrägreden in Ottenau sollte dieser Effekt nicht  
mehr zu beobachten sein, so dass Strömungsgeschwindigkeiten zur Tiefe hin abnehmen.

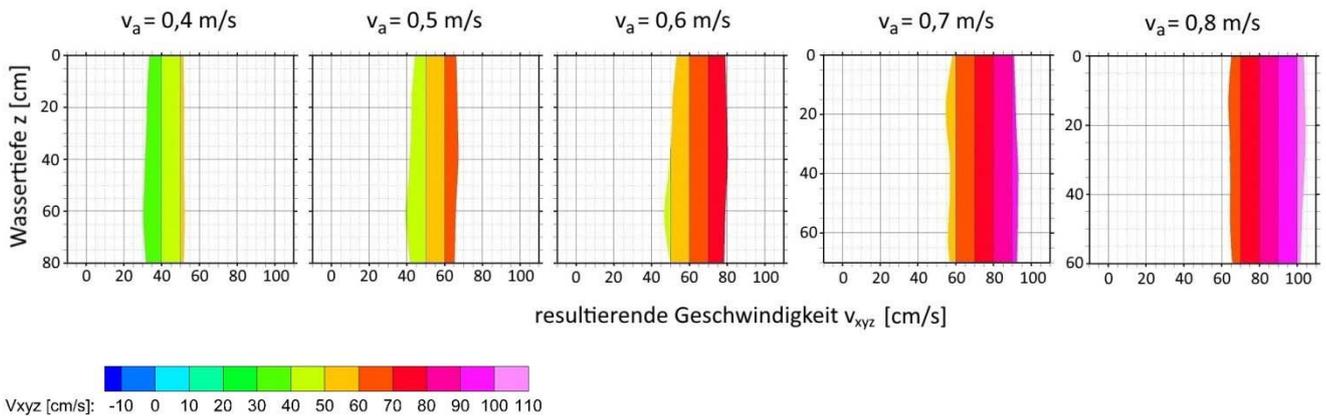


Abb. 57: Geschwindigkeitsprofile der aus den drei Strömungskomponenten x, y, z ermittelte resultierende Geschwindigkeit  $v_{xyz}$  bei Einstellung mittlerer Anströmgeschwindigkeiten von  $v_a = 0,4$  m/s bis  $0,8$  m/s an einem Schrägrechen mit  $45^\circ$  Anströmwinkel und 18 mm Stababstand. Dargestellt ist der gesamte Messquerschnitt über die Wassertiefe z. Die mittlere Anströmgeschwindigkeit  $v_a = 0,4$  m/s zeigt z. B. tatsächlich gemessene Werte in einer Bandbreite von  $0,3$  m/s bis  $0,52$  m/s (Quelle: verändert nach Schwab, 2016).

### Tiefendiagramme

Aus den Messebenen und der Gesamtheit an Messpunkten wurden fünf Schnitte in YZ-Richtung erstellt, welche als Tiefendiagramme die Strömungsverteilungen auf gesamter Rechenbreite und Rechentiefe darstellen (Abb. 58). Der Schrägrechen stellt Schnitt 1 dar, die weiteren Schnitte 2-5 liegen mit je einem Abstand von 20 cm zum Rechen bzw. zur vorherigen Schnittebene.

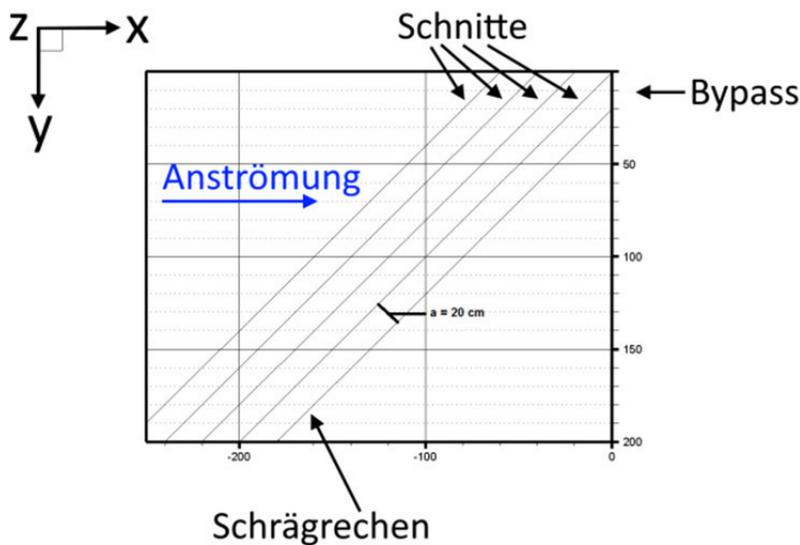


Abb. 58: Darstellung der parallel zum Schrägrechen angefertigten Tiefenschnitte (Quelle: verändert nach Schwab, 2016).

Man erkennt in den Darstellungen (Abb. 59 und Abb. 60) Geschwindigkeitszunahmen von rechts (strömungsberuhigte Zone mit Leitblech) nach links (Bypass), welche sich mit steigender Entfernung vom Rechen in Richtung Oberstrom (Schnitt 1  $\rightarrow$  Schnitt 5) vereinheitlichen und homogenisieren (Abb. 59). Die Geschwindigkeitszunahme in Richtung Bypass erfolgt schrittweise und nicht schlagartig. Diese Verteilungen der Zunahmen von rechts nach links bleiben auch bei der Betrachtung unterschiedlicher Anströmgeschwindigkeiten erhalten (Abb. 60). In Rechenmitte befinden sich größere Bereiche homogener Strömungsverhältnisse, unabhängig von der Anströmgeschwindigkeit. Auch die Tiefendiagramme bestätigen, dass die Strömungsgeschwindigkeit über die Tiefe relativ konstant bleibt und nicht in Richtung Sohle abnimmt. Der Einfluss des Leitblechs an der rechten Rinnenseite ist hier (Abb. 59 und Abb. 60) deutlich erkennbar.

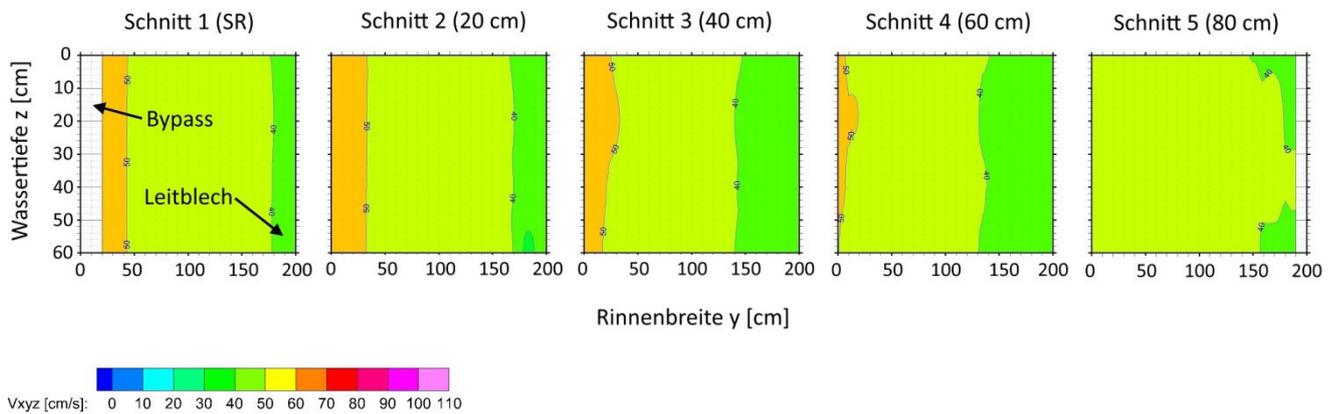


Abb. 59: Tiefendiagramme der Strömungsfelder der fünf Schnitte parallel zur Rechenebene eines Schrägrechens mit  $45^\circ$  Anströmwinkel und 18 mm Stababstand bei einer Anströmgeschwindigkeit von  $v_a = 0,4$  m/s. Blick in Fließrichtung/Unterwasser, links ist der Bypass angeordnet von  $y = 0$  cm bis  $y = 20$  cm (Quelle: verändert nach Schwab, 2016).

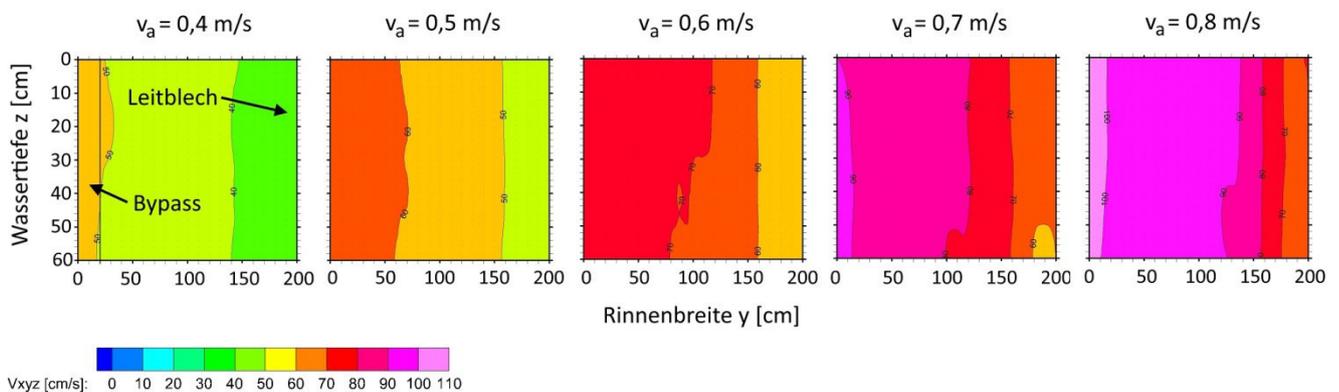


Abb. 60: Tiefendiagramme der Strömungsfelder des Schnittes 3 in 40 cm Entfernung zur Rechenebene eines Schrägrechens mit  $45^\circ$  Anströmwinkel und 18 mm Stababstand. Die Anströmgeschwindigkeiten variieren von 0,4 m/s bis 0,8 m/s. Blick in Fließrichtung/Unterwasser, links ist der Bypass angeordnet von  $y = 0$  cm bis  $y = 20$  cm (Quelle: verändert nach Schwab, 2016).

Aus den Tiefendiagrammen (Abb. 59 und Abb. 60) folgt, dass Leitbleche oder andere Anströmhindernisse wie Rechenreiniger, Autoreifen, usw. eine Auswirkung auf die Geschwindigkeitsverteilung am Schrägrechen haben, in dem sie die Anströmverhältnisse inhomogenisieren. Die Geschwindigkeitsverteilung über den gesamten Rinnenquerschnitt ist damit nicht homogen und teilt sich in Zonen höherer und niedrigerer Geschwindigkeit auf. Die strömungsberuhigten Zonen können schwimmschwachen Fischen möglicherweise als Rückzugsort dienen.

Die Untersuchungen an den anderen Rechenetups mit unterschiedlichem Stababstand  $s$  und Anströmwinkel  $\delta$  (Tab. 14 und Tab. 15) zeigen ein ähnliches Strömungsverhalten hinsichtlich des Auftretens strömungsberuhigter Zonen am rechten Leitblech sowie eine Zunahme der Geschwindigkeiten hin zum Bypass. Eine Vergleichmäßigung der Strömungsverhältnisse mit größer werdendem Abstand zum Rechen in Richtung Oberstrom wird ebenfalls beobachtet.

Strömungsverhältnisse direkt am Rechen konnten mit den Versuchsaufbauten des Messsystems nicht erfasst werden. Anhand von LDV-Messungen (Laser-Doppler-Velocimeter) wurde an einem geneigten Vertikalrechen bereits in der Versuchsanstalt und Prüfstelle für Umwelttechnik und Wasserbau der Universität Kassel festgestellt, dass in einer Entfernung von 1 cm vor der Rechenebene der Strömungsvektor vom Rechen noch unbeeinflusst ist. Fische müssen somit in einem Abstand von kleiner als 1 cm an den Rechen heranschwimmen, um Strömungsänderungen aufgrund der Einschnürung durch die Rechenstäbe wahrnehmen zu können. Dies kommt nahezu mit einem Rechenkontakt gleich. Daraus folgt, dass Fische, die keinen Kontakt mit der Rechenebene

haben, der rechenunbeeinflussten Strömung ausgesetzt sind (Hübner et al., 2011), welche in den oben aufgeführten Abbildungen dargestellt wurden. Aus den Untersuchungen anhand ADV-Messungen und Tecplot-Auswertungen können vier Erkenntnisse abgeleitet werden, welche die Anströmung vor einem Schrägrechen betreffen:

- Schrittweise Geschwindigkeitszunahmen entlang der Rechenebene in Richtung eines am unterstromigen Ende des Schrägrechens positionierten Bypasses;
- Homogene Strömungsbereiche in der Mitte der Rechenebene;
- Zonen mit höherer Geschwindigkeit am Bypass und Zonen mit niedriger Geschwindigkeit an Strömungshindernissen;
- Strömungszustände werden mit Annäherung an die Rechenebene inhomogener.

### Strömungsverteilungen in der Draufsicht (2D) und in 3D

Diese Ergebnisse werden auch durch weitere Darstellungen bestätigt, wie z. B. durch 2D-Strömungssignaturen in der Draufsicht (Abb. 61) sowie 3D-Strömungsbilder der resultierenden Geschwindigkeit  $v_{xyz}$  (Abb. 62). Weitere Darstellungen der Tecplot-Auswertungen der untersuchten Rechensetups im Forschungslabor können der Master-Thesis von Schwab (2016) entnommen werden.

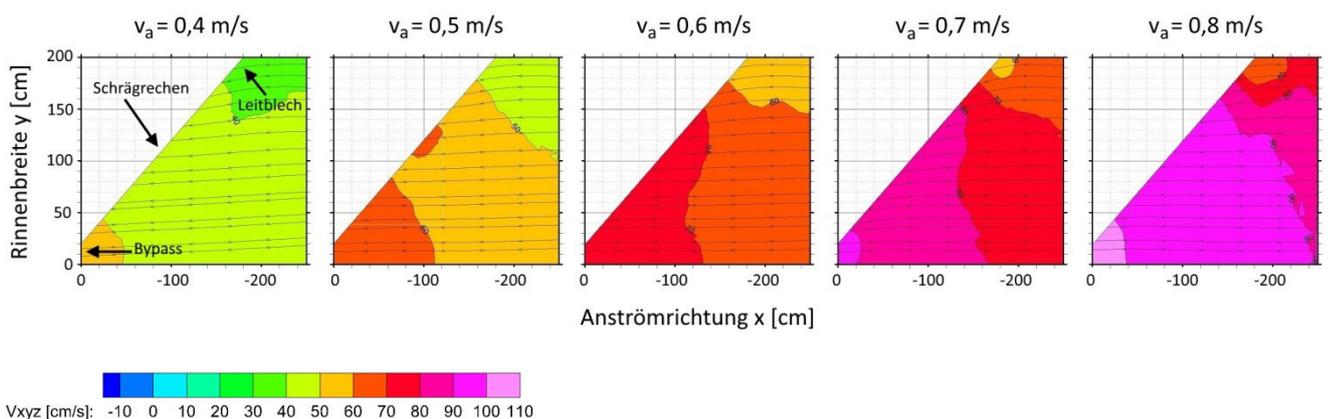


Abb. 61: 2D-Strömungssignaturen in der Draufsicht. Dargestellt ist der Tiefenschnitt bei  $z = 10$  cm (= 10 cm unterhalb der Wasserspiegellage) (Quelle: verändert nach Schwab, 2016).

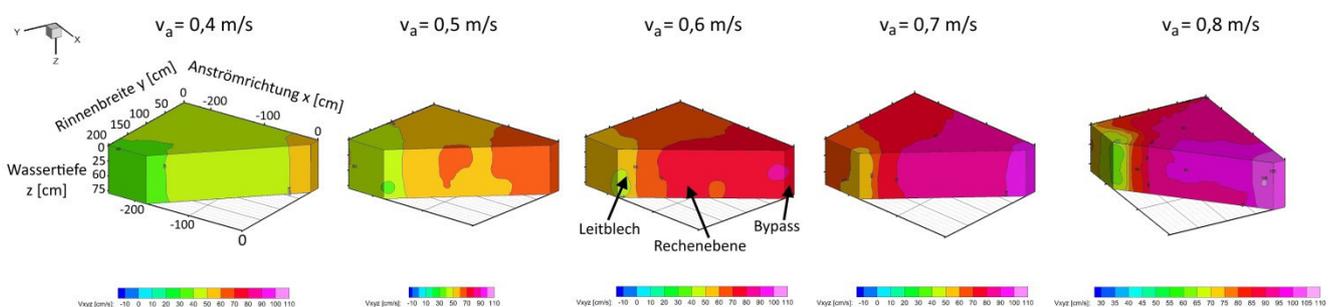


Abb. 62: 3D-Strömungssignaturen verschiedener Anströmgeschwindigkeiten mit Blick von Unterstrom in Richtung Oberstrom auf den Schrägrechen (links strömungsberuhigtes Leitblech, in der Mitte die Rechenebene, rechts Bypass) (Quelle: verändert nach Schwab, 2016).

Die Ergebnisse bestätigen auch die Strömungsuntersuchungen von *Raynal et al. (2013a)* an schräg angeströmten Rechen. Auch dort wurde eine Geschwindigkeitszunahme in Richtung einer an der unterstromigen Seite des Rechens angeordneten Öffnung festgestellt sowie eine Homogenisierung der Strömungsverhältnisse Richtung Oberstrom (Abb. 49).

## 4.2. Datenaufnahme im Feld am Wasserkraftwerk Ottenau

Um die Strömungssignaturen des Laborrechens mit einem realen und eingebauten Schrägrechen zu vergleichen, wurde eine Messkampagne am 18mm-Schrägrechen des Wasserkraftwerks Ottenau durchgeführt. Der Versuchsaufbau in Ottenau wird einschließlich der Versuchsergebnisse nachfolgend dargestellt, Unterschiede und Ähnlichkeiten zwischen Feld- und Labormessungen anschließend erläutert.

### 4.2.1. Beschreibung des Versuchsaufbaus

#### Abflussverhalten der Murg

Die hydrometrischen Freilandmessungen wurden vom 07.12.2015 bis 10.12.2015 am EnBW Wasserkraftwerk Ottenau an der Murg durchgeführt. Ottenau ist ein Stadtteil von Gaggenau im Landkreis Rastatt im Nordschwarzwald. Die Murg entspringt im Kreis Freudenstadt bei Baiersbronn und mündet nordwestlich von Rastatt in den Rhein. In Relation zu ihrem Einzugsgebiet (617 km<sup>2</sup>) besitzt sie ein reiches Wasserdargebot mit einem mittleren Abfluss (MQ) an der Mündung von 18,4 m<sup>3</sup>/s.

Im Bereich der Wasserkraftanlage Ottenau liegt der mittlere Abfluss bei 15,16 m<sup>3</sup>/s, der Mittelwert niedrigster jährlicher Abflüsse MNQ bei 3,61 m<sup>3</sup>/s. Der 100-jährliche Hochwasserabfluss beträgt am Pegel Rotenfels 688 m<sup>3</sup>/s (*Hochwasservorhersagezentrale Baden-Württemberg der LUBW (HVZ), 2017*). Aufgrund der Lage der Murg im Nordschwarzwald, in deren Einzugsgebiet sich steile Hänge und tiefe Täler befinden, kann der Abfluss der Murg bei und nach Niederschlägen sehr schnell anschwellen und kurzzeitige Überschwemmungen verursachen. Häufig ist dies mit einer Schneeschmelze verbunden, wie z. B. durch die Aufzeichnungen am Pegel Bad Rotenfels im Zeitraum 08.-20.03.2017 dokumentiert (Abb. 63). Starke Niederschläge am 09.03.2017 sowie Temperaturen deutlich über Null Grad verursachten am 09.03.2017 innerhalb weniger Stunden einen schnellen Anstieg des Abflusses von ca. 20 m<sup>3</sup>/s auf über 260 m<sup>3</sup>/s.

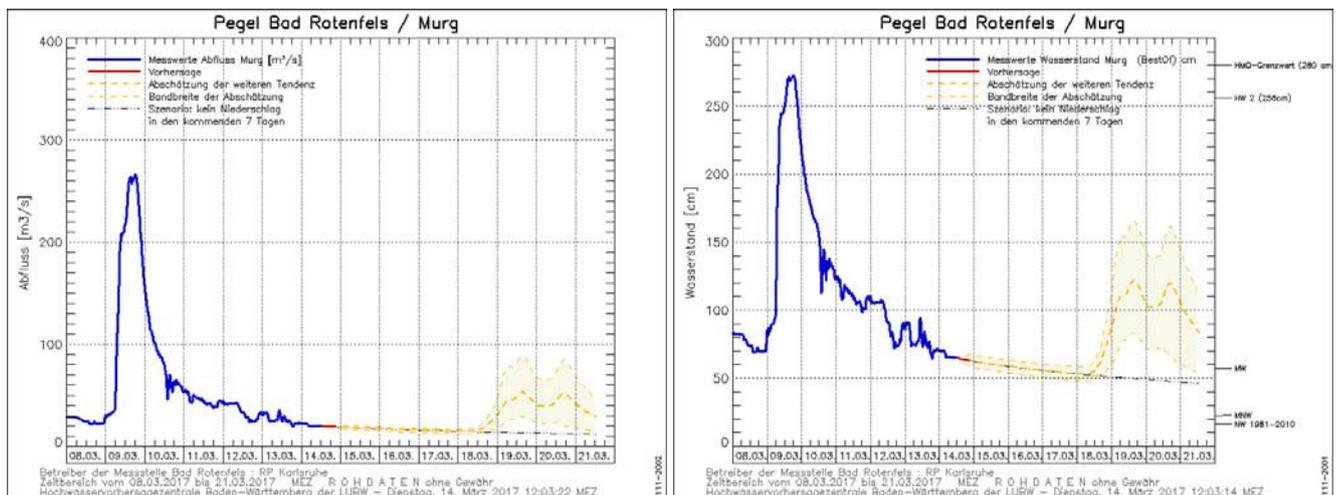


Abb. 63: Abfluss links und Wasserstand rechts der schnell veränderlichen Murg vom 08.-20.03.2017 am Pegel Rotenfels (*Quelle: HVZ Baden-Württemberg, 2017*).

### Überblick über das Wasserkraftwerk Ottenau

Das Wasserkraftwerk Ottenau wurde 1921 von der damaligen Badenwerk AG, einer der Vorgängerunternehmen der EnBW Energie Baden-Württemberg AG, als Ausleitungskraftwerk in Betrieb genommen und ist im Besitz eines unbefristeten Wasserrechts. Das Kraftwerk besitzt im Oberwasser ein Streichwehr, von dem aus der Kraftwerkskanal abzweigt (Abb. 64). Dieser ist seit Umbau- und Instandhaltungsmaßnahmen 2012 mit einem

Schrägrechen als mechanische Barriere gegen Fische und Geschwemmsel versehen. Der ca. 800 m lange Kraftwerkskanal führt zum Krafthaus mit zwei Francis-Maschinensätzen aus dem Jahr 1965, von denen jede Turbine eine Ausbauwassermenge von  $7,28 \text{ m}^3/\text{s}$  hat. Die durch den Kanalquerschnitt bedingte maximale rechnerische Anströmgeschwindigkeit beträgt gemittelt in etwa  $0,8 \text{ m/s}$  bei Volllast der Maschinen. Abgeleitet aus der Jahresdauerlinie besitzt das WKW Ottenau ca. 1.230 Volllaststunden pro Jahr und hat 50 Tage Stillstand pro Jahr aufgrund von Niedrigwasser. Die restlichen Tage im Jahr fährt das Kraftwerk im Teillastbetrieb. Mit einer Ausbaufallhöhe von  $5,0 \text{ m}$  beträgt die installierte Kraftwerksleistung in Ottenau  $560 \text{ kW}$ .



Abb. 64: Einlaufbereich zum Kraftwerkskanal mit dem 18mm-Schrägrechen in Ottenau (Quelle: verändert nach Google.maps).

Der ca. 260 m lange Auslaufkanal mündet nach dem Kraftwerk wieder in die Murg. Um den Sackgasseneffekt für aufsteigende Fische in Richtung Turbinenauslauf und Saugrohre zu verhindern, wurde die Auffindbarkeit der Ausleitungsstrecke durch den Bau einer Buhne aus Wasserbausteinen verbessert. Die Lockströmung (= Fließgeschwindigkeit) wurde durch die Buhneneinengung erhöht und zieht damit aufwärts schwimmende Fische, die der Hauptströmung folgen, besser an.

Im Zuge des Ausbaus des Rheinkraftwerk Iffezheim mit einer 5. Maschine musste die ökologische Modernisierung des Wasserkraftwerks Ottenau als Erfüllung einer Genehmigungsaufgabe durchgeführt werden. Dies erfolgte im Jahr 2012. Zu dieser Modernisierung zählten der Bau einer neuen Fischaufstiegsanlage im Bereich des Kanaleinlaufs, ein Fischschutzsystem mit Fischabstiegsanlage sowie die Abgabe einer definierten Mindestwassermenge. Mit wasserrechtlicher Erlaubnis vom 16.09.2011 wurde eine Gesamtmindestwassermenge für die Ausleitungsstrecke in Höhe von  $1.700 \text{ l/s}$  mit folgender Aufteilung festgelegt:

- über einen Einschnitt im festen Streichwehr „Lindenwehr“  $400 \text{ l/s}$ ;
- über die Fischaufstiegsanlage (Raugerinne-Beckenpass mit 21 Becken)  $500 \text{ l/s}$ ;
- über die Fischabstiegsanlage  $800 \text{ l/s}$  ( $\approx 5,5\%$  der Turbinenausbauwassermenge  $Q_A$ ).

Das Oberwasserstauziel am Streichwehr wird durch das Kraftwerk konstant gehalten, wodurch auch die Mindestwassermenge konstant abgegeben wird.

Als Fischschutzsystem wurde ein Schrägrechen mit einem Stababstand von  $18 \text{ mm}$  eingebaut, damals der erste seiner Art unter den EnBW-Wasserkraftwerken. Der Rechen hat eine Länge von  $14,46 \text{ m}$  und eine Höhe von

1,60 m, die Gesamtwassertiefe beträgt 2,00 m. Die Differenz zur Rechenhöhe ist konstruktionsbedingt: Der Rechen steht auf einem Sohlbalken von 0,25 m Höhe und besitzt einen 0,15 m hohen Tauchbalken (Abb. 65). Der Sohlbalken dient zum Freihalten des Sohlbereichs vor Schlamm, Steinen und Müll, so dass der Rechenreinigungsarm jederzeit den Rechen reinigen kann und dabei nicht beschädigt wird. Der Tauchbalken schützt den Rechen vor großem, an der Wasseroberfläche schwimmendem Treibgut wie Baumstämme. Diese Bauweise hat sich mittlerweile aus betrieblichen Gründen bewährt und wird auch von *Ebel* (2013) empfohlen.

Der Anströmwinkel beträgt  $44^\circ$ , die Rechenstäbe haben ein Rechteckprofil und demnach einen Stabprofilbeiwert von 2,42 analog dem Schrägrechen im Forschungslabor. Die Ruheposition des Rechenreinigungsarms liegt in Fließrichtung gesehen an der rechten Uferseite, seine Zacken greifen beim Reinigungsvorgang ein wenig zwischen die einzelnen Stäbe, jedoch nicht auf gesamter Rechenstablänge, da der Rechenreinigungsarm ansonsten Geschwemmsel durch den Schrägrechen drücken würde.

Auf der linken Seite des Einlaufkanals befindet sich in Verlängerung des Rechens die Fischabstiegsanlage in Form einer Klappe mit horizontaler Drehachse. Diese Klappe ist stets so weit geöffnet, dass die Mindestwassermenge von 800 l/s abgegeben werden kann. Dadurch stellt sich eine Überfallhöhe von 30 cm ein. Sobald der Rechenvorgang startet, wird die Klappe komplett gelegt (geöffnet), so dass ein Sog in den Bypass entsteht, der Fische und Geschwemmsel zum Abstieg zieht. Unter der Klappe befindet sich ein Tiefschutz, das bei Bedarf von der EnBW-Betriebsmannschaft gezogen werden kann, um Verlandungen sowie Sand- und Schlammablagerungen vor dem Rechen vorzubeugen. Der Bypass verläuft ca. 50 m parallel zur Fischaufstiegsanlage und mündet anschließend in der Ausleitungsstrecke der Murg.

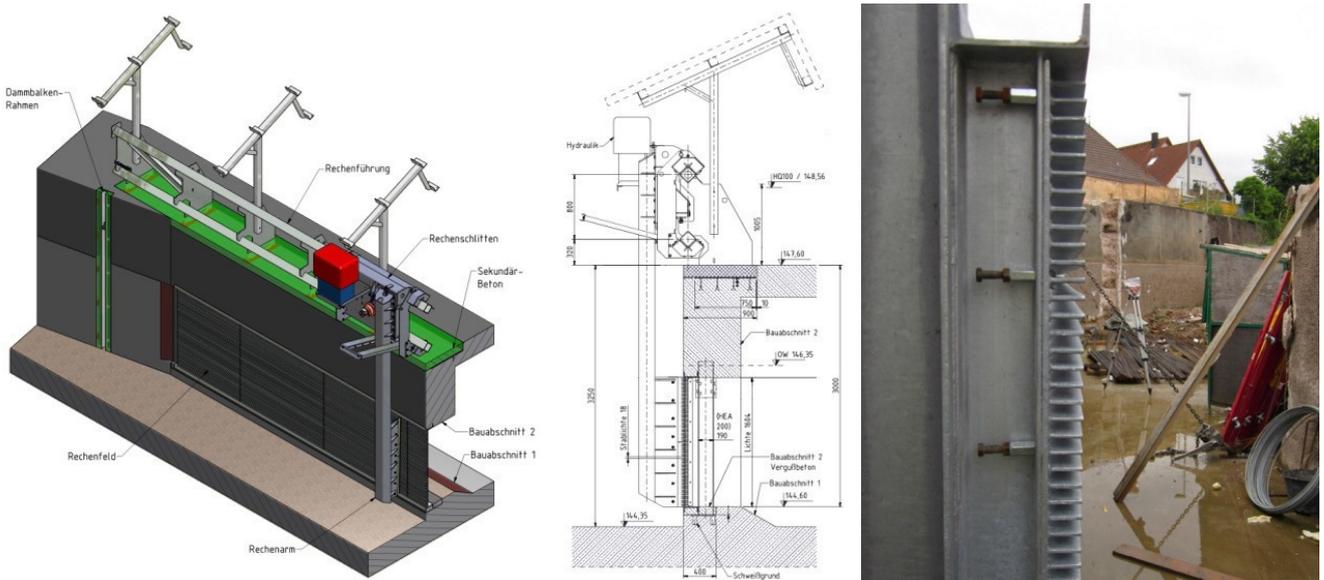


Abb. 65: Links 3D-Planausschnitt des Schrägrechens Ottenau, in der Mitte Planausschnitt des Rechenquerschnitts (*Quellen: Firma Jank im Auftrag der EnBW, 2012*). Rechts Foto des Rechenprofils mit den einzelnen Stäben (*Quelle: EnBW, 2012*).

## Messtechnik und Hydrometrie

Am Schrägrechen in Ottenau kam mit dem Nortek Vectrino das gleiche Messgerät zum Einsatz wie im Forschungslabor. Dieses wurde auf einem dreieckigen Fahrwagen montiert, welcher wiederum wie der Rechenschlitten auf der Rechenführung aufsaß (Abb. 66 links). Während der Messungen wurde die RRM aus Sicherheitsgründen ausgeschaltet. Damit vor jeder Messebene der Rechen wieder gereinigt werden konnte, musste der Fahrwagen manuell ausgehoben und die RRM ebenfalls manuell im Schaltschrank gestartet werden. Mittels verschiebbaren Aluminiumschienen und Rollen am Fahrwagen konnte so jeder der 162 Messpunkte aufgenommen werden (Abb. 66 rechts).



Abb. 66: Links für das Rechenschienensystem in Ottenau entworfener Messwagen auf der Rechenführung aufliegend und rechts in der Seitenansicht mit Aluschienen, an welchen das Messgerät befestigt war (*Quelle rechts: Schwab, 2016*).

### Beschreibung des Messrasters

Das Messraster wurde an die örtlichen Gegebenheiten und an die Konstruktion des Schrägrechens angepasst. Berücksichtigt wurden dabei auch Aspekte wie die Zugänglichkeit an das Messsystem, Arbeitssicherheit (Absturzgefahr) und die Gefahr des Quetschens beim Anfahren der RRM.

Wichtig war die Aufnahme eines engmaschigen Messrasters, um auch kleinräumige Abweichungen und Strömungsbeeinflussungen darstellen zu können. Der zeitliche Rahmen wurde so gewählt, dass eine Anströmgeschwindigkeit an einem Messtag aufgenommen werden sollte, um eine möglichst gleichmäßige Anströmung ohne starke Abflusszu- oder -abnahmen zu gewährleisten. Mittels Maschinenregelung bzw. Maschinendrosselung durch die EnBW-Fernwarte in Forbach, von wo aus das WKW Ottenau überwacht und gefahren wird, wurden konstante Anströmgeschwindigkeiten pro Messtag eingestellt. Dies wurde über die Kontinuitätsgleichung (Kap. 2.3, Gl. 1) mit Kenntnis des Einlaufquerschnitts  $A$  und der gewünschten Anströmgeschwindigkeit durchgeführt. Ungefähr vier Stunden nach Einstellung des Abflusses am flussauf liegenden Niederdruckwerk in Forbach stellte sich dieser Abfluss in Ottenau ein. Aufgrund diverser Kraftwerksbetreiber zwischen Forbach und Ottenau, welche teilweise unregelmäßigen Betrieb oder in einem Sunk- und Schwallbetrieb fahren, war es nicht möglich, die Anströmgeschwindigkeiten bzw. den Abfluss exakt einzustellen, so dass geringe Abweichungen zwischen der rechnerisch ermittelten Anströmgeschwindigkeit und der tatsächlich gemessenen resultierenden Anströmgeschwindigkeit vorhanden waren (Tab. 16).

Tab. 16: Messprogramm in Ottenau zur Aufnahme der Strömungssignaturen (*Quelle: verändert nach Schwab, 2016*).

Messtag	Anströmwinkel	Stababstand	gemittelte Anströmgeschwindigkeit	tatsächliche Anströmgeschwindigkeit
Tag 1 (07.12.2015)	45°	18 mm	0,5 m/s	0,47 m/s
Tag 2 (08.12.2015)			0,4 m/s	0,60 m/s
Tag 3 (09.12.2015)			0,7 m/s	0,58 m/s
Tag 4 (10.12.2015)			0,8 m/s	0,67 m/s

Das Koordinatensystem wurde aufgrund der Geometrie des Messwagens und der eingeschränkten Zugänglichkeit an den Kanalwänden orthogonal zum Schrägrechen und nicht orthogonal zum Kanal ausgerichtet, wie im Labor. Die x-Achse beschreibt somit den Abstand dreier Ebenen vom Rechen in Richtung Unterstrom und ist orthogonal zur Rechenebene ausgerichtet, nicht wie im Labor in Richtung der Anströmung. Die y-Komponente liegt parallel zur Rechenebene und besitzt mit dem Nullpunkt des Koordinatensystems insgesamt 18 Messpunk-

te vom Bypass bis zur Ruheposition des Rechenarms an der rechten Uferwand. Der Nullpunkt des Koordinatensystems (0/0/0) liegt am Bypasseinlauf und zeigt in positive Richtung zum Bypass hin (Abb. 67 und Abb. 68). Die z-Achse stellt die Tiefe des Reches in drei Ebenen von unten nach oben betrachtet dar (Abb. 68 und Abb. 69). Die Positionen der drei Messebenen auf x-Achse und z-Achse sind aufgrund der Lage des Koordinatensystems negativ (Tab. 17). Damit entspricht das Koordinatensystem in Ottenau dem des Vectrinos im Labor.

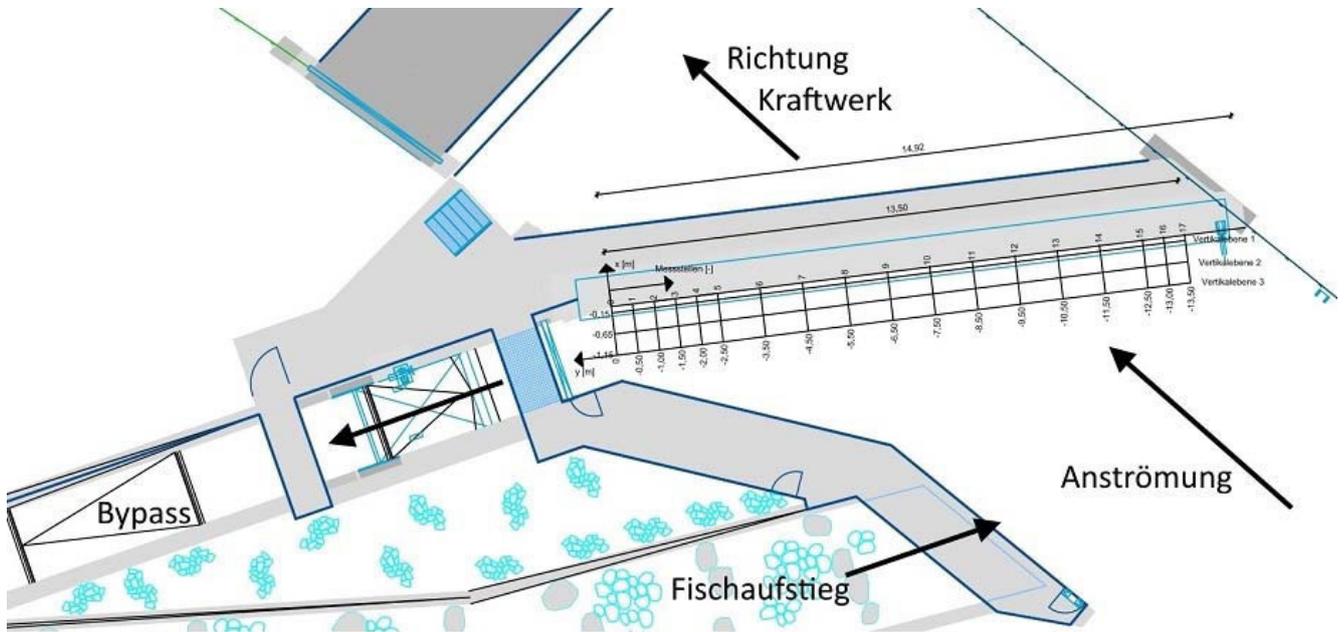


Abb. 67: Draufsicht auf den Schrägwehren Ottenau mit x- und y-Achse der hydrometrischen Messungen (Quelle: verändert nach Schwab, 2016).

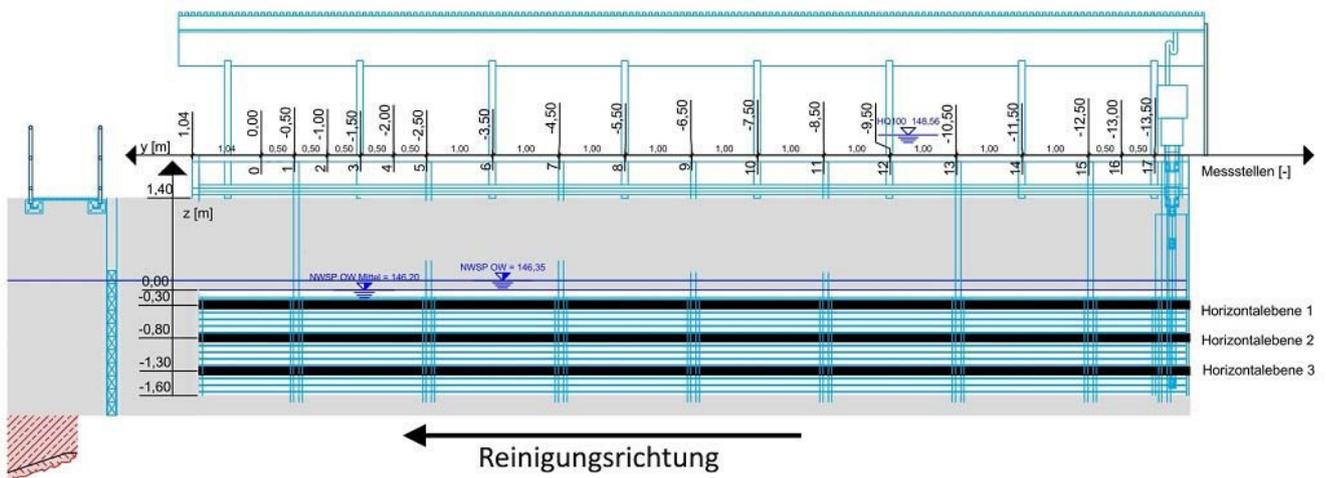


Abb. 68: Ansicht des Schrägwehres Ottenau mit Messstellen der hydrometrischen Messungen sowie der y- und z-Achse (Quelle: verändert nach Schwab, 2016).

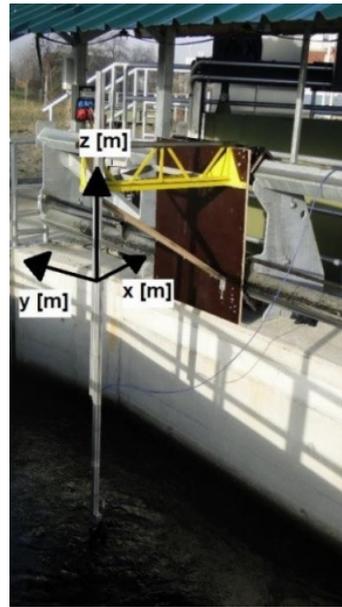
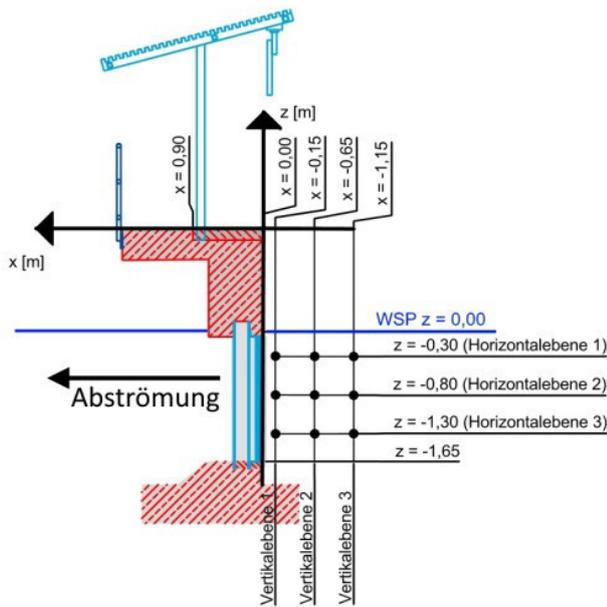


Abb. 69: Links Querschnitt des Schrägwehres Ottenau mit Messebenen auf der x-Achse sowie der z-Achse in die Tiefe (Quelle: verändert nach Schwab, 2016). Rechts Foto des Messwagens mit Messgerät samt Koordinatensystem (Quelle: Schwab, 2016).

Tab. 17: Positionen der Messebenen auf x- und y-Achse.

Horizontalebene	Vertikalebene
x-Achse	z-Achse
-0,15 m	-0,30 m
-0,65 m	-0,80 m
-1,15 m	-1,30 m

Begonnen wurde mit den Messungen analog zur Messkampagne im Forschungslabor im Nullpunkt des Koordinatensystems. Die Lage des Ursprungs war durch die Konstruktion des Messwagens auf der Rechenführung festgelegt und konnte daher nicht weiter Richtung Bypass verschoben werden, um dort zusätzliche Messpunkte aufzunehmen. Des Weiteren änderten sich die Geschwindigkeiten im Nahbereich der Klappe je nach Öffnungsgrad und Treibgutanteil vor deren v-förmigen Auslass. Gleiches galt für den letzten Messpunkt in y-Richtung (Nr. 17): Näher an die Ruheposition des Rechenarms konnte der Messwagen aus konstruktiven Gründen nicht fahren.

An jedem Messpunkt in y-Richtung ergaben sich drei Messpunkte in x-Richtung (XY-Ebenen) und drei in z-Richtung (YZ-Ebenen). Somit entstanden mit 18 Messpunkten insgesamt 162 Messpunkte pro aufgenommene Anströmgeschwindigkeit im Einlaufkanal.

Wichtig war die Aufnahme der Randbereiche hinsichtlich strömungsberuhigter Zonen, so dass rechts und links in y-Richtung ein engmaschigeres Raster von Messpunkten alle 0,50 m gewählt wurde. Im mittleren Kanal- bzw. Rechenbereich wurde der Abstand auf 1,00 m ausgeweitet. Somit konnten die 162 Messpunkte zeitlich an einem Tag aufgenommen werden.

#### 4.2.2. Ergebnisse

Wie bereits bei der Auswertung der Laboruntersuchungen, wurden auch die Daten der Messkampagne von Ottenau mittels Tecplot ausgewertet und Geschwindigkeitsprofile, Strömungsdiagramme in Draufsicht sowie Tiefenschnitte grafisch dargestellt.

Die Geschwindigkeitsprofile über die Tiefe wurden über den gesamten Messquerschnitt mit allen Messwerten ermittelt sowie mit fünf verschiedenen Abständen parallel zum Rechen dargestellt (Tab. 18). Es handelt sich bei ihnen um die YZ-Schnitte. Anhand dieser Schnitte können zum einen Aussagen über die Verteilung am Rechen

gemacht werden und zum anderen über die Änderung des Strömungsfelds mit steigender Entfernung Richtung Oberstrom. Die Ausrichtung der Strömungsvektoren in Tecplot erfolgt nach einem festgelegten Koordinatensystem (Kap. 4.2.1, Abb. 67 bis Abb. 69), die Messebenen (Tab. 17) wurden anhand der geometrischen Bedingungen des Schrägrechens Ottenau festgelegt.

Tab. 18: Positionen der x-Komponente der YZ-Schnitte der Geschwindigkeitsprofile am Schrägrechen Ottenau.

Schnitt	1	2	3	4	5
Position der x-Komponente [m]	0,00	-0,30	-0,60	-0,90	-1,15

Die Geschwindigkeitsprofile (Abb. 70) zeigen eine Abnahme der Geschwindigkeit über die Tiefe, unabhängig von eingestellter Anströmgeschwindigkeit (0,4 m/s, 0,5 m/s, 0,7 m/s und 0,8 m/s) oder gewählten Messabstand vom Rechen (Schnitt 1 bis 5, Tab. 18). Des Weiteren nimmt die resultierende Komponente der Strömungsvektoren  $v_{xyz}$  mit der über den Querschnitt gemittelten Anströmgeschwindigkeit zu. Mit steigendem Abstand zum Rechen (Schnitt 1 → Schnitt 5) werden die Geschwindigkeitsprofile etwas homogener, da sich in Richtung Oberstrom die Anströmverhältnisse vereinheitlichen und nicht durch den Schrägrechen einschließlich seiner Bauteile oder durch Treibgut am Rechen beeinflusst werden.

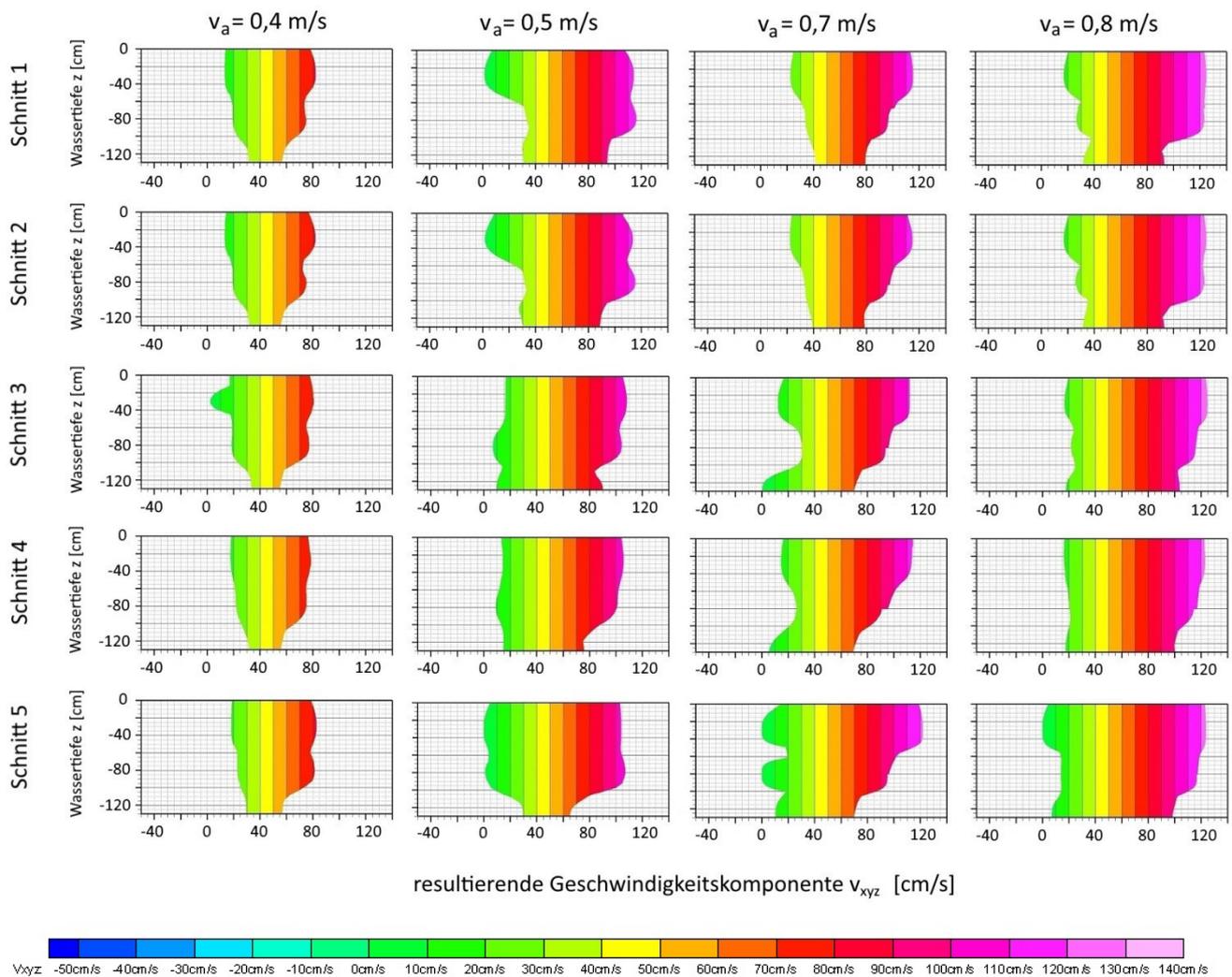


Abb. 70: Geschwindigkeitsprofile aller fünf Ebenen der x-Achse (Tab. 18) und aller eingestellten Anströmgeschwindigkeiten. Die Profilbilder sind über die Wassertiefe z aufgetragen und stellen den gesamten Messquerschnitt der gemessenen resultierenden Geschwindigkeitskomponente  $v_{xyz}$  für jede Anströmgeschwindigkeit und jeden Tiefenschnitt dar (Quelle: verändert nach Schwab, 2016).

Die Geschwindigkeitsvektoren der x- und y-Richtung des Koordinatensystems zeigen direkt am Rechen (Schnitt 1) oder nahe der Wasseroberfläche bei niedrigen Anströmgeschwindigkeiten auch negative Werte an, welche 30 cm unterhalb der Wasserspiegellage mit bis zu -0,5 m/s am größten sind (Abb. 71). Dies liegt an Quer- oder Rückströmungen in den betroffenen Bereichen, welche teilweise mit bloßem Auge zu erkennen sind. Solche Phänomene sind auf die Tauchwand zurückzuführen sowie auf mögliche inhomogene Anströmbedingungen, welche durch Geschwemmsel, Treibgut, Ablagerungen, Verlandungen etc. hervorgerufen oder verstärkt werden können. Diese Beobachtungen bzw. Messungen werden bei höheren Geschwindigkeiten ab 0,5 m/s nicht mehr gemacht. Bei höheren Anströmgeschwindigkeiten größer 0,5 m/s bildet sich die Hauptströmung stärker in Richtung Kraftwerk, also durch den Schrägwehre hindurch, aus. Konkurrenzströmungen, hervorgerufen durch den Bypass und den Fischaufstieg, werden bei größeren Abflüssen in Relation zur Hauptströmung kleiner und dadurch verringern sich auch mögliche Quer- oder Rückströmungen. Auch bei größerem Abstand zum Rechen (Schnitte 2 bis 5) ist diese Quer- oder Rückströmung weder mess- noch beobachtbar. Es besteht die Gefahr, dass solche Rückströmungen ggf. für die Fischerorientierung konkurrierende Strömungsbereiche darstellen und die Fische dann eher auf tiefere Wasserbereiche ohne Rückströmungen ausweichen. Auf den Einsatz einer Tauchwand kann aus betrieblicher und statischer Sicht nicht verzichtet werden. Eine regelmäßige Reinigung oder die Verkürzung der Reinigungsintervalle ist anzustreben bzw. die Pegeldifferenz vor/nach dem Rechen ist zu verkleinern. Diese Maßnahmen sorgen für weniger Verlandung und damit homogenere Anströmgebiete, erhöhen aber wiederum den Verschleiß von Rechenstäben und Rechenreinigungsmaschine.

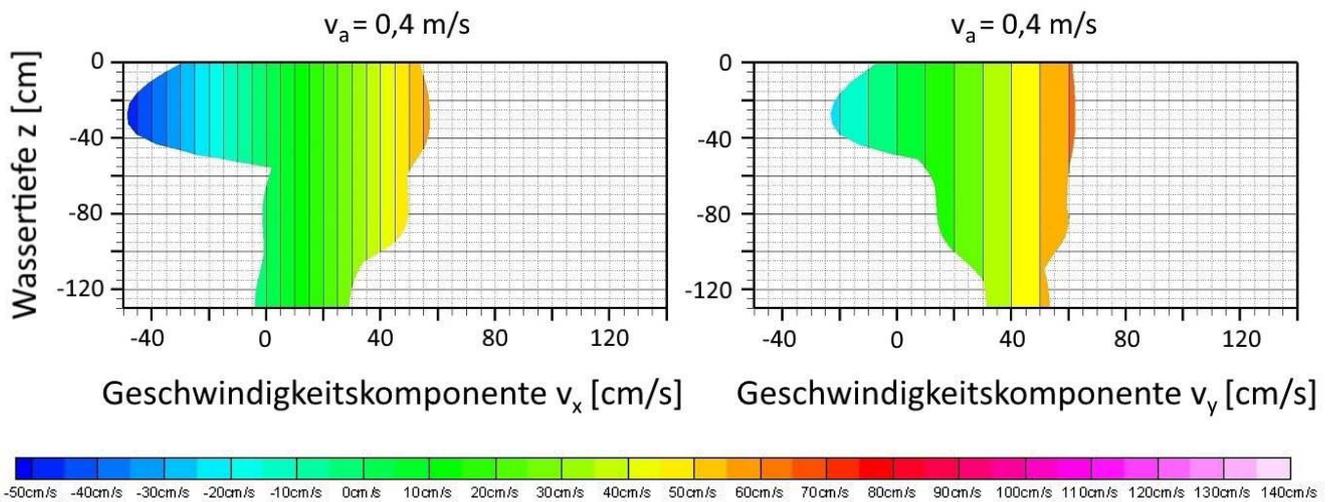
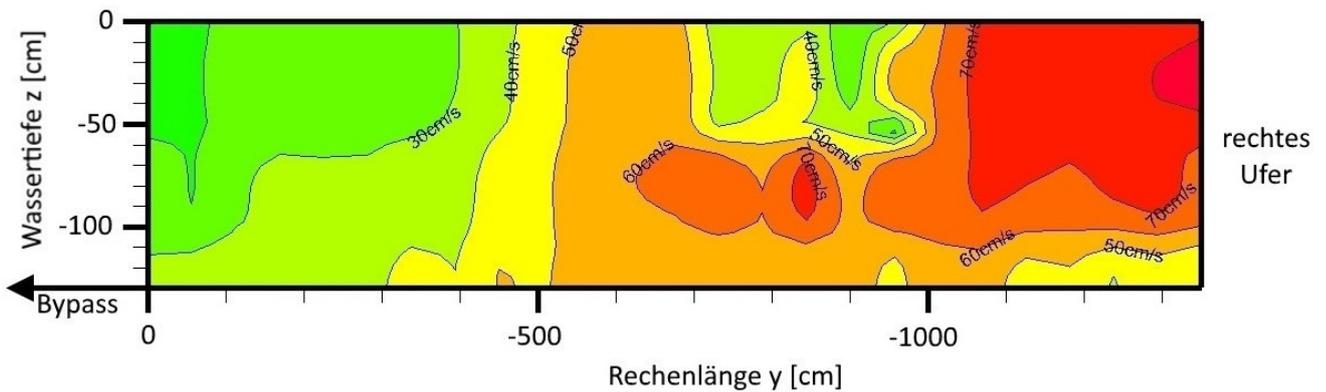


Abb. 71: Negative Geschwindigkeiten an der Wasseroberfläche in x- und y-Richtung bis zu -0,5 m/s durch Rück- und Querströmungen bei einer eingestellten Anströmgeschwindigkeit von 0,4 m/s. Die Schaubilder zeigen die Spanne der aufgetretenen Geschwindigkeiten über die Wassertiefe  $z$  im gesamten Messquerschnitt der XY-Ebene. *Quelle: verändert nach Schwab (2016).*

Die Tiefendiagramme (Abb. 72) sind in Fließrichtung dargestellt, die y-Achse zeigt in Richtung Bypass und befindet sich parallel zur Rechenebene. Der Einlauf in den Bypass befindet sich im Ursprung des Koordinatensystems bei  $y = 0 \text{ cm}$ , die Ruheposition der Rechenreinigungsmaschine bei  $y = -1450 \text{ cm}$  und das rechtsseitige Ufer bei  $y = -1492 \text{ cm}$ .

Unabhängig von den Anströmgeschwindigkeiten lässt sich erkennen, dass die Strömungsgeschwindigkeiten auf rechter Rechenseite höher sind und Richtung Bypass abnehmen. Die Abnahme erfolgt bei allen Geschwindigkeiten ab einem  $y$ -Wert von ca.  $y = -700 \text{ cm}$ , also ungefähr in der Hälfte der Rechenlänge (Abb. 72). Kreisrunde oder ellipsoide Felder geringerer Geschwindigkeiten können auf Verkläuerungen am Rechen oder auf Messfehler aufgrund des breiten Messrasters und der damit zusammenhängenden Interpolation von Daten zwischen den einzelnen Messwerten hindeuten.

a)  $v_a = 0,4 \text{ m/s}$



b)  $v_a = 0,5 \text{ m/s}$

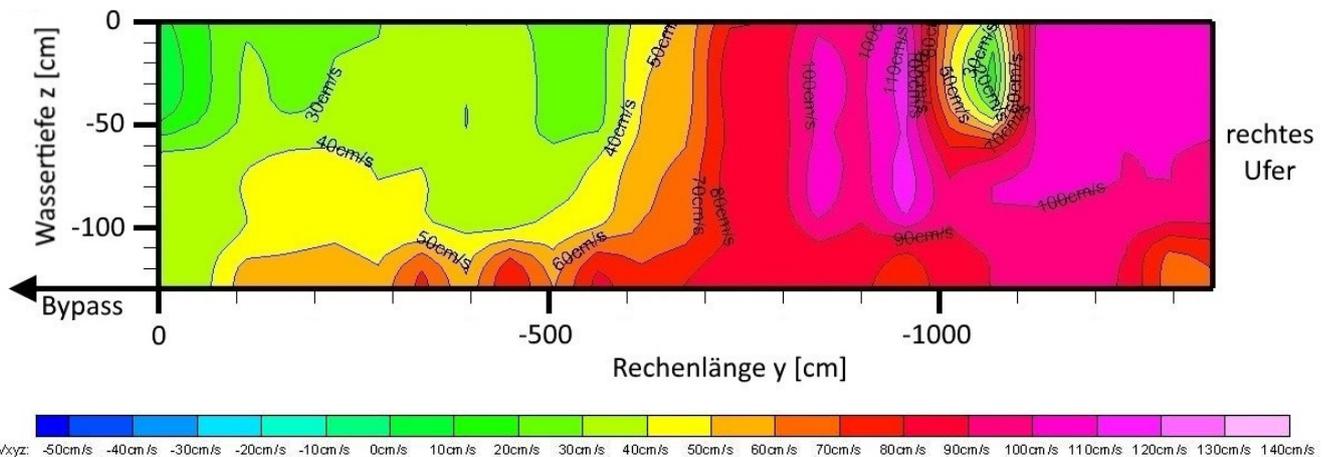


Abb. 72: Tiefendiagramme der Strömungsfelder parallel zur Rechenebene, a) bei einer Anströmgeschwindigkeit von 0,4 m/s und b) bei 0,5 m/s mit Blick in Fließrichtung/Unterwasser (Quelle: verändert nach Schwab, 2016).

Bedingt durch die bauliche Situation in Ottenau verläuft ein Teil der linken Rechenlänge in einer Einengung zum Bypass hin und wird nicht direkt von der Hauptströmung angeströmt. Darüber hinaus verläuft die Murg in einer leichten Linkskurve zum Rechen. Aufgrund dieser Flusskrümmung entstehen asymmetrische Fließquerschnitte. Die Außenufer (= Prallwände) weisen höhere Geschwindigkeiten auf als die Innenkurven (= Gleitufer). Diese Situation ist auch vor dem Schrägrechen in Ottenau vorhanden. Als weitere Ursache für die ungleichförmige Anströmung des Schrägrechens kann der Konkurrenzabfluss in Richtung Fischaufstiegsanlage herangezogen werden, welcher für eine geringere Anströmung des linken Rechenbereichs sorgt. Darüber hinaus war zum Zeitpunkt der Messkampagne vor dem Einlauf der Fischaufstiegsanlage eine Verlandung mit Kies vorhanden, welche sich auf die Symmetrie der Anströmung des Rechens ausgewirkt haben könnte. Solche Beeinflussungen sind stets standortspezifisch und bei Auswertungen und Interpretationen von Messergebnissen zu berücksichtigen (Abb. 73).

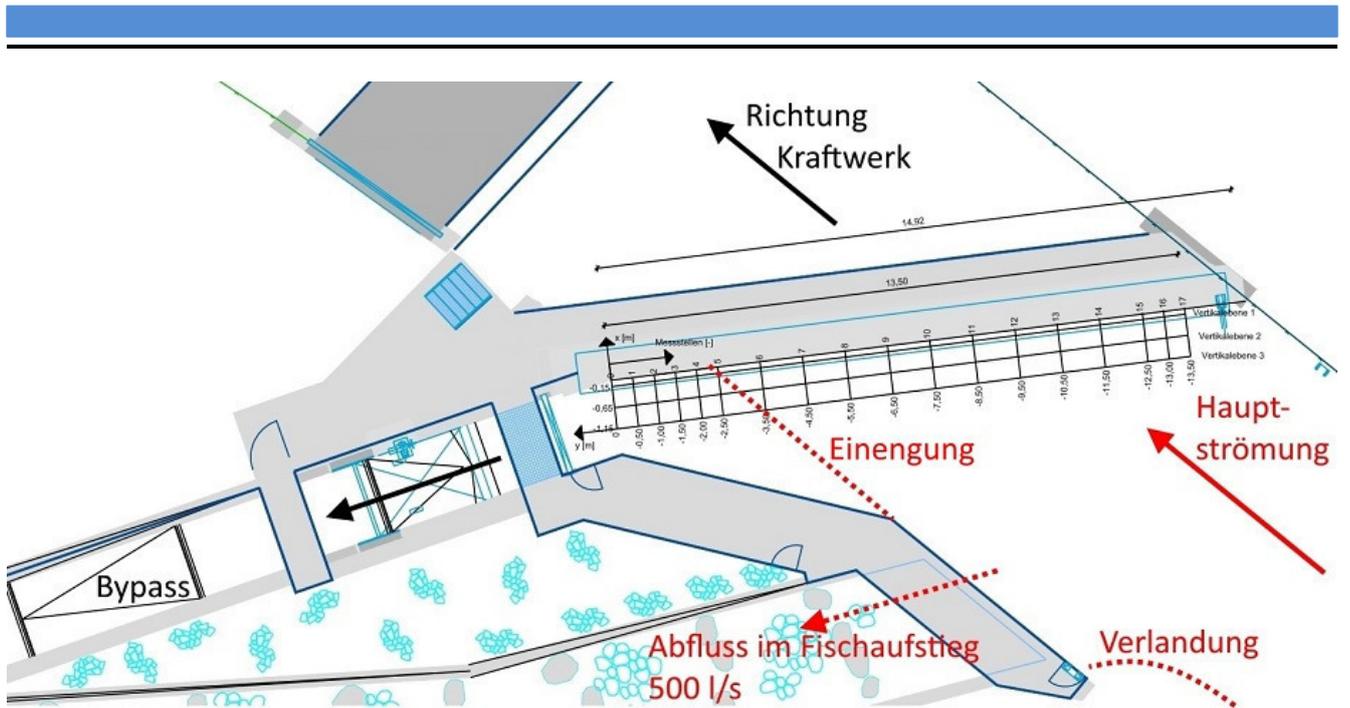


Abb. 73: Draufsicht auf den Anströmbereich des Schrägrechens Ottenau mit Gründen für das vorwiegend rechte Anströmen des Rechens.

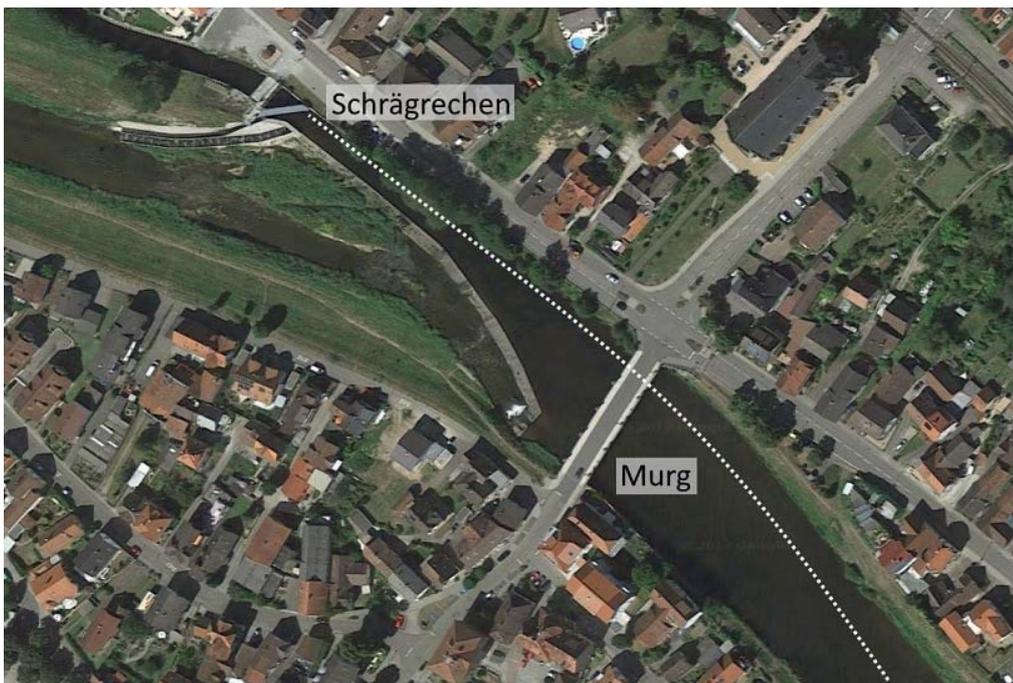


Abb. 74: Luftbild des Anströmbereichs am Schrägrechen Ottenau mit leichter Linkskurve der Murg (gestrichelt dargestellt) (Quelle: verändert nach Google.maps).

Die Strömungsdiagramme in der Draufsicht wurden in fünf Tiefenschnitten in z-Richtung ausgewertet (Tab. 19), welche anhand der Rechenkonstruktion über die Wassertiefe bzw. Rechenhöhe festgelegt wurden. Dabei entstanden die XY-Schnitte, mit denen Aussagen über die Geschwindigkeitsverteilung entlang des Rechens und in einem gewissen Abstand zum Rechen hin gemacht werden konnten.

Tab. 19: Positionen der z-Komponente der XY-Schnitte der Geschwindigkeitsprofile am Schrägreechen Ottenau.

Schnitt	1	2	3	4	5
Position der z-Komponente [m]	0,00	-0,30	-0,65	-1,00	-1,30

Die Strömungsdiagramme in der Draufsicht zeigen, dass sich die Strömungssignaturen mit steigendem Abstand zum Rechen in Richtung Oberstrom vereinheitlichen bzw. direkt an der Rechenebene inhomogen sind (Abb. 75). Dies liegt zum einen am Strömungshindernis Rechen, welcher einen Aufstau verursacht (Kap. 2.3), zum anderen an möglichen Verlandungen, der Wirkung des Tauchbalkens im Schnitt 1 sowie möglicherweise an der Konkurrenzströmung Richtung Bypass. Des Weiteren ist aus den Diagrammen ersichtlich, dass die Geschwindigkeiten an der Wasseroberfläche höher sind als in Richtung Sohle. Auch in dieser Darstellung (Abb. 75) ist erkennbar, dass die Strömung zunächst Richtung Bypass hin abnimmt (vgl. Abb. 72). Die Strömungsdiagramme der resultierenden Geschwindigkeitskomponente  $v_{xyz}$  bestätigen damit die oben gemachten Aussagen und Erkenntnisse.

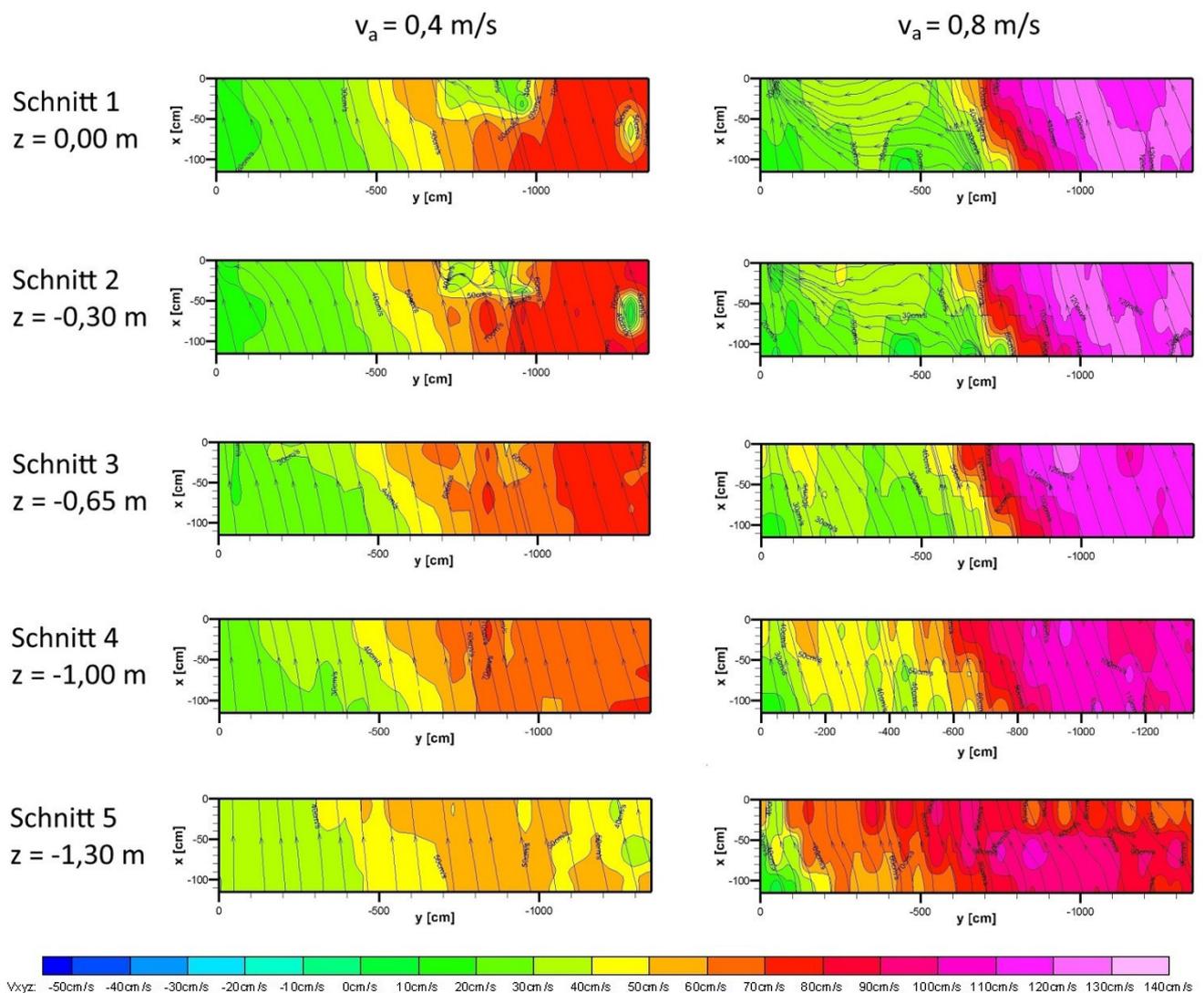


Abb. 75: Strömungsdiagramme der fünf Tiefenschichten (Tab. 19) der Wassertiefe  $z$  für die Anströmgeschwindigkeiten 0,4 m/s und 0,8 m/s (Quelle: verändert nach Schwab, 2016).

### 4.2.3. Vergleichende Messungen in Ottenau durch Hydro-Energie Roth GmbH (2014)

Im Rahmen der Bestandsaufnahme aller Wasserkraftanlagen an der Murg durch die *Hydro-Energie Roth GmbH* (2014) im Auftrag des zuständigen Regierungspräsidiums Karlsruhe wurden auch die Anströmgeschwindigkeiten am Schrägrechen in Ottenau aufgenommen. Es wurde ein ähnliches Messraster vor dem Schrägrechen aufgebaut, wie bei *Schwab* (2016) (vgl. Kap. 4.2.1). In y-Richtung parallel zum Rechen wurden 9 Messpunkte festgelegt, in z-Richtung (Tiefe) 3 Messpunkte. In x-Richtung (Entfernung zum Rechen Richtung Oberstrom) wurde lediglich eine Messebene aufgenommen.

Es wurde unter folgenden Rahmenbedingungen gemessen:

- durchschnittliche Anströmgeschwindigkeit von 0,69 m/s;
- gemessene Anströmgeschwindigkeiten mit einer Spannweite von 0,33 m/s bis 1,11 m/s.

Zum Einsatz kam das OTT MFpro Messgerät, welches die Ergebnisse direkt auf dem Display anzeigt. Aus den Ergebnissen wurden Strömungssignaturen erstellt, welche sich gut mit den Ottenau-Ergebnissen von *Schwab* decken: An der rechten Seite des Schrägrechen (oberstromiges Rechenende) sind die Geschwindigkeiten höher und nehmen Richtung Bypass (unterstromiges Rechenende) zunächst ab (Abb. 76). *Hydro-Energie Roth GmbH* erwähnt, dass diese Anströmgeschwindigkeiten im Nahfeld des Bypasses (außerhalb des Messrasters) jedoch wieder zunehmen. Des Weiteren nehmen laut den Messergebnissen von *Hydro-Energie Roth GmbH* (2014) die Geschwindigkeiten zur Sohle hin ab.

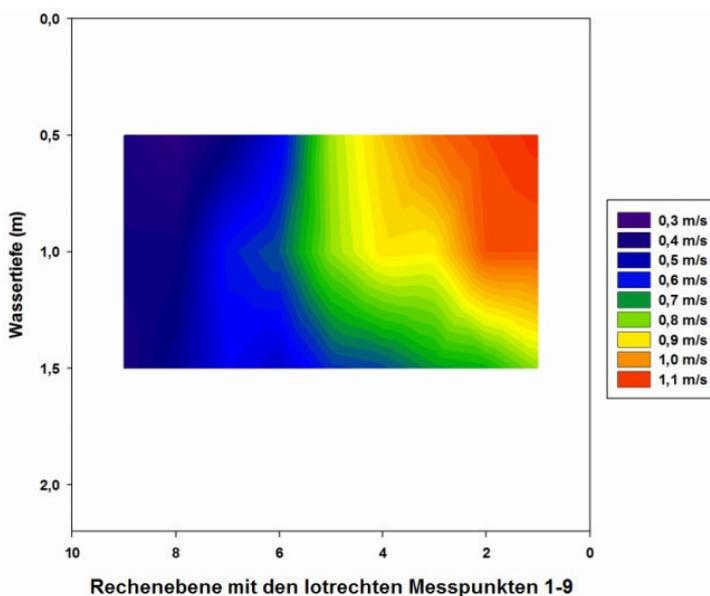


Abb. 76: Strömungsdiagramm mit Blick in Fließrichtung auf den Schrägrechen Ottenau mit der Wassertiefe als z-Achse und der Rechenebene als y-Achse (Quelle: verändert nach *Hydro-Energie Roth GmbH*, 2014).

### 4.3. Übertragbarkeit der Ergebnisse aus Labor- und Feldmessungen

Zur Verifizierung der Laboruntersuchungen und zur Überprüfung, ob eine Übertragbarkeit der Messergebnisse auf Feldanlagen zulässig ist, wurde eine Gegenüberstellung der Erkenntnisse und der Versuchsaufbauten durchgeführt.

#### 4.3.1. Unterschiede der Versuchsaufbauten

Es wurde angestrebt, den Schrägrechen Ottenau für die Laborrinne mit einer größtmöglichen situativen Ähnlichkeit nachzustellen. Trotz allem bestanden zwischen den Versuchsaufbauten im wasserbaulichen Forschungslabor und der Feldanlage in Ottenau Unterschiede, welche nicht beseitigt werden konnten:

- **Konstruktion:** Der Schrägrechen im Labor wurde in Anlehnung an die Konstruktion des Schrägrechens in Ottenau gebaut. So wurden gleiche Anströmwinkel, Stababstände, Stabdicken, Stabprofile und Anströmgeschwindigkeiten gewählt (Kap. 4.1.1 und Kap. 4.2.1). Damit der Schrägrechen in Ottenau auch ausreichend Widerstand gegen Lasten aus Hochwasserereignissen bietet, wurde ein massiver Hinterbau bzw. eine kompakte Stützkonstruktion erstellt, welche der Schrägrechen im Labor nicht benötigte. Damit lag der Verbaugungsgrad im Labor bei lediglich 0,45 gegenüber Ottenau mit 0,54. Der Verbaugungsgrad stellt einen wesentlichen Einflussfaktor auf die Rechenverluste dar und wirkt sich damit auf die An-, Durch- und Abströmung des Rechens aus (Kap. 2.6.1 und Kap. 3.5).
- **Verlandung:** Einflüsse aus allmählicher Verlandung durch Treibgut, Geschwemmsel usw. wurden im Labor nicht untersucht ( $V_{Re} = 0$ ). Zwar wurde im Feld nach jeder Messebene in x-Richtung der Rechen durch die manuelle Betätigung der RRM gereinigt, jedoch muss davon ausgegangen werden, dass der Schrägrechen immer eine gewisse Verlegung aufzeigte, deren Lage nicht zu bestimmen war.
- **Anströmgeschwindigkeiten:** Die eingestellten Anströmgeschwindigkeiten waren während der gesamten Versuchsdauer im Labor konstant und wurden laufend überprüft. In Ottenau steuerte die Fernwarte in Forbach den Abfluss, andere dazwischen liegende Kraftwerksbetreiber konnten durch deren Betriebsweise den Abfluss verändern oder behindern, so dass über die Dauer der Versuche geringe Abflussschwankungen auftreten konnten.
- **Inhomogene Anströmung:** Die Linkskurve der Murg vor und im Einlaufkanal verursachte inhomogene und ungleichmäßige Anströmungen des Schrägrechens. Der Rechen im Labor hingegen wurde vom gesamten Rinnenabfluss gleichmäßig angeströmt, da die Versuchsrinne ohne Kurven geradlinig verlaufen.
- **Wassertiefe:** Die Wassertiefe im Labor betrug zwischen 0,60 m und 0,80 m und lag damit unter der Wassertiefe in Ottenau mit 2,00 m vor dem Schrägrechen. Tiefenprofile waren daher auf die jeweiligen Wassertiefen anzuwenden und konnten nicht 1:1 übertragen werden. Des Weiteren spielte bei den Tiefenprofilen von Ottenau auch die Tauchwand mit 0,15 m sowie der Sohlbalken mit 0,25 m eine Rolle, welche im Labor nicht (keine Tauchwand) bzw. nur in kleiner Ausführung (Sohlbalken mit 0,05 m) nachgebaut wurden.
- **Bypassanordnung:** Die Anordnung des Bypasses im Forschungslabor erfolgte seitlich des Schrägrechens, parallel in Fließrichtung und lag innerhalb der 2 m breiten Versuchsrinne. In Ottenau hingegen war der Bypass in Verlängerung des Schrägrechens außerhalb der Hauptströmung angeordnet.
- **Einschwimmen in den Bypass:** In Ottenau wurde nur oberflächennah Wasser in den Bypass abgegeben, im Labor war der Bypass als 20 cm breiter Schlitz über die gesamte Wassersäule hin geöffnet. Die Anströmung im Nahfeld des Bypasseinlaufs gestaltete sich daher jeweils unterschiedlich. In Ottenau richteten sich die Stromlinien Richtung Bypass (links Rechenseite) in positiver z-Richtung zur Wasseroberfläche bzw. dem Wehrüberfall hin nach oben aus (Abb. 77).

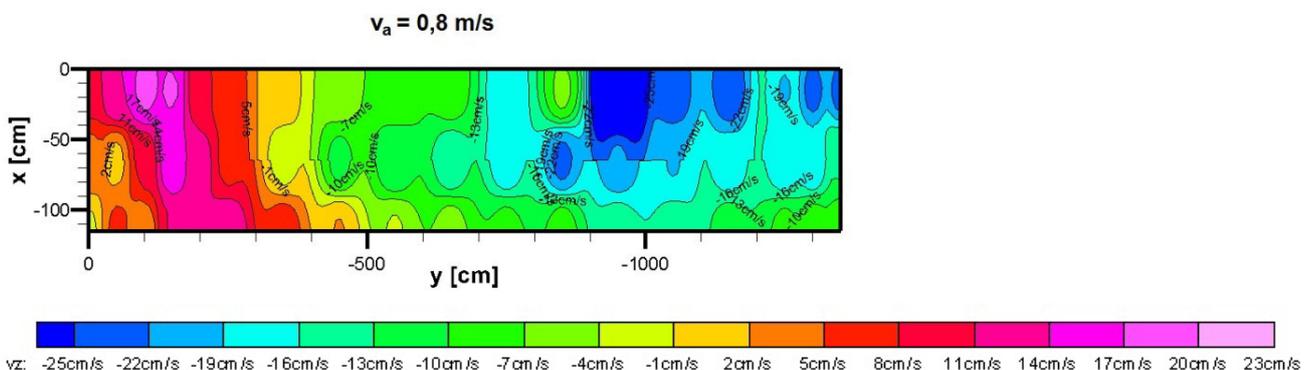


Abb. 77: Strömungsdiagramm mit Darstellung der z-Komponente der Strömungsgeschwindigkeit des Schrägrechens Ottenau im Schnitt 5 ( $z = -1,30 \text{ m}$ ) und mit einer Anströmgeschwindigkeit von  $0,8 \text{ m/s}$  (Quelle: verändert nach Schwab, 2016).

---

### 4.3.2. Ergebnisse und Fazit

Sowohl im Feld als auch im Labor war aus den gemessenen Geschwindigkeitsverteilungen ersichtlich, dass die Strömungssignaturen direkt vor der Rechenebene die größten Inhomogenitäten zeigten und sich mit Abstand Richtung Oberwasser vereinheitlichten. Darüber hinaus konnte eine Abnahme der Geschwindigkeit zur Sohle hin in Ottenau festgestellt werden, im Forschungslabor jedoch nicht, was dort an der geringen Wassertiefe und der glatten Sohle mit einer geringen Sohlrauheit lag.

Der Abfluss über den Bypass im Forschungslabor betrug 10% des jeweilig eingestellten Abflusses, also ca. 63 l/s bis 96 l/s. Der Betriebsabfluss im Bypass Ottenau wird über einen oberflächennahen vollkommenen Wehrüberfall an der Klappe erzeugt und beträgt unabhängig vom Turbinenabfluss konstant 800 l/s, was einer Wassermenge zwischen 6% (bei  $Q_A = 14 \text{ m}^3/\text{s}$  und einer Anströmgeschwindigkeit von 0,8 m/s) und 11% (bei  $Q_A = 7 \text{ m}^3/\text{s}$  und einer Anströmgeschwindigkeit von 0,4 m/s) des Gesamtabflusses Richtung Kraftwerk entspricht. Der Abflussanteil des Bypasses in Ottenau deckt sich damit nahezu mit dem im Labor.

Größere Bedeutung als die reine Abflussmenge in Litern pro Sekunde kommt der Geschwindigkeitsverteilung vor dem Bypass zu. Die Anströmgeschwindigkeiten am Bypasseinlauf lagen im Forschungslabor bei maximal ca. 1,10 m/s (Abb. 59 bis Abb. 62), die Anströmgeschwindigkeiten im Nahfeld des Bypasseinlaufs in Ottenau konnten aufgrund des Versuchsaufbaus nicht ermittelt werden.

In Ottenau ist entlang der Rechenebene in Richtung Bypass zunächst eine Abnahme der Geschwindigkeitsprofile erkennbar, was hauptsächlich an der baulichen Anordnung des Rechens zum Bypass und zur Fischaufstiegsanlage sowie innerhalb des nicht geradlinig verlaufenden Einlaufkanals liegt (Abb. 73 und Abb. 74). Auf den letzten Metern zum Bypass hin konnte vor Ort beobachtet werden, dass die Geschwindigkeiten zunehmen, da sich hier der Querschnitt bis zum Überfall an der Fischabstiegsklappe langsam einengte. Diese Geschwindigkeitszunahme zum Bypass hin war auch im Labor ersichtlich (Abb. 59 bis Abb. 62).

Auch direkt am Schrägrechen bildeten sich sowohl in Ottenau als auch im Forschungslabor noch homogene Zonen gleicher Anströmgeschwindigkeit aus, welche in Ottenau jedoch vom Verlegungsgrad abhängig waren.

Strömungsberuhigte Bereiche sowie Bereiche mit hohen Geschwindigkeiten bildeten sich ebenfalls an beiden untersuchten Schrägrechen aus. Deren Lage ist durch Einbauten, wie Sohlschwelle, Tauchbalken, Leitbleche, Rechenreinigungsmaschinen und der Verlegung beeinflusst.

Zusammenfassend waren aus hydraulischer Sicht beide untersuchten Anströmsituationen ähnlich komplex: Sowohl bei der Labor- als auch bei der Feldanlage prägten Sekundärströmungen das Abflussgeschehen unmittelbar vor dem Schrägrechen. Diese unterschieden sich zwar hinsichtlich der Beträge und Richtungen, wirkten jedoch innerhalb der gleichen Reaktionsräume. Daher kann davon ausgegangen werden, dass die Verhaltensweisen der Fische sowohl im Labor als auch im Feld von eben diesen Strömungen beeinflusst werden. Darauf gilt es im weiteren Verlauf dieser Arbeit gesondert zu achten.

---

## 5. Ethohydraulik und verhaltensbiologische Grundlagen

---

Die Transdisziplin der Ethohydraulik vereint zwei Forschungsgebiete: Die vergleichende Verhaltensforschung sowie die Strömungsmechanik. Beide Disziplinen werden in der Ethohydraulik angewandt, indem Biologen und Ingenieure eng zusammenarbeiten. Die Ethohydraulik umfasst damit die verhaltensrelevanten sowie die ingenieurwissenschaftlichen Anforderungen an wasserbauliche Einrichtungen und Gewässer (*Adam et al.*, 2011).

### 5.1. Grundlagen

Der Ausdruck der Ethohydraulik setzt sich einerseits aus der Ethologie und andererseits aus der Hydraulik zusammen. In Ethologie steht *ethos* (griechisch) für Charakter, Gewohnheit, Sitte, wonach Ethologie im Wortsinne „Die Lehre von den Gewohnheiten“ entspricht. Hier wird das Verhalten von Mensch und Tier auf bestimmte Einzelreize hin untersucht. Die Hydraulik lässt sich vom griechischen *hydor* ableiten, was Wasser bedeutet. Sie ist die Disziplin der Strömungen in offenen und geschlossenen Gerinnen und damit ein Teilgebiet der Mechanik (*Wikipedia*, 2017 und vgl. Kap. 2.3).

Die Ethohydraulik dient seit mehreren Jahren der vergleichenden Verhaltensforschung bei Fischen, indem deren Verhaltensmuster auf bestimmte Reize hin im wasserbaulichen und hydraulischen Modell hin untersucht, ausgewertet und wenn möglich auf reale Anlagen übertragen werden. Ethohydraulische Laborstudien haben den Vorteil, dass die Strömungsbedingungen variabel angepasst sowie Gewässereinbauten wie z. B. Schrägrechen schnell und einfach hinsichtlich ihrer hydraulischen und geometrischen Anordnung verändert werden können. Auch ist eine Beobachtung und Analyse des Verhaltens in einer Laborrinne einfacher zu realisieren und durchzuführen, als unter Naturbeobachtungen. In Kombination mit Freilanduntersuchungen können die Ergebnisse der Laborstudien gezielt verifiziert werden, so dass – wenn möglich – Labor- und Freilandstudien durchgeführt werden sollten, um belastbare Ergebnisse zu erhalten.

Die ersten Laborversuche mit Fischen gehen auf die 1930er Jahre zurück (*Adam et al.*, 2011), doch erst seit den 1990er Jahren mehrten sich die Anzahl und Vielfalt der Laborstudien. Dies ist sicherlich auf das in diesem Zeitraum gestiegene Bewusstsein für die Bedeutsamkeit von Fluss- und Gewässerzuständen und der Einführung der EU-WRRL zurückzuführen. Die letzte große ethohydraulische Versuchsreihe im wasserbaulichen Forschungslabor der TU Darmstadt fand 2013 bis 2015 statt und beinhaltete Studien für die Verbesserung des Fischschutzes im Hinblick auf Bypassöffnungen und die daran anschließenden Strukturen (*Lehman et al.*, 2016).

Standards für die Durchführung von ethohydraulischen Tests wurden zum ersten Mal von *Adam et al.* (2011) beschrieben. Im Rahmen dieser Vorgaben wurde auf mögliche Missinterpretationen bzw. auf das unterschiedliche Beschreiben gleicher Verhaltensmuster aufgrund unterschiedlicher Versuchsdurchführung und Ergebnisauswertung hingewiesen.

Bei ethohydraulischen Studien muss darauf geachtet werden, dass die strömungsmechanischen Bedingungen der physikalischen Modelle im Labor so weit wie möglich den Freilandbedingungen entsprechen, um das Fischverhalten situativ ähnlich untersuchen zu können. Zwar bildet das Labor immer nur einen kleinen Bereich der natürlichen Bedingungen ab, jedoch ist dieser so weit wie möglich anzupassen, z. B. anhand Strömungsgeschwindigkeiten in der Laborrinne oder Lichtverhältnissen. Hydraulische oder geometrische Parameter von Schrägrechen (vgl. Kap. 2.6.1), die einen Einfluss auf die Fische erwarten lassen, sind wenn möglich, so real wie möglich abzubilden.

Um diese Laborbedingungen zu realisieren, gliedert sich die Ethohydraulik in drei Phasen (Abb. 78). Im Präprozess wird der Versuchsaufbau im Labor festgelegt sowie dessen geometrische und hydraulische Randbedingungen. Um reale Situationen abzubilden, müssen diese häufig im Vorfeld mittels Messungen aufgenommen und im Labor nachgebildet werden: Die situative Ähnlichkeit wird soweit wie möglich hergestellt. Diese besteht aus der Vergleichbarkeit von in der Natur vorkommenden fischverhaltensrelevanten baulichen und/oder hydraulischen Situationen und der für die ethohydraulischen Versuche gestalteten physikalischen Modelle im Labor. Die ethohydraulischen Tests bilden die zweite Phase der Ethohydraulik. Hier werden Versuchsfische in einzelnen Setups (Konfiguration aus hydraulischen und geometrischen Parametern der Laborrinne und des untersuchten Bauwerks) untersucht und deren Verhaltensweisen identifiziert und analysiert. Es folgt ein Abgleich mit der

Strömungssignatur dieses Setups, so dass aus Verhalten und Strömungssituation eine ethohydraulische Signatur entsteht.

In der Transferphase werden die Ergebnisse auf die reale Freilandsituation übertragen und bewertet. So wird es möglich, Parameter, Grenzwerte und Empfehlungen für die wasserbauliche Praxis und für die Planung konkreter Maßnahmen zu liefern (Adam et al., 2011).

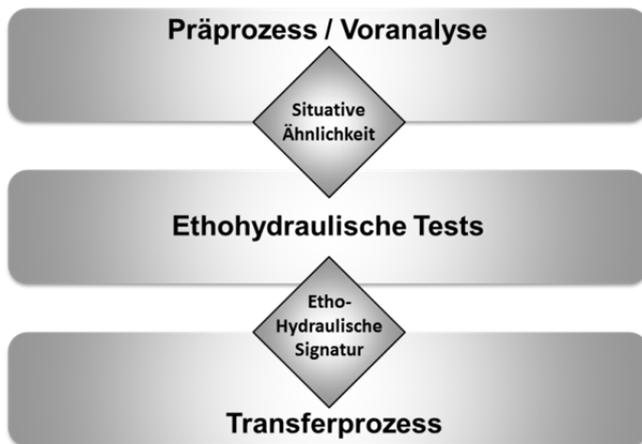


Abb. 78: Gliederung der Ethohydraulik in 3 Phasen (Quelle: verändert nach Adam et al., 2011).

## 5.2. Genehmigungs- und tierschutzrechtliche Grundlagen für die Labor- und Freilandstudien

### Genehmigungssituation

Ethohydraulische Versuche mit Fischen im Labor und an Feldanlagen unterliegen in Deutschland dem Tierschutzgesetz (TierSchG 2013) und werden nach § 7 als Tierversuche eingestuft, „wenn sie mit Schmerzen, Leiden oder Schäden für diese Tiere“ verbunden sind. Das TierSchG regelt den Umgang mit lebenden Tieren und ihrer Haltung, auch zu wissenschaftlichen Zwecken und schreibt Anforderungen an Personen vor, die mit den Labortieren umgehen und Experimente mit ihnen durchführen. Dies betrifft auch Umweltmonitorings und Umweltverträglichkeitsprüfungen.

Sobald Untersuchungen an Wirbeltieren erfolgen, werden diese vor dem Gesetz mit medizinischen oder operativen Tests gleichgesetzt und unterliegen somit einer Genehmigungspflicht, wie auch im vorliegenden Fall dieser Forschungsarbeit. Hier wurde im Vorfeld der ethohydraulischen Arbeiten durch den Tierschutzbeauftragten der TU Darmstadt bei der zuständigen Veterinärbehörde, dem Regierungspräsidium Darmstadt, eine Genehmigung für die Durchführung der ethohydraulischen Tests mit Lachssmolts und Aalen beantragt. Die Genehmigung für die Lachssmoltversuche vom 16.03.2016 sowie die der Aalversuche vom 18.10.2016 (fernmündlich am 14.10.2016) bildeten die rechtliche Grundlage für die ethohydraulischen Laborversuche im Rahmen dieser Forschungsarbeit. Die telemetrischen Freilandversuche mit Lachssmolts und Aalen in der Murg beantragte die EnBW AG beim zuständigen Regierungspräsidium Karlsruhe und wurde von diesem am 30.03.2016 genehmigt.

Die temporäre Installation der Elektroscheuchanlage am Kanaleinlauf des Wasserkraftwerks Rotenfels an der Murg musste durch eine entsprechende wasserrechtliche Erlaubnis des Landratsamtes Rastatt genehmigt werden, da es sich um Einbauten in ein Gewässer und damit um eine zeitliche Beeinträchtigung der Murg handelt. Derartige Einbauten – egal ob temporär oder dauerhaft – müssen nach dem Wassergesetz (WG) beantragt und genehmigt werden. Die wasserrechtliche Erlaubnis für den Einbau der Elektroscheuchanlage vorangegangener Studien wurde am 11.09.2014 erteilt und mit Zustimmung des Landratsamtes vom 04.10.2016 für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Aalversuche verlängert. Am 24.01.2017 erging vom Landratsamt Rastatt eine nochmalige Erlaubnis zur Projektverlängerung bis zum 31.03.2017.

Die Erlaubnis zur Hälterung von Tieren zu wissenschaftlichen Zwecken (TierSchVersV 2013) wurde der TU Darmstadt vom zuständigen Amt für Veterinärwesen und Verbraucherschutz am 02.04.2014 erteilt.

## Umgang mit den Versuchstieren

Zusätzlich zu den Anforderungen des TierSchG wurden vom Projektteam folgende Maßnahmen durchgeführt, um die Experimente im Labor für die Fische so schonend wie möglich zu gestalten:

- Erwerb von 413 Lachssmolts von aquaFUTURE e.K. (Hasper Talsperre, 58135 Hagen) und von 500 Aalen des Catch & Carry Programms der EnBW AG am Neckar (Elektrobefischung), des Catch & Carry Programms der E.on am Main (Schokker-Aale) sowie von einer Fangaktion des Regierungspräsidiums Karlsruhe am Rhein bei Iffezheim (Elektrobefischung).
- Hälterung von mehreren Stunden bis Tagen bis zum Abtransport, die in belüfteten Behältern mit Wasser aus den jeweiligen Fließgewässern mit dem Ziel erfolgte, den Stresslevel der Tiere zu senken.
- Transport der Versuchstiere mittels belüfteten Hälterungen an die TU Darmstadt.
- Langsame Anpassung der Wassertemperatur der Transporthälterungen (ca. 11°) an die relativ warmen Temperaturen des Wasserbaulabors (ca. 18°C bis 20°C) über mehrere Stunden.
- Hälterung der Fische in Langstrombecken des Wasserbaulabors (Abb. 79) sowie tägliche Kontrolle der Wassertemperatur, Wasserstand und des Befindens der Fische.
- Schonender Transport zur Laborrinne in Boxen, welche mit Wasser aus den Hälterungen gefüllt wurden.
- Engmaschige Netzeinbauten als Schutzmechanismen an Ein- und Auslauf der Laborrinne zum Schutz der Tiere gegen Einschwimmen in den Pumpenkreislauf.
- Nach einer Woche wurden die Fische am Freitagnachmittag in belüfteten Hälterungen zum Rhein transportiert und dort schonend im Gewässer freigelassen. Zu Beginn der nächsten Versuchswoche wurden neue Fische antransportiert.



Abb. 79: Hälterung im wasserbaulichen Forschungslabor mit Frischwasserzuleitung und Belüftung.

Für die Freilandversuche an den Wasserkraftwerken Ottenau und Rotenfels galt es ebenfalls die Fische schonend und möglichst stressfrei zu behandeln:

- Erwerb von 60 Lachssmolts von der Lachszucht Wolfstal (77709 Oberwolfach) des Landesfischereiverbandes Baden-Württemberg und von 124 Aalen des Catch & Carry Programms der E.on am Main (Schokker-Aale).
- Hälterung der Fische über mehrere Tage in belüfteten Behältern mit Wasser aus dem jeweiligen Fließgewässer, um das Stresslevel zu senken.
- Transport der Versuchstiere mittels belüfteten Hälterungen an das Wasserkraftwerk Rotenfels (hier wurden in Vergangenheit bereits Hälterungen aufgebaut, so dass das örtliche Equipment wiederverwendet wurde (vgl. Kap. 7.4.2)).
- Frischwasserzufuhr aus der Murg in die Behälter, so dass die Temperatur in den Hälterungen die der Murg entsprach.

- Betäubung/Narkotisierung der Fische einzeln in separaten Behältern mittels Nelkenöl (Wirkstoff: Eugenol, Konzentration 2 ml pro 10 Liter Wasser bei Lachssmolts und 4 ml pro 10 Liter Wasser bei Aalen)
- Sobald die Fische betäubt waren, wurden ihnen operativ in die Bauchhöhle die Sender implantiert, die Antennen der Sender hingen aus der Bauchhöhle heraus. Die Bauchhöhlen wurden anschließend zugenäht. Für diesen operativen Eingriff wurden spezielle Fischhalterungssysteme von den zuständigen Ökologen von IUS Weibel & Ness hergestellt (Abb. 80), um zügig und sauber arbeiten zu können.
- Nach Abschluss der Operation wurden die Fische in einen sogenannten Aufwachbehälter gesetzt. Sobald sie sich wieder normal verhielten, kamen sie in eine der großen Haltungen zurück.
- Transport mittels Haltungen an den nur wenige Kilometer entfernten Einsetzort oberhalb des Wasserkraftwerks Ottenau mit Einsetzen der Fische in einen strömungsberuhigten Bereich.



Abb. 80: Links Haltung der Lachssmolts in Rotenfels, rechts OP-Fischhalterung mit einem Aal zum Einsetzen des Senders in dessen Bauchhöhle.

### 5.3. Biologie und Verhaltensweise der eingesetzten Versuchstiere

Dieses Kapitel zur Biologie und zur Lebensweise der Versuchstiere soll einen Einblick in die Fischbiologie geben und dabei aufzeigen, welche zum Teil großen Unterschiede zwischen beiden verwendeten Fischarten bestehen und warum sie für die durchgeführten ethohydraulischen Versuche ausgewählt wurden.

Verhaltensbiologische Grundlagen sind maßgebend für den Erfolg eines Schutzsystems. Verschiedene Verhaltens- und Bewegungsmuster können anhand reizauslösender geometrischer oder hydraulischer Rahmenbedingungen wie Stababstand, Anströmwinkel oder Anströmgeschwindigkeit am Rechen beobachtet und mittels verschiedener Modelle (z. B. nach *Pakhorukov & Kuragina (1978)*, *Pavlov (1989)* oder *O'Keefee & Turnpenny (2005)*) abgebildet werden. Für die praktische Bemessung ist die leistungsschwächste Zielfischart zu verwenden (*Ebel et al., 2015*). Solche Modelle wurden an Schrägrechen bisher noch nicht entwickelt.

Die Wirkung der geometrischen und hydraulischen Parameter auf Fische wird nach *Adam et al. (1997)* Primärwirkung genannt. Die Sekundärwirkung beschreibt den kurzzeitigen leichten Kontakt mit dem Rechen, die Tertiärwirkung die reine mechanische Blockadewirkung der Barriere. Zusätzlich können bei Fischen Suchbewegungen vor dem Rechen wahrgenommen werden (*Hübner et al., 2011*). In den hier durchgeführten ethohydraulischen Studien geht es um alle vier Wirkungsweisen, also um verschiedene Fischverhaltensmuster, welche vor oder am Schrägrechen auftreten können.

Prinzipiell muss eine mechanische Barriere so bemessen werden, dass die Zielarten nicht hindurchschwimmen können. Basis für die Beurteilung der Barrierewirkung von Schrägrechen bildet bislang hauptsächlich die Körperhöhe der Fische, welche größer sein sollte als der Stababstand bei Schrägrechen mit horizontalen Stäben (*Ebel, 2013*). Deshalb wurden bisher aus Schutzgründen Stababstände von 15 mm oder kleiner vorgeschrieben und realisiert (Kap. 2.6.1).

Da ein Schrägrechen jedoch auch eine Verhaltensbarriere für Fische darstellen kann, ist unter Berücksichtigung der Anströmgeschwindigkeiten sowie den Anströmwindeln ein geeigneter Stababstand zu bestimmen, welcher eine ausreichende Schutzwirkung gegenüber den Fischen aufweist.

Das Rechenstabprofil ist bei Fischen, außer dem Aal, solange zu vernachlässigen, wie die Anströmgeschwindigkeit vor dem Rechen unter der Schwimmggeschwindigkeit des Fisches liegt. Somit gehen die Fische keine freiwillige Kollision mit dem Rechen ein und das Stabprofil ist vernachlässigbar. Aale hingegen zeigen häufig eine Berührung mit dem Rechen, um dessen Durchlässigkeit zu untersuchen. Abgerundete Profile verringern bei Aalen damit das Verletzungsrisiko durch scharfkantige Rechenstäbe. Auf das reine Verhalten der Aale am Schrägrechen wirkt sich ein Stabprofil jedoch vermutlich nicht aus.

Bei den hier durchgeführten Untersuchungen wurde das Hauptaugenmerk auf Verhaltensweisen gelegt, welche ein Leiten oder Abdriften in einen Bypass verursachen. Diese sind bei Lachssmolts stets berührungsarme oder berührungslose Bewegungsmuster ohne Kontakt mit dem Rechen (*Lehmann et al.*, 2016).

Die Anströmgeschwindigkeit hat einen maßgeblichen Einfluss auf das Verhalten von Fischen an Barrieren. Hierzu wurden verschiedene Modelle entworfen, welche maximale Geschwindigkeiten für die Normal- und Tangentialkomponenten der Anströmgeschwindigkeit vorgeben, meist in Abhängigkeit des Anströmwindels und des Winkels  $\beta$  der Körperschrägstellung des Fisches zur Anströmgeschwindigkeit. Nach *Pavlov* (1989) beträgt dieser Winkel  $\beta = 24,7^\circ$ . Die vorliegende Forschungsarbeit geht auf diese Modelle nicht ein und verweist an dieser Stelle auf *Ebel* (2013), der die rechnerischen Modelle zur Festlegung der tangentialen und normalen Strömungskomponenten eingehend erläutert. Stattdessen werden in dieser Forschungsarbeit Verhaltensweisen von Fischen an Schrägrechen identifiziert und versucht, diese mittels Strömungssignaturen zu erklären und daraus Bemessungsempfehlungen für Schrägrechen abzuleiten.

Für die Untersuchungen in Abhängigkeit der Anströmgeschwindigkeiten vor einem Schrägrechen ist die Schwimmggeschwindigkeit von Fischen eine wichtige Bezugsgröße. Hier lassen sich drei Geschwindigkeitsstufen einteilen, die abhängig von der Körperlänge des Fisches, deren Schwimtleistung und der Wassertemperatur sind (*Ebel et al.*, 2015; *DWA*, 2005; *Hübner et al.*, 2011) und für alle Fischarten gelten:

- Die sogenannte Dauerschwimmggeschwindigkeit beträgt zwei Fischkörperlängen pro Sekunde und kann über 200 Minuten von den Fischen beibehalten werden;
- Die gesteigerte Schwimmggeschwindigkeit kann je nach Fischart und Altersstadium über eine Dauer von 20 Sekunden bis 200 Minuten in Abhängigkeit der Strömungsggeschwindigkeit aufrecht erhalten werden und beträgt fünf Fischkörperlängen pro Sekunde;
- Die Sprintgeschwindigkeit beträgt 10 Fischkörperlängen pro Sekunde bzw. bei kleinen Fischen bis zu 20 Fischkörperlängen pro Sekunde mit einer Maximaldauer von ca. 20 Sekunden und einer danach erfolgenden Regenerationszeit von bis zu 24 Stunden.

Eine Hinderniswahrnehmung bei Fischen kann grundsätzlich durch optische, akustische, elektrische, chemisch-physikalische oder mechanische Reize erfolgen (*DWA*, 2005).

### 5.3.1. Atlantischer Lachs

Der Atlantische Lachs (*Salmo salar*, lat.) ist eine anadrome Fischart: Sein Lebensraum befindet sich überwiegend im Meer, die Laichhabitate in Süßgewässern. Er hält sich in den ersten beiden Lebensjahren vorwiegend im Bereich der Laichhabitate auf. Anschließend erfolgt die Umwandlung zu einem silberfarbenen Lachssmolt mit einer Länge von 10 cm bis 25 cm. Diese Lachssmolts wandern in einem Zeitraum von etwa April bis Juni in Richtung Meer/Atlantik ab (*Schmalz et al.*, 2015; *Ebel*, 2013) (Tab. 20 und Abb. 81).

Tab. 20: Abwanderungszeitraum des Lachssmolts (*Quelle: verändert nach Schmalz et al.*, 2015).

Art / Artengruppe	Entwicklungsstadium	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Atlantischer Lachs ( <i>Salmo salar</i> )	Smolts			10 – 25 cm									

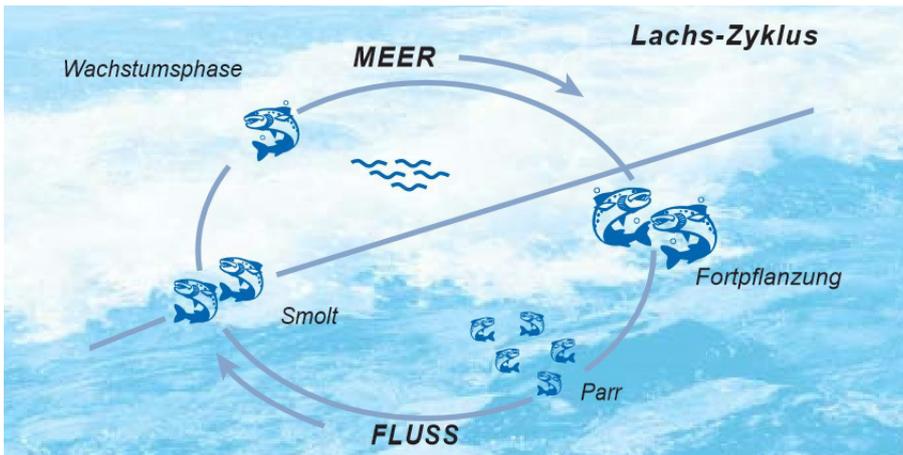


Abb. 81: Lebenszyklus des Lachses im Süß- und Salzwasser (Quelle: IKSR, 2005).

Der Atlantische Lachs war bis in das letzte Jahrhundert hinein in Deutschland heimisch (z. B. am Rhein der sogenannte „Rheinlachs“), galt aber zwischenzeitlich als ausgestorben bzw. verschollen.

1987 wurde von der Internationalen Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR) das „Lachs-2000-Projekt“ ins Leben gerufen, um den Lachs in deutschen Gewässern wieder anzusiedeln – sei es durch die Verbesserung der Wasserqualität oder durch die Herstellung der Durchgängigkeit. Das Nachfolgeprojekt „Lachs 2020“ hat die selbstständige Erhaltung von Lachspopulationen im Rhein zum Ziel. Fischbeobachtungen am Rheinkraftwerk Iffezheim haben in den letzten Jahren eine steigende Anzahl von Lachsen gezeigt (Abb. 82). Da noch nicht an allen Barrieren entlang der Flussläufe die beidseitig gerichtete Durchgängigkeit vollständig hergestellt ist und Gewässer noch weitere Defizite, wie z. B. eine unzureichende Wasserqualität oder Gewässerstrukturgüte aufweisen, müssen weiterhin regelmäßige Besatzmaßnahmen durchgeführt werden, um den Bestand zu halten. Aufgrund des hohen Gefährdungspotenzials wird der Lachs häufig als Zielfischart für sogenannte Lachszielgewässer deklariert. Darüber hinaus ist der Lachs eine EU-weit geschützte Art gemäß Flora-Fauna-Habitat-Richtlinie (FFH).

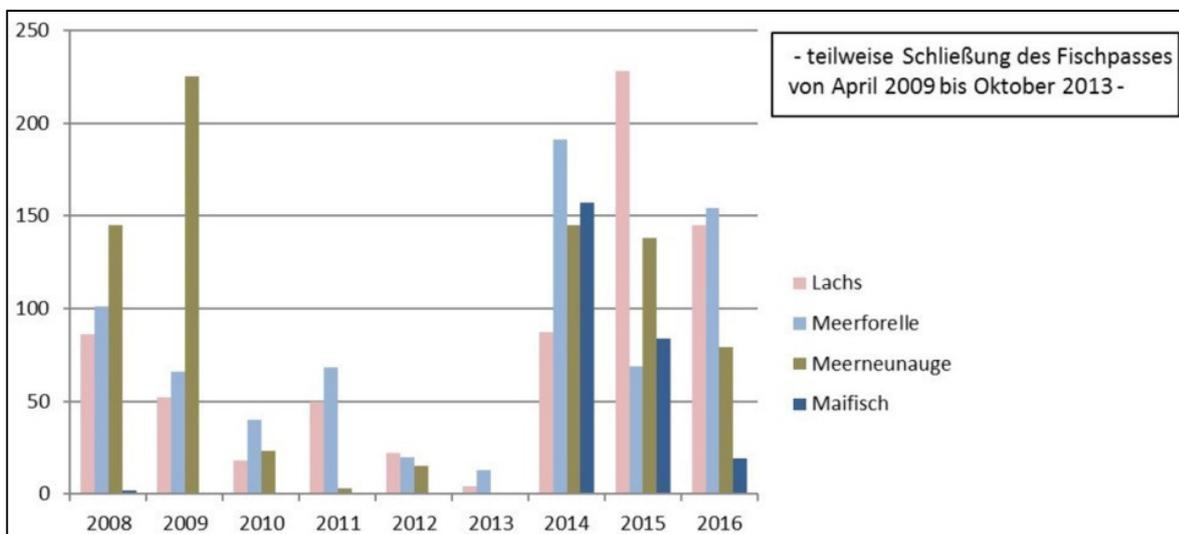


Abb. 82: Anzahl der gezählten Leitfischarten am Fischpass Iffezheim (Rhein) mit steigender Tendenz für den Lachs (Quelle: IKSR, 2017).

Die unterschiedlichen Stadien der Schwimmggeschwindigkeiten wurden für Lachse in einigen Untersuchungen ermittelt und sind bei Ebel (2013) tabellarisch angegeben (Tab. 21).

Tab. 21: Schwimgeschwindigkeiten von Lachsen (*Salmo salar*) nach Auflistung von *Ebel* (Quelle: verändert nach *Ebel*, 2013).

Untersuchungen mit Lachsen (nach <i>Ebel</i> , 2013)	Schwimgeschwindigkeit [m/s]
Dauerschwimgeschwindigkeit	0,55 - 1,15 m/s
gesteigerte Schwimgeschwindigkeit	0,71 - 1,98 m/s
Sprintgeschwindigkeit	1,43 m/s

Für ethohydraulische Studien an Schrägrechen benötigt man abwanderwillige Fische, um deren Verhalten im Nahbereich des Rechens untersuchen zu können. Folgende Gründe trugen dazu bei, den Lachs als geeignete Fischart für die anstehenden ethohydraulischen Studien auszuwählen:

- Die oben beschriebene Problematik des Lachsrückgangs in unseren Gewässern;
- Das Ziel, den Lachs wieder heimisch zu machen;
- Die bisherigen guten Erfahrungen beim Umgang mit Lachssmolts bei Laborversuchen;
- Lachse zeigten bei bisherigen ethohydraulischen Studien ein ähnliches Verhalten wie viele andere potamodrome Fischarten (= Fischarten, welche innerhalb von Süßgewässern wandern). Die gewonnenen ethohydraulischen Erkenntnisse mit Lachssmolts sind daher auch auf andere Arten übertragbar (*Lehmann et al.*, 2016).

### 5.3.2. Europäischer Aal

Als zweite Fischart wurde für die ethohydraulischen Labor- und Feldstudien der Europäische Aal (*Anguilla anguilla*, *lat.*) gewählt. Der Europäische Aal ist eine vom Aussterben bedrohte Fischart und kommt in Europa und Nordafrika vor (*Brämick*, 2017).

Aale schlüpfen als Weidenblattlarven in der Sargassosee in der Nähe der Bermuda Inseln in der Karibik und wandern hauptsächlich mit dem Golfstrom ca. 1-3 Jahre lang Richtung Westeuropa (Abb. 83). Nur 0,2% aller Weidenblattlarven kommen als sogenannte Glasaale in Westeuropa an (*Bonhommeau et al.*, 2009) und wandern in die Süßgewässer wie den Rhein und anschließend weiter flussaufwärts in z. B. Neckar, Main, und Mosel. Ein Teil der Glasaale verbleibt aber auch in marinen oder brackigen Regionen oder wechselt mehrfach zwischen Süß- und Salzwasser.

Aus den Glasaalen entstehen im Laufe der Zeit die sogenannten Gelbaale: Sie besitzen eine gelbliche Unterseite und sind in diesem Stadium noch als „junge“ Aale einzustufen. Gelbaale werden auch Steigaale genannt. Die erwachsenen Aale werden Blankaale genannt, nach ihrer weißlich schimmernden Unterseite. Der geschlechtsreife Aal wandert im Alter von ca. 12 bis 15 Jahren im Herbst wieder die Flüsse abwärts zurück in die Sargassosee zur Eiablage und stirbt vermutlich anschließend (Tab. 22 und Abb. 83). Der heutige Wissensstand beruht auf Beobachtungen aus dem Jahr 1923, durchgeführt von Ernst Johannes Schmidt, einem dänischen Biologen. Er trug mit seinen Beobachtungen und Untersuchungen maßgeblich zum heutigen Stand des Wissens bei. Tatsächlich konnte jedoch bislang weder ein Europäischer Aal beim Laichen beobachtet, noch die Größe des Laichbestandes beziffert werden (*Brämick*, 2017).

Aufgrund ihrer Fettreserven können Aale bis zu 5.000 km innerhalb eines Jahres ohne Nahrungsaufnahme entgegen den Golfstrom schwimmen (*WWF et al.*, 2010). Sie gehören aufgrund ihrer Wanderung zwischen Süß- und Salzwässern und aufgrund des Abblausens in Salzwässern zur Gattung der katadromen Fischarten.

Tab. 22: Abwanderungszeitraum des Europäischen Aals. Quelle: verändert nach *Schmalz et al.* (2015).

Art / Artengruppe	Entwicklungsstadium	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Aal ( <i>Anguilla anguilla</i> )	Gelbaale						20 – 60 cm						
	Blankaale						30 – 45 cm (Männchen) bzw. 50 – 90 cm (Weibchen)						

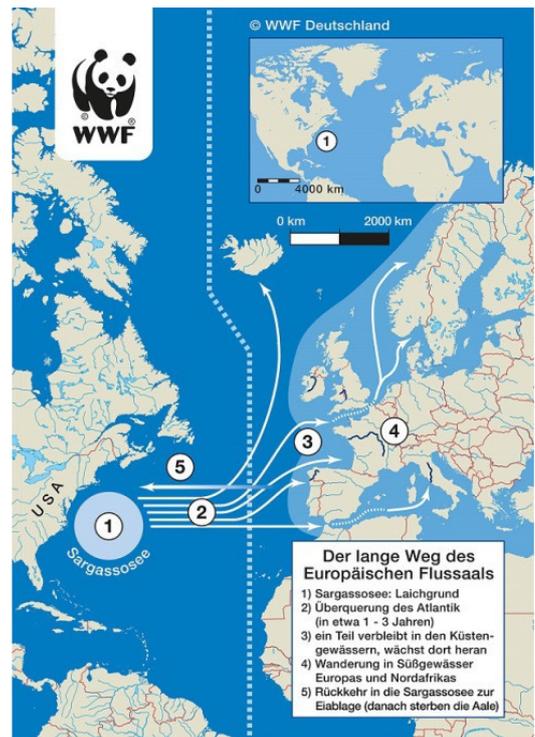
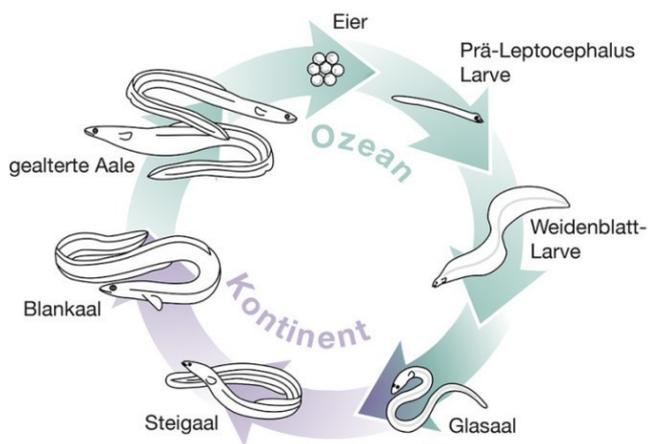


Abb. 83: Links Schema des Aal-Lebenszyklus (Quelle: Henkel et al., 2012). Rechts Aalwanderung von der Sargassosee bis nach Europa und Nordafrika (Quelle: WWF, 2014).

Anhand verschiedener Untersuchungen hat die „Working Group Eel“ des *International Council for the Exploration of the Sea (ICES)* in ihrem Report zum Aalbestand 2016 festgestellt, dass sich der Bestand an den europäischen Küsten seit den 1960er und 1970er Jahren erheblich reduziert hat. An der Nordseeküste werden derzeit nur noch 3% der damaligen Mengen verzeichnet, an der Atlantikküste nur noch 11% (ICES, 2016).

Um weitere Rückgänge des Aalbestands zu vermeiden und um den Laichfischbestand zu erhöhen, wurde bereits 2007 die EU-Aalverordnung (EG 1100/2007) erlassen. Sie gibt Mindestwerte für die Abwanderung von Blankaaalen aus europäischen Küsten- und Binnengewässern vor und nennt dafür u.a. den Aalbesatz als eine mögliche Methode, die fischereilichen Ziele erfolgreich zu erreichen (Brämick, 2017). Zur Überwindung von Abwanderungshindernissen wie Querbauwerken, Wasserkraftanlagen und Wehren werden im Rahmen von Catch & Carry Programmen großer Kraftwerksbetreiber wie EnBW Energie Baden-Württemberg AG (Abb. 84) oder E.ON Energie Deutschland GmbH Aale anhand Elektrofischung (Neckar) oder Schokker-Schiffen mit Hamen (Main) gefangen und weiter stromab in den Rhein gesetzt. Sogenannte Schokker-Aale sind Aale, welche mit Schokker-Schiffen während ihrer Abwanderung/Abwärtsbewegung gefangen werden.

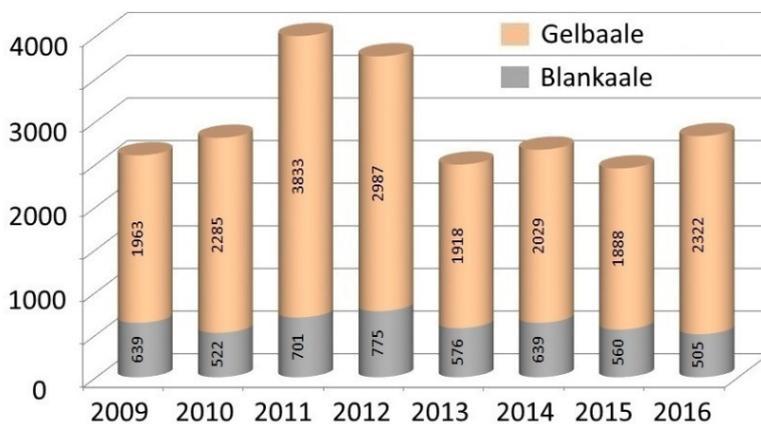


Abb. 84: Anzahl der gefangenen und umgesetzten Gelb- und Blankaale durch das Catch & Carry Programm der EnBW AG (Quelle: EnBW, 2017).

Aufgrund der Gefährdung des Aalbestandes und der Vorgaben der EU kommt den Aalen bei der Auf- und Abwanderung in Fließgewässern besondere Bedeutung zu. Daher wird im Rahmen dieses Forschungsprojektes deren Einsatz als wichtige Komponente bei der Betrachtung von Schutz- und Abstiegsanlagen mit Schrägwehren angesehen. Für die Labor- und Feldversuche war die Verwendung von Blankaalen wichtig, da diese am ehesten den Drang zur Abwanderung verspüren und somit eine hohe Wahrscheinlichkeit besteht, dass sie die typischen Verhaltensmuster an Barrieren zeigen, die bei der Abwanderung in natürlichen Gewässern auftreten.

Auch Aale zeigen je nach Situation, Abfluss oder drohender Gefahren verschiedene Schwimgeschwindigkeiten, welche in Abhängigkeit von Körpergröße und Wassertemperatur ermittelt wurden und bei *Ebel* (2013) aufgelistet sind (Tab. 23).

Tab. 23: Schwimgeschwindigkeiten von Aalen (*Anguilla anguilla*) nach Auflistung von *Ebel* (Quelle: verändert nach *Ebel*, 2013).

Untersuchungen mit Aalen (nach <i>Ebel</i> , 2013)	Schwimgeschwindigkeit [m/s]
Dauerschwimgeschwindigkeit	0,35-0,38 m/s
gesteigerte Schwimgeschwindigkeit	0,63-0,84 m/s
Sprintgeschwindigkeit	1,14-1,51 m/s

#### 5.4. Beobachtungsmethodik an der TU Darmstadt

Um den Anforderungen an ethohydraulische Studien hinsichtlich der Beobachtbarkeit und späteren Analyse des Fischverhaltens gerecht zu werden, mussten an den Versuchseinrichtungen des wasserbaulichen Forschungslabors der TU Darmstadt einige Maßnahmen und Umrüstungen bewerkstelligt werden (vgl. Kap. 3.3.1).

Die Wände der Versuchsrinne bestehen aus Plexiglas und wurden vor und während den Studien regelmäßig in Versuchspausen von Kalkablagerungen gereinigt, was die Durchsicht von außen in die Rinne verbesserte.

Der Rechen wurde so in die Laborrinne eingebaut, dass der Beobachtungsstand auf der linken Rinnenseite beibehalten werden konnte (Abb. 85 links). Der Versuchsstand wurde für die Lachssmoltstudien abgedunkelt, um die Tiere nicht durch die menschlichen Bewegungen bei der Beobachtung und Protokollführung zu stören. Bei den Aalstudien wurde die gesamte Laborrinne inklusive Beobachtungsstand ebenfalls abgedunkelt, da sich Aale eher im Dunkeln bewegen (*Rauschert*, 2013 und *Weibel* mündlich, 2016) und um störende Einflüsse aufgrund unterschiedlicher Lichtverhältnisse (Sonneneinstrahlung, Schattenschlag) zu verhindern (Abb. 85 rechts).



Abb. 85: Links Beobachtungsstand neben der Versuchsrinne und rechts Versuchsrinne mit Abdunkelung (Montageöffnung für den Umbau des Schrägwehres auf Foto geöffnet).

Vom Beobachtungsstand aus wurden die Verhaltensmuster chronologisch protokolliert (sog. ad libitum-Protokolle) (Abb. 86). Sie beinhalteten zunächst die entsprechenden Setup-Informationen wie Datum und Uhrzeit sowie Dauer des Versuchs, Anströmgeschwindigkeit und Wasserstand in der Laborrinne sowie Rinnendotation in Litern pro Sekunde, Anströmwinkel und Stababstand des Schrägwehres, aber auch die Nummerierung bzw. Benennung der Versuchsgruppe, die Tieranzahl im Versuch, Wassertemperatur und Lichtverhältnisse. Bei

den Aalversuchen wurde ergänzend protokolliert, ob die Versuche mit einem elektrifizierten Schrägrechen erfolgten. Während des Versuchs wurden Verhaltensmuster und Abwanderungen protokolliert, um die Häufigkeit und Dauer bestimmter Situationen nachträglich auswerten und mit hydraulischen Signaturen überschneiden zu können. Dazu wurden vom Protokollführer Abkürzungen und stenographische Formulierungen verwendet, um die oftmals schnell aufeinanderfolgenden Reaktionen stichwortartig aufschreiben zu können.

(V6.2)

Versuchsprotokoll: Aale an Horizontalrechen

Protokollnummer/-führer: cb	Wiederholungsnummer des Tests: 7	Datum/Uhrzeit: 19.10.16 12:06
Fischgruppennummer: F (?)	Anzahl der Probanden: 6	Dauer des Tests: 47:00
Gemittelte Fließgeschwindigkeit: 0,4 m/s	Wasserstand: 0,80 m	Rinnendotation: 660 l/s
Rechenprofil ks: 2,42	Rechenstabweite: 18 mm	Anströmwinkel: 55 °
Wassertemperatur:	Lichtverhältnisse: dunkel, diffuse Beleuchtung	
Elektrifiziert: /	Bemerkung zur Elektrifizierung: /	
Sonstiges:		

Zeit	Bemerkung/Verhalten
00:10	2 Rodekontakt & Umkehr, einer verliert etwas im rechten Eck
01:18	1 weicht ca. 1-2m vor Reche zurück, verliert dort kurz u. flussauf
06:31	1 Reche kontakt, umdrehe, flussauf am rechten Rand
11:05	1 sondiert rund um Bypass alles, Rodekontakt bis 12:30 u. den Fluss auf
15:17	1 wandert an Wasseroberfläche ab, wieder auf, am Reche anfang (neg. reagiert) bis ins rechte Eck, dann Rodekontakt u. flussauf an Wasseroberfläche
18:26	1 Aal an Wasseroberfläche (WOF) passiv abgewandert
19:11	1 Rodekontakt, Umkehren, ins rechte Eck
22:18	1 Rodekontakt, umdrehen
26:38	1 -"- , dann richtig Bypass, abgewandert u. direkt abgewandert
23:19	1 Abwanderung direkt links entlang, passiv
25:14	1 stoppt ca. 20cm vor Reche, dreht, berührt Reche, flussauf
25:58	-"-
	→ 2 unterschiedl. Aale
26:34	1 Aufwanderung
31:02	1 Rodekontakt, umdrehe, flussauf
31:17	1 Rodekontakt, lautes Rachen, absteig in Bypass
31:28	1 Rodekontakt, umdrehen flussauf
37:31	2 links direkt abgewandert
37:58	1 Rodekontakt, umdrehen, rechts in Eck flussauf
38:51	1 dreht links abgewandert, beide laute, und wieder ab
38:23	keine Phänomene
40:38	1 Rodekontakt, lautes Rachen, am Rode, nach links u. flussauf tel. weit an WOF oben
41:32	1 Rodekontakt, umdrehen, nach links, beiden laute, abwandern
43:32	1 direkt links abgewandert u. wieder auf
44:13	1 Rodekontakt, umdrehen, flussauf
44:57	1 Rodekontakt mit Schwanz in Rodekontakt abstand, ullebt drum, lost sich 45:29 u. flussauf
47:00	Abbruch

Abb. 86: Ad libitum-Protokoll des Aalversuchs mit der Versuch-Nr. V6.2 vom 19.10.2016.

Um nachträglich bestimmte Situationen im Detail bewerten zu können, wurde zusätzlich zu den ad libitum-Protokollen der Bereich im Nahfeld des Schrägrechens mittels Videokamera aufgezeichnet. Die Videoaufnahmen ermöglichten eine nachträgliche Analyse der Verhaltensweisen an den einzelnen Rechenstetups im Hinblick

auf Vergleichbarkeit bzw. hinsichtlich ihrer Unterschiede zu anderen Rechenkonfigurationen. Um auch aus der Draufsicht/Vogelperspektive einen Blick auf das Verhalten der Lachssmolts hinsichtlich Körperstellung und Richtungswechseln zu erhalten, wurden bei einigen Setups zusätzliche Unterwasservideoaufzeichnungen mittels GoPro Digitalkamera durchgeführt. Die GoPro wurde vom Beobachtungsstand per Tablet und mit Unterstützung einer GoPro App gesteuert. Darüber hinaus wurden mit Digitalspiegelreflexkamera, mit Digitalkamera und mit einem Tablet Fotos angefertigt. Insgesamt wurden bei den Lachssmoltversuchen 29,7 Gigabyte Daten aufgenommen, bei den Aalversuchen 9,25 Gigabyte, welche zusammen mit den ad libitum-Protokollen im Detail ausgewertet wurden und dazu beitrugen, die Verhaltensmuster von Fischen an Schrägreden zu identifizieren.

## 5.5. Beobachtungsmethodik an den Wasserkraftanlagen Ottenau und Rotenfels

An den Feldanlagen Ottenau und Rotenfels ist eine direkte Beobachtung der Versuchstiere von außen aus verschiedenen Gründen nicht möglich: Die Kanalwände sind nicht aus Plexiglas sondern aus Stahlbeton, das Wasser der Murg hat eine braune bis rötliche Färbung und damit eine hohe Trübung aufgrund des Buntsandsteins im Nordschwarzwald und Lichtbrechungen und Reflexionen machen eine Beobachtung der Versuchsfische von oben unmöglich (Dumont, 2011). Gleichzeitig wurden auch die negativen Erfahrungen vergangener EnBW-Elektroscheuchversuche mit einem Hamen in Rotenfels (vgl. Kap. 7.4.2) sowie mittels Garnreuse bei einem Monitoring an der Wupper (Engler et al., 2014) bei den Planungen berücksichtigt. Von fangbasierten Verfahren mit markierten Tieren wurde Abstand genommen, da die Murg ein durch erhöhte Niederschläge schnell anschwellendes Gewässer ist und ein hoher Treibgutanteil ein Einfangen der markierten Fische unmöglich macht.

In Zusammenarbeit mit dem Biologenteam von IUS Weibel & Ness GmbH wurde deshalb entschieden, die Feldversuche mittels Telemetrie durchzuführen. Der Vorteil der Telemetrie ist die Möglichkeit einer weiträumigen Verfolgung der Fischwanderungen und Aufenthaltsorte über große Distanzen hinweg. 60 Lachssmolts wurden mittels operativen Eingriffs aktive Transponder der Firma Sigma Eight Inc. in die Bauchhöhle implantiert. Die dazugehörigen Empfänger (= Receiver) sind gleichen Typs. Bei den Aalen wurden 124 Tiere besendert (vgl. Kap. 5.2).

Passive Sender kamen aufgrund deren begrenzter Reichweite von 0,3 m bis maximal 5 m nicht zum Einsatz. Die aktiven Transponder waren mit einer Batterie ausgestattet und somit nur für eine bestimmte Zeit funktionsbereit. Größere Sender ermöglichen zwar eine größere Batterie, Sendergröße und -gewicht sind jedoch von der Fischgröße abhängig und sollten maximal 5% des Fischgewichts betragen (DWA, 2005). Daher waren die Aalsender größer als die Sender für die Lachssmolts und konnten für mehrere Monate eingesetzt werden. Die Sender für die Lachssmolts funktionierten ca. 14-16 Tage, die Sender der Aale ca. 3 Monate. Die Größe der Lachssmoltsender (Typ TX-PSC-I-10-D) lag in der Länge ca. bei einem 5 Cent-Stück, die Sender der Aalversuche (Typ TX-PSC-I-80-D) waren etwas größer (Abb. 87). Die verwendeten Antennen und Schaltschranke sind Eigenbau der Firma Profish Technology aus Belgien, die Empfänger (Typ Orion) von der Firma Sigma Eight Inc..

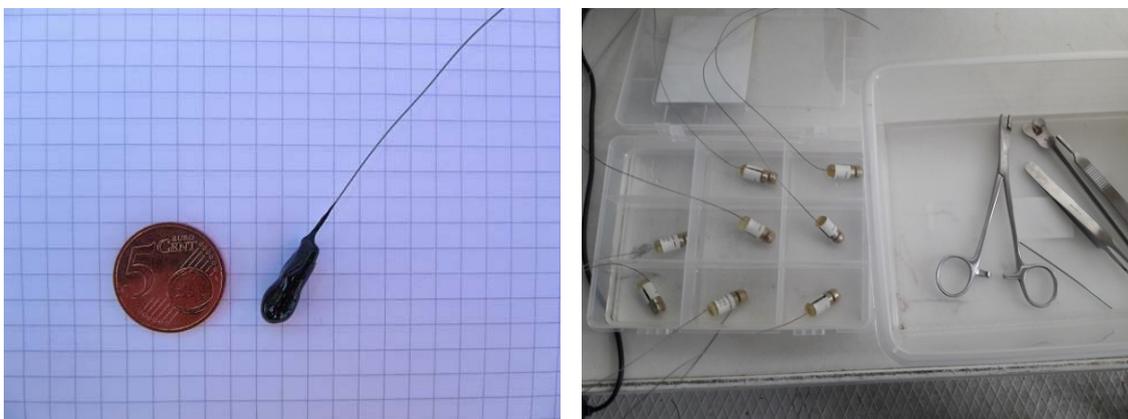


Abb. 87: Sendergrößen bei Lachssmolts (links) und bei Aalen (rechts), welche bei den telemetrischen Studien zum Einsatz kamen.

Nach dem Einsetzen der markierten Tiere in die Murg konnten diese mittels gespannter Antennen detektiert werden. Zum Einsatz kamen sogenannte Yagi-Antennen (= Richtantennen), welche eine Reichweite von mehre-

ren 100 m haben. Eine Abgrenzung des genauen Aufenthaltsorts eines Fisches ist nur mit einer ungefähren Abschätzung möglich, jedoch liefert das System ausreichend Informationen darüber, ob ein Fisch einen Bereich durchschwommen hat oder nicht. Diese Methode ist vor allem bei den Korridoren „Kraftwerk“ und „Ausleitungsstrecke“ effektiv, in denen nur die Tiere zu erfassen waren, welche diesen Bereich durchschwommen hatten und nicht deren exakten Aufenthaltsort oder Verhalten zu bestimmen war.

Außerdem wurden Unterwasser-Antennen verwendet, welche eine Reichweite von nur wenigen Metern hatten. Diese Unterwasser-Antennen kommen unterhalb der Wasseroberfläche zum Liegen und können die Position eines Fisches genau bestimmen. In Kombination mit mehreren Unterwasser-Antennen war eine genaue Aufenthalts- und Verhaltensbestimmung samt Verweildauern über die Signalstärke möglich. Die Unterwasser-Antennen kamen vorwiegend vor dem Rechen oder im Bypass zur Anwendung (Wüst mündlich, 2017). An beiden hier untersuchten Feldanlagen wurden anhand dieser beiden Antennen-Systeme alle für die Fische möglichen Abwanderungswege bestimmt.

Für jeden Fisch mit einer ausreichenden Datenmenge an empfangenen Signalen wurden Schaubilder über dessen Verhalten erstellt. Mit diesen Schaubildern ließen sich die Bewegungsmuster im Nahfeld des Schrägrechens nachvollziehen. Starke Signale ließen auf einen Aufenthalt des Fisches an der Antenne schließen, schwache Signale zeigten eine größere Entfernung des Fisches zur Antenne an. Die Receiver zeichneten bei Empfang im Sekundentakt Signale auf. Da dies eine erhebliche Datenmenge darstellte, wurden die Daten für die Darstellung zusammengefasst. Die Antennen überlappen sich in ihrem Detektionsradius, eine exakte Ortsauflösung und die Abtrennung einzelner Aufzeichnungsbereiche ist nicht darstellbar (Wüst mündlich, 2017).

### Mögliche Anwendung alternativer Beobachtungsmethoden in Ottenau und Rotenfels

Eine ähnliche Methode zur Verwendung radiotelemetrischer Sender bietet die akustische Telemetrie. Ihre Sender besitzen zwar eine größere Reichweite von bis zu 800 m, sind dadurch aber auch schwerer und bei Lachsmolts daher nur schwer einsetzbar. Mit einer entsprechenden Anordnung von mindestens drei Antennen können sogenannte Kreuzpeilungen vorgenommen werden, mit denen der Weg der Fische dreidimensional dargestellt werden kann (Abb. 88). Aufgrund fehlender professioneller Auswertungssoftware muss bei der Analyse und bei der grafischen Darstellung der aufgezeichneten Datenmengen mit einem hohen zeitlichen und personellen Arbeitsaufwand gerechnet werden (Dumont *et al.*, 2011), was innerhalb des vorliegenden Forschungsprojektes nicht möglich war.

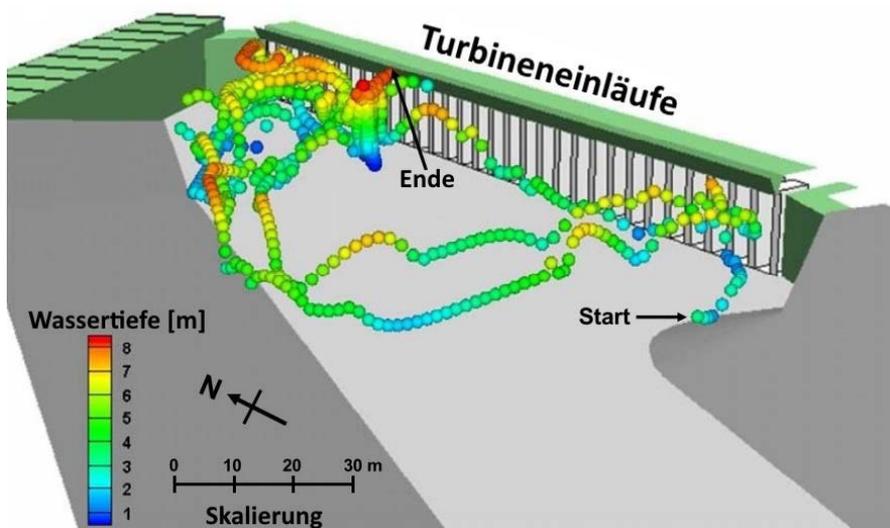


Abb. 88: 3D-Darstellung und Nachverfolgung einer Aalabwanderung vor Turbineneinläufen des WKW Arapuni im Norden Neuseelands mittels Acoustic Tag Tracking System nach Brown *et al.* (Quelle: verändert nach Brown *et al.*, 2007).

Eine Beobachtung der Lachsmolts und Aale mittels DIDSON Sonar (Dual-Frequency Identification Sonar = Ultraschallgerät) oder anderer hydroakustischer Methoden deckt nur einen kleinen kegelförmigen Bereich im Wasser ab (Abb. 89 links) und produziert laufend eine große Anzahl von Datenmengen, die anschließend ausgewertet werden müssen. Für einen Versuchszeitraum von mehreren Monaten ist die Datenmenge daher zu

groß. Darüber hinaus wären mit dem DIDSON nicht alle Abwanderungswege in Ottenau und Rotenfels kontrollierbar gewesen, schon gar nicht bei zwei hintereinander geschalteten Versuchsanlagen. Man hätte mehrere DIDSON Sonare für alle Abwanderungswege benötigt, was das Projektbudget nicht beinhaltete. Eine Unterscheidung von kleinen Fischarten ist mittels DIDSON Sonar schwierig und die genaue Erfassung der Fischzahlen ebenfalls nur bedingt möglich (Abb. 89 rechts). Eine Auswertung der Datenmengen hat durch geschulte Biologen/-innen bzw. Ökologen/-innen zu erfolgen.

Gleiches gilt auch für ARIS Sonare (Adaptive-Resolution-Identification Sonare), die ähnlich wie DIDSON Sonare funktionieren, jedoch eine bessere Auflösung besitzen. Beim Auftreten dichter Fischschwärme ist eine genaue Erfassung von Art und Anzahl jedoch unmöglich (Schmalz *et al.*, 2015).

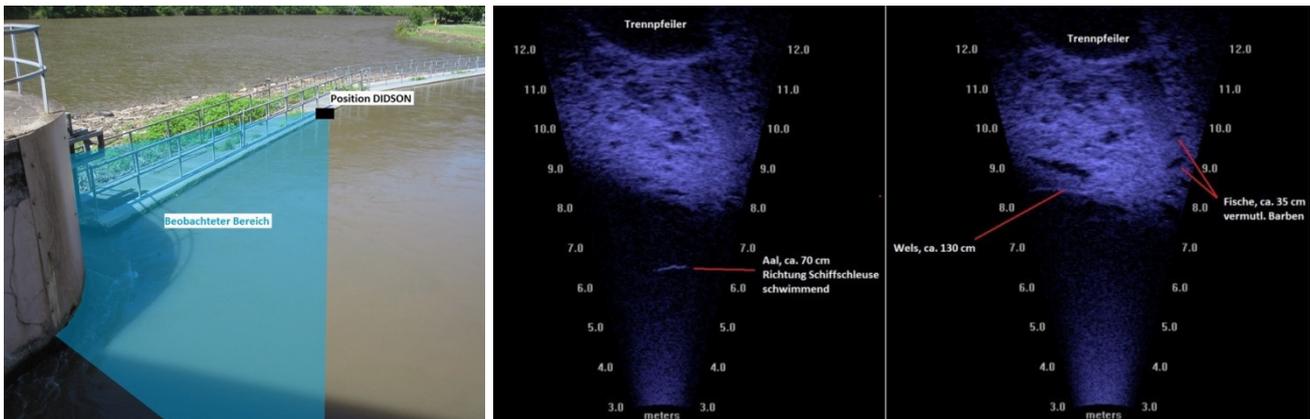


Abb. 89: Kegelförmiger Beobachtungsbereich eines DIDSON-Sonars am Einlaufbereich des WKW Hirschhorn (links) sowie Ultraschallbilder des DIDSON-Sonars in Hirschhorn mit aufgezeichneten Aalen, Welsen und Barben (Quelle: Weibel *et al.* im Auftrag der EnBW, 2015b).

Ein weiteres Beobachtungssystem stellt der „Riverwatcher“ dar, welcher in Ludwigsburg-Poppenweiler in das Umgebungsgewässer Zugwiesen eingebaut wurde, das die Neckarschleuse und das WKW Poppenweiler umläuft (Abb. 90 links) und einen Abfluss von 1,0 m<sup>3</sup>/s bis 1,5 m<sup>3</sup>/s besitzt. Aufwärts und abwärts wandernde Fische werden über Schrägrechen mit einem Anströmwinkel von 45° und einem Stababstand von 30 mm in einen Edelstahlkasten geleitet, in dem eine Kamera die Fische filmt (Abb. 90 rechts). Der Kasten ist 60 cm hoch und 30 cm breit und wird mit einer Anströmgeschwindigkeit von etwa 0,6 m/s bis 0,7 m/s angeströmt. Der Riverwatcher erfasst u.a. die durchschwimmenden Fische und nimmt dann sowohl deren Schwimmgeschwindigkeit, als auch deren Schwimmrichtung und Körpergröße auf. Aufgrund der guten Auflösung und der Innenbeleuchtung (Tag/Nacht angepasst) ist eine Fischartenbestimmung möglich. Gereinigt werden die Schrägrechen vom Württembergischen Anglerverein e.V.. Aufgrund des großen Betriebsaufwands ist ein Einsatz des Riverwatchers kombiniert mit Schrägrechen in einem größeren Gewässer mit viel Geschwemmselanfall und höheren Geschwindigkeiten nicht möglich – sowohl der Schrägrechen als auch der Riverwatcher würden verstopfen. Der Einbau des Riverwatchers erfordert bauliche Maßnahmen, die einer wasserrechtlichen Erlaubnis bedürfen.



Abb. 90: Riverwatcher im eingebauten Zustand in den Zugwiesen Ludwigsburg (links) und in Betrieb zur Aufnahme der wandernden Fische (rechts) (Quelle rechts: Württembergischer Anglerverein e.V., 2017).

Die HDX-Methodik („Half-Duplex-Transponder“) kam ebenfalls nicht als Beobachtungssystem zur Anwendung, da die hierfür erforderlichen Antennen nicht bereits während der Errichtung in die verschiedenen Abwanderungskorridore eingebaut wurden. Die Murg ist ein breites Gewässer mit breiten Kanaleinläufen und eine nachträgliche Installation von Antennen wäre zu aufwändig gewesen. Die Aufenthaltsbestimmung über die Auswertung der Signalstärken einzelner Antennen und damit Nachbildung des Fischverhaltens vor dem Schrägrechen wären mit der HDX-Technologie ebenfalls nicht darstellbar gewesen. Außerdem ist der Leseabstand zwischen HDX-Sender und Antenne für die gegebenen Rahmenbedingungen in Ottenau und in Rotenfels zu gering. Der für die Anwendung der HDX-Technik maximale Abstand von Sender und Antenne liegt bei lediglich ca. 1,50 m und ist daher eher für ein Monitoring an Fischaufstiegsanlagen oder engeren Kanälen und kleineren Gewässern geeignet. Breite Einlaufkanäle wie in Ottenau sind hierfür zu groß. Die HDX-Antennen können nur jeweils einen Sender gleichzeitig erfassen, was bei einem gleichzeitigen Abstieg mehrerer Tiere zu Lücken in der Aufzeichnung führen kann (Engler *et al.*, 2014) (Abb. 91).



Abb. 91: Links: HDX-Transponder. Mitte: Rahmenantenne aus Holz. Rechts: Aufgespannte Antennen in einem relativ schmalen Gewässer. *Quellen: Engler et al. (2014).*

Klassische Methoden wie das Markieren (mit Farbe) und Einfangen im Unterwasser (mit Reusen, Hamen oder mittels Elektrofischung) (Abb. 92) wären ebenfalls zu aufwändig gewesen, v.a. bei verschiedenen Abwanderungswegen und Versuchszeiträumen von mehreren Monaten. Hier wäre es nicht möglich gewesen, das Verhalten und die Aufenthaltsdauer vor dem Schrägrechen aufzuzeichnen und damit zu analysieren. Diese Methoden sind anfällig gegenüber Geschwemmsel und Treibgut, v.a. in der Aalwanderzeit im Herbst mit viel Laabanfall.



Abb. 92: Links: Hoher Treibgutanteil in einer Reuse nach einem Hochwasser (*Quelle: Engler et al., 2014*). Rechts: aufwändige Elektrofischung im Kraftwerkskanal des WKW Ohrnberg in trübem und schlammigem Wasser mit Geschwemmsel, Ästen, schlechten Zugangsmöglichkeiten und baulichen Zwängen (Zugstreben des Kanals).

Auf weitere Markierungs- wie auch Fangmethoden soll hier nicht näher eingegangen werden. Sie werden bei Dumont (2011) im Text 21/2012 des Umweltbundesamtes oder bei Schmalz *et al.* (2015) in der Arbeitshilfe des „Forum Fischschutz und Fischabstieg“ im Detail beschrieben.

---

## 6. Ethohydraulische Studien an Schrägrechen mit Lachssmolts

---

Zur Bemessung und Auslegung von Schrägrechen ist die Kenntnis des Fischverhaltens in seinem Nahbereich unerlässlich. Bereits bei der Untersuchung der Rechenverluste am Schrägrechen (Kap. 3) konnte nachgewiesen werden, dass der Schrägrechen hydraulisch gesehen nicht mit einem konventionellen Rechen mit vertikalen Stäben zu vergleichen ist. Es wird daher angenommen, dass sich die gegenüber konventionellen Rechen unterschiedlichen hydraulischen Bedingungen des Schrägrechens auch auf das Verhalten von Fischen, wenn sie sich in dessen Nahbereich aufhalten, auswirken. Eine uneingeschränkte Übertragbarkeit der bisherigen Erkenntnisse des Fischverhaltens an konventionellen Rechen auf Schrägrechen darf daher angezweifelt werden.

Bereits *Adam et al.* (1999) wiesen darauf hin, dass für eine erfolgreiche Abwanderung die Kenntnis des Verhaltens von Fischen am Rechen maßgeblich ist. Sie führten Lachssmoltstudien an verschiedenen Rechen setups mit einem Stababstand von 20 mm durch, wobei es sich bei den Rechen um konventionelle Rechen und Flachrechen mit einem Anströmwinkel von 90°, um Louver mit 75° Anströmwinkel und um Wire-Wedge-Screens (sog. Flachrechen mit vertikalen trapezförmigen Rechenstäben) handelte. Schrägrechen wurden nicht untersucht.

Zur Eliminierung der Wissensdefizite hinsichtlich des Fischverhaltens an Schrägrechen und zur Untersuchung der einzelnen Verhaltensmuster im Nahbereich wurden im wasserbaulichen Forschungslabor der TU Darmstadt vom 04.04.2016 bis 19.04.2016 Lachssmoltstudien mit insgesamt 22 verschiedenen Rechen setups durchgeführt. Zur Verifizierung der Laborergebnisse wurden im Anschluss daran vom 04.05.2017 bis 17.05.2016 situativ ähnliche Feldstudien mit 60 besenderten Lachssmolts am Schrägrechen des WKW Ottenau durchgeführt.

### 6.1. Laborstudien mit Lachssmolts

Im wasserbaulichen Forschungslabor sollten anhand ethohydraulischer Studien Verhaltensweisen beobachtet werden, welche für die Eignung eines Schrägrechens hinsichtlich seiner Leitwirkung in Richtung eines seitlichen Bypasses verantwortlich sind. Damit sollten Beobachtungen aus bisherigen Freilanduntersuchungen an Schrägrechen hinsichtlich der Auffindbarkeit und der Akzeptanz eines am Schrägrechen anschließenden Bypasses besser erklärt werden können (*Lehmann et al.*, 2016). Des Weiteren sollten Auslegungsgrundlagen von Schrägrechen anhand der fischökologischen Erfordernisse einer ausreichenden Schutzwirkung und einer ausreichenden Leiteffizienz ermittelt werden.

1989 untersuchte *Pavlov* das Verhalten von Fischen an mechanischen Barrieren und klassifizierte drei grundsätzliche Verhaltensmuster, welche im Nahbereich des Rechens zu beobachten waren:

- Vermeidungsreaktion
- Positiv rheotaktische Reaktion
- Suchreaktion

Ähnliche Verhaltensmuster wurden auch in den nachfolgend beschriebenen ethohydraulischen Studien beobachtet, im Detail ausgewertet und durch weitere Verhaltensmuster ergänzt.

#### 6.1.1. Versuchsaufbau und -durchführung

Die Lachssmoltstudien im wasserbaulichen Forschungslabor der TU Darmstadt fanden in der dortigen 40 m-Versuchsrinne statt, welche wie das modulare Rechensystem bereits erläutert wurde (Kap. 3.3.1). Für die Durchführung der ethohydraulischen Tests können darüber hinaus weitere Angaben zur Rinne und zum Versuchsaufbau gemacht werden.

Die Rinnensohle war einheitlich grau, im Nahfeld des Rechens befand sich jedoch eine dunkle Platte. Es zeigte sich in den Versuchen, dass diese keine Auswirkungen auf das Verhalten der Lachssmolts hatte. Weder wurde dieser Bereich häufig aufgesucht und als Versteck oder Rückzugsort gegenüber möglichen Fressfeinden genutzt, noch wurde der Bereich aufgrund seiner Ähnlichkeit zu einem Schatten gemieden. Gleiches war auch bei Schattenschlag oder Sonneneinstrahlung auf die Rinne oder das Rechensystem zu erkennen: Das Verhalten bei Sonneneinstrahlung unterschied sich nicht gegenüber den Versuchen ohne Sonneneinstrahlung. Daher wird auf die Farbgestaltung der Sohle und auf die Lichtverhältnisse nicht weiter eingegangen.

---

Der Bypass wurde als 20 cm breite Öffnung am Ende des Schrägrechens in Fließrichtung positioniert und war über die gesamte Wassertiefe geöffnet. Die Probanden konnten daher während der gesamten Versuchsdauer abwandern und auch wieder Richtung Oberstrom aufwandern.

Die Versuche wurden mit Lachssmolts in deren typischen Abwanderungszeit durchgeführt, um auch unter diesem Gesichtspunkt eine situativ ähnliche Versuchskonstellation zur Feldanlage Ottenau zu erhalten. Für die Lachssmolts liegt die Abwanderungszeit im Frühjahr (*Schmalz et al.*, 2015 und Tab. 20). Daher wurden die Studien im April 2016 im wasserbaulichen Forschungslabor durchgeführt.

Nach dem Einbau des zu untersuchenden Rechen setups in der Rinne wurde dieses mit der gewünschten Anströmgeschwindigkeit bzw. Rinnenabfluss dotiert. Vor Versuchsbeginn wurden Wasserstand und Durchfluss überprüft und nach Erfordernis nachreguliert. Sobald die gewünschten Strömungsbedingungen vorlagen, wurde eine Probandengruppe mittels Transportbehälter in die Rinne eingesetzt und zwar im Abstand von ca. 9 m stromaufwärts vor dem Schrägrechensystem. Insgesamt kamen auf diese Weise 413 Lachssmolts in Gruppen zu je 13 Probanden zum Einsatz. Die Fische hatten eine durchschnittliche Größe von 16 cm. Die Versuchszeiträume lagen im Schnitt bei etwa 30 Minuten. Je nach Aktivität oder Passivität der Probanden fielen einzelne Versuche kürzer oder auch länger aus, teilweise bis zu eineinhalb Stunden. Der längste Versuch dauerte 1 Stunde und 35 Minuten und beinhaltete drei Probandengruppen, welche in gewissen Zeitabständen nacheinander der Versuchsrinne beigegeben wurden.

Nach Versuchsende wurden die Lachssmolts in der Rinne eingefangen und sofort zur Erholung in ihre Hälterungen gesetzt. Die einzelnen Probandengruppen wurden mit einer Gruppennummer sowie dem Versuchsdatum versehen. Die Gruppen wurden maximal 4-mal verwendet, um einer Erschöpfung und einem Lerneffekt vorzubeugen. Im Zuge der Hälterungen kam es 2-mal vor, dass sich die Fische zweier Gruppen vermischt hatten. Diese beiden Gruppen wurden deshalb im weiteren Versuchsverlauf als Mix der beiden Gruppennamen benannt. Das gleiche Rechen setup wurde von verschiedenen Probandengruppen zwischen 2- und 5-mal durchlaufen, um eine möglichst eindeutige und belastbare Aussage zu jedem Rechen setup zu erhalten.

Trotz sorgfältiger Vorbereitung der Studien im wasserbaulichen Forschungslabor traten während der Versuchsdurchführung Probleme auf, welche teilweise kurzfristig gelöst werden mussten. Diese Schwierigkeiten hatten keinen Einfluss auf die Versuchsdurchführung oder die Ergebnisse. Sie hatten nahezu ausschließlich mit der Technik und der Ausrüstung im Labor zu tun und sind im Anhang 3 aufgeführt.

Erwähnt werden soll an dieser Stelle lediglich die Passivität einiger Probanden. Trotz der Versuchsdurchführung in der typischen Abwanderungszeit der Lachssmolts im April verspürten nicht alle eingesetzten Lachssmolts einen Abwanderungsdrang. Einige Probanden verblieben über die gesamte Versuchsdauer im oberen Bereich der Versuchsrinne bzw. größtenteils am oberstromigen Ende, also noch weiter oberhalb des Einsatzpunktes. Da sich das Ziel der vorliegenden Arbeit auf das Fischverhalten am Schrägrechen konzentrierte und nicht allgemein auf das Verhalten von Lachssmolts, wurden diese „passiven“ Lachssmolts in der statistischen Auswertung der nachfolgenden Kapitel nicht berücksichtigt. Lediglich die „aktiven“ Smolts wurden in ihrer Anzahl und dem Verhalten in die Beurteilung der Ergebnisse einbezogen.

### **6.1.2. Untersuchte Schrägrechenkonfigurationen**

Neben den technischen Einrichtungen sind auch verhaltensbeeinflussende (geometrische und hydraulische) Parameter des Versuchsaufbaus zu nennen. Des Weiteren wird auf die Versuchsreihenfolge und auf die untersuchten Rechen setups eingegangen.

#### **Anströmgeschwindigkeit**

Die Anströmgeschwindigkeit spielt beim Verhalten von Fischen eine maßgebliche Rolle. So richten sich Fische ab einer Geschwindigkeit von etwa 0,2 m/s bis 0,3 m/s positiv rheotaktisch aus, d.h. sie sind mit dem Kopf gegen die Strömung ausgerichtet. Bei kleineren Geschwindigkeiten herrscht eine instabile rheotaktische Ausrichtung bzw. bei sehr niedrigen Geschwindigkeiten von 0,0 m/s bis 0,1 m/s keine erkennbare Reaktion sondern nur ein ungeordnetes Sondieren (*Lehman et al.*, 2016). Schwimmt ein Fisch rheotaktisch ausgerichtet gleich der Anströmgeschwindigkeit, so behält er seine Position. Schwimmt er langsamer, so verdriftet er in Richtung stromabwärts. Häufig sind die Anströmgeschwindigkeiten vor Barrieren jedoch höher als die, welche eine Bei-

behaltung der Position (auf längere Zeit oder auf Dauer) ermöglichen. In den überwiegenden Fällen liegt diese Anströmgeschwindigkeit vor Bestandsbarrieren höher als die Dauerschwimmgeschwindigkeit der meisten vorkommenden Fischarten und beeinflusst damit das Fischverhalten. Die Anströmgeschwindigkeit erhält dadurch eine zentrale Bedeutung beim Verhalten der Fische vor einer mechanischen Barriere.

Anhand der technischen Möglichkeiten des wasserbaulichen Forschungslabors der TU Darmstadt wurden verschiedene Anströmgeschwindigkeiten in der Laborrinne eingestellt:

- Anströmgeschwindigkeit von  $v_a = 0,4$  m/s
- Anströmgeschwindigkeit von  $v_a = 0,5$  m/s
- Anströmgeschwindigkeit von  $v_a = 0,7$  m/s
- Anströmgeschwindigkeit von  $v_a = 0,8$  m/s als maximal mögliche Geschwindigkeit mit einer für die Fische noch ausreichenden Wassertiefe von 60 cm.

Der Anströmgeschwindigkeit von 0,5 m/s kam besondere Bedeutung zu, da dieser Wert derzeit bundesweit von den Behörden vorgeschrieben wird und auf früheren Laboruntersuchungen an Aalen basiert (DWA, 2005). Geringere Anströmgeschwindigkeiten als 0,4 m/s wurden nicht untersucht, da hier die technischen Umsetzungsmöglichkeiten v.a. bei Bestandsanlagen i.d.R. nicht vorhanden sind. Vorhandene Einlaufkanäle, die häufig zwischen Uferbebauung, Wehren und/oder Schleusen angeordnet wurden, sind in ihrer Breite so eingeschränkt, dass sie nicht aufgeweitet werden können, um eine möglichst geringe Anströmgeschwindigkeit zu erhalten (Abb. 93). Zur optimalen energetischen Nutzung der gesamten genehmigten Ausbauwassermenge des Kraftwerks liegen die Anströmgeschwindigkeiten vor Rechenanlagen häufig im Bereich von 1,0 m/s oder darüber (vgl. Kap. 2.6.1). Die technische Obergrenze für Anströmgeschwindigkeiten liegt im Forschungslabor pumpen- und rinnenbedingt bei ca. 0,8 m/s – bei einer für ethohydraulische Tests noch sinnvollen Wassertiefe von 60 cm.



Abb. 93: WKW Hirschhorn mit seiner Lage zwischen der Wehranlage und der rechten Schleusenkammer des Wasser- und Schiffsamtes ohne Möglichkeit zur Vergrößerung des Querschnitts vor den Maschineneinläufen.

### Anströmwinkel

Das bereits vorgestellte modulare Rechensystem (Kap. 3.3.1) kann aus einzelnen Rechenfeldern so kombiniert werden, dass verschiedene Anströmwinkel  $\delta$  eingestellt werden können. Wie bereits im Unterkapitel „Anströmgeschwindigkeit“ erläutert, ist bei Bestandsanlagen, welche auf einen Schrägrechen umgerüstet werden, häufig die Platzsituation die einschränkende Komponente bei der Wahl des Anströmwinkels. Darauf verweist auch die Handreichung Fischschutz und Fischabstieg an Wasserkraftanlagen (LUBW, 2016). Hier werden Anströmwinkel von kleiner  $30^\circ$  für Bestandsanlagen vorgegeben, „sofern räumlich möglich“. Um kleinere Anströmwinkel bzw. längere Rechen zu installieren, müssen Mittelpfeiler häufig aufwändig in Richtung Oberwasser hin verlängert werden (Abb. 94).



Abb. 94: Verlängerung des Mittelpfeilers am WKW Künzelsau zum Einbau eines Schrägrechens mit Anströmwinkel von  $42^\circ$ , Anströmgeschwindigkeit von  $0,8 \text{ m/s}$  und einem Stababstand von  $15 \text{ mm}$ . Links während des Baus mit Systemschalung für Pfeilerverlängerung und rechts im ausgeschalteten Zustand sowie mit fertiger Sohnische zum Einbau des Schrägrechens.

Als Vorlage für die Herstellung des modularen Systems im Forschungslabor wurde der Schrägrechen am WKW Ottenau mit einem horizontalen Anströmwinkel von  $44^\circ$  zur Anströmrichtung verwendet. Mit den einzelnen Rechenfeldelementen konnten folgende Anströmwinkel für die ethohydraulischen Lachssmoltstudien im Labor installiert und untersucht werden (Abb. 95 und vgl. Kap. 3.3.1), die die gesamte Spannweite von empfohlenen und bautechnisch möglichen Anströmwinkeln abdeckten:

- Anströmwinkel von  $\delta = 30^\circ$
- Anströmwinkel von  $\delta = 45^\circ$
- Anströmwinkel von  $\delta = 55^\circ$
- Anströmwinkel von  $\delta = 70^\circ$

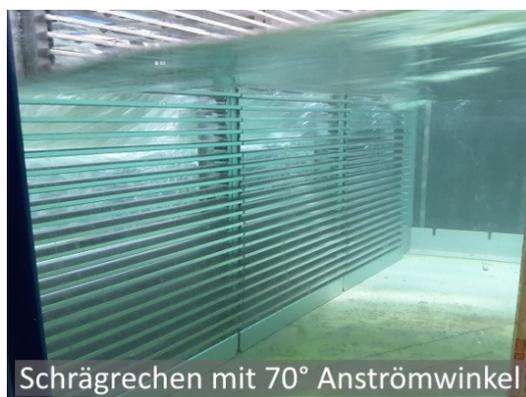


Abb. 95: Verschiedene Anströmwinkel mittels modularem Rechensystem im Forschungslabor der TU Darmstadt.

## Stababstand

Der Stababstand ist bei allen Rechentypen ein wichtiger Parameter, von dem häufig der Erfolg einer Schutzwirkung abhängt. Kraftwerksbetreiber sind bestrebt, einen möglichst großen Stababstand an Rechenanlagen zu installieren, da dies zu geringeren hydraulischen Verlusten und damit zu einer höheren Energieerzeugungsmenge führt (vgl. Gleichung 10 in Kap. 2.3 sowie Kap. 3).

Aus fischereiökologischer Sicht werden zum Schutz von Fischpopulationen jedoch enge Stababstände gefordert, um Fische vor einer Passage durch den Rechen weitestgehend abzuhalten. Anhand der gewässerspezifischen Artengemeinschaft eines unbeeinflussten Gewässers, der sogenannten Referenzfischzönose, werden die Leit- und Zielfischarten eines jeden Gewässers festgelegt. Daraus können dann die für die Bemessung maßgeblichen Fischgrößen und -dicken ermittelt werden. So gibt die Handreichung der LUBW (2016) z. B. für Bestandsanlagen in Aalmanagementgewässern einen Stababstand von 15 mm für Schrägrechen an, in Lachszielgewässern einen Stababstand von 18 mm. Seit 2008 ist gemäß der *Hessischen Fischereiverordnung (HFO)* (2016) nach § 10 ein lichter Stababstand von 15 mm an Wasserentnahmen und Triebwerken sicherzustellen, wie auch seit 2009 in Brandenburg. In Nordrhein-Westfalen z. B. gelten 10 mm Stababstand für Lachsvoranggewässer, 15 mm für Aalmanagementgewässer und 20 mm für die restlichen Gewässer (Hübner *et al.*, 2011).

Bei den untersuchten Rechenetups für die ethohydraulischen Lachssmoltsstudien wurde am häufigsten ein Stababstand von 18 mm gewählt (Abb. 96 Mitte). Der Stababstand von 18 mm entspricht dem Stababstand des Rechens in Ottenau, an dem die situativ ähnlichen Feldstudien durchgeführt wurden. Darüber hinaus wurde ein Stababstand von 10 mm untersucht (Abb. 96 links), welcher z. B. der Forderung der LUBW-Handreichung bei Neuanlagen mit Flachrechen für Zielgewässer mit anadromen Wanderfischen, also auch Lachssmolts, entspricht. In weiteren Versuchen wurde ein Stababstand von 30 mm untersucht (Abb. 96 rechts), da größere Stababstände noch häufig bei Bestandsanlagen oder großen Wasserkraftanlagen verbaut sind.

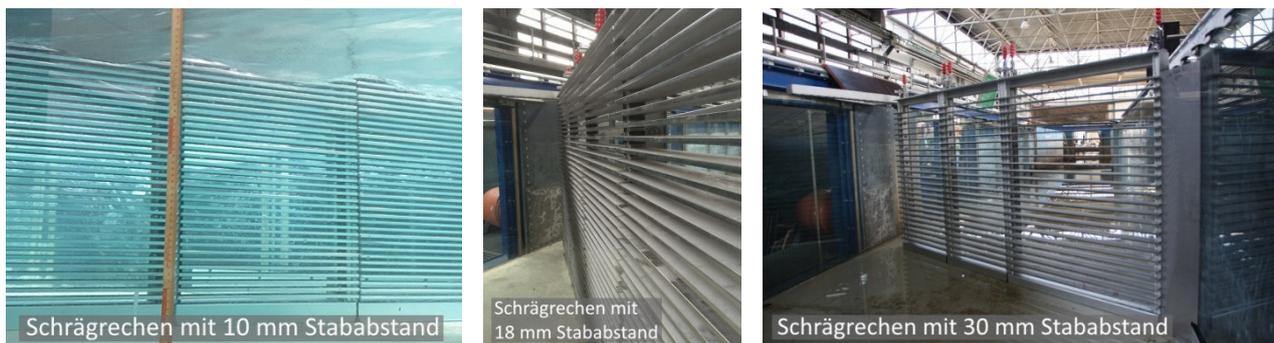


Abb. 96: Verschiedene Stababstände mittels modularem Rechensystem im Forschungslabor der TU Darmstadt.

## Stabprofil

Wie bereits erläutert (vgl. Kap. 3.3.1), wurde mit dem Rechteckprofil und einem Stabprofilbeiwert  $k_s$  von 2,42 ein einheitliches Stabprofil bei allen Rechenetups verwendet.

## Kombinationen und Versuchsreihenfolge

Aus den vorausgegangenen hydraulischen und geometrischen Parametern wurden verschiedene Kombinationen für die Rechenetups gebildet. Aufgrund des begrenzten Budgets für die Beschaffung von Fischen, des begleitenden Biologenteams und der eingeschränkten Verfügbarkeit der Versuchsrinne im Forschungslabor konnten nicht alle möglichen 48 Kombinationen mit mehreren Durchläufen untersucht werden.

Für die Entscheidung, welche Kombinationen zur Anwendung kamen, wurden für die ethohydraulischen Laborversuche die Randbedingungen des situativ ähnlichen Schrägrechens in Ottenau zu Grunde gelegt: Ein Stababstand von 18 mm und ein Anströmwinkel von  $45^\circ$  (in Ottenau  $44^\circ$ ). Die Anströmgeschwindigkeiten konnten an der Feldanlage je nach Abfluss der Murg im Versuchszeitraum zwischen 0,0 m/s und 0,8 m/s variieren. Daher wurden auch alle vier oben beschriebenen Anströmgeschwindigkeiten im Labor untersucht (0,4 m/s, 0,5 m/s, 0,7 m/s, 0,8 m/s). Von diesen Rechenkonfigurationen ausgehend wurden alle Anströmwinkel bei Stababständen

von 18 mm mit allen Anströmgeschwindigkeiten getestet. Zuletzt wurden die Stababstände 10 mm und 30 mm untersucht, jedoch nur mit Anströmgeschwindigkeiten von 0,5 m/s und 0,8 m/s, was erst im Laufe der Versuchsdurchführung festgelegt wurde. Erste Versuche hatten nämlich gezeigt, dass sich die Ergebnisse der beiden Anströmgeschwindigkeiten 0,5 m/s und 0,8 m/s unterschieden und sich die Anströmgeschwindigkeit von 0,4 m/s und 0,5 m/s bzw. 0,7 m/s und 0,8 m/s ähnelten. Für diese Versuche mit 10 mm und 30 mm Stababstand wurden die Anströmwinkel 30° und 55° gewählt, da beide Winkel im Laufe der Untersuchungen mit 18 mm Stababstand interessante Verhaltensmuster bei den Fischen zur Folge hatten. Daher wurden bei diesen Kombinationen Untersuchungen für sinnvoll erachtet mit dem Ziel, den Einfluss des Stababstands zu untersuchen. Insgesamt wurden 22 verschiedene Rechen-setup-Kombinationen getestet (Tab. 24).

Tab. 24: 22 verschiedene Rechen-setups für die Lachssmoltstudien im Forschungslabor.

Anströmwinkel $\delta$ [°]	Anströmgeschwindigkeit $v_a$ [m/s]	Stabweite $s$ [mm]		
30	0,4	-	18	-
	0,5	-	18	30
	0,7	-	18	-
	0,8	10	18	30
45	0,4	-	18	-
	0,5	-	18	-
	0,7	-	18	-
	0,8	-	18	-
55	0,4	-	18	-
	0,5	-	18	30
	0,7	-	18	-
	0,8	10	18	30
70	0,4	-	18	-
	0,5	-	18	-
	0,7	-	18	-
	0,8	-	18	-

Da in der ersten Versuchswoche nur zwei der drei Pumpen für den Volumenstrom in der Rinne zur Verfügung standen, wurden zunächst die Studien mit einer Anströmgeschwindigkeit von 0,4 m/s und 0,5 m/s durchgeführt. Variiert wurde in der ersten Woche zusätzlich zur Anströmgeschwindigkeit nur noch der Anströmwinkel mit einem gleichbleibenden Stababstand von 18 mm. In der zweiten Versuchswoche wurden die höheren Geschwindigkeiten 0,7 m/s und 0,8 m/s untersucht sowie zwei Setups mit Stababständen von 10 mm. In der dritten Versuchswoche wurden zuletzt noch vier Rechen-setups mit einem Stababstand von 30 mm durchgeführt. Insgesamt standen 12 Versuchstage für 22 Rechen-setups im Forschungslabor zur Verfügung (Tab. 25). Jede Rechenkonfiguration/Rechen-setup (V1 bis V 22) wurde 2- bis 5-mal untersucht. Die einzelnen Wiederholungen wurden Vx.1 bis Vx.5 genannt (vgl. Abb. 86 mit Versuch-Nr. V6.2).

Diese hohe Anzahl an Versuchen und Durchläufen setzte ein hohes Maß an detaillierter Vorbereitung, Disziplin, sorgfältiger Durchführung und einem ausgeprägten Teamwork aller Beteiligten im Forschungslabor voraus.

Tab. 25: Ablaufliste der Rechensetups mit Versuchsnummern und Anzahl der Probanden. Mit einem Stern gekennzeichnet sind die Ottenau-Setups, welche im Forschungslabor untersucht wurden.

Versuchstag	Rechensetup-Nr.	Anströmwinkel $\delta$ [°]	Anströmgeschwindigkeit $v_a$ [m/s]	Stabweite $s$ [mm]	Anzahl der Setupdurchläufe	Anzahl der Probanden [Stck]
04./05.04.2016	V1*	45	0,4	18	5	62
05.04.2016	V2*	45	0,5	18	4	52
06.04.2016	V3	30	0,4	18	4	52
06.04.2016	V4	30	0,5	18	3	39
07.04.2016	V5	55	0,4	18	3	39
07.04.2016	V6	55	0,5	18	4	52
08.04.2016	V7	70	0,4	18	4	52
08.04.2016	V8	70	0,5	18	4	52
11.04.2016	V9*	45	0,7	18	4	52
12.04.2016	V10*	45	0,8	18	4	52
12.04.2016	V11	70	0,8	18	3	39
12.04.2016	V12	70	0,7	18	2	26
13.04.2016	V13	55	0,7	18	5	65
13.04.2016	V14	55	0,8	18	3	39
14.04.2016	V15	30	0,8	18	3	39
14.04.2016	V16	30	0,7	18	5	65
15.04.2016	V17	30	0,8	10	4	46
15.04.2016	V18	55	0,8	10	4	48
18.04.2016	V19	55	0,8	30	4	52
18.04.2016	V20	55	0,5	30	3	39
19.04.2016	V21	30	0,5	30	3	39
19.04.2016	V22	30	0,8	30	2	52

### 6.1.3. Ethohydraulische Befunde mit Lachssmolts

Im Zuge der ethohydraulischen Lachssmoltstudien und bei der nachträglichen Auswertung wurden zahlreiche Verhaltensmuster direkt am Schrägrechen sowie im Nahfeld des Rechens identifiziert, statistisch und grafisch bewertet und anderen Erkenntnissen gegenübergestellt. Es wurden Häufigkeiten von bestimmten wiederkehrenden Verhaltensmustern gebildet und als prozentuale Beträge mit der Gesamtzahl an Lachssmolts verglichen. Es wurden Hypothesen aufgestellt, diese mit den Befunden aus den situativ ähnlichen Feldstudien verglichen und mit hydraulischen Signaturen untermauert.

Grundsätzlich war zu erkennen, dass alle Lachssmolts bei den vier getesteten Anströmgeschwindigkeiten stets positiv rheotaktisch ausgerichtet am Schrägrechen agierten. Diese Beobachtung bestätigt die von *Adam et al.* (1999) gemachten Aussagen. Die positive Rheotaxis bei Lachssmolts war im gesamten Rinnenbereich und in unterschiedlichen Reaktionsräumen vor dem Schrägrechen beobachtbar. Die positive Rheotaxis bei Lachssmolts ist auch in den Reaktionsräumen vor konventionellen Rechen zu beobachten (*Lehmann et al.*, 2016).

#### Verharren

Nicht alle Probanden bewegten sich während der gesamten Versuchsdauer aktiv vor oder im Nahbereich des Schrägrechens. Es war zu beobachten, dass die Lachssmolts häufiger nahe der Rinnenwand am Leitblech verharren (47% aller Smolts) und in beruhigten Zonen unmittelbar vor der Rechenebene, wie vor der Sohlschürze oder vor Stützpfosten (11% aller Smolts) (Abb. 97). Bei nahezu der Hälfte aller Lachssmolts (42%) war kein Verharren beobachtbar.

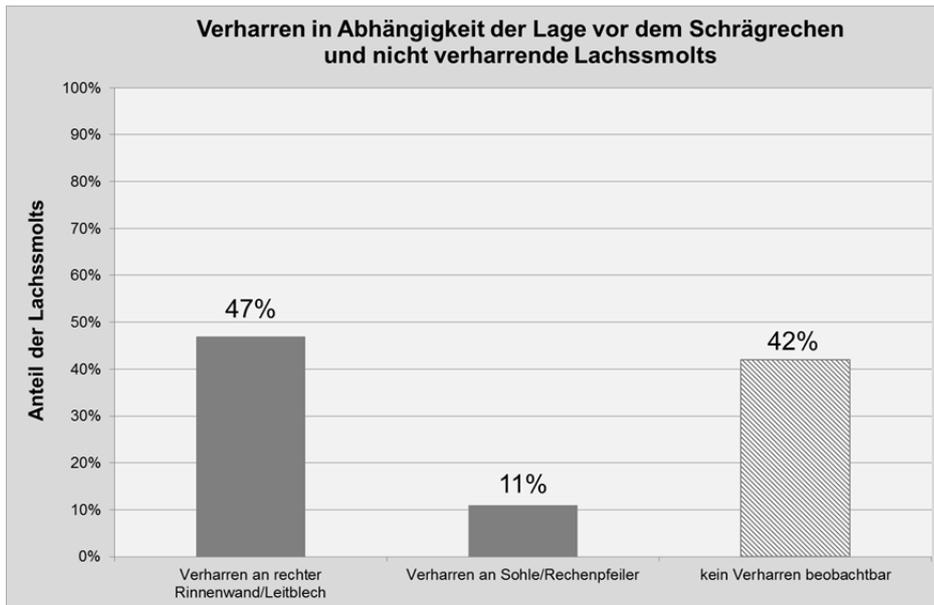


Abb. 97: Verharren von Lachssmolts an rechter Rinnenwand und an der Sohle bzw. an den Rechenpfeilern sowie der Anteil nicht verharrender Lachssmolts.

Das Verharren dauerte wenige Sekunden bis über die gesamte Versuchsdauer an. Dies zeigten die durchgeführten Langzeitversuche, bei denen verharrende Smolts fast über die gesamte Versuchsdauer an der rechten Rinnenwand neben dem Schrägrechen verblieben und erst nach vielen Minuten am Schrägrechen entlang in Richtung Bypass abwanderten. Grundsätzlich kann dies in der Natur ebenfalls mehrere Stunden oder sogar Tage andauern und soll in den Feldstudien (Kap. 6.2) untersucht werden. Im Labor zeigten die Studien, dass Lachssmolts auch nach längerer Verharrungszeit in strömungsberuhigten Bereichen den Bypass auffanden und ihn als Abwanderungsweg akzeptierten. Erklärt werden kann dies durch eine Eingewöhnungszeit der Lachse an die vorherrschenden Strömungsbedingungen bis zum Zeitpunkt, bei dem der Abwanderungsdrang andere „Gefahrenpotenziale“ wie Strömungswechsel, Lichtverhältnisse, mögliche Prädatoren, etc. übersteigt. Erst ab dann setzten sich die Tiere in Bewegung und verließen den strömungsberuhigten Bereich. Eine Verzögerung der Abwanderung muss sich daher nicht zwingend auf den Erfolg der Abwanderung auswirken, kann jedoch negative Folgen auf die Reproduzierbarkeit der Fische haben (Abb. 1).

Bei hohen Anströmgeschwindigkeiten von 0,8 m/s war häufig ein längeres Verharren der Smolts in strömungsberuhigten Zonen nahe des Schrägrechens zu erkennen, meist begleitet von einer Meidungsreaktion unmittelbar vor dem Bypass. Gründe dafür liegen in den heterogenen Strömungssignaturen, welche bei hohen Anströmgeschwindigkeiten ausgeprägter sind (Abb. 99). Diese befanden sich vor allem vor dem Bypass, an welchem eine Zunahme der Geschwindigkeit erfolgte. Strömungsberuhigte Bereiche waren eher vor dem rechts angeordneten Leitblech zu finden (Abb. 98 und Abb. 99), welches in der Realität strömungsberuhigte ufernahe Bereiche oder Rechenreinigungsräume darstellt und damit ähnliche Setupsituationen wie in der Rinne erzeugt.



Abb. 98: Verharren von Lachssmolts an rechter Rinnenwand im Setup V3.3 (links) und im Setup V9.4 (rechts).

Rechen nah verharren weniger Smolts, da die strömungsberuhigten Bereiche am Schrägrechen dort weniger ausgeprägt und kleinräumiger waren als an der rechten Rinnenwand (Leitblech). An realen Schrägrechen könnte die Häufigkeit eines Verharrens durch inhomogene Strömungsbedingungen noch ausgeprägter sein.

Die Strömungssignaturen zeigten, dass bei geringen Anströmgeschwindigkeiten (Abb. 99 links) homogene Strömungsverteilungen vorlagen und diese zum Bypass hin nur wenig zunahm. Bei höheren Geschwindigkeiten (Abb. 99 rechts) hingegen erfolgte eine starke Beschleunigung Richtung Bypass, an dem Geschwindigkeiten von 1,0 m/s und darüber herrschten.

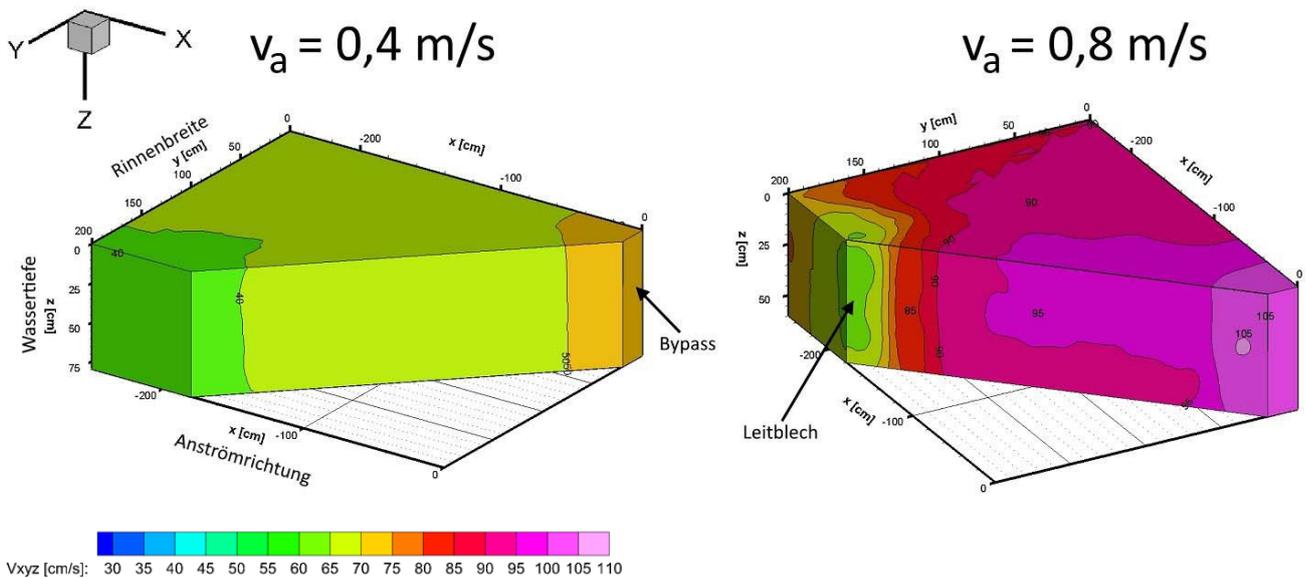


Abb. 99: 3D-Strömungssignaturen bei  $v_a = 0,4 \text{ m/s}$  (links) und  $v_a = 0,8 \text{ m/s}$  (rechts) (Quelle: verändert nach Schwab, 2016).

Die Häufigkeiten eines Verharrens bei unterschiedlichen Anströmgeschwindigkeiten wurde auch durch die Untersuchungen in Abhängigkeit der Anströmwinkel und den Anströmgeschwindigkeiten ersichtlich und bestätigen eine Abhängigkeit des Fischverhaltens von der Höhe der untersuchten Anströmgeschwindigkeit: Je höher die Anströmgeschwindigkeit, desto größer der Anteil der Probanden, welche an der rechten Rinnenwand verharren (Abb. 100). Dies bestätigt die Betrachtung unabhängig vom Anströmwinkel (Abb. 100, Balken ganz rechts): Die Zunahme der Häufigkeit eines Verharrens über die steigende Anströmgeschwindigkeit ist ersichtlich mit kleinen Abweichungen von wenigen Prozent.

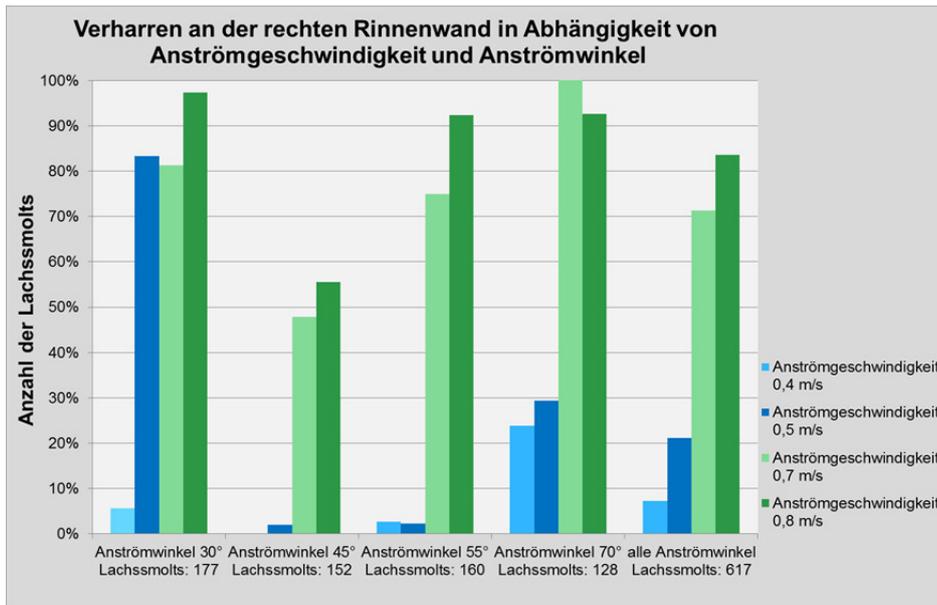


Abb. 100: Verharren von Lachssmolts an der rechten Rinnenwand in Abhängigkeit der Anströmgeschwindigkeit und des Anströmwinkels, unabhängig vom Stababstand.

Betrachtet man die Rechenetups unter variierenden Anström winkeln (Abb. 100), so erkannte man darüber hinaus, dass bei steigenden Anström winkeln das Verharren der Fische anstieg – Ausnahme bildete jedoch der Anström winkel von 30°. Hier war das Verharren an der rechten Rinnenwand bereits bei einer Anströmgeschwindigkeit von 0,5 m/s ausgeprägt und auch bei 0,4 m/s überragt der prozentuale Wert der Häufigkeit des Verharrens den der Anström winkel von 45° und 55°. Dieses Phänomen kann mit dem großen Leitblech in der rechten Rinnenwand bei einem Anström winkel von 30° begründet werden: Das Leitblech und damit dessen angeströmte Fläche wurde mit steigendem Anström winkel kleiner. Vom strömungsberuhigten Bereich am Leitblech gibt es eine Strömungsumlenkung in tangentialer Richtung um dieses Blech herum Richtung Unterstrom (Abb. 101). Diese Strömungsumlenkung bzw. Strömungsänderung ließ die Lachssmolts im rechten Bereich der Ebene 1 und 2 verharren. Gleiche Phänomene können Rechenreinigungsarme an realen Rechenanlagen oder strömungsberuhigte Zonen mit Uferverbauungen hervorrufen.

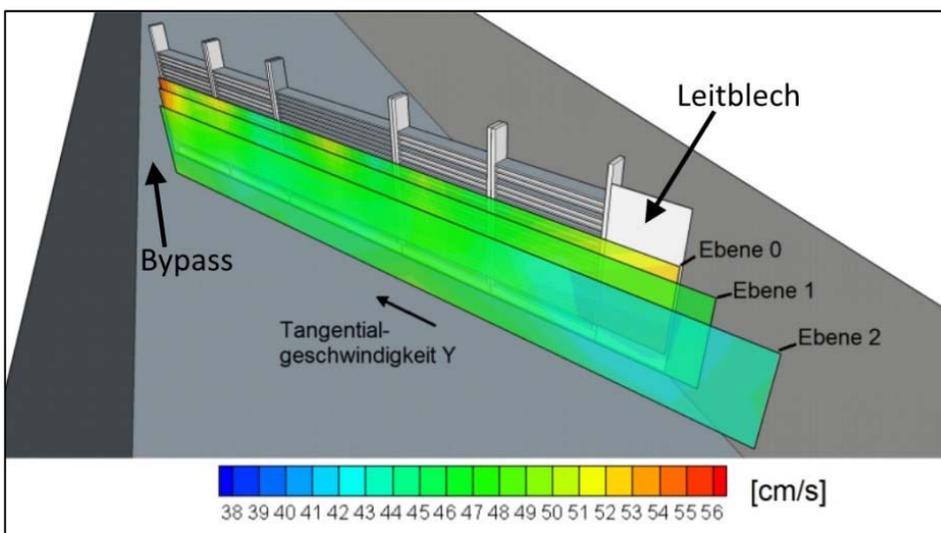


Abb. 101: Tangentiale Geschwindigkeitskomponente an der rechten Rinnenwand erhöht aufgrund Leitblech bei Anström winkel von 30°, Stababstand von 18mm und Anströmgeschwindigkeit von 0,5 m/s (Quelle: verändert nach Glock, 2017).

Die ausgewerteten Versuche hinsichtlich des Verharrens vor dem Rechen (vor dem Sohlblech und vor den Rechenpfeilern) lieferten abweichende Ergebnisse im Vergleich zum Verharren im Bereich des Leitblechs. So

verharrten die meisten Lachssmolts bei einem Anströmwinkel von 55° im Nahfeld des Schrägrechens. Bei Anströmwindeln von 45° und 70° verharrten jedoch nur wenige Lachssmolts rechennah (Abb. 102). Dies zeigt auf, dass das Leitblech eine größere strömungsberuhigte Zone auch Richtung Oberstrom ausbildete, als die Rechenpfeiler oder das Sohlblech (Abb. 99) und damit für die Lachssmolts leichter aufzufinden war. Lachssmolts konnten im strömungsberuhigten Bereich des Leitblechs kleine Positionsänderungen ausführen, ohne in Bereiche mit stärkerer Strömung zu gelangen. Dies war bei dem hier verbauten kleinen Sohlblech sowie bei den Rechenpfeilern nicht möglich.

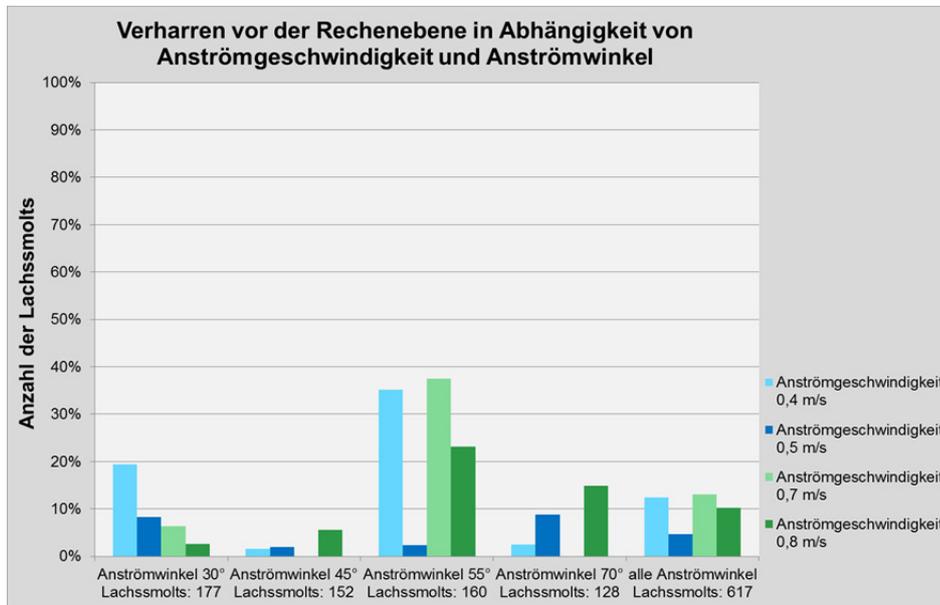


Abb. 102: Verharren von Lachssmolts vor der Rechenebene in Abhängigkeit der Anströmgeschwindigkeit und des Anströmwinkels unabhängig vom Stababstand.

Beide Grafiken (Abb. 100 und Abb. 102) veranschaulichen, dass das Verharren bei einem Anströmwinkel von 45° am geringsten war – egal welche strömungsberuhigte Zone aufgesucht wurde.

Ein möglicher Einfluss des Stababstands wurde ebenfalls untersucht, indem die Häufigkeiten des Verharrens nach unterschiedlichen Stababständen gebildet wurden. Unabhängig von einem Stababstand von 10 mm, 18 mm oder 30 mm zeigten die Lachssmolts das gleiche Verhalten. Der Stababstand spielt somit keine Rolle beim Verharren von Lachssmolts in strömungsberuhigten Zonen.

## Gieren

Das Gierverhalten von Fischen wurde erstmals im Rahmen des BfN-Forschungsprojekts zur Verbesserung des Fischschutzes an Wasserkraftanlagen ausführlich beschrieben (Lehmann et al., 2016). Dieses Verhalten zeigen Lachssmolts, die sich positiv rheotaktisch vor der Rechenebene positionieren. Sie schwimmen gleichmäßig gegen die Strömung an, um den Abstand zur Rechenebene einzuhalten und nicht gegen ihn gedrückt zu werden. Ohne erkennbare Schwimm- oder Flossenbewegungen verschiebt sich ihre Position jedoch langsam entlang der Rechenebene Richtung Bypass. Dies ist auf eine leichte Schrägstellung des Körpers um die Hochachse, den die Fische ausüben, zurückzuführen. Diese Schrägstellung wird **Gieren** genannt.

Die Körperschrägstellung des Lachssmolts war beim Gieren gegenüber der Anströmrichtung geneigt, zeigte jedoch nicht orthogonal in Richtung der Normalkomponente der Anströmrichtung auf den Schrägrechen (Abb. 103). Die Körperschrägstellung des Lachssmolts weichte mit einem Winkel von 20° bis 30° gegenüber der Anströmrichtung bzw. der Normalkomponente der Anströmung ab – bei einem Anströmwinkel des Schrägrechens von 45°. Damit wirkte sich der Anströmwinkel des Schrägrechens direkt auf die Schrägstellung des Fisches aus: Je kleiner der Anströmwinkel, desto größer die Schrägstellung des Fisches und desto höher die seitlich auf seine Längsseite wirkenden Strömungskräfte.

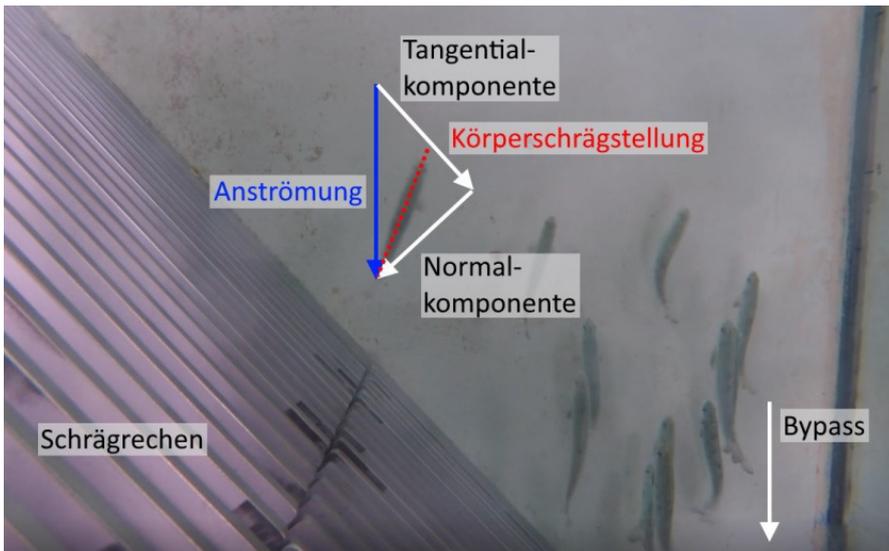


Abb. 103: Schrägstellung des Fisches (rot gestrichelte Linie) um 20° bis 30° gegenüber der Anströmrichtung geneigt bei einem Anströmwinkel des Schrägrechens von 45° (Foto zeigt Versuch-Nr. V1.5 mit Setupkonstellation 18mm/45°/0,4m/s).

Die Anströmgeschwindigkeit verursachte beim Gieren einen seitlichen Druck auf den Körper des Lachssmolts, was eine passive und damit kräftesparende aber kontrollierte Positionsänderung (= Drift) in Richtung eines Bypass bewirkte. Dieses Verhalten ermöglichte dem Fisch in den meisten Fällen ein erfolgreiches Auffinden des Bypasses. Ein Rechenkontakt fand beim Gieren nicht statt. Dies widerspricht der Aussage von *Hübner et al.* (2011), eine Leitwirkung basiere auf einer Berührung des Rechens mit dem Schwanz. Zwar kann eine Berührung nicht vollkommen ausgeschlossen werden, war bei den untersuchten Schrägrechen jedoch nur selten zu beobachten und war offenkundig nicht der Reizauslöser für eine Leitwirkung oder eine anschließende Abwanderung.

Der Begriff des Gierens stammt ursprünglich aus der Schiff- und Luftfahrttechnik. Flugzeuge können sich um drei Achsen bewegen, um kraftstoffsparende Lenkbewegungen durchzuführen: Längsachse, Querachse, Hochachse. Die Bewegung um die Hochachse ist für das Gieren des Flugzeugs verantwortlich (Abb. 104, links). In der Schifffahrtstechnik nutzen sogenannte Gierfähren dieses Prinzip, indem sie durch eine Querstellung ihrer Achse gegen die Strömung und gleichzeitig durch ein Seil gehalten, ohne Motorunterstützung auf die andere Uferseite gelangen können. In der vorliegenden Arbeit wird mit Gieren die Schrägstellung des Fisches zur Hauptströmung bezeichnet (Abb. 104, rechts) und nicht die anschließende Drift in Richtung eines seitlichen Bypasses.

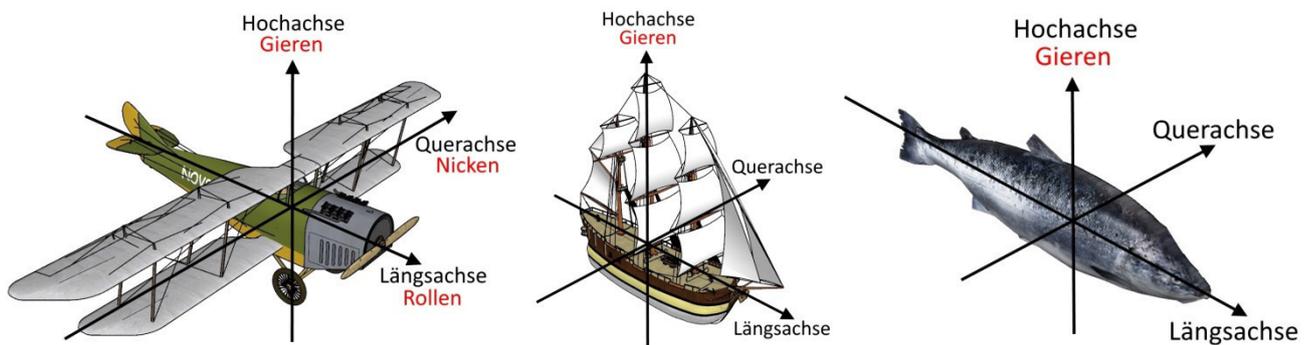


Abb. 104: Bewegungsachsen beim Flugzeug (links), Achsen in der Schiffstechnik (Mitte) und beim Fisch (rechts) (Quellen: verändert nach Google Sketch Up).

*Hassinger* (2016) beschreibt dieses Verhalten mittels eines Driftvektors und einer Schrägstellung in die Fluchtrichtung, da der Schrägrechen für den Fisch eine Gefahr darstellt, der er ausweichen will (Abb. 105). *Hassinger* setzt daher voraus, dass die Fische den Rechen sichtbar wahrnehmen und in Richtung Bypass abdriften.

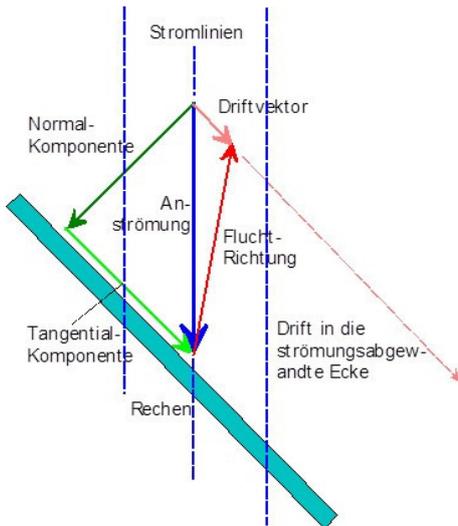


Abb. 105: Beschreibung des Driftvektors nach *Hassinger* analog dem Prinzip des Gierens (*Quelle: Hassinger, 2016*).

Die beiden beschreibenden Systeme des Verhaltens der Schrägstellung als sogenanntes Gieren (*Lehmann et al., 2016*) bzw. als Driftvektor aufgrund einer Flucht (*Hassinger, 2016*) basieren auf der gleichen Grundlage: Eine Schrägstellung des Fisches gegenüber der Anströmrichtung und einer anschließenden Drift entlang der Rechen-ebene in Richtung eines Bypasses. Dieses Gierverhalten wurde bei den durchgeführten Lachssmoltstudien im Forschungslabor häufig beobachtet und hing sowohl von der Anströmgeschwindigkeit als auch vom Anström- winkel ab.

Betrachtet man zunächst die Versuche mit einem Stababstand von 18 mm unabhängig vom Anströmwinkel, so war zu erkennen, dass das Gierverhalten mit steigender Anströmgeschwindigkeit nachlässt (Abb. 106). Bei Anströmgeschwindigkeiten von 0,7 m/s und 0,8 m/s ist jedoch ein kleiner Anstieg zu verzeichnen, der dieser Aussage widerspricht. Bei der Bewertung muss beachtet werden, dass die Versuche je Anströmgeschwindigkeit nicht die jeweils gleiche Anzahl an Lachssmolts und auch unterschiedliche Versuchsdauern aufwiesen. Dies kann zu kleinen Abweichungen in der statistischen Auswertung führen und liegt innerhalb der Toleranzen. Die Tendenz zum Nachlassen des Gierverhaltens bei steigender Anströmgeschwindigkeit ist jedoch erkennbar.

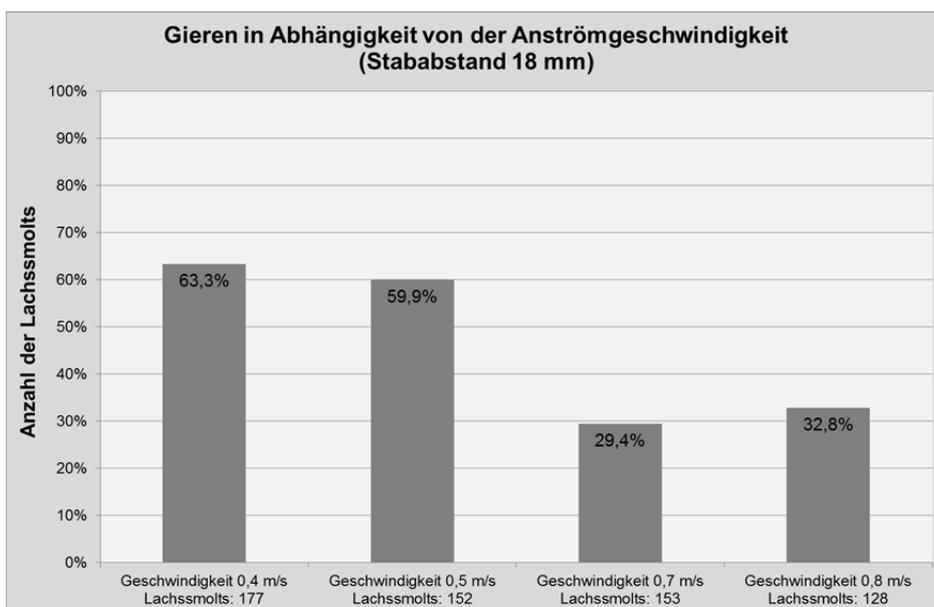


Abb. 106: Häufigkeit des Gierens in Abhängigkeit der Anströmgeschwindigkeit und unabhängig des Einflusses des Anström- winkels bei einem Stababstand von 18 mm.

Der Rückgang des Gierens bei hohen Anströmgeschwindigkeiten (0,7 m/s bis 0,8 m/s) liegt am ausgeprägten Verharren der Lachssmolts in strömungsberuhigten Zonen und der Meidung vor einer schnellen Zunahme der Geschwindigkeit (Abb. 107). Häufig treten bei den hohen Anströmgeschwindigkeiten auch Meidungsreaktionen unmittelbar vor dem Bypass auf, welche ein erfolgreiches Gieren verhindern.

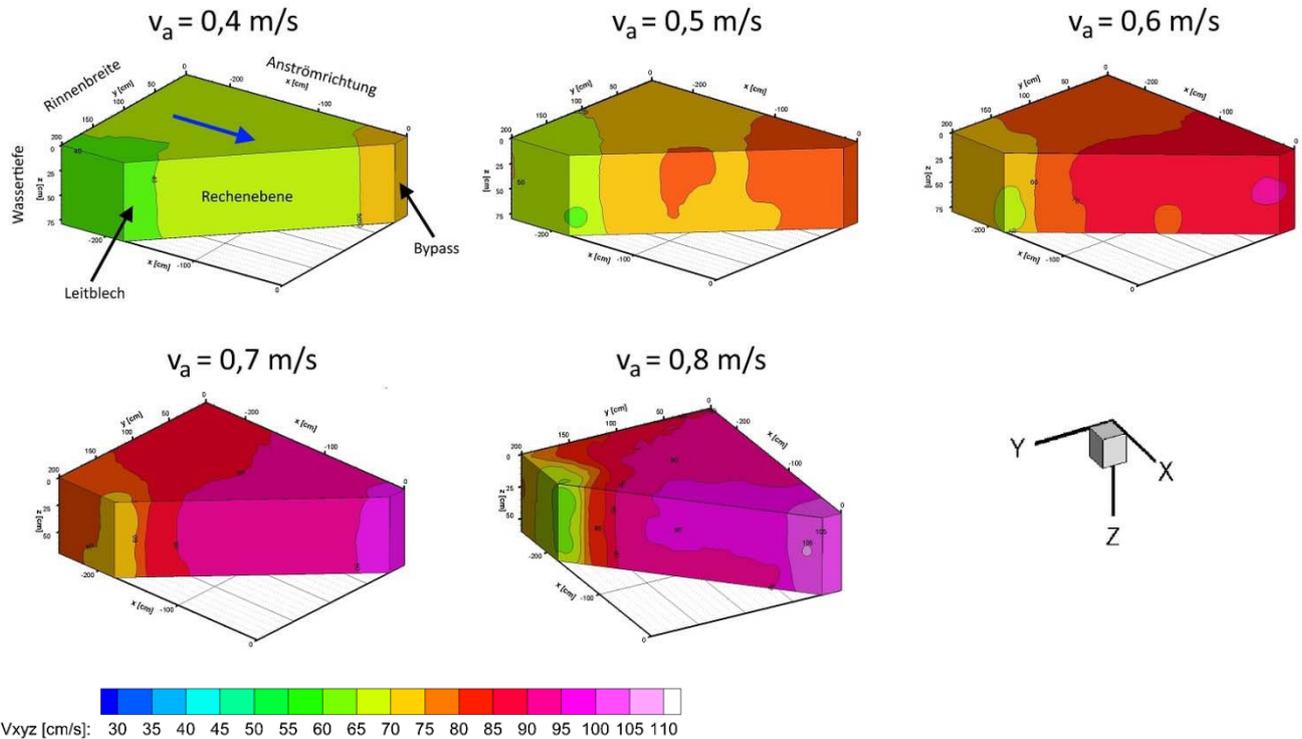


Abb. 107: Strömungssignaturen bei Anströmgeschwindigkeiten von 0,4 bis 0,8 m/s mit Zunahme von Geschwindigkeiten und Inhomogenitäten. Die Stababstände betragen 18 mm, der Anströmwinkel  $45^\circ$  (Quelle: verändert nach Schwab, 2016).

Lässt man die Anströmgeschwindigkeit unberücksichtigt und betrachtet nur den Anströmwinkel, so ist erkennbar, dass das Gieren bei einem Rechenwinkel von  $45^\circ$  am ausgeprägtesten war (Abb. 108). Die Anströmwinkel von  $45^\circ$  und  $55^\circ$  lösten bei den Lachssmolts zuverlässig ein Gierverhalten aus. Dies führte zu einem raschen Auffinden des Bypasses und anschließend häufig zu einer erfolgreichen Abwanderung über den Bypass. Bei großen und kleinen Anströmwinkeln ( $30^\circ$  und  $70^\circ$ ) kam es seltener zum Gieren.

Bei einem Anströmwinkel von  $70^\circ$  lag die Ursache hierfür an der geringen Schrägstellung der Barriere. Hier konnten die Fische nur eine kleine Schrägstellung des Körpers durchführen, um keine zu großen Kräfte auf ihre Seitenlinie zu erhalten und um kontrollierte Positionsänderungen vorzunehmen. Beobachtet wurde bei hohen Anströmwinkeln vielmehr ein ungeordnetes Sondieren im Nahfeld des Rechs.

Bei einem Anströmwinkel von  $30^\circ$  wurde hingegen häufig ein Flüchten bzw. Zurückziehen nach Oberstrom sowie ein Verharren in strömungsberuhigten Zonen beobachtet, wodurch die Häufigkeit des Gierens und des Auffindens des Bypasses abnahmen. Ursache hierfür waren der aufgrund der Schrägstellung entstandene längere Abwanderungsweg entlang der Rechenebene und Inhomogenitäten in der Strömung (Abb. 107). Diese ließen die Lachssmolts im Labor immer wieder in ruhigere Zonen zurückkehren und das Gieren unterbrechen. Zur Vermeidung derartiger Effekte sollte deshalb an großen Wasserkraftanlagen mit breiten Einlaufbereichen ein kürzerer Schrägwehre mit  $45^\circ$  bis  $55^\circ$  bevorzugt sowie auf eine Vermeidung von heterogenen Strömungsverhältnissen geachtet werden.

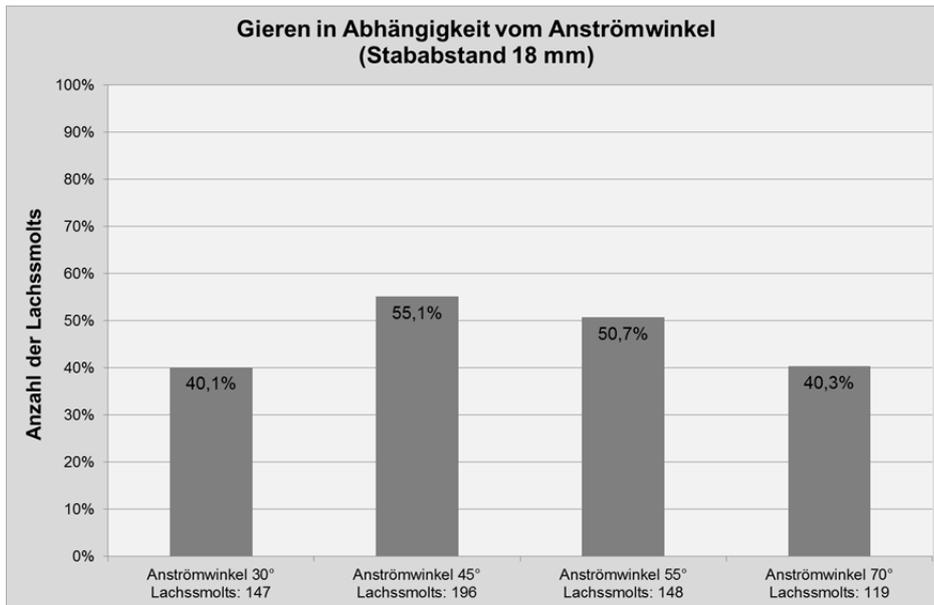


Abb. 108: Häufigkeit des Gierens in Abhängigkeit des Anströmwinkels und ohne Betrachtung der Anströmgeschwindigkeit bei einem Stababstand von 18 mm.

Untersucht man das Gierverhalten in Abhängigkeit von Anströmgeschwindigkeit und Anströmwinkel (Abb. 109), so bestätigte sich, dass mit steigender Anströmgeschwindigkeit das Gierverhalten nachließ. Auffällig war jedoch, dass das Gieren mit steigendem Anströmwinkel **und** steigenden Anströmgeschwindigkeiten wieder häufiger auftrat (Abb. 109). Es wird vermutet, dass die Körperschrägstellung für das Auslösen des Gierens einen gewissen Winkel des Fisches zum Vektor der Anströmgeschwindigkeit (Abb. 103 und Abb. 104) nicht überschreiten darf, da die Fische sonst auf Ihrer Längsseite zu stark den Strömungskräften der Anströmung ausgesetzt sind und ein kontrolliertes Gieren nicht mehr möglich ist.

Bei 30°-Schrägrechen müssen Fische ihren Körper zum Gieren schräger stellen, als bei 70°-Rechen. Bei großen Anströmwindeln eines Schrägrechens und somit bei geringer Körperschrägstellung können die Lachssmolts das Gieren bei höheren Anströmgeschwindigkeiten besser kontrollieren, aktiv ihre Position bestimmen und korrigieren. Sie sind den Strömungskräften auf ihrer Körperlängsseite nicht so stark ausgesetzt, wie bei einer größeren Körperschrägstellung bei kleinen Anströmwindeln. Die Kombination aus großer Körperschrägstellung bei kleinen Anströmwindeln sowie hohen Anströmgeschwindigkeiten, also hohen Strömungskräften auf deren Körperlängsseite, lässt die Fische nur selten ein Gieren ausführen. Dies kann auch die hohe Anzahl von verharrenden Lachssmolts bei einem 30°-Rechen erklären (siehe Unterkapitel Verharren), da die Fische eher verharren und kein Gieren zeigen.

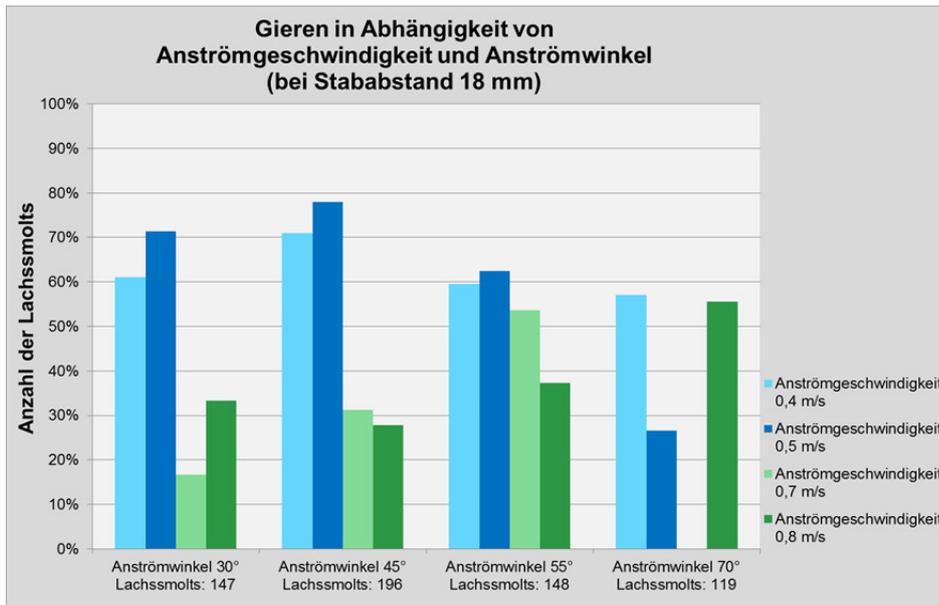


Abb. 109: Häufigkeit des Gierens in Abhängigkeit der Anströmgeschwindigkeit und des Anströmwinkels bei einem Stababstand von 18 mm.

Die Häufigkeit des Gierverhaltens bei kleinem und großem Anströmwinkel in Abhängigkeit der Anströmgeschwindigkeit kann auch mit den rechnerischen tangentialen Vektoren der Anströmungsgeschwindigkeit bei Anströmgeschwindigkeiten begründet werden. So lässt sich bei Anströmgeschwindigkeiten von 0,5 m/s und 0,8 m/s und bei Anströmwindeln von 30° und 70° folgendes aufzeigen (Abb. 110 und Abb. 111):

- Bei einem Anströmwinkel von 30° und einer Anströmgeschwindigkeit von 0,8 m/s lag die Tangentialkomponente über 0,8 m/s (Abb. 110 links), was zu einem geringeren Gierverhalten führte;
- Bei einem Anströmwinkel von 70° und einer Anströmgeschwindigkeit von 0,8 m/s lag die Tangentialkomponente im Schnitt bei 0,5 m/s (Abb. 110 rechts) und löste damit ein zuverlässiges Gierverhalten aus (Abb. 109);
- Bei einem Anströmwinkel von 30° und einer Anströmgeschwindigkeit von 0,5 m/s lag die Tangentialkomponente im Schnitt bei 0,5 m/s (Abb. 111) und löste damit ein zuverlässiges Gierverhalten aus (Abb. 109);
- Bei einem Anströmwinkel von 30° und einer Anströmgeschwindigkeit von 0,5 m/s lag die Tangentialkomponente im Schnitt bei 0,3 m/s (stellenweise darunter) und war damit für Fische kaum noch wahrnehmbar, was zu einem geringeren Gierverhalten führte.

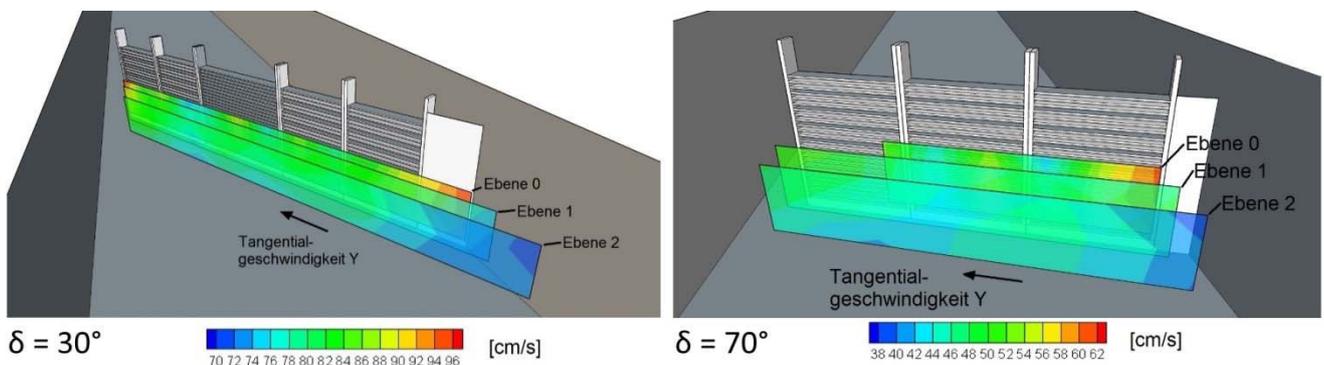


Abb. 110: Abnahme der Tangentialkomponente mit steigendem Anströmwinkel  $\delta$ , bei Stababstand von 18 mm und einer Anströmgeschwindigkeit  $v_a$  von 0,8 m/s (Quelle: verändert nach Glock, 2017).

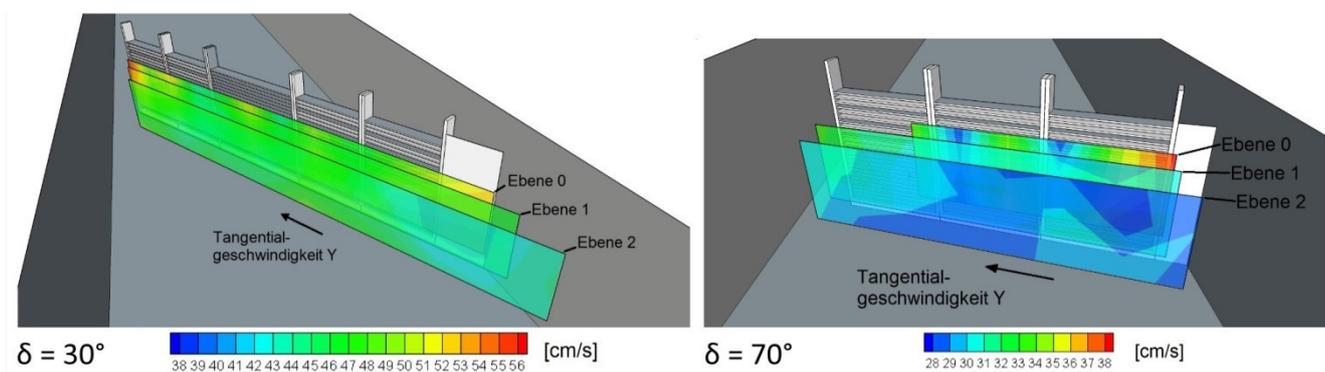


Abb. 111: Abnahme der Tangentialkomponente mit steigendem Anströmwinkel  $\delta$ , Stababstand von 18 mm und einer Anströmgeschwindigkeit  $v_a$  von 0,5 m/s (Quelle: verändert nach Glock, 2017).

Damit lässt sich aufzeigen, dass Anströmgeschwindigkeit und Anströmwinkel direkt zusammenhängen, wobei die Komponente Anströmgeschwindigkeit eine größere Bedeutung bekommt als der Anströmwinkel. Die für ein ausgeprägtes Gierverhalten optimale Kombination aus beiden Parametern (Anströmgeschwindigkeit und Anströmwinkel) muss damit sowohl unter Berücksichtigung der ethohydraulischen Befunde erfolgen, als auch anhand äußerer standortspezifischer Rahmenbedingungen wie Ausbauabfluss (vorgegebene Anströmgeschwindigkeit) oder bauliche Zwänge (vorgegebener Anströmwinkel) ermittelt werden.

Die Strömungssignaturen (Abb. 110 und Abb. 111) zeigen, dass die beobachteten Verhaltensweisen von Fischen von hydraulischen Randbedingungen abhängen. Eine Verschneidung von hydraulischen Untersuchungen an Schrägrechen und ethohydraulischen Studien führte damit zu fundierten und belegbaren Aussagen zur Leitwirkung von Schrägrechen, welche aufgrund der fehlenden Schräganströmung nicht auf konventionelle Rechen übertragen werden können.

Bisher wurden alle Auswertungen des Gierverhaltens mit einem Stababstand von 18 mm durchgeführt. Bei den Untersuchungen mit den Stababständen von 10 mm und 30 mm wurden lediglich Anströmgeschwindigkeiten von 0,5 m/s und 0,8 m/s untersucht sowie Anströmwinkel von 30° und 55°. Es wurden daher weniger Setups mit Stababständen von 10 mm und 30 mm durchgeführt (Kap. 6.1.2, Tab. 24). Damit lagen die Anzahl der Probanden bei den Lachssmolts und die Gewichtung der repräsentativen Aussage unter denen des Stababstands von 18 mm.

Bei hohen Anströmgeschwindigkeiten (0,8 m/s), bei einem Anströmwinkel von 55° und bei einem Stababstand von 10 mm lag die Häufigkeit eines Gierens mit 35% etwas unter der 37%-igen Häufigkeit des Gierens bei einem Stababstand von 18 mm und unter der bei einem Stababstand von 30 mm mit 60% (Abb. 112).

Bei einem Winkel von 30° hingegen näherten sich die Gierhäufigkeiten mit Stababständen von 10 mm und 30 mm an und lagen bei einem Stababstand von 10 mm bei knapp 33% und bei 30 mm bei 34%. Beim Stababstand von 18 mm betrug die Häufigkeit eines Gierens 33% und lag damit ebenfalls zwischen den beiden anderen Stababständen in diesem Bereich.

Damit zeigt sich eine Abhängigkeit der Gierhäufigkeit vom Stababstand: Je größer der Stababstand, desto größer die Gierhäufigkeit. Es muss aber beachtet werden, dass diese Aussage nur für die untersuchten Stababstände zutrifft und nicht für Stababstände außerhalb dieser Spannweite (10 mm bis 30 mm).

Auch lässt sich bei den Stababständen von 10 mm und 30 mm eine Abhängigkeit vom Anströmwinkel erneut bestätigen (Abb. 112), ebenso die Aussage, dass bei steigender Anströmgeschwindigkeit und steigenden Anströmwinkeln das Gieren häufiger wird.

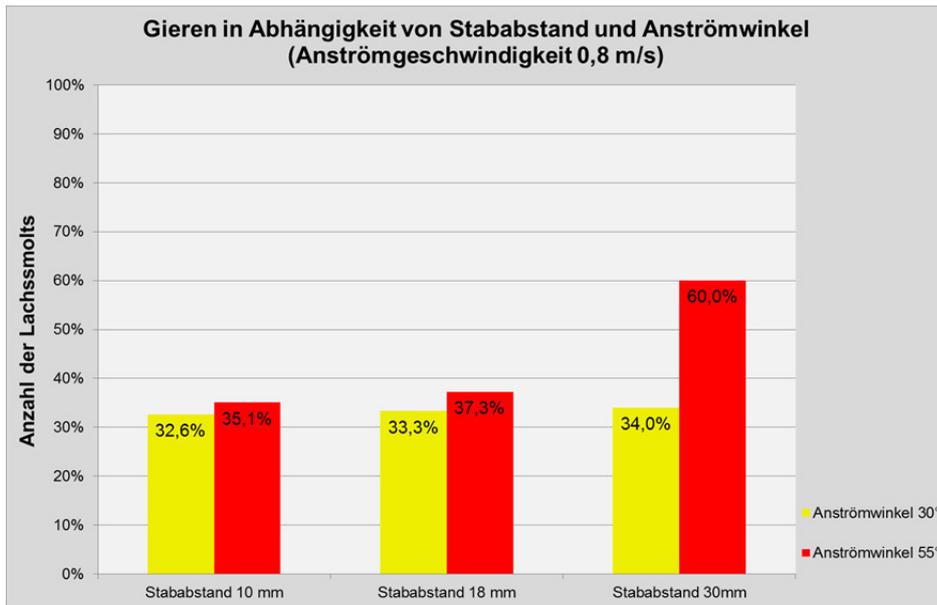


Abb. 112: Steigende Häufigkeit des Gierens mit steigendem Stababstand bei einer Anströmgeschwindigkeit von 0,8 m/s.

Die Tendenz der Abnahme des Gierverhaltens bei steigenden Anströmwindeln und niedrigeren Anströmgeschwindigkeiten (0,5 m/s) ist auch bei einem Stababstand von 30 mm zu erkennen (Abb. 113, blauer Balken) und bestätigt damit die oben getätigten Aussagen bei einem Stababstand von 18 mm (Abb. 109). Die Gierhäufigkeit bei diesem Rechen-setup liegt damit nur leicht über der Gierhäufigkeit des 18mm-Setups. Auch die Häufigkeiten bei einem Stababstand von 10 mm, einer Anströmgeschwindigkeit von 0,8 m/s, einem Anströmwinkel von 30° oder 55° liegen ungefähr in einem Bereich mit denen des Stababstands von 18 mm. Damit wird nochmals bestätigt, dass bei unterschiedlichen Stababständen das Phänomen der steigenden Häufigkeit des Gierens mit steigendem Anströmwindel und steigender Anströmgeschwindigkeit ebenfalls vorliegt (Abb. 113, dunkelgrüner und hellgrüner Balken) und damit unabhängig vom Stababstand ist.

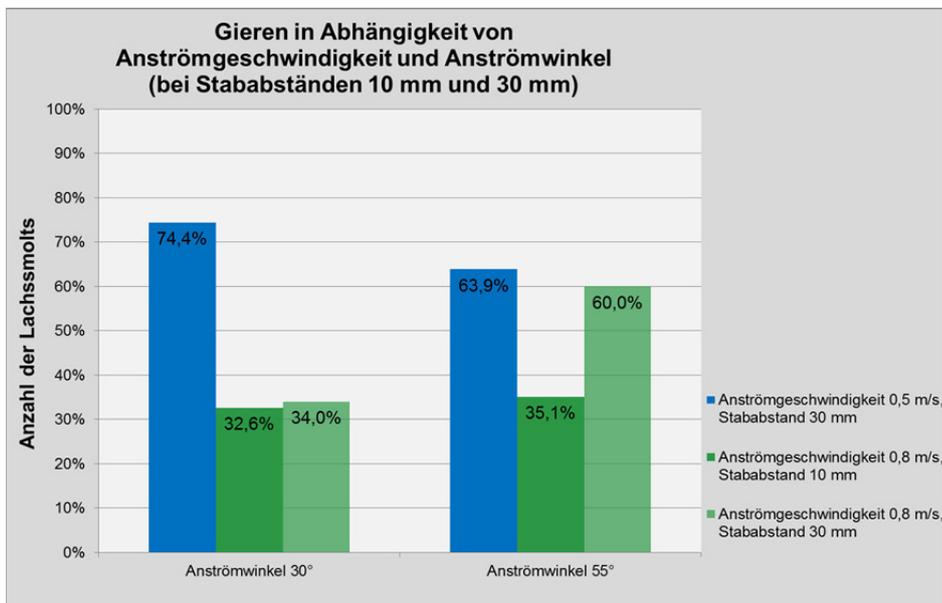


Abb. 113: Häufigkeit des Gierens bei Stababständen von 10 mm und 30 mm in Abhängigkeit von Anströmgeschwindigkeit und Anströmwindel.

Gründe für den stärker werdenden Einfluss des Stababstands mit steigendem Anströmwindel auf das Gierverhalten lassen sich aus den erstellten Strömungssignaturen nicht ableiten. Die Ursache liegt vermutlich im direkten Nahbereich der Rechenebene von ca. 1 cm (Hübner et al., 2011), welche hydrometrisch mit den zur Verfü-

gung stehenden Messgeräten nicht mehr aufzunehmen war. Bei einem Stababstand von 30 mm war die Strömungseinschnürung zwischen den Rechenstäben und damit die Zunahme der Beschleunigung und der Druckverlust zwischen den Rechenstäben geringer, als bei einem Stababstand von 10 mm. Damit reduzierten sich auch die Ablösungen und Verwirbelungen (= Inhomogenitäten) am Schrägrechen, welche sich negativ auf die Häufigkeit eines Gierverhaltens auswirken könnten.

Das Gieren stellte in Kombination mit einer anschließenden Drift eine Verhaltensweise dar, welche in den meisten untersuchten Fällen zu einer zügigen und erfolgreichen Abwanderung führte. Sie ist daher entsprechend geometrisch und hydraulisch bei der Planung und Auslegung von Schrägrechen zu berücksichtigen und zu fördern. Aufgrund der oben aufgeführten Befunde eignen sich geringe Anströmgeschwindigkeiten (0,4 m/s und 0,5 m/s) für die Bildung eines ausgeprägten Gierverhaltens, ebenso Anströmwinkel von 30° bis 55°. Sollten aufgrund baulicher Zwänge an Bestandskraftwerken hohe Anströmgeschwindigkeiten (0,7 m/s und 0,8 m/s) vorliegen, so ist ein Anströmwinkel größer/gleich 45° zu wählen und von einem kleinen Anströmwinkel von 30° abzusehen. Ausführliche Empfehlungen für die Planung werden nach Auswertung und Berücksichtigung aller Verhaltensweisen in Kap. 6.3 aufgeführt.

Ein bisher noch nicht bekanntes – dem Gieren ähnliches – Verhaltensmuster wurde an den Fischen beim Sondieren des Schrägrechens häufig beobachtet: Lachssmolts schwammen mit Kopf voraus in Strömungsrichtung auf der linken Rinnenseite in Richtung Bypass. Kurz vor dem Bypass stoppten sie ab und zeigten damit fehlende Akzeptanz gegenüber dem Bypasseinlauf. Sie führten anschließend eine Drehbewegung in Richtung Schrägrechen aus, schwammen Kopf voraus entlang der Rechenebene bis zur Rechenmitte und anschließend Richtung Oberstrom oder direkt bis zur strömungsberuhigten Zone an der rechten Rinnenwand (Abb. 114 links). Lachssmolts zeigten dieses Verhalten auch mehrmals innerhalb eines Versuchsdurchgangs. Die Körperschrägstellung während des Schwimmens entlang der Rechenebene war wie beim Gieren bei einem Anströmwinkel des Schrägrechens von 45° um 20° bis 30° gegenüber der Anströmrichtung geneigt, jedoch in Richtung des Rechens betrachtet und nicht wie beim Gieren in Richtung des Bypasses (Abb. 114 rechts). Daher wurde dieses Verhaltensmuster der Körperschrägstellung Richtung Rechenebene „stromaufwärts gerichtetes Gieren“ genannt. Wie beim Gieren ist auch beim stromaufwärts gerichteten Gieren die Schrägstellung vom Anströmwinkel des Schrägrechens abhängig. Insgesamt verhielten sich 42% aller Lachssmolts so – unabhängig von den hydraulischen und geometrischen Versuchsparametern.

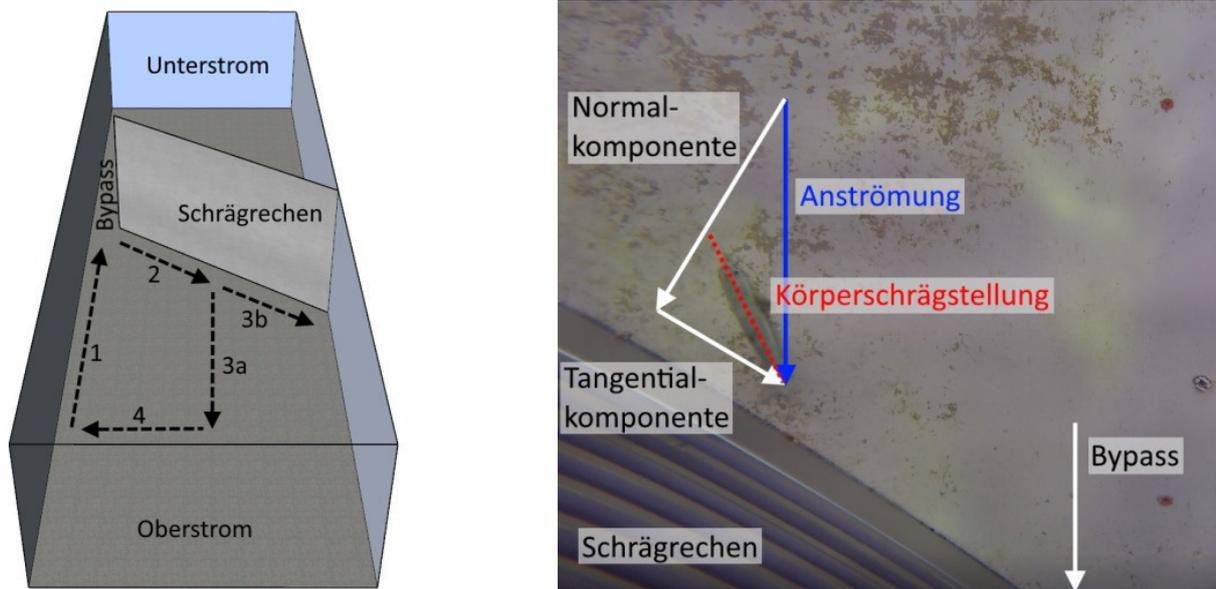


Abb. 114: Linkes Bild: Schema des stromaufwärts gerichteten Gierens entlang der Rechenebene bis zur Mitte (2) und Richtung Oberstrom (3a) mit anschließender Wiederholung (4 → 1) oder bis in strömungsberuhigte Zonen (3b). Rechtes Bild: Schrägstellung des Fisches (rot gestrichelte Linie) um 20° bis 30° gegenüber der Anströmrichtung geneigt in Richtung der Rechenebene bei einem Anströmwinkel des Schrägrechens von 45° (Foto zeigt Versuch-Nr. V10.3 mit Setupkonstellation 18mm/45°/0,8m/s).

Wertet man die Beobachtungsergebnisse mit einem Stababstand von 18 mm lediglich nach der Anströmgeschwindigkeit aus, so wurde das stromaufwärts gerichtete Gieren bei 0,7 m/s am seltensten beobachtet, bei 0,5 m/s am häufigsten – obwohl bei beiden Rechenetups mit 152 bzw. 153 nahezu gleich viele Probanden verwendet wurden. Die Flucht vor der Beschleunigung der Geschwindigkeit im Nahbereich des Bypasses und den dortigen inhomogenen Strömungssignaturen wurde durch die eingestellte Anströmgeschwindigkeit beeinflusst: Bei höheren Anströmgeschwindigkeiten (0,7 m/s und 0,8 m/s) suchten die Lachssmolts eher hektisch und gestresst den direkten Weg Richtung Oberstrom auf und zeigten kein stromaufwärts gerichtetes Gieren.

Die Auswertung unabhängig von der Anströmgeschwindigkeit und nur in Abhängigkeit vom Anströmwinkel ergab, dass das Verhalten häufiger bei großen Anströmwinkeln und damit bei kurzen Schrägrechen gezeigt wurde, als bei kleinen Anströmwinkeln langer Schrägrechen (Abb. 115). Die Häufigkeit des stromaufwärts gerichteten Gierens stieg somit bei steigendem Anströmwinkel an. Bei einem großen Anströmwinkel von 70° ist der Übergang von Bypassbereich zur Rechenebene für den Fisch mit einer kleineren Körperdrehung und Schrägstellung eher machbar, als bei kleinen Anströmwinkeln. Dadurch ist erklärbar, warum bei großen Anströmwinkeln mehr Lachssmolts das stromaufwärts gerichtete Gieren zeigten, als direkt umzudrehen und an der linken Rinnenwand stromauf zu schwimmen.

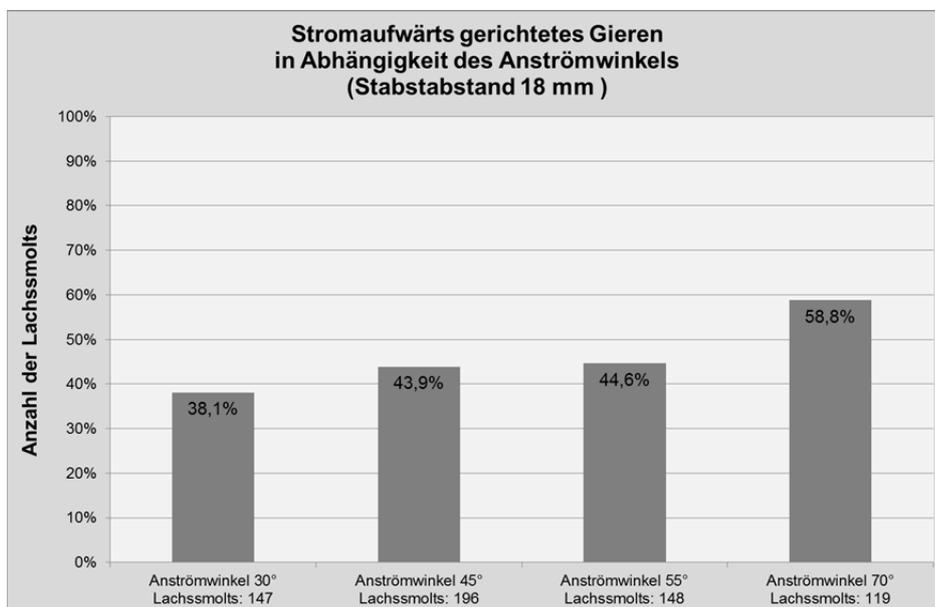


Abb. 115: Häufigkeit des stromaufwärts gerichteten Gierens von Lachssmolts in Abhängigkeit des Anströmwinkels bei einem Stababstand von 18 mm.

Bezieht man die verschiedenen untersuchten Stababstände in die Auswertung der Beobachtung mit ein, so ist erkennbar, dass die Häufigkeit eines stromaufwärts gerichteten Gierens mit steigendem Stababstand abnahm (Abb. 116). Der Stababstand wirkt sich demnach auf das aufwärts gerichtete Gieren aus: Je größer der Stababstand, desto geringer die Häufigkeit des stromaufwärts gerichteten Gierens. Da das stromaufwärts gerichtete Gieren die Abwanderung verzögert oder verhindert, ist diese Verhaltensweise möglichst durch äußere Einflussfaktoren zu vermeiden. Enge Stababstände wirken begünstigend auf das stromaufwärts gerichtete Gieren und damit hemmend auf das Abwanderungsverhalten.

Die Strömungsbedingungen im Nahbereich der Rechenebene waren für Lachssmolts bei kleinem Stababstand unattraktiver, da lokale Inhomogenitäten durch die Rechenanströmung entstanden (Abb. 117). Die Lachssmolts mieden daher bei kleinen Stababständen die Rechenebene und suchten alternative Wege zurück nach Oberstrom oder in strömungsberuhigte Zonen.

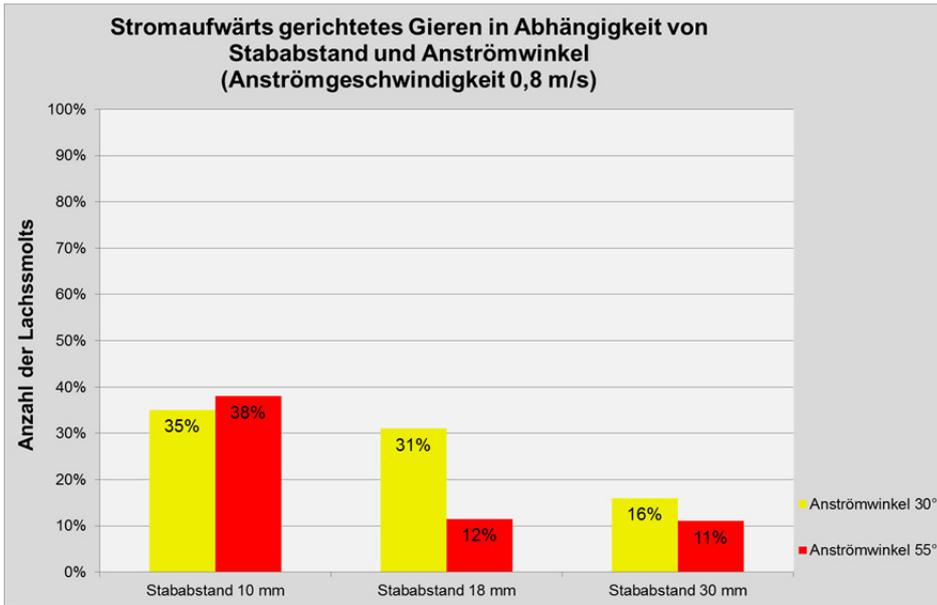


Abb. 116: Häufigkeit eines stromaufwärts gerichteten Gierens bei unterschiedlichen Stababständen und Anström winkeln sowie bei einer Anströmgeschwindigkeit von 0,8 m/s.

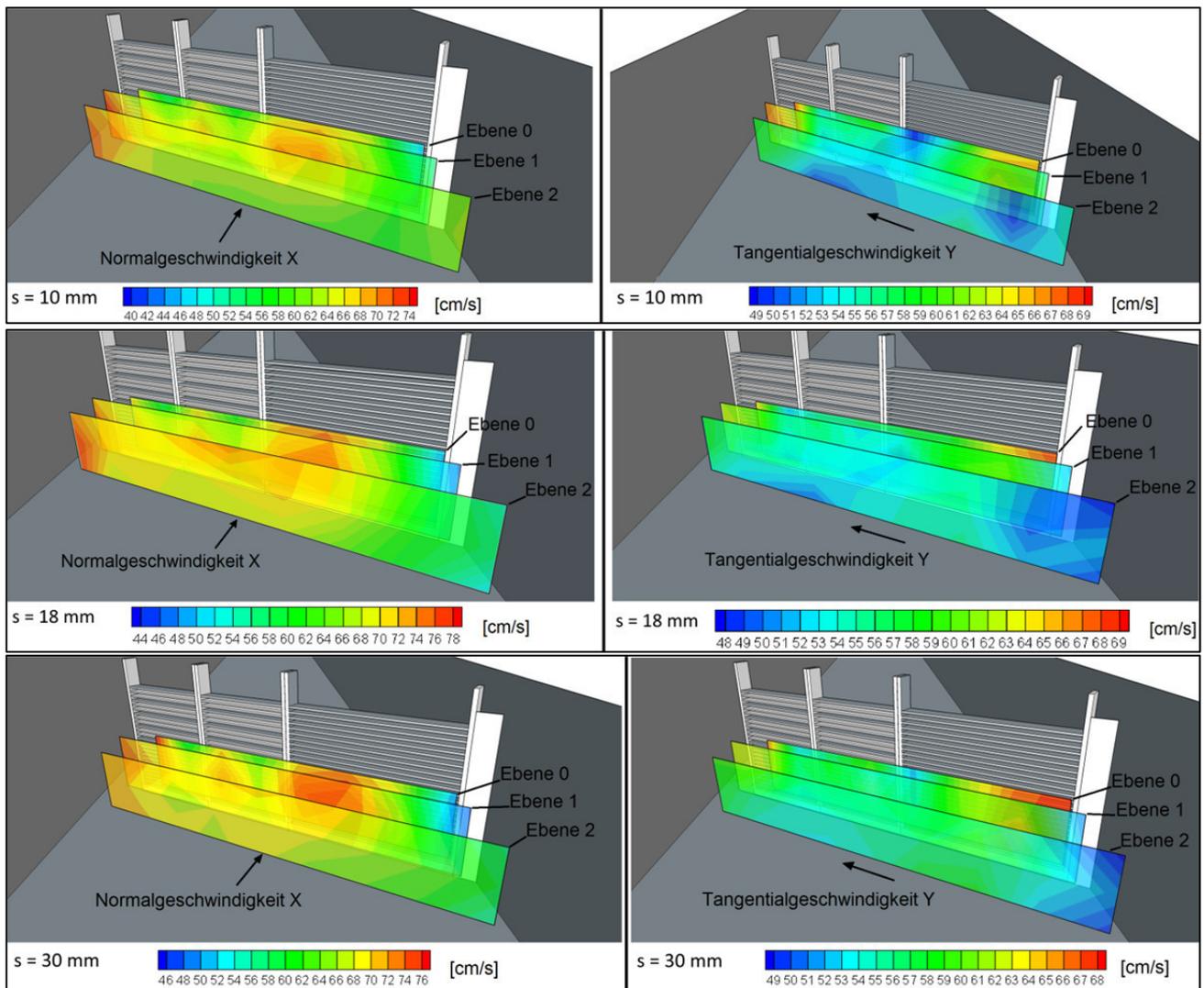


Abb. 117: Normale und tangentiale Strömungskomponente mit Geschwindigkeitszunahme im Nahfeld des Bypasses bei  $55^\circ$  und 0,8 m/s und mit unterschiedlichen Stababständen.

## Trampolinartiges Verhalten

Vergleichbar mit dem Gieren richteten sich die Lachssmolts beim sogenannten trampolinartigen Verhalten ebenfalls positiv rheotaktisch gegen die Strömung aus. Doch statt einer Schrägstellung entwickelte sich bei diesem Verhaltensmuster ein langsames Annähern mit der Schwanzflosse an den Rechen, gefolgt von einem Schwimmen um einige Zentimeter gegen die Strömung in Richtung Oberstrom. Durch ein mehrmaliges Wiederholen dieser Bewegungen entstand für den Beobachter der Eindruck eines „trampolinartigen Verhaltens“ (Lehmann *et al.*, 2016). Die Ursache für das Abtasten der Stabzwischenräume ist unklar, man vermutet jedoch, dass es sich um ein Sondieren der mechanischen Barriere handelt. Aufgrund des trampolinartigen Verhaltens wanderten die Lachssmolts zufällig in Richtung eines seitlich angeordneten Bypasses. Somit führte dieses Verhalten zwar zu einer Abwanderung, ist jedoch durch den Zufall bestimmt.

Betrachtet man zunächst die Auswertung der Erkenntnisse aus diesen trampolinartigen Bewegungen bei einem Stababstand von 18 mm und in Abhängigkeit der Anströmgeschwindigkeit, so erkennt man, dass die Häufigkeit des trampolinartigen Verhaltens mit steigender Geschwindigkeit abnimmt und zwar von 41% bei 0,4 m/s auf nur noch 8% bei 0,8 m/s (Abb. 120). Starke Strömungen und inhomogene Signaturen (Abb. 110 und Abb. 111) hemmen nicht nur das Gieren sondern auch die Häufigkeit eines trampolinartigen Verhaltens. Die Häufigkeit eines trampolinartigen Verhaltens liegt bei jeder getesteten Anströmgeschwindigkeit außerdem unter der eines Gierens und war damit am Schrägrechen seltener zu beobachten, als das Gieren. Da die Lachssmolts teilweise während einer Versuchsdurchführung sowohl das Gierverhalten als auch das trampolinartige Verhalten zeigten, betragen die prozentualen Werte der Häufigkeiten von Gieren und trampolinartigem Verhalten in Summe mehr als 100% (Abb. 118).

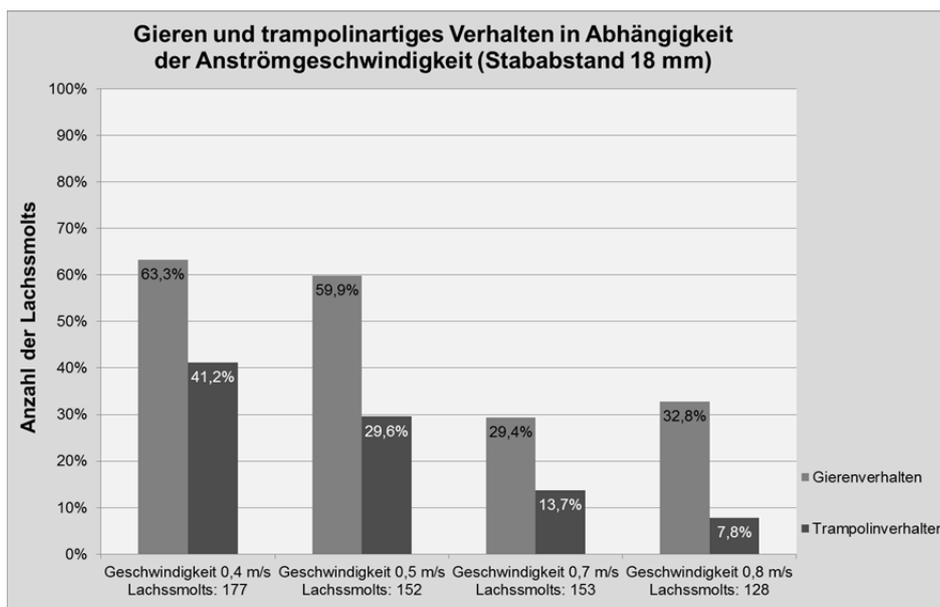


Abb. 118: Häufigkeit des trampolinartigen Verhaltens und des Gierens in Abhängigkeit der Anströmgeschwindigkeit bei einem Stababstand von 18 mm über alle Anströmwinkel betrachtet.

Vernachlässigt man die Anströmgeschwindigkeit und untersucht nur den Einfluss des Anströmwinkels, so war auch hier eine Abnahme der Häufigkeit des trampolinartigen Verhaltens mit steigendem Anströmwinkel zu beobachten. Das Optimum des trampolinartigen Verhaltens lag wie beim Gieren bei einem Anströmwinkel von 45° (leicht über dem Wert bei 30°) und sank mit steigendem Anströmwinkel rasch auf 3% ab (Abb. 119). Auch in dieser Betrachtung lag die Häufigkeit eines trampolinartigen Verhaltens unter der Häufigkeit des Gierens.

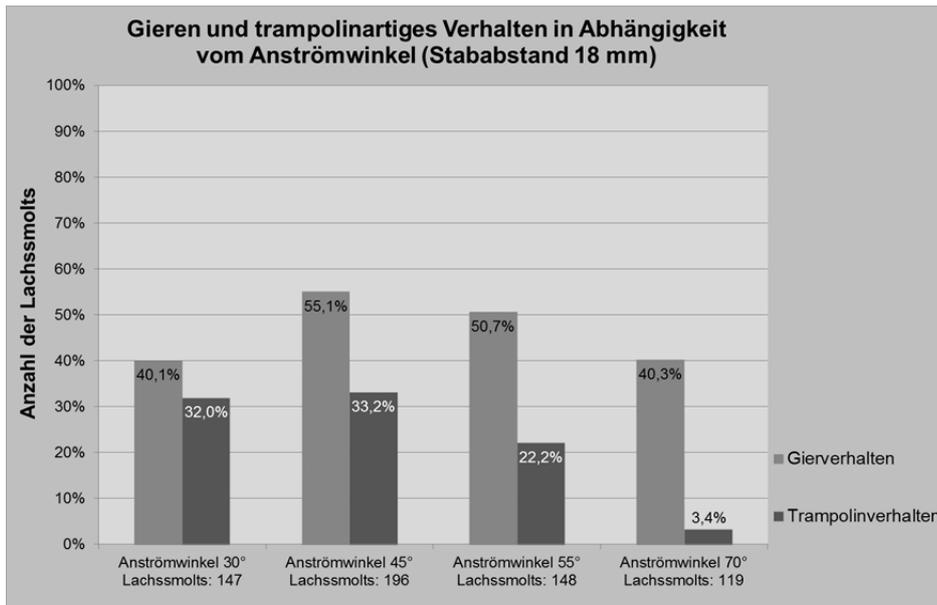


Abb. 119: Häufigkeit des trampolinartigen Verhaltens und des Gierens in Abhängigkeit des Anströmwinkels bei einem Stababstand von 18 mm über alle Geschwindigkeiten betrachtet.

Berücksichtigt man in der Auswertung sowohl den Anströmwinkel als auch die Anströmgeschwindigkeit bei einem Stababstand von 18 mm, so ist erkennbar, dass die größte Häufigkeit eines trampolinartigen Verhaltens bei kleinen Geschwindigkeiten (0,4 m/s) auftrat, bei denen die Lachssmolts kontrolliert den Rechen immer wieder berühren konnten, ohne der Gefahr eines Impingements ausgesetzt zu sein (Abb. 120). Bei großen Anströmwinden von 70° konnte dieses Verhaltensmuster nur bei geringen Geschwindigkeiten beobachtet werden. Bei größeren Anströmgeschwindigkeiten entgehen die Lachssmolts an einem Rechen ohne große Schrägstellung damit der Gefahr, an den Schrägrechen gedrückt zu werden. Bei einer Geschwindigkeit von 0,8 m/s wurde das trampolinartige Verhalten nur bei einem kleinen Anströmwinkel von 30° beobachtet, da Fische hier aufgrund der Rechenschrägstellung mit wenigen Bewegungen große Distanzen entlang der Rechenebene Richtung Bypass zurücklegen konnten.

Daraus (Abb. 120) leitet sich ab, dass der Anströmwinkel, ebenso wie die Anströmgeschwindigkeit, für die Häufigkeit eines trampolinartigen Verhaltens die wesentlichen Einflussfaktoren darstellen.

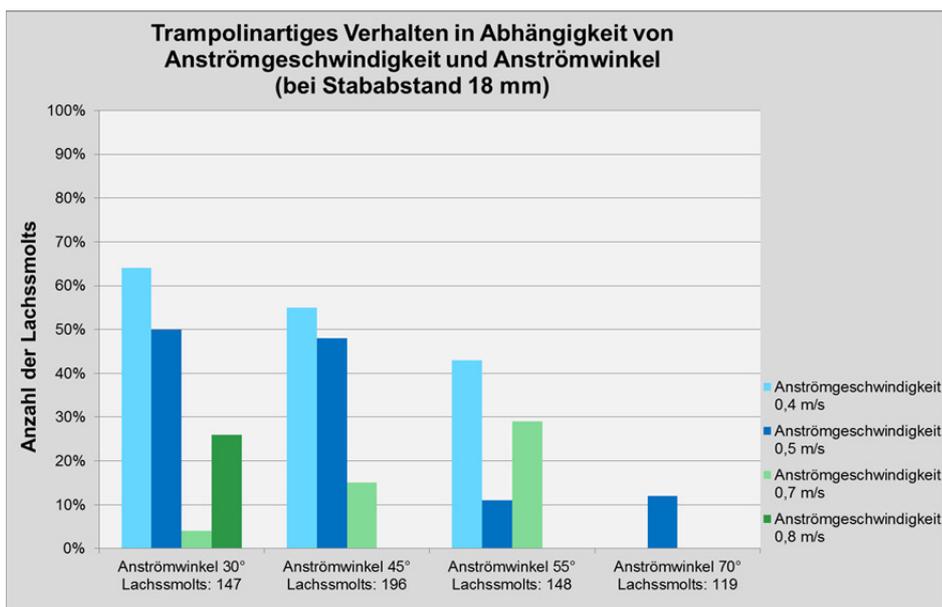


Abb. 120: Häufigkeit des trampolinartigen Verhaltens in Abhängigkeit der Anströmgeschwindigkeit und des Anströmwinkels bei einem Stababstand von 18 mm.

---

Bei einem Stababstand von 10 mm war in den untersuchten Rechenetups mit einer Anströmgeschwindigkeit von 0,8 m/s und Anström winkeln von 30° und 55° kein trampolinartiges Verhalten zu beobachten. Dies hing mit der Geschwindigkeitszunahme im direkten Nahbereich der Stabzwischenräume (Ablösezone) zusammen: Während des trampolinartigen Verhaltens berührten die Fische mit ihrer Schwanzflosse den Schrägrechen und nahmen so die Geschwindigkeitszunahme bzw. Erhöhung der Beschleunigung in den Rechenzwischenräumen wahr. Die Fische schreckten vor dieser Geschwindigkeitszunahme zurück, d.h. sie mieden diese Bereiche und übten damit das Verhaltensmuster des trampolinartigen Verhaltens nicht aus. Das trampolinartige Verhalten war daher bei geringen Stababständen nicht zu beobachten.

Bei Stababständen von 30 mm konnten keine eindeutigen Befunde gemacht werden.

Wie auf das Gieren, so folgte auch auf das trampolinartige Verhalten häufig eine erfolgreiche Abwanderung. Daher ist auch diese Verhaltensweise bei einer Bemessung von Schrägrechen zu berücksichtigen und deren begünstigte Faktoren in die Planung einzubeziehen.

Das trampolinartige Verhalten war auch bei orthogonal positionierten Rechen beobachtbar (*Lehmann et al.*, 2016).

### Rechenkontakte

Im Gegensatz zu Aalen, die häufig mit mechanischen Barrieren kollidieren und an ihnen verharren (*Adam et al.*, 1999), scheuten die Lachssmolts den Kontakt mit den untersuchten Schrägrechen. Verschiedene Situationen führten aber in den durchgeführten Laborstudien an Schrägrechen auch bei Lachssmolts zu Berührungen oder Kontakten. Diese waren meist abhängig von geometrischen und hydraulischen Randbedingungen in der Laborrinne bzw. am Schrägrechen, aber auch vom Sozialverhalten der Fische untereinander. Stresssituationen und aggressives Verhalten einiger Lachssmolts lösten bei Artgenossen ruckartige und gestresste Bewegungen – häufig in Strömungsrichtung und damit gegen den Schrägrechen – aus. Schwache Tiere kollidierten bei hohen Geschwindigkeiten mit dem Schrägrechen. Doch gemessen an der hohen Gesamtanzahl von über 400 Probanden hatten vergleichsweise wenige Lachssmolts Kontakt mit den Schrägrechen.

Die Gefahr des Impingement bestand bei keinem Rechensetup im Labor, so dass mit Blick auf die Schwimmleistung der Lachssmolts (Kap. 5.3.1, Tab. 21) davon auszugehen ist, dass auch Anströmgeschwindigkeiten größer als 0,8 m/s ein sicheres Navigieren der Lachssmolts im Nahfeld des Rechens kaum beeinflussen. Diese Feststellung bestätigt die von *Adam et al.* (1999) gemachten Beobachtungen von Lachssmolts an konventionellen Rechen und Louvern.

Die meisten Rechenkontakte wurden – unter Nichtberücksichtigung des Anström winkels – bei einem Stababstand von 18 mm und einer Geschwindigkeit von 0,8 m/s beobachtet: 16% aller Probanden berührten den Rechen (Abb. 121). Vor allem schwache Tiere kollidierten häufig mit dem Schrägrechen und konnten zu Versuchsende erschöpft am unterwasserseitigen Ende der Versuchsrinne aufgefunden werden. Bei höheren Anströmgeschwindigkeiten konnte aggressives Verhalten der Fische festgestellt werden, was sich durch Revierkämpfe in strömungsberuhigten Zonen äußerte und zu Rechenberührungen führte.

Die Häufigkeiten der Rechenkontakte lagen bei den anderen untersuchten Stababständen (10 mm und 30 mm) jeweils niedriger als bei einem Stababstand von 18 mm (Abb. 121). Bei engen Stababständen wie 10 mm entstanden heterogene Strömungsbedingungen im Nahfeld des Rechens und in den Zwischenräumen der Rechenstäbe, was Meidungsreaktionen der Fische am Rechen auslöste bzw. zu einem Aufsuchen von strömungsberuhigten Zonen führte. Größere Stababstände führten bei den Lachssmolts zu einem Passieren des Schrägrechens, was wahrscheinlich bei den Fischen eine Meidung dieser Zonen zur Folge hatte.

Insgesamt betrachtet liegen alle Häufigkeiten von Rechenkontakten auf einem niedrigen Niveau (Abb. 121).

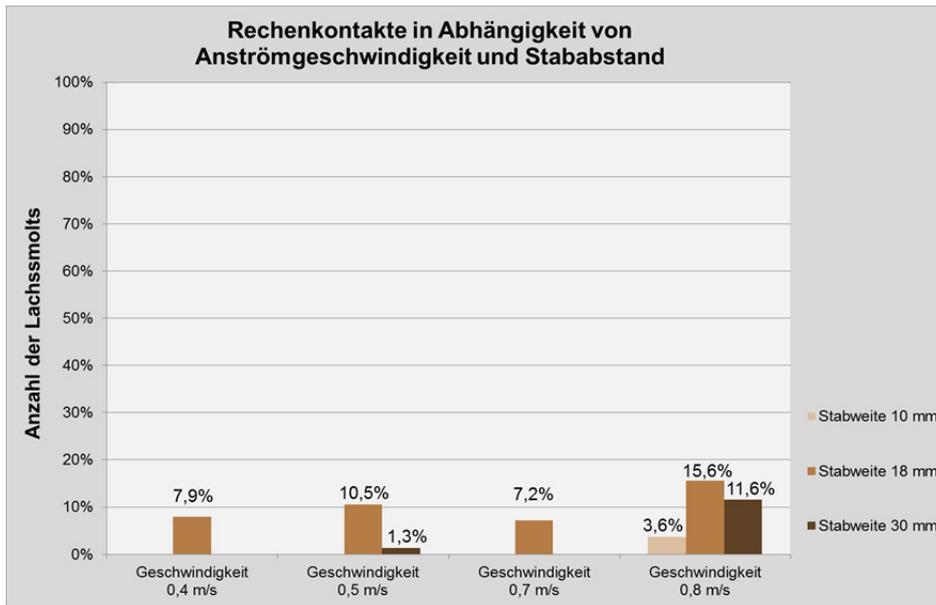


Abb. 121: Anzahl der Rechenkontakte in Relation zu allen Probanden in Abhängigkeit von Anströmgeschwindigkeit und Stababstand.

Bezieht man den Anströmwinkel in die Betrachtung mit ein (bei einem Stababstand von 18 mm), wird ersichtlich, dass die Anzahl an Rechenkontakten bei Anströmgeschwindigkeiten zwischen 0,4 m/s und 0,7 m/s und Anströmwindeln von 45° bis 55° einen Peak erreichen und davor bei einem Anströmwinkel 30° sowie danach bei 70° wieder abfallen (Abb. 122). Bei Anströmgeschwindigkeiten von 0,8 m/s steigt die Anzahl der Rechenkontakte bei 70° jedoch auf ein Maximum von 30% an. Dies könnte daran liegen, dass gestresste Tiere bei einem großen Anströmwinkel eher mit dem Rechen kollidieren, als bei kleinen Anströmwindeln und damit längeren Schrägrechen. Bei kleinen Anströmwindeln können Fische – auch ruckartig und unkontrolliert – in Richtung eines seitlichen Bypass ausweichen, bevor es zu einer Rechenberührung kommt.

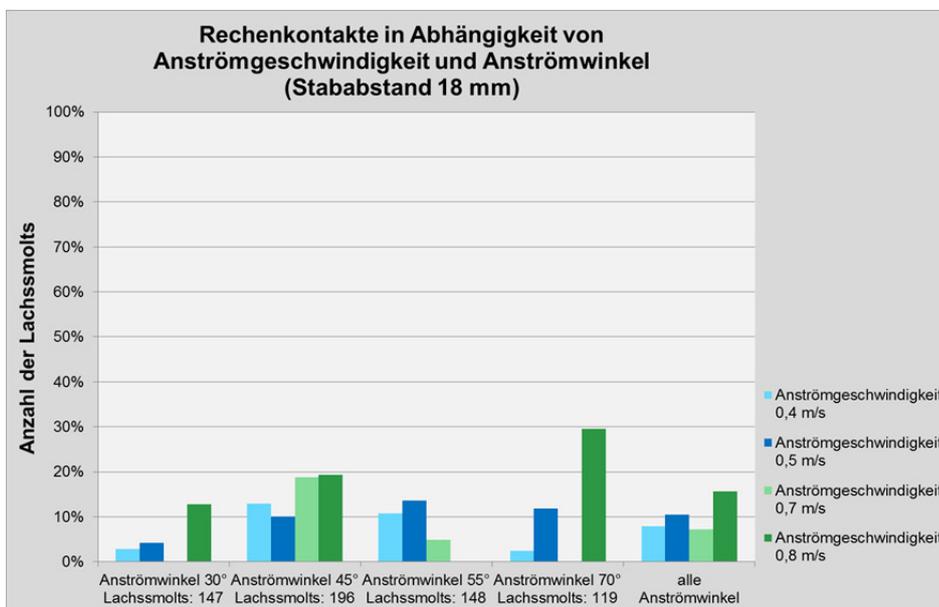


Abb. 122: Rechenkontakte in Abhängigkeit von Anströmgeschwindigkeit und Anströmwinkel bei Stababständen von 18 mm.

Die ethohydraulischen Studien zeigten, dass Rechenkontakte bei den untersuchten Fischen zu einem längeren Verharren in strömungsberuhigten Zonen und zu einem Meiden von Schrägrechen und Bypass führten. Daher sollten Schrägrechen so ausgelegt werden, dass Rechenkontakte möglichst vermieden werden.

## Rechenpassagen

Die Schrägrechen wurden im Zuge der Untersuchungen nur selten von den Lachssmolts passiert (= Rechenpassagen). Daraus leitete sich eine hohe Schutzrate bzw. Effizienz (Dumont, 2011) der getesteten Schrägrechen ab. Nur bei einem Anströmwinkel von 45° kam es bei einem Stababstand von 18 mm zu zwei Rechenpassagen. Ein Lachssmolt passierte den Schrägrechen bei 0,5 m/s und einer bei 0,8 m/s – von insgesamt 610 eingesetzten Lachssmolts. Dies entsprach einer Rechenpassagen-Quote von nur 0,3% aller Lachssmolts bei einem Stababstand von 18 mm.

Bei einem Stababstand von 10 mm kam es zu keinen Rechenpassagen, bei einem Stababstand von 30 mm mehrten sich die Rechenpassagen vor allem bei einer Anströmgeschwindigkeit von 0,8 m/s – sowohl bei 30° (6% von 147 Lachssmolts) als auch bei 55° Anströmung (13% von 148 Lachssmolts) (Abb. 123).

Die Anzahl der Rechenpassagen bei einem Stababstand von 30 mm war insgesamt betrachtet trotzdem gering (5% aller Lachssmolts), obwohl bei 30 mm die Probanden problemlos die Räume zwischen den Rechenstäben durchschwimmen konnten. Ein Grund hierfür könnte die visuelle Wahrnehmung der Barriere sein und/oder die plötzliche Strömungsbeschleunigung im Bereich zwischen den Rechenstäben, vor denen die Lachssmolts Abstand hielten, nachdem sie diese Beschleunigung evtl. bei einem vorausgegangenem Rechenkontakt gespürt hatten.

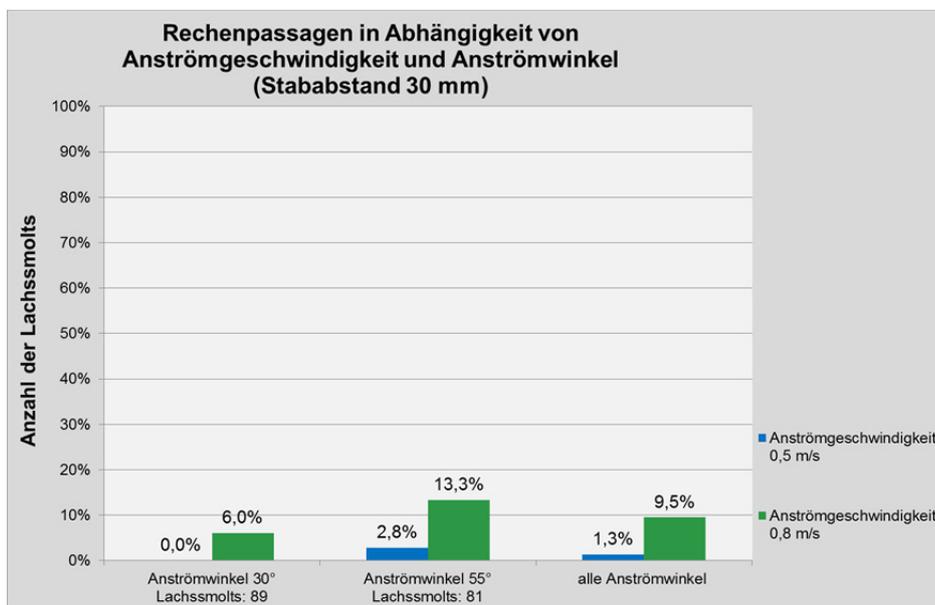


Abb. 123: Rechenpassagen in Abhängigkeit von Anströmgeschwindigkeit und Anströmwinkel bei einem Stababstand von 30 mm.

Da der Bypass im unterstromigen Becken endete, von dem aus die Fische an die Rückseite des Schrägrechens schwimmen konnten, wurden auch Rechenpassagen von Unterstrom nach Oberstrom beobachtet. Auslöser für das Zurückschwimmen in den Oberstrom des Schrägrechens befindlichen Verband war ein ausgeprägtes Schwarmverhalten oder ein Zurückkehren in den strömungsberuhigten Bereich an der rechten Rinnenwand. Dies war für die Lachssmolts mit schwierigen Strömungsbedingungen, welche sich unterwasserseitig des Schrägrechens ausbildeten und durch Turbulenzen und Verwirbelungen entstanden, verbunden (Kap. 2.6.1). Das Schwarmverhalten oder die Rückkehr in eine strömungsberuhigte Zone hatte in diesem Moment jedoch Priorität gegenüber den inhomogenen Strömungsbedingungen, so dass die Lachssmolts kurzzeitig ihre Sprintgeschwindigkeit für eine Rückkehr nach Oberstrom nutzten.

Insgesamt war dieses Verhalten bei drei von 610 Lachssmolts bei den Versuchen mit einem Stababstand von 18 mm zu beobachten sowie bei zwei von 170 Lachssmolts bei einer einem Stababstand von 30 mm:

Beim Rechensetup V10.3 (45°/18mm/0,8m/s) handelte es sich um einen konkreten Lachssmolt, der zuvor den Schrägrechen von Oberstrom nach Unterstrom passiert hatte. Er hatte noch genügend Schwimmkapazitäten zur Verfügung, um nach der Rechenpassage wieder durch den Schrägrechen zurück nach Oberstrom zu schwim-

---

men. Die zuvor erfolgte Rechenpassage war daher nicht einer zu hohen Geschwindigkeit oder dem Ermüden der Lachssmolts zuzuschreiben, sondern einem zufälligen Ereignis oder einer Stresssituation.

Beim Rechensetup V7.2 und V7.3 (70°/18mm/0,4m/s) hingegen wanderten zwei Lachssmolts über den Bypass ab und anschließend über den Schrägrechen wieder nach Oberstrom zurück. Gleiches war auch beim Rechen-setup V21.2 (30°/30mm/0,5m/s) zu beobachten: Hier wanderte ein Lachssmolt über den Bypass ab und über den Schrägrechen wieder auf.

Dies zeigt, dass solche Aufwanderungen unabhängig von Anströmgeschwindigkeit, Anströmwinkel und Stababstand sind – nur bei geringen Stababständen von 10 mm war dies physisch nicht mehr möglich.

Eine Rotation des Fisches in seine Seitenlage und das dadurch mögliche Passieren des Schrägrechens wurde lediglich einmal beobachtet. Der Lachssmolt schwamm Kopf voraus in hoher Geschwindigkeit auf den Schrägrechen zu, rotierte um seine Längsachse und passierte den Rechen in Seitenlage. Dies erfolgte direkt bei Versuchsbeginn, was eher auf Stress in der Versuchsrinne zurückzuführen war, als einem bewussten und kontrollierten Abwandern durch den Schrägrechen sowie einer beabsichtigten Schrägstellung. Alle anderen Lachssmolts veränderten ihre natürliche Körperausrichtung nicht und drehten sich nicht um ihre Längsachse. Dies bestätigen auch Untersuchungen von *Ebel* (2010).

Mit einer derartigen Schrägstellung um die Längsachse könnten auch höhere und dünnere Fische den Schrägrechen mit horizontal ausgerichteten Stäben passieren. Dies war das Ergebnis des Monitorings an der WKA Walkmühle in Thüringen an der Werra auf Grundlage einer statistischen Auswertung: Bleie, Hasel, Schleie und Gründlinge, deren Körperhöhen größer als der 20 mm-Schrägrechen waren, passierten teilweise den Rechen, was nach Aussage der Autoren auf eine Schrägstellung um die Längsachse des Fisches zurückzuführen war (*Schmalz*, 2011). Die betroffenen Fische erlitten laut den Autoren große Schuppenverluste. Diese Verletzungen könnten ggf. nicht nur durch die Turbinenpassage verursacht worden sein, sondern auch aufgrund eines Hindurchquetschens durch den Schrägrechen, aufgrund Erschöpfung oder mechanischer Einwirkung durch die RRM. Stressverhalten kann ebenso eine Ursache für eine ruckartige und gequetschte Rechenpassage sein. Eine Schrägstellung um die Längsachse entspricht nicht dem natürlichen Verhalten von Fischen (*Schock, Württembergischer Anglerverein e.V.*, mündlich, 2017).

Der Schrägrechen besitzt aufgrund dieser Tatsache Vorteile gegenüber konventionellen Rechen mit vertikal angeströmten Stäben und kann daher mit größerem Stababstand als der konventionelle Rechen ausgestattet werden.

### **Schwarmverhalten**

Erkennbare Muster des Schwarmverhaltens (*Adam et al.*, 1999 und *Lehmann et al.*, 2016) wurden bei jedem Versuch und unabhängig vom Setup und den eingestellten Randbedingungen beobachtet. Alle bzw. nahezu alle Lachssmolts befanden sich im Laufe eines Versuchsdurchgangs eine bestimmte Zeit innerhalb eines mehr oder weniger lockeren Verbands (Abb. 124), lösten sich daraus und schwammen wieder dazu. Einzelne Fische, welche den Verband verließen, kehrten oftmals nach kürzester Zeit wieder dorthin zurück. Dies betraf teilweise auch durch den Schrägrechen hindurch abgewanderte Lachssmolts, die den Weg zurück zum Schwarm über die Stabzwischenräume nahmen und damit eine kurze Zeit hohen Anströmgeschwindigkeiten und Druckunterschieden ausgesetzt waren. Das Schwarmverhalten war stellenweise so ausgeprägt, dass sich einzelne Individuen aus dem Verband an der rechten Rinnenwand lösten, Richtung Bypass wanderten und anschließend entlang der Rechenebene wieder zurück in den Schwarm bewegten. Häufig setzte sich kurz darauf der gesamte Schwarm Richtung Bypass in Bewegung. Bei einzelnen Rechen setups mit niedrigen Anströmgeschwindigkeiten verhielten sich zeitweise alle Lachssmolts in einem Schwarm auf.

Vereinzelt war zu beobachten, dass Lachssmolts bestimmte strömungsberuhigte Bereiche gegenüber anderen Fischen verteidigten und mit Beißattacken auf ein Eindringen in ihr Territorium reagierten. Dieses Phänomen wurde auch bei *Lehmann et al.* (2016) beobachtet. Dies war v.a. bei bereits mehrfach eingesetzten Fischgruppen zu erkennen.

Das sogenannte Wächterverhalten am Bypasseingang, welches bei *Lehmann et al.* (2016) beobachtet wurde, beschreibt ein aggressives Verhalten eines Lachssmolts, der den Einlauf zum Bypass versperrt und andere Lachssmolts durch Beißattacken o.ä. vertreibt. Dieses Verhalten am Bypasseinlauf wurde bei den durchgeführten Versuchen nicht beobachtet. Es wird jedoch darauf hingewiesen, dass das Hauptaugenmerk dieser For-

---

schungsarbeit auf das Verhalten vor dem Schrägrechen und nicht auf die Akzeptanz des Bypasses und dessen Einlaufbereich gerichtet war.



Abb. 124: Schwarmverhalten im Versuch-Nr. V7.1 bei dem sich alle Probanden in einem Schwarm vor der Rechenebene befanden (links) und ein locker aufgelöster Schwarm im Versuch-Nr. V3.3, bei dem sich alle Lachssmolts aneinander reihten (rechts).

### Lernverhalten

Bereits bei *Adam et al.* (2011) wurde auf die Problematik des Lernverhaltens von Fischen in ethohydraulischen Tests eingegangen. Da die Laborversuche die Realität abbilden sollten, stand ein Lerneffekt bei den Lachssmolts aufgrund mehrmaligen Einsatzes unter gleichen Randbedingungen eines Setups einem natürlichen Verhalten gegenüber. In der Realität stellt jedes Kraftwerk bzw. jeder Schrägrechen aufgrund vieler verschiedener Einflussfaktoren ein Unikat dar, so dass ein Lernprozess hier nahezu unmöglich ist. Das Lernverhalten musste daher durch den Einsatz unterschiedlicher Probandengruppen bei gleichen Rechenetups sowie durch möglichst wenig wiederholte Einsätze einzelner Gruppen minimiert werden.

Die Probandengruppen wurden daher maximal 4-mal eingesetzt, wobei immer mindestens ein Tag Pause zwischen den Versuchen lag. Darüber hinaus wurde darauf geachtet, dass die Lachssmolts beim gleichen Rechen-setup nicht 2-mal eingesetzt wurden, sondern stets bei anderen Setups. Lediglich die äußeren Einflüsse blieben gleich: Die Laborrinne als Gewässer, der Schrägrechen als Barriere und die Individuen innerhalb einer Probandengruppe (Gruppenzusammenstellung).

Bei den verwendeten Lachssmolts wurde kein Lernverhalten beobachtet, wie z. B. ein Auflösen des Schwarms nach mehreren Tagen (*Lehmann et al.*, 2016). Die hier eingesetzten Lachssmoltgruppen wurden seltener und mit größerem Abstand verwendet als bei *Lehmann et al.* und somit konnte sich kein beobachtbares Lernverhalten ausprägen.

### Bypasspassagen

Grundsätzlich ist das Verhalten am Schrägrechen und nicht der Erfolg einer Abwanderung durch einen seitlichen Bypass Gegenstand dieses Forschungsprojekts. Dennoch wurden die Auf- und Abwanderungen am Bypass aufgezeichnet, um Erfolge oder Misserfolge sowie Meidungsreaktionen nach bestimmten Verhaltensmustern festzuhalten und auszuwerten.

Da der Bypass über die gesamte Wassertiefe hin geöffnet und der unterstromige Bereich nicht abgetrennt war, konnten Fische auch mehrmals auf- und abwandern, was ebenfalls erfasst wurde. Die nachfolgenden prozentualen Angaben beziehen sich auf die Anzahl an Bypasspassagen in Relation zur Anzahl der eingesetzten Probanden.

Unabhängig vom Anströmwinkel nahm die Anzahl der Abwanderungen (= Bypasspassagen) bei einem Stababstand von 18 mm mit steigender Geschwindigkeit ab und zwar von 73% bei einer Anströmgeschwindigkeit von 0,4 m/s auf 21% bei einer Anströmgeschwindigkeit von 0,8 m/s. Hohe Anströmgeschwindigkeiten führten am

---

Bypasseinlauf zu heterogenen Strömungssignaturen, welche Meidungsreaktionen am Bypasseinlauf auslösten und eine Abwanderung behinderten.

Unter Berücksichtigung beider Einflussfaktoren – Anströmwinkel und Anströmgeschwindigkeit – und einem Stababstand von 18 mm sind niedrige Geschwindigkeiten (0,4 m/s bis 0,5 m/s) bei allen Anströmwinkeln förderlich für die Wahrscheinlichkeit einer Abwanderung durch den Bypass. Bei hohen Geschwindigkeiten (0,7 m/s bis 0,8 m/s) eignet sich ein Anströmwinkel von 45° am besten für eine erfolgreiche Abwanderung, da hier auch das Gieren am ausgeprägtesten ist.

Der Stababstand zeigte ebenfalls einen Einfluss auf die Bypasspassagen: Je größer der Stababstand (in einer Spannweite von 10 mm bis 30 mm), desto höher die Wahrscheinlichkeit einer Abwanderung bei hohen Anströmgeschwindigkeiten, da hier die Geschwindigkeitszunahmen an der Rechenebene in Richtung Bypass geringer sind, als bei kleinen Stababständen (Kap. 2.3).

Eine erfolgreiche Bypasspassage wurde größtenteils durch das Gierverhalten oder durch das trampolinartige Verhalten ausgelöst.

### **Ausnutzung der Wassertiefe**

Die maximal zur Verfügung stehende Wassertiefe in der Versuchsrinne betrug je nach Setup zwischen 0,60 m und 0,80 m und resultierte aus der Abflussmenge und der eingestellten Anströmgeschwindigkeit. Grundlage hierfür bildet die Kontinuitätsgleichung (Gl. 1).

Die Mehrheit der Probanden hielt sich sohnlah oder in strömungsberuhigten Zonen übereinander gereiht auf (Abb. 125). Stellenweise nutzten Lachssmolts bei unterschiedlichen Rechensetups aber auch die gesamte Wassertiefe in der Rinne für Schwimmbewegungen aus. Auch Rechendurchgänge von Oberstrom nach Unterstrom und zurück fanden vereinzelt auch im mittleren oder oberen Bereich des Schrägrechens statt. In einigen wenigen Fällen hatte es sogar den Anschein, als ob die Smolts mit dem Kopf aus dem Wasser ragten, um sich zu orientieren. Diese Beobachtung wurde in verschiedenen Reaktionsräumen vor dem Schrägrechen bzw. in der Rinne gemacht. Eine konkrete Zuordnung zu einem bestimmten Reaktionsraum konnte nicht gemacht werden. Strömungssignaturen (Kap. 4.1.3, Abb. 57) zeigen auf, dass aufgrund der geringen Wassertiefe im Labor eine einheitliche Anströmgeschwindigkeit über die gesamte Wassertiefe ermittelt wurde. Dies kann eine Erklärung für den Aufenthalt der Fische über die gesamte Wassertiefe darstellen.



Abb. 125: Sohnlah orientierte Lachssmolts (links) bei Versuch-Nr. V13.2 und über 2/3 der Wassertiefe aufgereichte Lachssmolts (rechts) bei Versuch-Nr. V22.2.

### **6.1.4. Empfehlungen für die Schrägrechenbemessung anhand der Laborstudien**

Die nachfolgende Zusammenfassung der Befunde aus den Laborstudien und daraus resultierende Empfehlungen können für eine Bemessung eines Schrägrechens auf Grundlage der Laborstudien gemacht werden. Eine Ergebnissynthese mit den Erkenntnissen aus den Feldstudien erfolgt später (Kap. 6.3).

- Das **Verharren** wirkt sich zwar auf den Zeitfaktor bei der Abwanderung aus, doch auch nach langen Zeiten des Verharrens bei hohen Anströmgeschwindigkeiten (0,8 m/s) wird der Bypass aufgefunden und als Abwanderungsweg akzeptiert. Daher beeinflusst ein langes Verharren nicht zwangsläufig die Abwanderungsquote, wirkt sich jedoch möglicherweise auf die Reproduzierbarkeit bei einer Aneinanderreihung mehrerer schwierig aufzufindender Bypässe aus. In der Natur befinden sich im Gewässer mehr Unsicherheitsfaktoren als im Labor, welche die Lachssmolts zum Verharren bringen könnten, wie z. B. Temperaturwechsel, Tag-/Nachtwechsel, direkte Sonneneinstrahlung bzw. Schattenschlag, Fressfeinde, Verlandung am Schrägrechen, Verwirbelungen und Rückströmungen. Das Verharren der Fische zeigte sich im Labor vorwiegend bei hohen Anströmgeschwindigkeiten durch Aufsuchen von strömungsberuhigten Zonen.
- Das **Gieren** beeinflusst die Auffindbarkeit und Akzeptanz des Bypasses positiv, daher ist es durch die entsprechende Wahl von Rechenparametern zu begünstigen. Bei wechselnden Anströmgeschwindigkeiten ist ein Anströmwinkel von 45° bis 55° zu wählen. Bei niedrigeren Geschwindigkeiten (0,4 m/s bis 0,5 m/s) ist ein Anströmwinkel von 30° am besten geeignet. Ein Anströmwinkel von 70° ist nur bei höheren Anströmgeschwindigkeiten (0,8 m/s) zu empfehlen, z. B. bei Bestandsanlagen mit beengten Möglichkeiten zum Umbau. Da größere Stababstände das Gieren begünstigen, ist ein Stababstand von 18 mm bis 30 mm zu wählen. Das Gieren ist eine Verhaltensweise, welche bislang nur an Schrägrechen beobachtet wurde.
- **Stromaufwärts gerichtetes Gieren** ist ein Verhaltensmuster, bei dem der Bypass von den Fischen gemieden wird und diese entlang der Rechenebene Richtung Oberstrom oder in strömungsberuhigten Zonen schwimmen. Dieses Verhalten ist daher möglichst zu vermeiden. Ausgeprägt war dieses Muster bei Stababständen von 10 mm und bei Anströmwinkeln von 70°. Von einer Installation eines 70°-Schrägrechens und zu kleinen Stababständen (10 mm und kleiner) wird daher abgeraten.
- Das **trampolinartige Verhalten** wirkt sich ebenfalls positiv auf die Abwanderung aus, ist jedoch seltener als das Gierverhalten zu beobachten. Bei kleinen Anströmwinkeln und kleinen Anströmgeschwindigkeiten ist die Häufigkeit eines trampolinartigen Verhaltens ausgeprägter als bei größeren Anströmwinkeln und größeren Anströmgeschwindigkeiten. Kleine Stababstände verhinderten das Verhaltensmuster, daher sollten Stababstände von 18 mm bis 30 mm gewählt werden. Außerdem kann bei einem Stababstand von 18 mm und gleichzeitig kleinem Anströmwinkel die Anströmgeschwindigkeit 0,8 m/s betragen.
- **Rechenkontakte** wirken sich als verzögernde Komponente auf die Abwanderung aus und waren bei höheren Geschwindigkeiten eher ein Zeichen von Stressreaktionen. Teilweise führen Rechenkontakte auch zu einer Meidungsreaktion am Schrägrechen und/oder am Bypass und damit zu einer verzögerten Abwanderung. Um dies zu vermeiden, sind Stababstände von 18 mm oder 30 mm und Anströmwinkel von 30° bis 55° zu wählen. Je höher die Anströmgeschwindigkeit, desto wahrscheinlicher sind die Rechenkontakte. Diese liegen aber auch bei einer Anströmgeschwindigkeit von 0,8 m/s noch im moderaten, prozentual niedrigen Bereich.
- Bei allen Rechen setups gab es relativ gesehen wenige bis keine **Rechenpassagen**. Die Tendenz zu vermehrten Rechenpassagen bei Stababständen von 30 mm und großen Anströmwinkeln von 70° ist jedoch ersichtlich. Daher sind bei großen Stababständen von 30 mm kleine Anströmwinkel von 30° zu empfehlen. Bei einem Stababstand von 18 mm kann der Anströmwinkel frei gewählt werden. Ein Teil der Rechenpassagen war zufällig und nicht verursacht durch eine verminderte Schwimmleistung, da einzelne Lachssmolts durch den Schrägrechen von Unterstrom nach Oberstrom schwammen. Bei großen Anströmgeschwindigkeiten von 0,8 m/s ist ein kleinerer Stababstand besser geeignet als ein größerer Stababstand. Der Schrägrechen verursacht eine teilweise rein verhaltensbiologische Schutzwirkung, da die Lachssmolts bei Stababständen von 30 mm trotz kleiner Körperhöhe selten den Schrägrechen passieren. Anströmbedingungen und Anströmwinkel sind hierbei die maßgeblichen Mechanismen für die Schutz- und Leitwirkung. Ein Schräglegen um die Längsachse wurde bei den Lachssmolts lediglich 1-mal von 610 Smolts beobachtet und ist mit 0,2% daher vernachlässigbar.

- Das **Schwarmverhalten** hat keine positive oder negative Auswirkung auf das Verhalten am Schrägrechen, auf dessen Leitfunktion und auf die Auffindbarkeit eines möglichen Bypasses. Es war jedoch stark ausgeprägt und konnte in nahezu allen Versuchen beobachtet werden.
- **Bypasspassagen** stellen den Erfolg bei den Abwanderungen von Lachssmolts dar und konnten anhand der tatsächlich abgewanderten Anzahl von Probanden gemessen werden. Bei höheren Anströmgeschwindigkeiten (0,7 m/s bis 0,8 m/s) ist möglichst ein Anströmwinkel von 45° zu wählen, bei niedrigeren Anströmgeschwindigkeiten (0,4 m/s bis 0,5 m/s) sind alle Anströmwinkel (30°, 45°, 55°, 70°) gut geeignet.

## Fazit

Drei Einflussfaktoren wirkten sich auf die Schutz- und Leitwirkung von Schrägrechen auf Lachssmolts aus: Der Anströmwinkel, die Anströmgeschwindigkeit und der Stababstand.

Insgesamt spielte der Stababstand eine eher untergeordnete Rolle für die Leitwirkung von Schrägrechen mit horizontalen Stäben. Die einflussreichsten Parameter waren die Anströmgeschwindigkeit und der Anströmwinkel, da bestimmte Verhaltensmuster (Gieren und trampolinartiges Verhalten) von beiden abhängig waren und diese Verhaltensmuster die Abwanderung beeinflussen bzw. initiieren konnten. Der Stababstand muss daher bei Lachssmolts nicht zwingend mit maximal 15 mm vorgesehen werden.

Es ist zu beachten, dass das Gieren, welches eine Abwanderung begünstigte, nur bei Schrägrechen zu beobachten war und nicht bei konventionellen Rechen. Daher dürfen Ergebnisse aus Untersuchungen mit konventionellen Rechen nicht ohne Weiteres auf Schrägrechen übertragen werden und umgekehrt. Die Schrägrechen beeinflussen das Verhalten von Fischen anders als konventionelle Rechen und haben daher auch andere Verhaltensmuster zur Folge.

Bemessungswerte für die Planung von Schrägrechen werden für die Anforderungen von Lachssmolts in der vorliegenden Arbeit nach einer Ergebnissynthese der Laborversuche mit den Feldstudien in Kapitel 6.4 gegeben.

## 6.2. Feldversuche mit Lachssmolts am Wasserkraftwerk Ottenau (Schrägrechen)

Zur Verifizierung der im Labor erhaltenen Befunde und Erkenntnisse wurden im Anschluss daran am EnBW Wasserkraftstandort Ottenau an der Murg Lachssmoltsstudien mittels Telemetrie durchgeführt. Die Untersuchungen dienen dazu, Aufschluss über das Fischverhalten an Schrägrechen unter Naturbedingungen zu erhalten und mögliche Übertragbarkeiten der Ergebnisse aus Laborstudien auf das Freiland festzustellen. Es wird in diesem Kapitel aufgezeigt, welche Abwanderungswege von den Smolts akzeptiert und passiert wurden und wie sie sich am Schrägrechen verhielten.

### 6.2.1. Versuchsaufbau und -durchführung

Die Freilanduntersuchungen mit Lachssmolts wurden im Zeitraum 04.05.2016 bis 17.05.2016 durchgeführt. Die Monate April und Mai sind zwar typische Abwanderungsmonate für Lachssmolts, jedoch ist deren Abwanderung abhängig von der Wassertemperatur. Diese muss für das Einsetzen der Abwanderung einen Schwellenwert von ca. 10°C erreichen (Weibel *et al.*, 2015). Zunächst waren die Feldstudien vom Projektteam für Mitte/Ende April 2016 vorgesehen gewesen. Aufgrund des langen Winters 2016 und dem erneutem Schneefall Ende April 2016 verzögerten sich die Feldstudien, da in der Murg lange Zeit Wassertemperaturen unter 10°C gemessen wurden. In der ersten Maiwoche stiegen die Luft- und somit auch die Wassertemperaturen, so dass mit den Feldstudien am 04.05.2016 begonnen werden konnte.

Eine Kraftwerks- und Rechenbeschreibung ist in der vorliegenden Arbeit bereits enthalten (Kap. 4.2.1), die nachfolgende Abbildung veranschaulicht nochmals die Einlaufsituation am Schrägrechen Ottenau (Abb. 126).



Abb. 126: Luftbild der Einlaufsituation in Ottenau mit Lage der Fischauf- und Fischabstiegsanlage sowie des Schrägrechens im Einlaufkanal des Kraftwerks Ottenau (Quelle: verändert nach Google.maps).

Die geometrischen Versuchsparameter sind in Ottenau wie folgt:

- Anströmwinkel des Schrägrechens  $\delta = 44^\circ$  (dieser ist mit dem  $45^\circ$ -Laborwinkel gleichzusetzen)
- Stababstand des Schrägrechens  $s = 18 \text{ mm}$
- Rechteckprofil der Rechenstäbe mit einem Profilbeiwert  $k_s = 2,42$
- Rechenstabdicke  $d = 8 \text{ mm}$
- Rechenstablänge  $l = 60 \text{ mm}$

Jeder der 60 Lachssmolts wurde mit einer fortlaufenden Nummer 1 bis 60 versehen, dem ein Sendercode im Transponder zugeordnet wurde. Darüber hinaus wurde das Einsetzdatum (04.05.2017) tabellarisch festgehalten sowie die Uhrzeit der Freisetzung. Zusätzlich wurde jeder Fisch gewogen und seine Körperlänge bestimmt. Die Fische hatten im Schnitt ein Gewicht von 90,5 Gramm und eine durchschnittliche Körperlänge von 20,7 cm. Eine Liste der eingesetzten Lachssmolts mit Durchnummerierung und Codenummern, Gewicht, Länge sowie Uhrzeit des Einsetzens in die Murg ist im Anhang 4 aufgeführt.

Es wurden vier unter dem Wasserspiegel liegende Antennen (= Unterwasser-Antennen) vor dem Schrägrechen positioniert (Abb. 127), eine Unterwasser-Antenne in der Fischabstiegsanlage, eine Yagi-Antenne in der Ausleitungsstrecke an der Straßenbrücke Ebersteinstraße sowie zwei Unterwasser-Antennen im Kraftwerkskanal ca. 50 m unterwasserseitig des Schrägrechens. Anhand der Signalstärke in der Fischabstiegsanlage bzw. in der daneben liegenden Fischaufstiegsanlage konnte bestimmt werden, ob ein Fisch über die Fischabstiegsanlage oder über die Fischaufstiegsanlage abgewandert war.



Abb. 127: Sogenannte Unterwasser-Antennen (4 Stück) vor dem Schrägrechen Ottenau, welche mit Seilen aufgespannt sind.

Die Tiere wurden am 04.05.2016 in drei Tranchen zu je 16 Exemplaren (15:15 Uhr), 17 Exemplaren (17:00 Uhr) und 27 Exemplaren (20:05 Uhr) freigelassen. Innerhalb von 13 Tagen waren alle 60 Lachssmolts abgewandert und der Versuch wurde als beendet erklärt.

Die Antennen wurden nach Versuchsende für die Aalfeldstudien an der Untersuchungsstelle belassen, lediglich die Schaltschränke und Aufzeichnungsgeräte wurden deinstalliert, ausgewertet und eingelagert.

Im Abwanderungszeitraum betrug die Kraftwerksleistung aufgrund der Abflüsse in der Murg ohne große Schwankungen im Schnitt 177 kW (Abb. 129). Dies entsprach einer Anströmgeschwindigkeit von 0,33 m/s vor dem Schrägrechen. Maximal erreicht wurde eine Geschwindigkeit von knapp 0,4 m/s in einem Zeitraum von zwei bis drei Tagen zu Beginn der Versuchsreihe am 04.05.2016 bis 06.05.2016. Die Ergebnisse waren daher mit den Laborerkenntnissen der Anströmgeschwindigkeit von 0,4 m/s zu vergleichen, um eine situative Ähnlichkeit herzustellen. Abflussbedingt und aufgrund der Verlandungsprobleme mit Kies am Einlauf des Kraftwerkskanals in Richtung Streichwehr konnte keine höhere Kraftwerksleistung gefahren und damit keine höhere Anströmgeschwindigkeit hergestellt werden. Weitere Schwierigkeiten bei der Durchführung der Aalstudien in Ottenau sind in Anhang 5 dargestellt.

Trotz einer über den Fließquerschnitt gemittelten Anströmgeschwindigkeit von 0,4 m/s entstanden am Schrägrechen Ottenau Bereiche mit höherer und niedrigerer Geschwindigkeit als 0,4 m/s (Abb. 128). Damit mussten die Lachssmolts auch bei der gemittelten Anströmgeschwindigkeit von knapp 0,4 m/s höhere Anströmgeschwindigkeiten durchschwimmen.

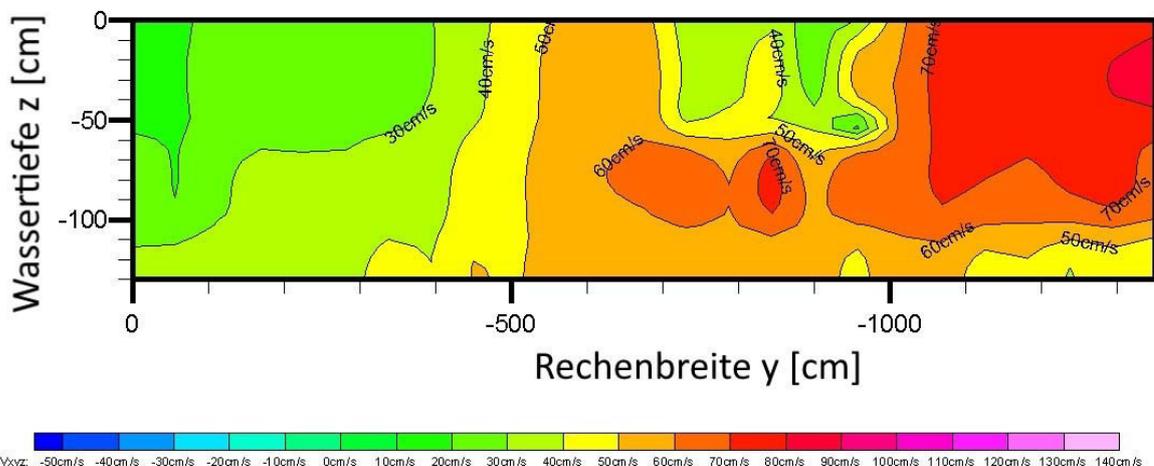


Abb. 128: Strömungssignatur am Schrägrechen Ottenau bei einer gemittelten Anströmgeschwindigkeit von 0,4 m/s. Vor allem rechts lagen Bereiche mit bis zu 0,8 m/s (Quelle: verändert nach Schwab, 2016).

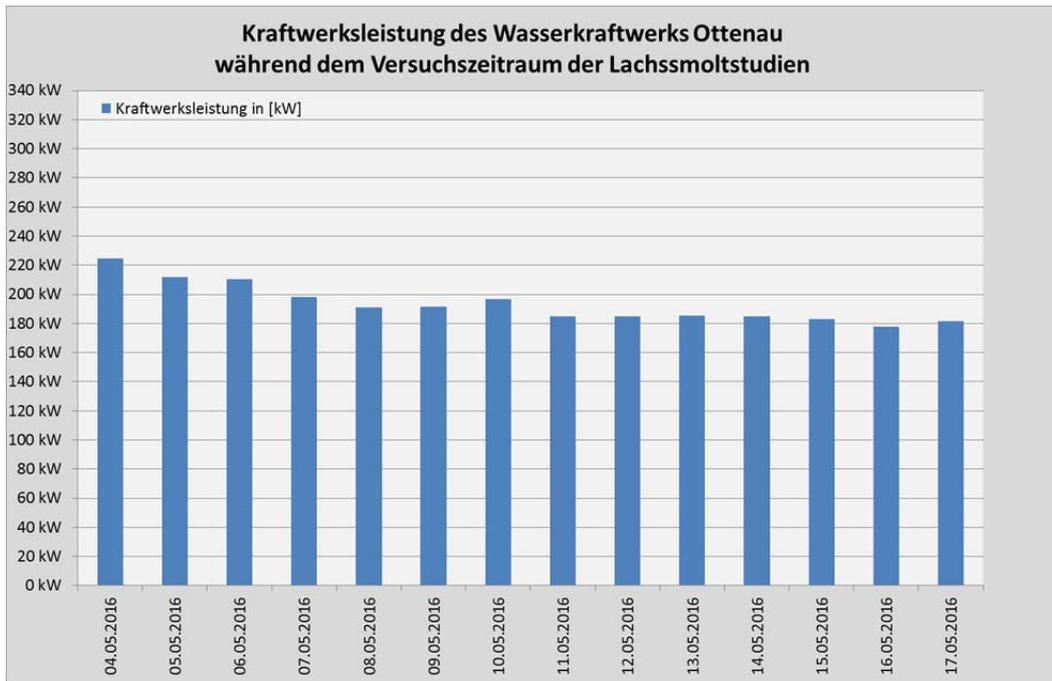


Abb. 129: Kraftwerksleistung im Versuchszeitraum vom 04.05.-17.05.2016 mit nur leicht schwankenden Abflüssen in Richtung des Wasserkraftwerks im Kraftwerkskanal und damit auch vor dem Schrägwehrgitter.

## 6.2.2. Befunde der Feldversuche mit Lachssmolts

Zur Auswertung der Freilandversuche mit Lachssmolts wurden sowohl die Abwanderungswege (= Abwanderungskorridore) nach ihrer Nutzungshäufigkeit statistisch bewertet, als auch das Verhalten am Schrägwehrgitter und die Abwanderungsdauer näher untersucht.

### Abwanderungskorridore

Die besenderten Lachssmolts nutzten alle Abwanderungskorridore aus, d.h. alle Abwanderungskorridore waren auffindbar und passierbar (Abb. 130). Lediglich ein Lachssmolt wanderte durch den Schrägwehrgitter in Richtung Kraftwerk ab, was einer Schutzrate und einer Effizienz des Schrägwehrgitters in Ottenau von 98% entspricht. Der Verbleib eines Lachssmolts ist unbekannt, von ihm wurden zwar Signale am Schrägwehrgitter empfangen, aber er wanderte nicht ab. Er kann Fressfeinden zum Opfer gefallen, durch Fischereipächter geangelt oder in Richtung Oberstrom geschwommen sein, um dort zu verharren.

Die Fischabstiegsanlage, welche in Verlängerung des Schrägwehrgitters angeordnet ist und mit einer Wassermenge von konstant 800 l/s beaufschlagt wird, wurde von fast zwei Dritteln aller Versuchstiere aufgefunden und als Bypass akzeptiert. Der Anströmwinkel von 44° verursachte daher bei den Fischen Verhaltensreaktionen, die sie am Wehrgitter entlang Richtung Bypass schwimmen oder verdriften ließen. Die daneben angeordnete Fischabstiegsanlage wurde von immerhin noch einem Viertel aller Smolts als Abwanderungskorridor angenommen.

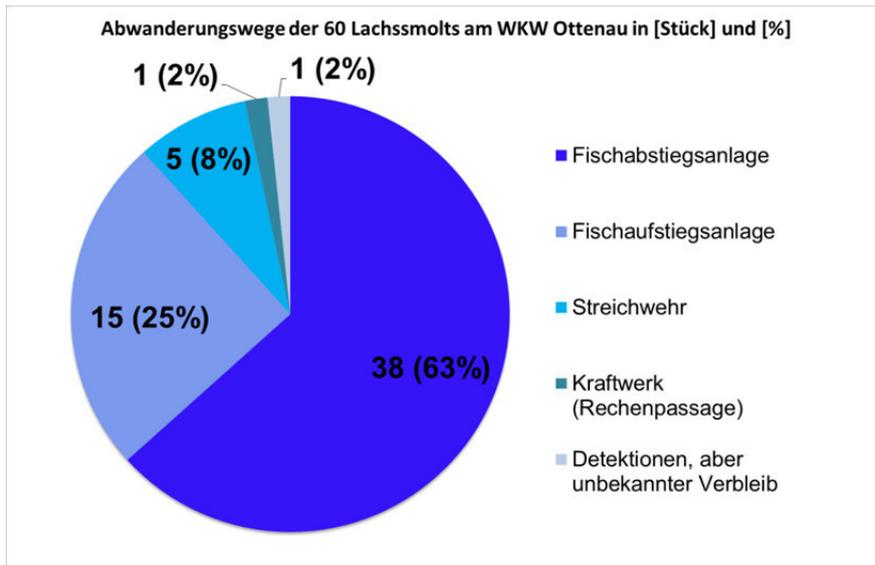


Abb. 130: Abwanderungskorridore der besenderten Lachssmolts während der Versuchsdurchführung vom 04.-17.05.2016.

Andere Untersuchungen an der mit Ottenau vergleichbaren Wasserkraftanlage Walkmühle an der Werra mit einem Ausbaudurchfluss von 12 m<sup>3</sup>/s zeigten hingegen eine gewisse Durchwanderbarkeit des dortigen 20 mm-Schrägrechens von Fischen mit einer Körperlänge von 5 cm bis 15 cm. Der dortige Anströmwinkel von 75° bis 80° ist groß ausgebildet (*Schmalz*, 2010) und verursacht somit offenbar keine ausreichende Leitwirkung, welche das Gieren oder das trampolinartige Verhalten auslösen könnte. Derartig große Anströmwinkel sind daher nicht zu empfehlen.

In einer 2014 im Auftrag des Regierungspräsidiums Karlsruhe und durch *Hydro-Energie Roth GmbH* durchgeführten Bestandsaufnahme der Auf- und Abwanderungsmöglichkeiten an der Murg wurden qualitative Aussagen zu den Erfolgsaussichten der angebotenen Abwanderungskorridore in Ottenau gemacht. Die Fischaufstiegsanlage wurde für Salmoniden aufgrund der tiefreichenden Tauchwand vor dem Einlauf als nicht qualifizierte Abstiegsmöglichkeit eingestuft und eine Auffindbarkeit als unwahrscheinlich bezeichnet. Ebenso wurde der freie Überfall an der Fischabstiegsklappe als Grund für Vermeidungsreaktionen genannt (*Hydro-Energie Roth*, 2014). Die tatsächlichen Ergebnisse der Feldstudien zeigten jedoch dem gegenüber eine gute Auffindbarkeit und Passierbarkeit der Fischaufstiegsanlage als Abwanderungskorridor sowie eine gute bis sehr gute Akzeptanz des Bypasses mit seinem oberflächennahen Wehrüberfall. Der vorhandene Tauchbalken hielt abwärts wandernde Lachssmolts vor einer Nutzung der Fischaufstiegsanlage nicht ab, ebenso führten die Strömungsbedingungen am Klappenüberfall nicht zu Vermeidungsreaktionen.

Diese Ergebnisse zeigen auf, dass eine günstig angeordnete Fischaufstiegsanlage, deren Ausstieg in Nähe des Bypasseinlaufs liegt und mit ausreichend Betriebswassermenge beaufschlagt wird, ebenso als Abwanderungskorridor geeignet ist, wie ein reiner Bypass. Dieses Phänomen wurde auch am Kraftwerk Auer Kotten festgestellt (*Lehmann et al.*, 2016). Obwohl dort der Fischpass am oberstromigen Ende des Rechens angeordnet ist – und nicht wie in Ottenau am unterstromigen Ende des Schrägrechens – führte eine ausreichende Beaufschlagung der Fischaufstiegsanlage und eine entsprechend große Öffnung zu einer Auffindbarkeit des potenziellen Abwanderkorridors.

Grundsätzlich gilt es aber zu beachten, dass die Funktionalität der Fischaufstiegsanlage durch eine zu nahe Anordnung des Ausstiegs am Schrägrechen nicht negativ beeinflusst werden darf: Erschöpft ankommende Fische im Oberwasser dürfen nicht durch zu hohe Anströmgeschwindigkeiten in Richtung Schrägrechen abgetrieben werden. Dies ist standortspezifisch zu prüfen und bei der Planung entsprechend zu berücksichtigen. Nicht bei jedem Standort kann der Fischauftstieg entsprechend günstig positioniert werden, v.a. bei Bestandsanlagen mit räumlichen Zwängen.

In Ottenau waren auch Abwanderungen über das Streichwehr zu beobachten. Diese können jederzeit am Wehreinchnitt an der linken Uferseite durchgeführt werden, da hier die Mindestwassermenge für die Ausleitungs-

strecke in konstanter Höhe abgegeben wird. Die gesamte Streichwehrbreite hingegen konnte bei erhöhtem Abfluss und damit bei Tagen mit Wehrüberfall für einen Abstieg genutzt werden. Während des Versuchs gab es einige Tage mit Wehrüberfall (Abb. 131), so dass die über das Streichwehr und dessen Wehreinschnitt abgewanderte Anzahl von fünf Lachssmolts realistisch erscheint. Streichwehre mit einer hohen Anzahl an Überfalltagen können daher als zusätzlichen Abwanderungskorridor für Lachssmolts herangezogen werden.

Nach den Aussagen von *Hydro-Energie Roth GmbH* (2014) ist das Streichwehr aufgrund der geringen Überströmhöhe, des kantigen Wehrrückens und des fehlenden Tosbeckens als Abwanderungsweg ungeeignet. Die Strömung vor dem Wehreinschnitt für die Mindestwasserabgabe soll laut *Hydro-Energie Roth GmbH* zu Vermeidungsreaktionen führen. Beide Punkte konnten im Rahmen der durchgeführten Studien widerlegt werden: Zumindest teilweise (8%) akzeptieren die Lachssmolts das Streichwehr als alternativen Abwanderungsweg. Bei ausschließlich sohl nah schwimmenden Fischen und Kleinstlebewesen und bei geringem Streichwehrüberfall könnte dieser Abwanderungsweg jedoch versagen. Eine weitere Abwanderungsmöglichkeit muss vorgesehen werden.



Abb. 131: Kurzzeitiger Streichwehrüberfall (ggf. durch Sunk und Schwall der Oberliegerkraftwerke hervorgerufen) am Streichwehr in Ottenau zu Versuchsbeginn am 04.05.2017.

Der Vergleich der Aussagen von *Hydro-Energie Roth GmbH* (2014) mit den hier gewonnenen Erkenntnissen über die Abwanderungskorridore in Ottenau zeigt, dass qualitative Aussagen ohne ethohydraulische Studien zu Fehlinterpretationen führen können. Diese können bei baulichen Änderungen hohe Kosten für Kraftwerksbetreiber verursachen.

### **Abwanderungsverhalten**

Das Abwanderungsverhalten kann mit den empfangenen Signaldaten der Lachssmolts für alle Antennenstandorte nachvollzogen und bewertet werden. 26 von 60 Lachssmolts lieferten konkrete Daten zur Analyse des Verhaltens im Nahbereich des Schrägrechens.

Alle Antennen wurden in den nachfolgenden Auswertungen farblich markiert und mit Nummern versehen (Abb. 132):

- Antenne 1 (dunkelblau): Aufnahme der Ausleitungsstrecke unterhalb von allen Abwanderungskorridoren, d.h. diese Antenne zeichnet alle abgewanderten Lachssmolts auf. Über die Differenz von Gesamtanzahl abgewandelter Lachssmolts und der am Rechen abgewanderten Lachssmolts erhält man die über das Streichwehr abgewanderten Probanden;
- Antenne 2/3 (mangenta): Aufnahme des Bereichs Unterstrom des Schrägrechens, d.h. hier werden Rechenpassagen aufgenommen;
- Antenne 4 (gelb): Aufnahme von Annäherungen an den Bypass sowie von Bypasspassagen;
- Antenne 5 (rot): Aufnahme des direkten Nahbereichs des Schrägrechens auf rechter Seite;

- Antenne 6 (grün): Aufnahme des direkten Nahbereichs des Schrägrechens auf linker Seite sowie des Nahbereichs am Einlauf der Fischaufstiegsanlage;
- Antenne 7 (lila): Aufnahme des Bereichs oberstrom des Schrägrechens auf rechter Seite;
- Antenne 8 (hellblau): Aufnahme des direkten Nahbereichs des Einlaufs der Fischaufstiegsanlage und des Bereichs oberstrom des Schrägrechens auf linker Seite (Bereich der Kiesablagerungen).

Über den Bypass abgewanderte Fische verursachten kurzzeitig einen deutlichen Peak an der Antenne 4 in der Fischabstiegsanlage. In diesem Fall passierte der Lachssmolt die Antenne im Bypass und wanderte über diesen ab. Zeigte sich lediglich eine Erhöhung der Signalstärke an Antenne 4 aber kein derartiger Peak, so wurde die daneben liegende Fischaufstiegsanlage zur Abwanderung benutzt. Daher musste keine separate Antenne in der Fischaufstiegsanlage positioniert werden.

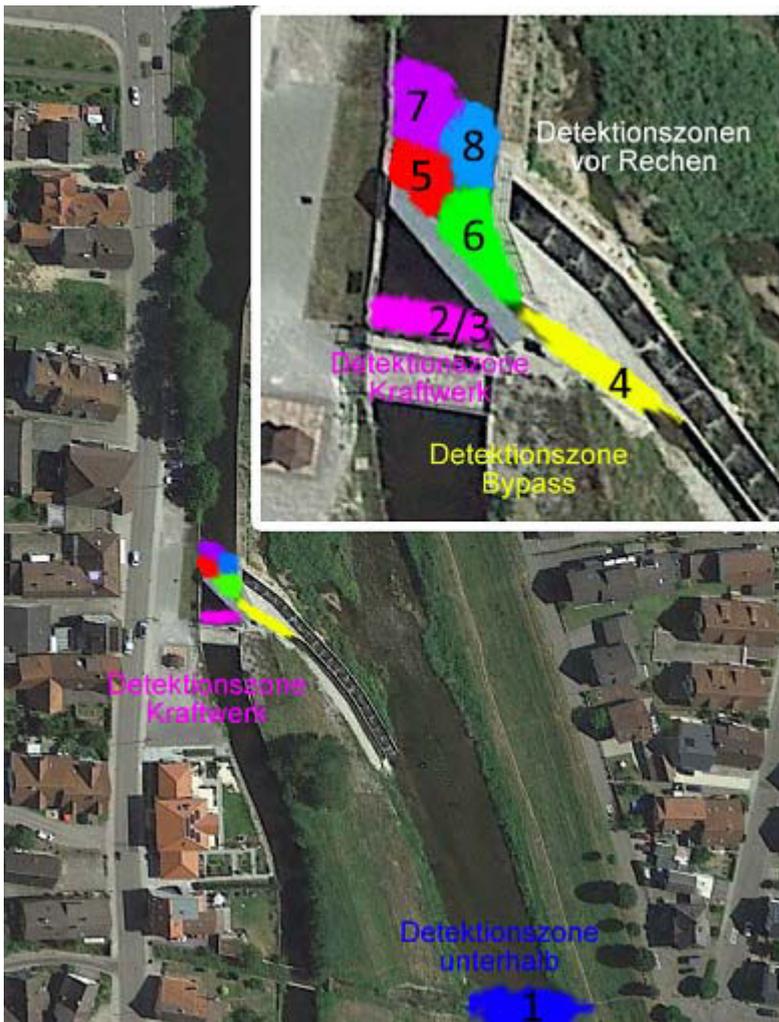


Abb. 132: Antennenbereiche Ober- und Unterstrom des Schrägrechens, in der Fischabstiegsanlage und in der Ausleitungsstrecke (Quelle: verändert nach Weibel et al. auf Basis von Google.maps, 2017).

Die x-Achse der nachfolgenden Diagramme bezeichnet die Zeitachse, die fisch- bzw. verhaltensabhängig und somit unterschiedlich skaliert ist. Auf der y-Achse ist die Signalstärke aufgetragen. Nicht für jede Minute existieren Detektionen, so dass stellenweise einige Minuten pro Stunde fehlen. Die Kurven geben Anhaltspunkte dafür, an welcher Gewässerseite bzw. in welchem Erfassungsbereich der Antennen sich ein Fisch zu einem bestimmten Zeitpunkt aufgehalten und welchen Abwanderungskorridor er gewählt hat (Wüst per E-Mail, 2017 und Kap. 5.5).

Es wurden drei unterschiedliche Verhaltensmuster im Nahbereich des Rechens festgestellt, nach denen die Auswertungen und Diagramme aufgeteilt wurden:

- Gruppe stationär (27% aller Lachssmolts)
- Gruppe sondierend (46% aller Lachssmolts)
- Gruppe sondierend-stationär rechts/links (27% aller Lachssmolts)

Bei den Lachssmolts wurde keine Abhängigkeit der Wanderbewegungen von der Tageszeit/Helligkeit festgestellt.

#### Gruppe stationär:

27% der Fische zeigten bei der Annäherung an den Rechen nur ein kurzes Suchverhalten. Anschließend führten sie bis zum Abstieg keine größeren Positionsveränderungen mehr durch. Diese Gruppe wurde daher als „stationär“ bezeichnet.

Beispielhaft wird das Verhalten von Smolt Nr. 36 (Code 33) dargestellt, der am 04.05.2016 um 17 Uhr in die Murg eingesetzt wurde. Am 06.05.2016 hielt er sich am Schrägrechen auf (Abb. 133). Die Signalstärken der Antennen 4, 5 und 6 waren über 7,5 Stunden relativ konstant, was ein stationäres Verhalten des Lachssmolts zeigt. Um 14:30 Uhr zeigten die Antennen 6 und 7 jeweils einen kleinen Peak, der Lachssmolt schwamm kurz vom Rechen weg Richtung rechtes Ufer, kehrte aber wieder an seinen Ausgangspunkt am Rechen zurück. Gegen 17:30 Uhr zeigte Antenne 4 einen deutlichen Peak – der Lachssmolt war über den Bypass abgestiegen. Während seines Aufenthaltes am Schrägrechen zeichneten die Antennen 7 und 8 ebenfalls einige Ausschläge der Signalstärke auf, was kleinräumige Suchbewegungen des Lachssmolts erklärt. Unterbrechungen der Aufzeichnungen einzelner Antennen wurden durch ein Herausschwimmen des Lachssmolts aus dem Detektionsbereich der Antenne verursacht oder sind fehlenden Daten zuzuschreiben.

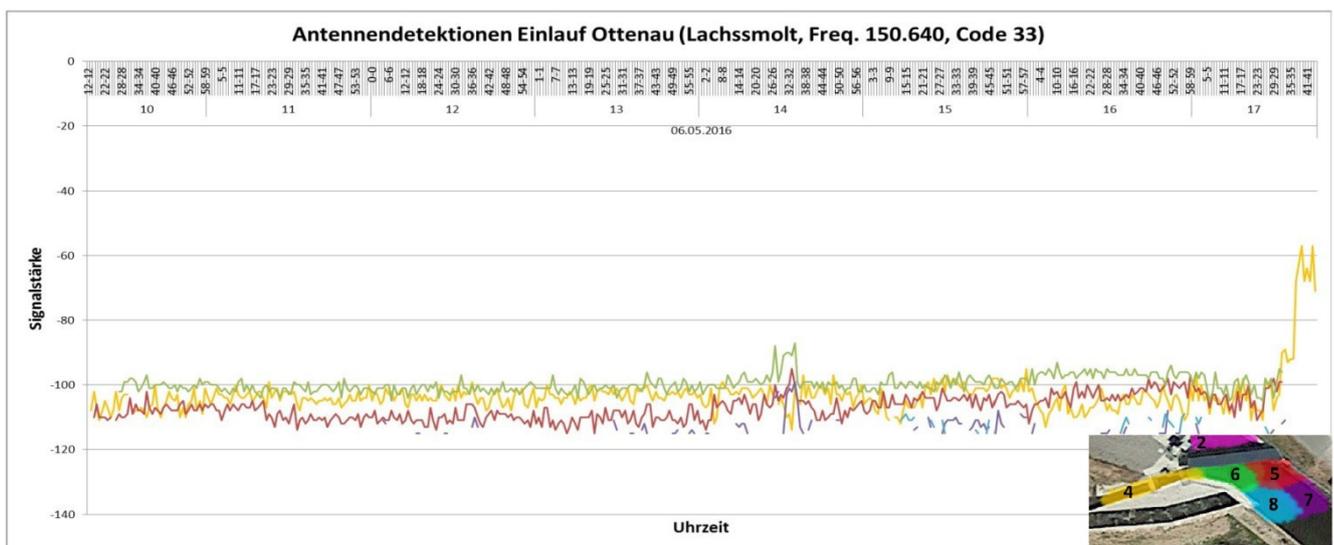


Abb. 133: Signalstärken, welche das Verhalten des Smolts mit Code-Nr. 33 am 06.05.2016 zwischen 10 und 18 Uhr vor dem Schrägrechen Ottenau wiedergeben.

Dieses Verhalten zeigt, dass auch ein längerer Aufenthalt am Schrägrechen über mehrere Stunden zu einem erfolgreichen Auffinden des Bypasses samt Abwanderung führen kann und der Prozess des Abwanderns nicht auf Sekunden oder Minuten begrenzt ist. Fische adaptieren sich mit der Umgebung, bis der Abwanderungsdrang groß genug oder mögliche Gefahren bei der Abwanderung wahrgenommen und eingeschätzt wurden.

Anhand der Auswertungen führte ein Lachssmolt eine Rechenpassage durch (Abb. 134). Er wurde am 04.05.2016 um 17 Uhr in die Murg eingesetzt und passierte noch am selben Tag um 22:21 Uhr den Rechen. Er führte gegen 17:30 Uhr Bewegungen zwischen den Antennen 6 bis 8 aus und verharrte anschließend mehrere Stunden im Bereich der Antenne 6 in der Nähe des Bypasses und der Antenne 4. Ab ca. 20:30 Uhr gab es dann nur noch Detektionen der Antenne 4 am Bypass, bevor diese in der Signalstärke um ca. 22:20 Uhr abnahmen und es zu einem Peak der Antenne 2 hinter dem Schrägrechen kam – der Lachssmolt war durch den Rechen abgewandert. Er hielt sich lange im Bereich des Bypasses auf, ohne diesen anzunehmen und entschied sich dann

für die Rechenpassage. Über die Gründe kann nur spekuliert werden: Es können Prädatoren oder andere Lachsmolts mit einem Wächterverhalten (vgl. *Lehmann et al., 2016*) im Bypassbereich Auslöser für diesen alternativen Abwanderungsweg gewesen sein, aber auch heterogene Strömungssignaturen, eine Flucht vor der Rechenreinigungsmaschine oder ein Ermüden des Lachsmolts, das zu einer passiven Drift durch den Rechen führte.

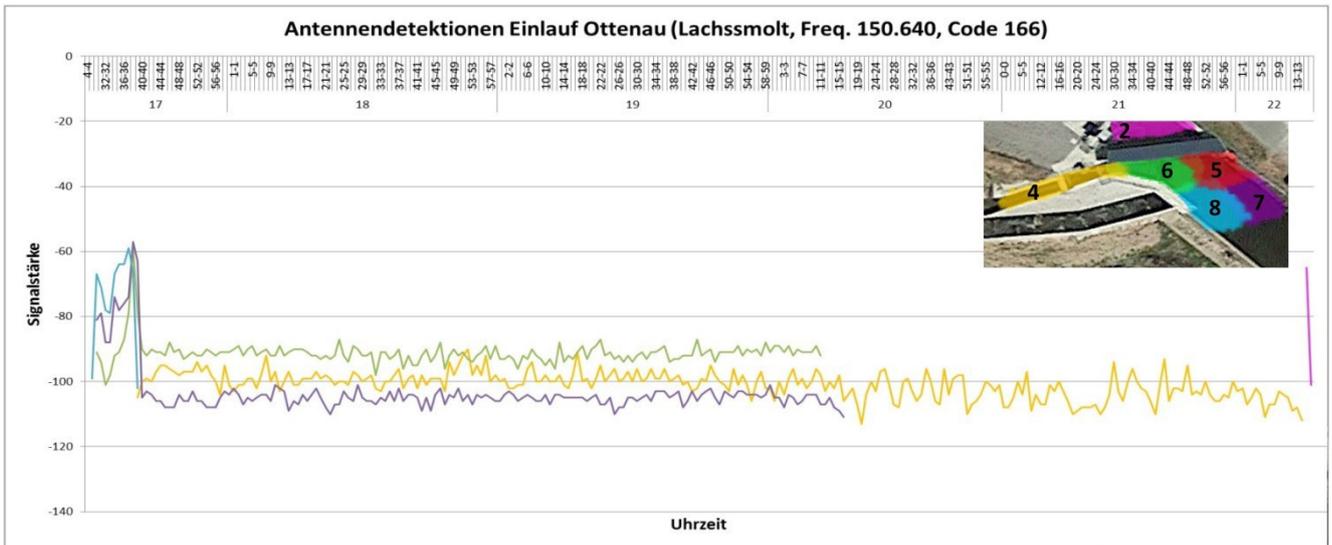


Abb. 134: Signalstärken, welche das Verhalten des Smolts mit Code-Nr. 166 am 04.05.2016 zwischen 17 und 23 Uhr vor dem Schrägrechen Ottenau wiedergeben.

#### Gruppe sondierend:

Die Lachsmolts der Gruppe „sondierend“ waren den Großteil der Zeit vor dem Schrägrechen in Bewegung und verharren nicht bis zur Abwanderung. Sie wurden daher als „sondierende“ Gruppe benannt. Dieses Verhalten zeigten 46% der 26 Lachsmolts. Die hohe Anzahl an sondierenden Lachsmolts konnte mit der geringen Anströmgeschwindigkeit vor dem Schrägrechen begründet werden. Dies veranlasste die Lachsmolts nach einem Abwanderungskorridor zu suchen und nicht in strömungsberuhigten Zonen zu verharren.

Das Sondierungsverhalten am Schrägrechen zeigte zum Beispiel Lachsmolt Nr. 6 (Code 62), der am 04.05.2016 um 15:15 Uhr in die Murg eingesetzt wurde (Abb. 135). Große Signalschwankungen von Antennen 6, 7 und 8 waren erkennbar (Antenne 5 war ab ca. 17:30 Uhr ausgefallen). Der Lachsmolt führte am 04.05.2016 über mehrere Stunden größere Bewegungen im Nahfeld des Rechens und an der rechten Uferwand aus, bevor er gegen 22 Uhr über die Fischaufstiegsanlage abwanderte: Da keine Signale an Antenne 6 sondern an Antenne 8 aufgezeichnet wurden und kein Peak der Signalstärken an Antenne 4 erkennbar war, wanderte der Lachsmolt über den Fischaufstieg und nicht über den Bypass ab.

Auch hier zeigt sich, dass ein langes Suchverhalten an der Rechenebene und entlang des Ufers (strömungsberuhigte Zone auf Grund der Ruheposition des Rechenreinigungsarms) letztendlich zu einer erfolgreichen, wenn auch verzögerten Abwanderung führen konnte.

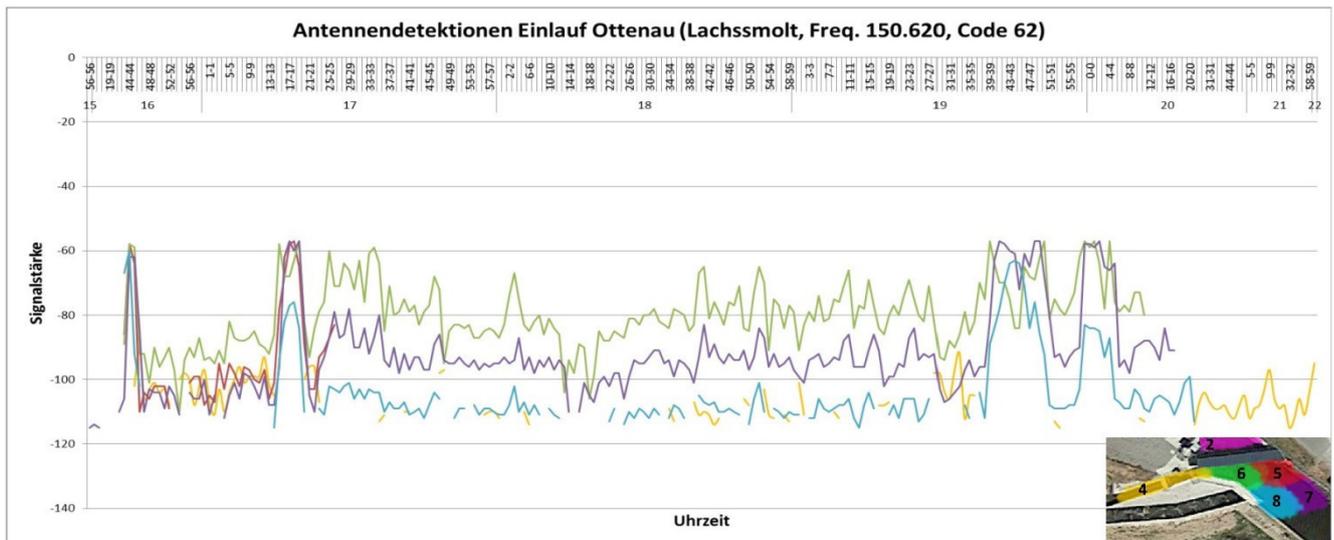


Abb. 135: Signalstärken, welche das Verhalten des Smolts mit Code-Nr. 62 am 04.05.2016 zwischen 16 und 22 Uhr vor dem Schrägrechen Ottenau wiedergeben.

Gruppe sondierend-stationär rechts und links:

27% der Fische übten bei der Annäherung an den Schrägrechen eine Suchbewegung aus, gefolgt von einem Verharren bis zum letztendlichen Abstieg. Die Gruppe wurde daher als „sondierend-stationär“ bezeichnet. Diese Gruppe wurde nochmals in eine rechts- und linkseitige Gruppe unterteilt, um deren Aufenthalt an rechter Kanalwand oder links nahe dem Einlauf des Fischaufstiegs zu konkretisieren. Ungefähr gleich viele Lachsmolts zeigten dieses Verhalten rechts oder links im Kanal, es wurde keine Seite gegenüber der anderen besonders bevorzugt.

Beispielhaft werden nachfolgend die Bewegungen von Lachsmolt Nr. 42 (Code 73, Einsetzung am 04.05.2016 um 20:05 Uhr) in der Nacht vom 06. auf den 07.05.2016 dargestellt (Abb. 136). Er bewegte sich vorwiegend sondierend am rechten Ufer entlang, bevor sich seine Suchbewegungen abschwächten und er sich weiter vom Rechen in Richtung Antenne 7 und 8 entfernte. Anschließend schwamm er schlagartig vom rechten Ufer in den Bypass und wanderte dort ab. Dies kann z. B. im Zuge einer Abreinigung des Schrägrechens passiert sein, bei der der Rechenreinigungsarm von der rechten Uferwand bis zum Bypass läuft und aufgrund der Bypassöffnung zusätzlich ein Sog entstand, dem der Fisch gefolgt sein könnte.

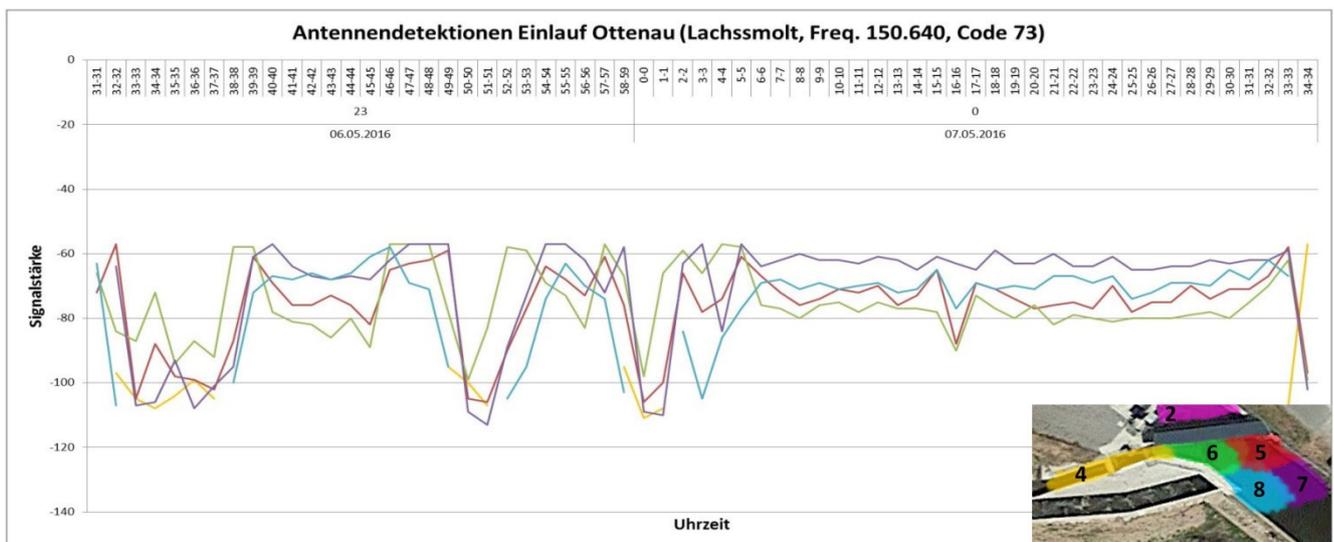


Abb. 136: Signalstärken, welche das rechte sondierend-stationäre Verhalten des Smolts mit Code-Nr. 73 am 06.-07.05.2016 vor dem Schrägrechen Ottenau wiedergeben.

Ein linksseitiges Sondieren entlang vom Einlauf des Fischaufstiegs war z. B. bei Lachssmolt Nr. 17 (Code 116), der am 04.05.2016 um 15:15 Uhr in die Murg gesetzt wurde, erkennbar (Abb. 137). Seine Bewegungen führten hauptsächlich an den Antennen 6 bis 8 zu hohen Signalstärken, bevor das aktive Suchen nachließ und er sich vorwiegend im Bereich der Antennen 4 und 6 aufhielt, bis er nach mehreren Stunden des Verharrens über den Bypass abstieg (gelber Peak).

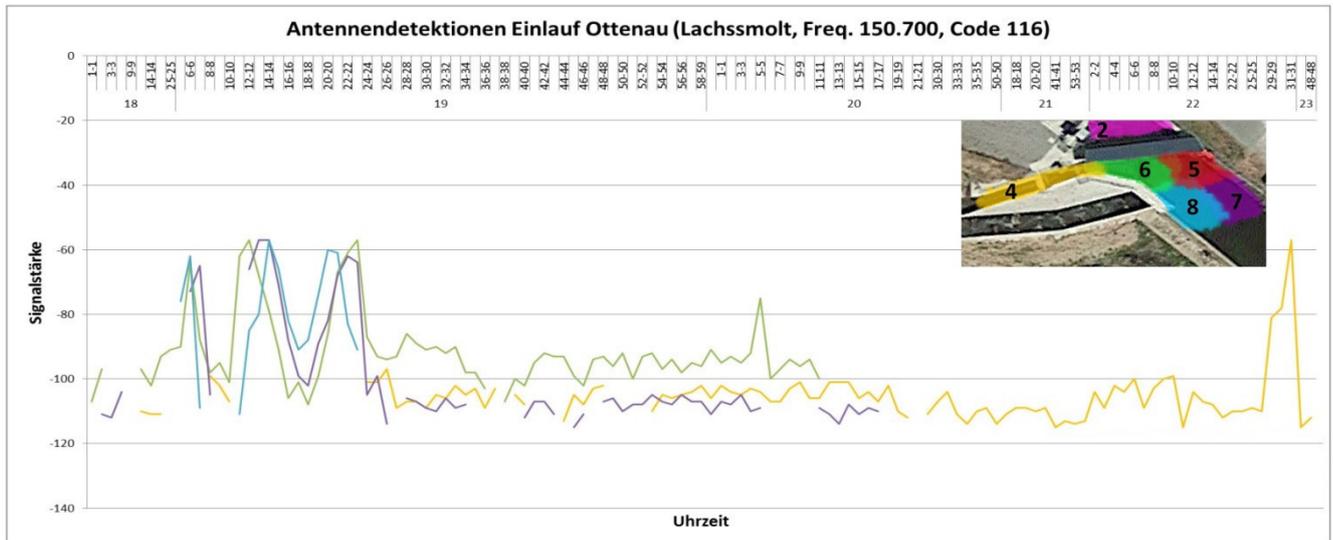


Abb. 137: Signalstärken, welche das linke sondierend-stationäre Verhalten des Smolts mit Code-Nr. 116 am 04.05.2016 vor dem Schrägrechen Ottenau wiedergeben.

Alle weiteren Schaubilder der Verhaltensweisen und Abwanderungswege sind im Anhang 6 aufgeführt.

### 6.2.3. Empfehlungen für die Schrägrechenbemessung anhand der Freilandstudien

Anhand der durchgeführten und beschriebenen Freilandstudien kann unter Berücksichtigung der während des Versuchszeitraums herrschenden über den Fließquerschnitt gemittelten Anströmgeschwindigkeit von knapp 0,40 m/s (mit Bereichen von max. 0,8 m/s) folgende Zusammenfassung gegeben werden, aus der sich Empfehlungen für die Schrägrechenbemessung ergeben:

- Der **Stababstand** von 18 mm sorgte für eine hohe Schutzrate (98%). Diese Schutzrate gilt für Fische mit einer Körperlänge von 20 cm an upwards. Die Schwimmleistung der Fische ermöglichte bei Anströmgeschwindigkeiten von knapp 0,40 m/s (und in bestimmten Bereichen bis 0,8 m/s) ein reges Verhaltensspektrum (Verharren, Sondieren), was auch im Labor zu beobachten war.
- Der **Anströmwinkel** von 44° erwies sich als gute Lösung, da zwei Drittel aller Lachssmolts den in Verlängerung des Schrägrechens angeordneten Bypass aufgefunden und zur Abwanderung nutzten. Dies bestätigt ebenfalls die Laborversuche.
- Längeren Phasen des Suchens und/oder des **Verharrens** folgten ebenfalls Abwanderungen, wenn auch verzögert. 88% aller Lachssmolts nutzten in Ottenau die Fischabstiegs- oder die Fischaufstiegsanlage für die Abwanderung – unabhängig von einer Verharrung oder eines Sondierens im Nahbereich des Schrägrechens oder der Uferwände.
- Der oberflächennahe Einstieg in die **Fischabstiegsanlage** mit einer Überfallhöhe von 30 cm wurde als Abwanderungskorridor angenommen. Eine Abstiegsöffnung über die gesamte Wasserhöhe ist bei Lachszielgewässern daher nicht unbedingt notwendig.
- Sobald die **Fischaufstiegsanlage** direkt neben dem Bypass angeordnet wird, kann diese häufig von den abstiegswilligen Fischen als Abstieg genutzt werden. Die Auffindbarkeit eines Bypasses sowie die Ein-

---

schwimmakzeptanz sind die zentralen Aspekte für eine erfolgreiche Nutzung eines Abwanderungskorridors. Bei einer zeitgleichen Planung und Umsetzung der Durchgängigkeit stromauf und stromab kann dieses Phänomen berücksichtigt werden.

- Ein **Streichwehr** mit Überfall oder einem Wehrkroneneinschnitt zur Abgabe einer Mindestwassermenge wurde von einigen Lachssmolts ebenfalls als Abwanderungsweg genutzt. Somit können Streichwehre mit einer hohen Anzahl von Tagen mit Überströmung in ein Abwanderungskonzept miteinbezogen werden. Streichwehre eignen sich für sohl nah lebendes Makrozoobenthos jedoch nicht als Abwanderungskorridor.
- Die Strömungssignaturen des Schrägrechens in Ottenau (Kap. 4.2.2 und Kap. 4.2.3) zeigten, dass sich bei gemittelten Anströmgeschwindigkeiten von 0,4 m/s **heterogene Strömungen** vor dem Schrägrechen ausbildeten und es lokal zu Geschwindigkeitsunterschieden kam. Die Murg verläuft vor Ottenau in einer Linkskurve, die Hauptströmung kommt daher konzentriert an der rechten Rechenseite an. Darüber hinaus waren einige Meter vor dem Rechen Kiesablagerungen vorhanden, welche ebenfalls dazu führten, dass die linke Rechenseite weniger angeströmt wurde. Aufgrund der baulichen Auskrugung des Einlaufs in die Fischauftiegsanlage wurde der links davon gelegene Einlaufbereich des Fischabstiegs von der Hauptströmung weniger angeströmt.

### 6.3. Ergebnissynthese aus Labor- und Feldversuchen

Bevor die Beobachtungen aus Laborstudien und Felduntersuchungen miteinander verglichen werden, muss auf die unvermeidbaren Unterschiede beider Versuchsaufbauten hingewiesen werden sowie auf daraus entstandene Konsequenzen. Anschließend wird eine Übertragbarkeit der Erkenntnisse aus den Laborstudien auf reale Bedingungen untersucht.

#### 6.3.1. Unterschiede der Versuchsaufbauten

Folgende Unterschiede zwischen den Labor- und den Feldstudien sind vorhanden:

- Versuchsaufbau des Schrägrechens: Im Labor wurde ein relativ niedriger Sohlbalken mit einer Höhe von 5 cm eingebaut. Der Stahlbetonsohlbalken in Ottenau hatte eine Höhe von 35 cm. Somit konnten sich in Ottenau an der Sohle größere strömungsberuhigte Zonen ausbilden. Vertikale Stahlstützen zur Abstützung des Rechensystems wurden in Ottenau im Abstand von 200 cm angeordnet, im Labor mit einem Abstand von 60 cm bzw. 85 cm – abhängig von der modularen Rechenfeldbreite. Jedes Strömungshindernis verursacht sowohl strömungsberuhigte als auch direkt danebenliegende beschleunigte Strömungsbereiche. Aufgrund der größeren Rechenfeldbreite in Ottenau können dort ausgedehntere Strömungsbereiche homogener Anströmung entstehen, als am Laborrechen.
- Bypassgestaltung: Der Bypass im Labor ist in Fließrichtung angeordnet, in Ottenau ist er in Verlängerung der Rechenebene seitlich angeordnet. Die Auswirkungen unterschiedlicher Bypassanordnungen wurden in dieser Arbeit nicht untersucht, hierzu liegen bereits Untersuchungsergebnisse vor (*Lehmann et al.*, 2016). Dort wurde dargestellt, dass ein von der Hauptströmung orthogonal abzweigender Bypass weniger akzeptiert wird, als ein Bypass in Fließrichtung.
- Laborbedingungen und Setupparameter: Die Laborbedingungen und Setupparameter waren während der gesamten Versuche im Labor im Gegensatz zu den Feldversuchen konstant. An der Feldanlage konnte sich die Anströmgeschwindigkeit jedoch durch Niederschlag, Sunk & Schwall anderer Kraftwerke oder kleine Hochwässer verändern. Gleiches trifft für die Lichtverhältnisse aufgrund des Wetters bzw. aufgrund des Tag-/Nachtwechsels zu. Somit veränderten sich die äußeren Verhältnisse, die zu einer Verhaltensänderung (z. B. längeres Verharren) bei den Fischen führen könnten. Auch sind Fressfeinde (Raubfische oder Kormorane), die an der Murg in großer Anzahl leben, unter Laborbedingungen nicht vorhanden. Diese können sich potenziell am Einlauf des Bypasses in Ottenau positionieren. Sobald abwandernde Fische die Fressfeinde erkennen, meiden die Fische die betroffenen

---

Bereiche, suchen alternative Wege auf oder verharren längere Zeit in geschützten Bereichen. Im Labor wurden nur artenreine Schwärme pro Versuch verwendet.

- Rechenverlegung: Bei den Laborstudien wurde eine Verlegung des Rechens nicht untersucht. In der Natur beeinträchtigen auf der Sohle liegende Steine, Baumstämme und Zivilisationsmüll die Strömungsverhältnisse, ebenso verlegen Geschwemmsel oder Plastikmüll Rechenbereiche. Hier entstehen temporär neue strömungsberuhigte Zonen.
- Veränderliche Strömungssignaturen: Aufgrund der Rechenverlegung und dem Treibgutvorkommen im Gewässer sowie aufgrund des Betriebs der Rechenreinigungsmaschine entstanden während der Feldversuche veränderliche Strömungssignaturen, denen sich die Fische anpassten und ihr Verhalten entsprechend veränderten. Fische können auf derartige Situationen reagieren, in dem sie sich mit strömungsberuhigten Zonen mitbewegen oder verschiedene Strömungsbereiche austesten und dort verharren. Schrägrechenbereiche mit erhöhter Anströmgeschwindigkeit werden dann eher gemieden. Im Labor hingegen waren die Strömungssignaturen während der Versuchsdauer konstant.
- Strömungssignaturen vor Rechenebene: Ein weiterer Unterschied zwischen Labor- und Freifeldversuchen bestand in den Strömungssignaturen vor der Rechenebene. Im Labor erhöhten sich die Geschwindigkeiten in Richtung Bypass. Demgegenüber verringerten sich in Ottenau die Anströmgeschwindigkeiten in Richtung Bypass aufgrund dessen Lage in einer Bucht, außerhalb der Hauptströmung. Die Geschwindigkeiten zur Fischabstiegsklappe in Ottenau erhöhten sich dann – außerhalb des untersuchten Messrasters, so dass auch in Ottenau eine Geschwindigkeitszunahme zum Bypass hin vorlag.
- Rechenreinigungsmaschine: Die RRM hat möglicherweise eine die Abwanderung unterstützende Wirkung, indem Fische vor dem Rechenreinigungsarm herwandern und so in Richtung Bypass „gedrückt“ werden.
- Wasserqualität und –temperatur: Des Weiteren waren die Wasserqualität und die Wassertemperatur im Labor und im Feld unterschiedlich. Im Labor hatte das Versuchswasser nahezu Trinkwasserqualität mit einer Temperatur von ca. 18°C bis 20°C, im Feld jedoch überwog in der Murg trübes bis rötliches Wasser, verursacht durch die Geologie im Nordschwarzwald mit vorwiegend rötlichem Buntsandstein. Die Wassertemperatur der Murg betrug im Versuchszeitraum ca. 10°C bis 11°C. Ob und wie weit sich diese Parameter auf das Verhalten von abwandernden Lachssmolts auswirken, wurde in dieser Forschungsarbeit nicht untersucht. Nach *Ebel (2013)* und den dort aufgeführten Untersuchungen zu den Schwimmgeschwindigkeiten ist eine Temperaturabhängigkeit gegeben.

### 6.3.2. Übertragbarkeit der Labor- und Feldbefunde

Für den Vergleich mit den Feldstudien werden primär diejenigen Laborversuche herangezogen, die situativ ähnlich sind, also jene mit den folgenden Randbedingungen:

- Stababstand  $s = 18 \text{ mm}$
- Anströmwinkel  $\delta = 45^\circ$
- Gemittelte Anströmgeschwindigkeit  $v_a = 0,4 \text{ m/s}$

Im Labor kamen bei dieser Versuchskonstellation insgesamt 62 Lachssmolts zum Einsatz, in Ottenau insgesamt 60 Lachssmolts inkl. des Lachssmolts, dessen Verbleib unbekannt ist.

Die Schutzeffizienz des Schrägrechens ist eindeutig gegeben: Sie betrug im Labor 100% und in Ottenau 98% (Abb. 138). Beide Versuchsserien belegen eine hohe Schutzrate des 18 mm-Schrägrechens für Lachssmolts – und mit hoher Wahrscheinlichkeit auch für potamodrome Fischarten mit ähnlicher Körpergröße. Bei kleineren Arten oder Jungfischen können die Ergebnisse abweichen.

Hinsichtlich der Leitwirkung des Schrägrechens und eine anschließende Abwanderung werden auch die Bypasspassagen verglichen. Im Labor lag die Abwanderungsquote über den Bypass (87%) höher als die Abwande-

rungsquote in Ottenau (63%). In Ottenau war aber die Fischaufstiegsanlage als zusätzlicher Abwanderungskorridor neben dem Bypass angeordnet, so dass über diesen zusätzlich 25% abwanderten. Betrachtet man in Ottenau Fischab- und –aufstiegsanlage als einen Abwanderungskorridor, so nutzten diesen insgesamt 88%. Dieser Wert entspricht ziemlich exakt der Abwanderungsquote bei den ethohydraulischen Versuchen im Labor mit 87%.

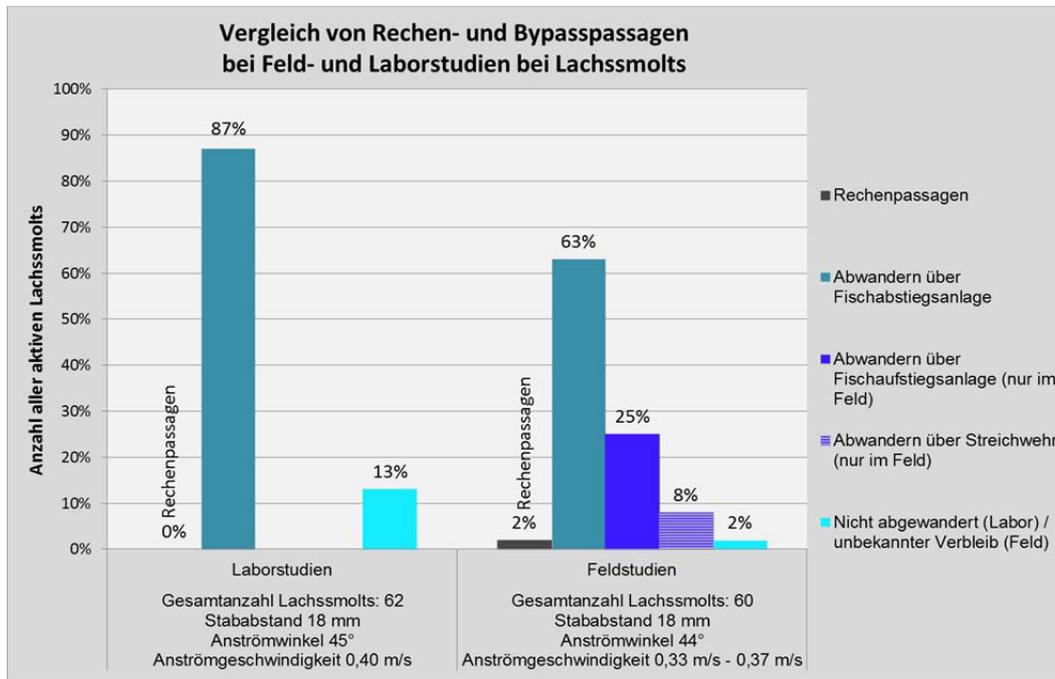


Abb. 138: Vergleich der Rechen- und Bypasspassagen bei Feld- und Laborstudien. Die prozentualen Angaben beziehen sich auf die Gesamtzahl an Probanden (62 Lachssmolts im Labor und 60 Lachssmolts im Feld).

Weiterhin untersucht und verglichen wurden Verharrungsreaktionen und –zeiten vor dem Rechen. Einige Lachssmolts hielten sich in Ottenau über mehrere Minuten und Stunden vor dem Rechen auf, was auch im Labor zu beobachten war. Trotz kurzem oder längerem Verharren der Fische in strömungsberuhigten Zonen wanderten diese zielgerichtet ab. Dies wurde sowohl im Labor beobachtet (Gierverhalten und trampolinartiges Verhalten mit anschließender Abwanderung nach langem Verharren) wie auch in Ottenau (Abb. 133). Ebenfalls wurde im Labor und in Ottenau beobachtet, dass sich Fische im Randbereich zu Rinnenwand bzw. Uferwand aufhalten und dort strömungsberuhigte Bereiche aufsuchen.

Zusammenfassend lässt sich anhand der oben genannten Ergebnisse feststellen, dass sich die im Labor gewonnenen Erkenntnisse auf Naturbedingungen übertragen lassen – solange eine situative Ähnlichkeit der Versuchsaufbauten besteht.

Mit Blick auf die unterschiedlichen hydraulischen Randbedingungen und die äußeren Einflüsse zwischen Labor- und Feldstudien wird daher postuliert, dass die diskutierten Befunde allgemeingültig auf derartig gestaltete und angeordnete Schrägrechen übertragen werden können.

## 6.4. Fazit

Durch Überschneidung der Strömungssignaturen mit den ethohydraulischen Erkenntnissen aus den Labor- und Feldstudien mit Lachssmolts entstehen **ethohydraulische Signaturen**. Anhand dieser können die folgenden Bemessungsempfehlungen für die Planung und Gestaltung von Schrägrechen gegeben werden (Tab. 26):

Tab. 26: Bemessungswerte für einen Schrägrechen im Zielgewässer Lachs, aufgestellt anhand ethohydraulischer Studien und hydraulischer Strömungssignaturen mit Lachssmolts an Schrägrechen.

Gewässertyp/Zielarten	Zielgewässer Lachs
Anströmwinkel $\delta$	$30^\circ \leq \delta \leq 55^\circ$
max. Stabweite $s$	$s = 30 \text{ mm}$ (95%-iger Schutz) $s = 18 \text{ mm}$ (100%-iger Schutz)
Anströmgeschwindigkeit $v_a$	$0,4 \leq v_a \leq 0,8 \text{ m/s}$

Grundsätzlich eignen sich Schrägrechen als Schutzsystem für den Fischabstieg an Kraftwerken oder Ausleitungsbauwerken bei kleinen bis mittleren Gewässern. Homogene Anströmbedingungen und moderate Anströmgeschwindigkeiten vor Schrägrechen empfohlen bereits *Hübner et al.* (2011) auf Basis von Beobachtungen, welche im Zuge von ethohydraulischen Versuchen mit Rotaugen und Brassen gemacht wurden.

Die Schutzrate des Schrägrechens liegt bei einem Stababstand von bis zu 18 mm und einer über den Fließquerschnitt gemittelten Anströmgeschwindigkeit von 0,4 m/s (und mit Bereichen erhöhter Anströmgeschwindigkeiten in Höhe von max. 0,8 m/s) bei nahezu 100%.

Laborversuche zeigten folgende Kombinationen aus Anströmwinkel und Anströmgeschwindigkeit als zielführende Rechenauslegungen für eine Leitwirkung des Schrägrechens und eine erfolgreiche Abwanderung:

- Anströmgeschwindigkeit von 0,4 m/s bis 0,5 m/s in Kombination mit Anströmwinkel von  $30^\circ$  bis  $55^\circ$
- Anströmgeschwindigkeit von 0,7 m/s bis 0,8 m/s in Kombination mit Anströmwinkel von  $45^\circ$  bis  $55^\circ$
- Wechselnde Anströmgeschwindigkeiten in Kombination mit Anströmwinkel von  $45^\circ$  bis  $55^\circ$

Stababstände können größer als bei konventionellen Rechen gewählt werden.

Das Gieren ist die am häufigsten vorkommende Verhaltensweise und hat in den meisten Fällen eine Abwanderung zur Folge, ebenso wie das trampolinartige Verhalten. Lange Zeiten des Verharrens verzögern zwar die Abwanderung, verhindern diese jedoch nicht. Voraussetzung hierfür ist aber, dass Inhomogenitäten in der Anströmung vermieden werden. In der Realität bedeutet dies, dass eine effiziente und zuverlässige Rechenreinigung vorzusehen ist, um ungleiche Verlegungen mit Rechengut und „hot spots“ hoher Anströmung (*Hübner et al.*, 2011) zu vermeiden. Lange und tiefe Schrägrechen mit massiver Hinterbauung können bei Fischen zu einem Unterbrechen ihrer Drift führen, da lokale Strömungsdiskrepanzen die Fische irritieren. Diese Gefahren wären z. B. bei Schrägrechen an Wasserkraftanlagen mit großen und tiefen Einlaufkanälen zu erwarten.

## 7. Ethohydraulische Studien an (elektrifizierten) Schrägrechen mit Aalen

Für die gesamthafte Betrachtung der Effektivität des Schrägrechens wurden zusätzlich zu den Lachssmoltstudien auch Versuche mit Aalen durchgeführt. Da von Aalen bei der Abwanderung ein komplett anderes Verhalten bei Kontakt mit einem Wanderhindernis bekannt ist, als bei vielen anderen Fischarten, lagen ethohydraulische Versuche mit dieser Fischart auf der Hand. Diese Untersuchungen fanden vom 17.10.2016 bis 04.11.2016 im wasserbaulichen Forschungslabor statt. Es wurden 26 verschiedene Rechenetups am Schrägrechen sowie 16 Rechenetups mit einem unter Strom gesetzten (= elektrifizierten) Schrägrechen durchgeführt. Auf diese Weise konnten die Verhaltensmuster der Aale an nicht elektrifizierten Rechen mit denen der Lachssmolts verglichen werden.

Zur Ermittlung der Übertragbarkeit der Ergebnisse der Laborstudien auf reale Anlagen wurden vom 09.11.2016 bis 03.03.2017 situativ ähnliche Feldstudien mit 124 besenderten Aalen am nicht elektrifizierten Schrägrechen der Wasserkraftanlage Ottenau an der Murg durchgeführt. Zusätzlich wurde eine Elektroscheuchanlage am EnBW Wasserkraftwerk Rotenfels an der Murg installiert, das sich direkt unterhalb des WKW Ottenau befindet. Somit hatten die dort eingesetzten und besenderten Aale zwei Versuchsstandorte zu durchschwimmen: Ottenau mit einem (nicht elektrifizierten) Schrägrechen und Rotenfels mit einer Elektroscheuchanlage. Lediglich Ottenau besaß damit eine situative Ähnlichkeit mit den Laborversuchen.

*Adam et al.* (1999) beobachteten in ihren Studien an verschiedenen Rechentypen vier Schwimmverhaltensmuster von Aalen im Nahbereich einer mechanischen Barriere (Abb. 139):

- Aktive Gegenstrombewegung: Aufwanderung Richtung Oberwasser;
- Drift: Aale lassen sich passiv mit der Strömung flussabwärts treiben (Abb. 139, Bild A);
- Kontrolliertes Verdriften: Aale lassen sich aktiv mit der Strömung flussabwärts treiben und führen Korrekturen ihrer Körperhaltung und Bewegungen durch (Abb. 139, Bild B);
- Aktive Abwanderung: Der Vorderkörper der Aale ist leicht aufgerichtet und der Schwanz beschleunigt mittels kleinen Bewegungen die stromabwärts gerichtete Abwanderung (Abb. 139, Bild C).

Von *Adam et al.* wurde festgestellt, dass sich diese Körperhaltungen aneinanderreihen und mit unterschiedlichen Zeitdauern von den Aalen ausgeführt werden können. In den nachfolgenden ethohydraulischen Versuchen an Schrägrechen wurden sämtliche oben genannten Körperhaltungen unterschiedlich häufig beobachtet.



Abb. 139: Charakteristische Körperhaltungen beim Aal – A während der Drift, B während der kontrollierten Drift und C während der aktiven Abwanderung (*Quelle: verändert Adam et al., 1999*).

## 7.1. Laborstudien mit Aalen

### 7.1.1. Versuchsaufbau und -durchführung

Die Aalversuche fanden wie die Lachssmoltversuche in der 40m-Plexiglasrinne des wasserbaulichen Forschungslabors der TU Darmstadt statt. Verwendet wurden die gleichen Versuchsaufbauten wie bei den bereits erläuterten Lachssmoltstudien (Kap. 3.3.1).

Lediglich die Lichtverhältnisse wurden im Vergleich zu den Lachssmoltversuchen variiert. Bei den Aalversuchen wurde die Rinne mittels schwarzer Folien abgedunkelt (Abb. 85 rechts). Aale halten sich vorwiegend an der Sohle in dunkleren Bereichen auf (*Rauschert, 2013* und *Weibel mündlich, 2016*), eine Beeinflussung durch Licht und Sonneneinstrahlung sowie Schatten sollte daher ausgeschlossen werden. Die Lichtverhältnisse waren über alle Versuche hindurch gleich und auch während der Versuchsdauer unverändert.

Der Aufbau der elektrifizierten Schrägrechenversuche im Labor wurde vorab mit dem Lieferanten (Firma Procom System S.A. aus Polen) besprochen. Die Elektroden sollten zum einen der Schrägrechen bilden und zum anderen eine dahinter angeordnete herkömmliche Baustahlmatte aus Stahl. Mittels Kunststoffabstandshaltern wurde diese über dem Wasserspiegel am Schrägrechen und direkt auf der Sohle montiert (Abb. 140). Somit war es möglich, ein elektrisches Feld zu erzeugen, das zwischen den einzelnen Rechenstäben begann und hinter dem Rechen im Zwischenraum bis zur Baustahlmatte wirkte. Der Schrägrechen bildete dabei die Anode, die Baustahlmatte die Kathode. Anhand der Procom-eigenen Software NeptunTool wurde das Elektrofild am Schrägrechen erzeugt, wo eine Spannung von 34 bis 35 Volt herrschte. Ein schwaches elektrisches Feld Oberstrom der Rechenebene sollte vermieden werden, um das Verhalten der Aale ohne Elektrifizierung im Nahfeld des Schrägrechens beobachten zu können. Rechenkontakte sollten von vornherein nicht unterbunden werden. Erst bei einem Kontakt im Zwischenraum der Stäbe sollten die Aale einen elektrischen Reiz wahrnehmen.



Abb. 140: Schrägrechen im Labor mit dahinter liegender Baustahlmatte und Kunststoffhaltungen an der Sohle und am oberen Ende der Baustahlmatte in Blickrichtung Oberstrom bei Teilfüllung der Versuchsrinne (links). Schaltschrank zur Erzeugung des elektrischen Feldes der Fa. Procom (Mitte und rechts).

Die Laborstudien mit Aalen wurden im Herbst in der für Aale typischen Abwanderungszeit durchgeführt (Tab. 22). Die über 500 Probanden besaßen eine Körperlänge von 60 cm bis 80 cm, einige kleinere Aale auch nur 40 cm. Im Zuge der Versuchsdurchführung wurden die Aale in einzelne Gruppen von je 6 Individuen aufgeteilt und ca. 9 m vor dem Schrägrechen in die Versuchsrinne eingesetzt. Die Versuchsdauern lagen im Schnitt bei etwa 30 bis 40 Minuten, wobei einzelne Versuche auch über eine Stunde andauerten. Die längste Versuchsdauer lag bei 1 Stunde und 15 Minuten mit insgesamt drei Gruppen zu je 6 Versuchstieren. Nach Versuchsende wurden die Aale eingefangen und in speziell nummerierte Hälterungen gesetzt. Jede Gruppe wurde maximal 3-mal verwendet, um einem Lerneffekt vorzubeugen. Das gleiche Rechensetup wurde zwischen 1- und 4-mal durchlaufen, um belastbare Erkenntnisse bei der entsprechenden Rechenkombination zu erhalten.

---

### 7.1.2. Untersuchte Schrägrechenkonfigurationen

Bei der Durchführung verschiedener Rechenetups wurden die nachfolgenden geometrischen und hydraulischen Parameter im Labor variiert.

#### Geschwindigkeit

Bei Aalen spielt die Geschwindigkeit der Strömung, in der sie sich befinden, eine grundlegende Rolle (*Adam et al.*, 1999). Im Gegensatz zu Lachssmolts oder anderen potamodromen Arten bewegen sich Aale häufig aktiv schwimmend oder aktiv/passiv verdriftend mit dem Kopf voraus (Kap. 7.1.2).

Die Handreichung zum Fischschutz und Fischabstieg an Wasserkraftanlagen (*LUBW*, 2016) gibt für Aalmanagementgewässer eine maximal zulässige Anströmgeschwindigkeit am Schrägrechen von kleiner 0,5 m/s an. Häufig wird von Behörden und Planern auch die Komponente der sogenannten Normalgeschwindigkeit auf maximal 0,5 m/s begrenzt (Kap. 2.3). Dies bedeutet, dass die Anströmgeschwindigkeit je nach Anströmwinkel rechnerisch größer als 0,5 m/s sein kann.

Flussabwärts wandernde Aale kommen vorwiegend in größeren Flüssen wie z. B. Neckar, Main, Mosel und Rhein vor. An deren Staustufen, Wehren, Schleusen und Wasserkraftanlagen herrschen häufig deutlich höhere Anströmgeschwindigkeiten als die derzeit geforderten 0,5 m/s (z. B. *LUBW*, 2016) oder sogar mehr 1,0 m/s.

Wie auch bereits bei den Lachssmoltstudien wurden für die Aalversuche folgende Anströmgeschwindigkeiten in der Laborrinne mit den zur Verfügung stehenden Pumpen im wasserbaulichen Forschungslabor eingestellt:

- Anströmgeschwindigkeit von  $v_a = 0,4$  m/s
- Anströmgeschwindigkeit von  $v_a = 0,5$  m/s
- Anströmgeschwindigkeit von  $v_a = 0,7$  m/s
- Anströmgeschwindigkeit von  $v_a = 0,8$  m/s

Anhand der ethohydraulischen Aalstudien sollten die oben genannten bisherigen Geschwindigkeitsannahmen und -maxima an Schrägrechen untersucht werden.

#### Anströmwinkel

Aufgrund der bei den Lachssmoltstudien gewonnenen Erkenntnisse mit einem Anströmwinkel von  $70^\circ$  (Häufigkeiten der Verhaltensweisen, welche zu Abwanderungen maßgeblich beitragen, lassen teilweise nach), wurde dieser Anströmwinkel nicht eingestellt. Die verfügbare Versuchsdauer betrug 12 Tage. An diesen Tagen mussten sämtliche Versuche, auch die elektrifizierten Versuche, durchgeführt werden. Daher wurden die folgenden Anströmwinkel in den Versuchen variiert:

- Anströmwinkel von  $\delta = 30^\circ$
- Anströmwinkel von  $\delta = 45^\circ$
- Anströmwinkel von  $\delta = 55^\circ$

Wichtig war die Durchführung mit einem Winkel von  $45^\circ$ , um die anschließenden Feldstudien am WKW Ottenau mit einer situativen Ähnlichkeit zu den Laborstudien durchführen zu können.

#### Stababstand

Der Stababstand besitzt an Rechen in Aalmanagementgewässern eine zentrale Bedeutung. Aufgrund ihrer Körperform können sich Aale in kleinste Öffnungen zwängen und somit durch engste Stababstände abwandern (*Adam et al.*, 1999). Die LUBW-Handreichung (*LUBW*, 2016) gibt daher bei Neuanlagen in Aalmanagementgewässern einen maximalen Stababstand von 10 mm an, bei Bestandsanlagen 15 mm. Für kleine Bestandsanlagen, die derzeit noch mit 20 mm oder 30 mm ausgestattet sind sowie für große Wasserkraftwerke mit Stababständen von 50 mm und größer würde eine Umrüstung auf einen kleineren Stababstand eine erhebliche Erhöhung der hydraulischen Verluste und des Reinigungsaufwands bzw. des Anfalls an Getreibsel bedeuten.

Untersucht wurde in den ethohydraulischen Laborstudien ein Stababstand von 18 mm, da dieser an vielen Bestandsanlagen wie in Ottenau eingebaut ist. Darüber hinaus wurden zum Vergleich Stababstände von 10 mm und 30 mm untersucht. Gerade der größere Stababstand wurde vorwiegend bei den elektrifizierten Rechen eingesetzt. Hier wurde untersucht, ob Aale einen für sie passierbaren Zwischenraum zum Abwandern nutzen oder ob elektrische Reize die Aale davon abhalten. Eine derartige Kombination aus mechanischer Barriere und Verhaltensbarriere könnte bei großen Anlagen z. B. am Neckar, erfolgreich zum Einsatz kommen: Hydraulische Verluste würden durch große Stababstände minimiert, ebenso der Reinigungs- und damit Instandhaltungsaufwand – die Aale hingegen würden durch die elektrischen Impulse vor einer Rechenpassage abgehalten. Am Wasserkraftwerk Kostheim am Main schlängeln sich die Aale um die Rechenstäbe des konventionellen Rechens und werden vom Rechenreiniger verletzt oder getötet (Abb. 141). Die Aalmortalität am Rechen ist am WKW Kostheim hoch (WKW Staustufe Kostheim/Main GmbH & Co. KG, 2015 und Berger, 2015). Ein elektrisches Feld, das insbesondere Aale vor einem Aufenthalt am Rechen abhält, könnte zu einer Verringerung der Aalmortalität an Rechensystemen beitragen.



Abb. 141: Aalschäden am Wasserkraftwerk Kostheim/Main. Toter Aal an der Rechenharke des konventionellen Rechens (links), im Rechengut aufgefundene und teils durch die Rechenreinigungsmaschine zertrennte Aale (Mitte und rechts) (Quelle: WKW Staustufe Kostheim/Main GmbH & Co. KG, 2015).

### Stabprofil

Wie bereits erläutert (Kap. 3.3.1), wurden die Rechenetups mit einem unveränderlichen rechteckförmigen Stabprofil mit einem Stabprofilbeiwert von 2,42 durchgeführt.

### Elektrisches Feld

Nach den Vorgaben des Herstellers der Elektroscheuchanlage wurde das elektrische Feld im Labor mit einer Spannung von 34 bis 35 Volt eingestellt. Somit herrschte ein schwaches elektrisches Feld am und hinter dem Schrägrechen.

### Kombinationen und Versuchsreihenfolge

Unter Variation der genannten geometrischen und hydraulischen Parameter sowie der Elektrifizierung wurden verschiedene Rechenetups zur Durchführung der Aalstudien gewählt. Aufgrund der begrenzten Versuchszeit und des begrenzten Forschungsbudgets konnten nicht alle 72 möglichen Rechenetups getestet werden (Tab. 27).

Tab. 27: 26 verschiedene Rechenetups für die nicht elektrifizierte Aalstudien im Forschungslabor (links) und 16 Rechenetups der elektrifizierten Aalstudien (rechts).

Nicht elektrifizierte Versuche					Elektrifizierte Versuche				
Anströmwinkel $\delta$ [°]	Anströmgeschwindigkeit $v_a$ [m/s]	Stabweite $s$ [mm]			Anströmwinkel $\delta$ [°]	Anströmgeschwindigkeit $v_a$ [m/s]	Stabweite $s$ [mm]		
30	0,4	-	18	30	30	0,4	-	-	30
	0,5	-	18	30		0,5	-	-	30
	0,7	-	18	30		0,7	-	-	30
	0,8	-	18	30		0,8	-	-	30
45	0,4	-	18	30	45	0,4	-	18	30
	0,5	-	18	30		0,5	-	18	30
	0,7	-	18	30		0,7	-	18	30
	0,8	-	18	30		0,8	-	18	30
55	0,4	-	18	30	55	0,4	-	-	30
	0,5	10	18	30		0,5	-	-	30
	0,7	-	18	30		0,7	-	-	30
	0,8	10	18	30		0,8	-	-	30

Im Oktober 2016 wurde im Forschungslabor zunächst mit den Setups mit einem Anströmwinkel von 45° gestartet, gefolgt von den Anströmwinkeln 30° und 55°. Anschließend folgten 4 Tage mit elektrifizierten Versuchen mit Stababständen von 30 mm und 18 mm. In der dritten Versuchswoche wurden dann nicht elektrifizierte Versuche mit Stababständen von 10 mm und 30 mm durchgeführt (Tab. 28).

Insgesamt wurden 26 nicht elektrifizierte sowie 16 elektrifizierte Rechenetups untersucht – mit je 1-4 Durchläufen pro Setup. In einigen Versuchen trat die Abwanderung der eingesetzten Probanden relativ schnell ein, so dass vor Beendigung eines Versuchs samt Abfischen eine weitere Gruppe in die Versuchsrinne gesetzt wurde. Daher gab es Setupdurchläufe mit mehr als 6 Probanden.

Die hohe Anzahl an Rechenetups war nur mit einer guten Vorbereitung leistbar. Außerdem profitierte das Projektteam aus den Erfahrungen der Lachssmoltstudien, welche 6 Monate vorher stattfanden: Das Projektteam war eingespielt, die Abläufe im Labor und an den Pumpen sowie den an Hälterungen waren bekannt. Des Weiteren funktionierten alle Pumpen der Laborrinne während der Versuchszeit ohne Probleme, so dass der Versuchsaufbau nur selten umgebaut werden musste und damit Zeit eingespart werden konnte.

Trotzdem gab es während der Versuchsdurchführung Schwierigkeiten, welche jedoch keinen Einfluss auf die Versuchsdurchführung oder deren Ergebnisse hatte. Sie sind im Anhang 7 aufgeführt.

Unter den Aalen, die aus dem Catch & Carry Programm der EnBW am Neckar und aus der Fangaktion des Regierungspräsidiums Karlsruhe stammten, gab es Individuen, die passiv im oberen Bereich der Versuchsrinne verharrten und sich nicht an den Versuchen beteiligten – trotz Aalwanderzeit.

Diese Aale wurden als „passive“ Aale, diejenigen im Nahfeld des Rechens als „aktive“ Aale bezeichnet. Wie auch bei den Smoltstudien wurden die passiven Aale im weiteren Verlauf nicht weiter betrachtet und bei der Auswertung von der jeweiligen Aalanzahl im Versuch abgezogen. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit werden mit Aale die „aktiven“ Aale beschrieben.

Die Aale der Fangaktion der E.ON mittels Schokker-Schiffen waren aktiver, als die aus den anderen Fangkampagnen, was an der Fangmethode selbst lag: Sogenannte Schokker-Aale sind Aale, die sich auf der Wanderung befinden und somit einen Drang zur aktiven Abwanderung haben. Aale aus einer Elektrofischerei können auch verharrende Aale sein.

Tab. 28: Ablaufliste der Rechenstetups mit Versuchsnummern und Anzahl der Probanden. Mit einem Stern gekennzeichnet sind die Ottenau-Rechenstetups, welche im Forschungslabor untersucht wurden.

Versuchstag	Rechenstetup-Nr.	Elektrifizierung "E"	Anströmwinkel $\delta$ [°]	Anströmgeschwindigkeit $v_a$ [m/s]	Stabweite $s$ [mm]	Anzahl der Stetupdurchläufe	Anzahl der Probanden [Stck]
17./18.10.2016	V1*		45	0,5	18	4	24
18.10.2016	V2*		45	0,4	18	2	12
18.10.2016	V3*		45	0,8	18	3	18
18.10.2016	V4*		45	0,7	18	3	18
19.10.2016	V5		55	0,5	18	3	19
19.10.2016	V6		55	0,4	18	2	12
19.10.2016	V7		55	0,8	18	3	18
19.10.2016	V8		55	0,7	18	2	11
20.10.2016	V9		30	0,8	18	3	16
20.10.2016	V10		30	0,7	18	1	18
20.10.2016	V11		30	0,5	18	3	17
20.10.2016	V12		30	0,4	18	1	16
24.10.2016	V1E	E	30	0,4	30	1	12
24.10.2016	V2E	E	30	0,5	30	3	18
24.10.2016	V3E	E	30	0,7	30	1	12
24.10.2016	V4E	E	30	0,8	30	3	20
25.10.2016	V5E	E	55	0,8	30	3	18
25.10.2016	V6E	E	55	0,7	30	2	12
25.10.2016	V7E	E	55	0,5	30	3	18
25.10.2016	V8E	E	55	0,4	30	1	12
26.10.2016	V9E	E	45	0,4	30	1	12
26.10.2016	V10E	E	45	0,5	30	2	20
26.10.2016	V11E	E	45	0,7	30	1	12
26.10.2016	V12E	E	45	0,8	30	3	24
27.10.2016	V13E*	E	45	0,8	18	4	24
27.10.2016	V14E*	E	45	0,7	18	1	10
27.10.2016	V15E*	E	45	0,5	18	3	18
27.10.2016	V16E*	E	45	0,4	18	1	10
28.10.2016	V13		45	0,4	30	2	16
28.10.2016	V14		45	0,5	30	3	24
28.10.2016	V15		45	0,7	30	1	10
28.10.2016	V16		45	0,8	30	3	18
02.11.2016	V17		30	0,8	30	3	24
02.11.2016	V18		30	0,7	30	1	12
02.11.2016	V19		30	0,5	30	3	24
02.11.2016	V20		30	0,4	30	1	12
03.11.2016	V21		55	0,4	30	1	12
03.11.2016	V22		55	0,5	30	3	24
03.11.2016	V23		55	0,7	30	1	12
03.11.2016	V24		55	0,8	30	3	30
04.11.2016	V25		55	0,8	10	3	36
04.11.2016	V26		55	0,5	10	3	24

### 7.1.3. Ethohydraulische Befunde mit Aalen (mit/ohne Elektrifizierung)

Nach Durchführung aller Versuche (Kap. 7.1.2 mit Tab. 27 und Tab. 28) wurden beobachtete und mittels Videokamera und Protokollen aufgenommene Verhaltensmuster mehrfach detailliert analysiert, mit den Biologen und Ökologen besprochen, deren Häufigkeit ermittelt und anderen Verhaltensweisen gegenübergestellt. So wurde auf bereits bei *Adam et al.* (1999) oder *Lehmann et al.* (2016) erkannte Muster eingegangen sowie neue Muster deklariert. Das beobachtete Verhalten wurde hinsichtlich Häufigkeit und mögliche Auslöser hin untersucht, Unterschiede wurden herausgearbeitet und begründet.

## Verharren im Nahfeld des Schrägrechens ohne Rechenkontakt

Eine zu beobachtende Verhaltensweise war das Verharren eines oder mehrerer Aale an der rechten Rinnenwand im strömungsberuhigten Bereich des Leitblechs ohne Berührung des Schrägrechens mit Kopf oder Schwanz. Die Aale übten dabei minimale Schwimmbewegungen aus, um ihre Position zu halten oder nach einer gewissen Zeit wieder in Richtung Oberstrom zu schwimmen.

Es verharren mehr Aale bei einem Stababstand von 18 mm als bei einem Stababstand von 30 mm, was auch bei den elektrifizierten Versuchen zu beobachten war (Abb. 142). Dies hing damit zusammen, dass bei einem größeren Stababstand von 30 mm, der den Aalen ein Durchswimmen ermöglichen könnte, die Aale dieses auch testeten und deshalb weniger lang bzw. nicht verharren. Bei einem Stababstand von 18 mm liegen die Quoten der Häufigkeiten eines Verharrens bei elektrifizierten und nicht elektrifizierten Versuchen mit 21,4% und 22,2% nahezu gleich. Die prozentualen Angaben beziehen sich auf den Anteil der Aale, welche verharren, in Relation zu allen (aktiven) Probanden und stellen damit die Häufigkeit dieser Verhaltensweise dar. Bei einem Stababstand von 30 mm unterscheiden sich die Verharrungshäufigkeiten der elektrifizierten und nicht elektrifizierten Versuche geringfügig. Dies bedeutet, dass eine Elektrifizierung des Schrägrechens keinen Einfluss auf das Verharren der Aale vor dem Schrägrechen bzw. an der dortigen Rinnenwandung hat. Grund dafür ist die Positionierung des Stromfeldes, welches erst zwischen den Rechenstäben für die Tiere spürbar wird.

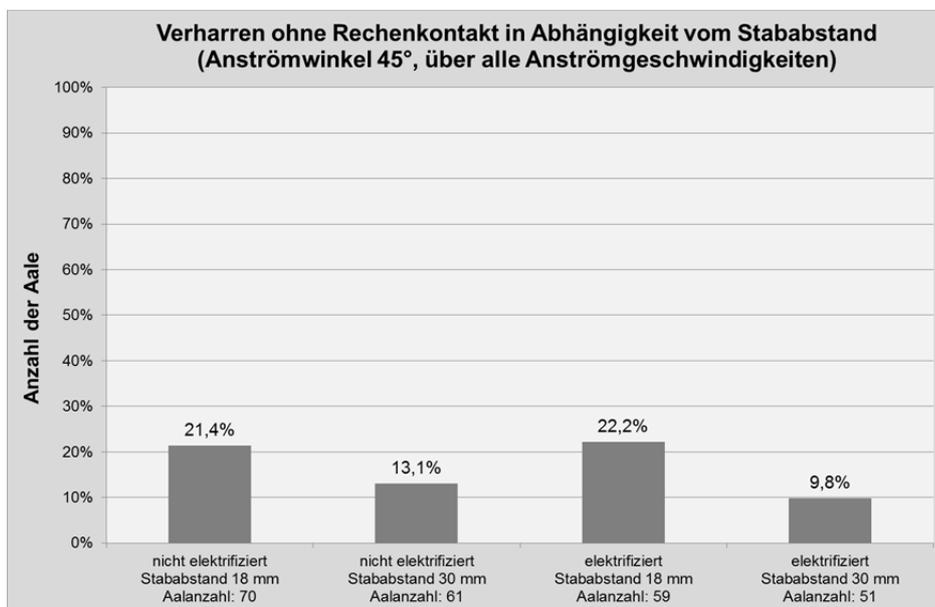


Abb. 142: Verharren ohne Rechenkontakt in Abhängigkeit von Stabstand und Elektrifizierung bei einem Anströmwinkel von 45°.

Wertet man die Häufigkeit des Verharrens nach der Anströmgeschwindigkeit aus (Abb. 143), so kann man keine Abhängigkeit zwischen Verharren und Anströmgeschwindigkeit erkennen. Anströmgeschwindigkeiten von 0,4 m/s bis 0,8 m/s schienen beim Verharren ohne Rechenkontakte bei Aalen eine eher untergeordnete Rolle zu spielen. Gleiches gilt auch für den Einfluss des Anström winkels.

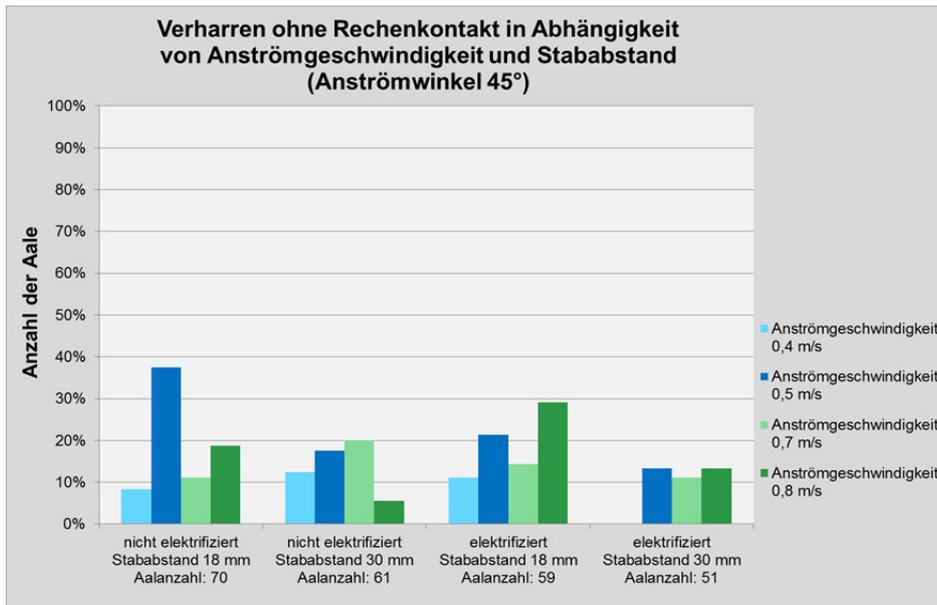


Abb. 143: Verharren ohne Rechenkontakt in Abhängigkeit von Stababstand, Elektrifizierung und Anströmgeschwindigkeit bei einem Anströmwinkel von 45° ohne Tendenzen in Abhängigkeit der Anströmgeschwindigkeit.

### Verharren im Nahfeld des Rechens mit Rechenkontakt

Ein Verharren wurde auch in Zusammenhang mit un-/regelmäßigen Rechenkontakten mit der Schwanzflosse beobachtet. Die Aale erkundeten Lage des Schrägrechens und/oder des Stababstands mit dem Schwanz und schwammen anschließend wieder ein paar Zentimeter stromaufwärts. Dieses Verhalten wiederholte sich teilweise minutenlang, wurde aber immer aus einer strömungsberuhigten Position heraus durchgeführt. Nicht zu vergleichen ist dieses Verhaltensmuster mit dem trampolinartigen Verhalten der Lachssmolts, da sich diese dabei mehr oder weniger intensiv entlang der Rechenebene Richtung Bypass bewegten – die Aale verharren in ihrer Position positiv rheotaktisch ausgerichtet in strömungsberuhigten Zonen.

Betrachtet man in der Auswertung den Einfluss der Elektrifizierung, so liegen die Häufigkeiten eines Verharrens mit Rechenkontakt bei einem Stababstand von 18 mm bei allen Anströmwinkel bei 10,3% (ohne Elektrifizierung) und bei 12,4% (mit Elektrifizierung) (Abb. 144). Damit zeigt sich, dass die Elektrifizierung bei einem Stababstand von 18 mm einen zu vernachlässigenden Einfluss auf das Verharren mit Rechenkontakt hat. Die prozentualen Angaben beziehen sich hier auf den Anteil der Rechenkontakte aus einer Position des Verharrens heraus in Relation zu allen Rechenkontakten im Versuch. Bei einem Stababstand von 30 mm sind die Häufigkeiten des Verharrens mit Rechenkontakt mit 7,8% (ohne Elektrifizierung) bis 9,3% (mit Elektrifizierung) kleiner. Dies liegt an der größeren Wahrscheinlichkeit einer Reizwahrnehmung im Stabzwischenraum bei 30 mm im Vergleich zu einem Stababstand von 18 mm.

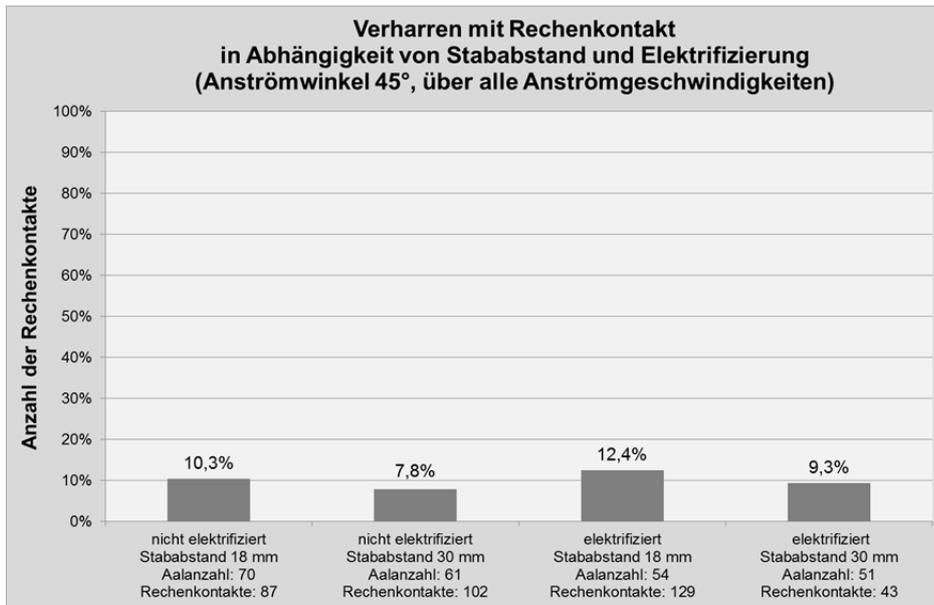


Abb. 144: Verharren mit Rechenkontakt in Abhängigkeit von Stabstand und Elektrifizierung bei einem Anströmwinkel von 45°.

Untersuchte man den Anströmwinkel ohne Elektrifizierung bei einem Stababstand von 30 mm, so waren bei dem Verharren mit Rechenkontakt Häufigkeiten zwischen 8% (bei 30° Anströmwinkel) und 15,9% (bei 55° Anströmwinkel) feststellbar. Bei einer Untersuchung der Ergebnisse mit Elektrifizierung lagen die Werte zwischen 6,3% (bei 55° Anströmwinkel) und 12,3% (bei 30° Anströmwinkel). Ein Einfluss des Anströmwinkels war nicht eindeutig erkennbar.

Wie bereits beim Verharren ohne Rechenkontakt zeigte sich auch mit Rechenkontakt, dass in Abhängigkeit der Anströmgeschwindigkeit keine klaren Erkenntnisse und Häufigkeiten zu beobachten waren. Die Unterschiede von elektrifizierten und nicht elektrifizierten lagen maximal 10% voneinander entfernt, so dass auch hier kaum von einer Beeinflussung der Elektrifizierung ausgegangen werden kann.

Verglichen mit dem Verharren ohne Rechenkontakte kam das Verharren mit Rechenkontakten seltener vor. Es wird vermutet, dass die Aale durch einen Lerneffekt mit vorausgegangenen Rechenkontakten eher ohne Rechenkontakte verharren als mit Rechenkontakten.

### Impingement und kurzzeitiges Verharren am Rechen

Das sogenannte Impingement (vgl. *Lehmann et al.*, 2016) entsteht bei höheren Anströmgeschwindigkeiten, wenn der Vorderkörper eines Aals gegen die Barriere gedrückt wird und er sich nicht mehr mit eigener Kraft davon entfernen kann (Abb. 145). Bei einem Impingement befindet sich der Aalkörper auf den Stäben der Rechenebene. Er ist dort einerseits dem Staudruck ausgesetzt, andererseits dem Druckabfall bzw. dem Unterdruck auf seiner Körperrückseite. Dieser Unterdruck ist abhängig von der Lage des Fisches zu den Stäben und von der Stabform (*Hassinger*, 2011).

Dieses Phänomen wurde bei insgesamt 3 von 441 Aalen bei den nicht elektrifizierten Versuchen im Labor beobachtet, was einer Impingement-Quote von 0,7% entspricht und somit vernachlässigbar ist.

Ein Aal war dem Impingement beim Rechensetup V9.1 (30°/18mm/0,8m/s) ausgesetzt, ein Aal beim Setup V19.3 (30°/30mm/0,5m/s) und ein Aal beim Setup V14.3 (45°/30mm/0,5m/s). Da die Gesamtanzahl von Aalen, welche von einem Impingement betroffen waren, gering waren, könnten bei diesen Versuchen Stresssituationen oder Ermüdung für das Impingement verantwortlich gewesen sein. Darüber hinaus ist auffällig, dass zwei Impingements bei einem Stababstand von 30 mm aufgetreten sind, bei denen die Aale den Rechen auch passieren hätten können.



Abb. 145: Aal, welcher beim Rechensetup V9.1 ( $30^\circ/18\text{mm}/0,8\text{m/s}$ ) vom Impingement betroffen ist.

Bei mittleren bis größeren Anström winkeln von  $55^\circ$  und bei kleinen Stababständen von 10 mm entstand kein Impingement, allerdings wurden hier nur Versuche mit 44 Probanden durchgeführt. Auch bei sämtlichen elektrifizierten Studien wurde kein Impingement beobachtet. Die Elektrifizierung führte beim Ertasten der Rechenzwischenräume zu einem elektrischen Reiz. Sobald die Aale diesen Reiz spürten, entfernten sie sich unter Aufbringung ihrer gesamten Schwimmleistung (= Sprintgeschwindigkeit) schlagartig und ruckartig vom Schrägrechen. Das Stromfeld unterstützt daher das Entfernen vom Schrägrechen und kann somit zu einer verringerten Mortalität, welche aufgrund des Rechens und der RRM entsteht, führen.

Impingement spielt bei Schrägrechen bis zu einer Anströmgeschwindigkeit von 0,8 m/s (maximal getestete Geschwindigkeit) keine bzw. eine vernachlässigbare Rolle – unter den gegebenen Laborbedingungen mit einer Wassertemperatur von  $18^\circ\text{C}$  bis  $20^\circ\text{C}$ . Nach *Adam et al.* (1999) ist bei konventionellen Rechen und tieferen Wassertemperaturen bei Anströmbedingungen größer 0,5 m/s mit einem Impingement zu rechnen, da dann bei Aalen physiologisch bedingt keine Umkehrreaktion mehr möglich sei. Die Schräganströmung der hier untersuchten Rechen scheint für eine geringere Impingementquote als bei konventionellen Rechen verantwortlich zu sein. Die Schlussfolgerung daraus sind höhere zulässige Anströmgeschwindigkeiten von bis zu 0,8 m/s in Aalmanagementgewässern, wenn ein Schrägrechen statt einem konventionellen Rechen installiert wird.

Ein kurzzeitiges Verweilen oder Verharren am Rechen oder in den Zwischenräumen der Rechenstäbe mit anschließendem Lösen vom Schrägrechen war hingegen am Schrägrechen häufiger zu beobachten (Abb. 146). Dieses kurzzeitige Verweilen mit anschließendem Lösen vom Rechen war unabhängig von der Anströmgeschwindigkeit zu beobachten und wurde eher durch Zufallssituationen oder gestresstes Verhalten ausgelöst.



Abb. 146: Links: Versuch-Nr. V19.3 mit einem Aal, der sich zwischen die Rechenstäbe gewunden hat und so über die gesamte Versuchsdauer verharrte. Er ist mit seiner Position bei Schrägrechen an Wasserkraftanlagen durch den Rechenreinigungsarm gefährdet, der ihn wahrscheinlich verletzen oder töten würde. Rechts: Versuch-Nr. V24.2 mit einem Aal, welcher an den Schrägrechen angedrückt wurde. Er löste sich jedoch nach 4 Minuten und wanderte entlang der Rechenebene über den Bypass ab.

Bei einem Stababstand von 18 mm war das Verweilen am Schrägrechen häufiger zu beobachten, als bei einem Stababstand von 30 mm (Abb. 147). Bei 30 mm zeigten die Aale eine Umkehrreaktion, um die mögliche Gefahr eines unkontrollierten Abdriftens durch den Schrägrechen zu vermeiden.

Bei kleinen Anström winkeln glitten die Aale eher an der Rechenebene Richtung Bypass entlang. Bei großen Anström winkeln waren eher ein Verharren an der Rechenebene und eine Flucht nach Oberstrom zu beobachten, da ein Entlanggleiten bei Winkeln größer 55° aufgrund der geringen Schrägstellung von den Aalen nicht mehr durchgeführt wurde. Dieses aktive Verharren am Rechen ermöglichte es den Aalen, jederzeit vom Rechen Richtung Oberstrom zu flüchten.

Unter Verwendung des elektrifizierten Schrägrechens wurden nur noch vereinzelt Aale beobachtet, die im Bereich einiger Sekunden oder Minuten an der Barriere verharrten (Abb. 147). Der elektrische Impuls führte zu einer schnellen und ruckartigen Flucht der Aale vom Schrägrechen und danach zu einem schnellen Schwimmen stromauf. Die dargestellte Wirksamkeit des schwachen elektrischen Feldes ist mit hoher Wahrscheinlichkeit unabhängig von Stababstand und dem Anström winkel sowie der Anström geschwindigkeit gegeben.

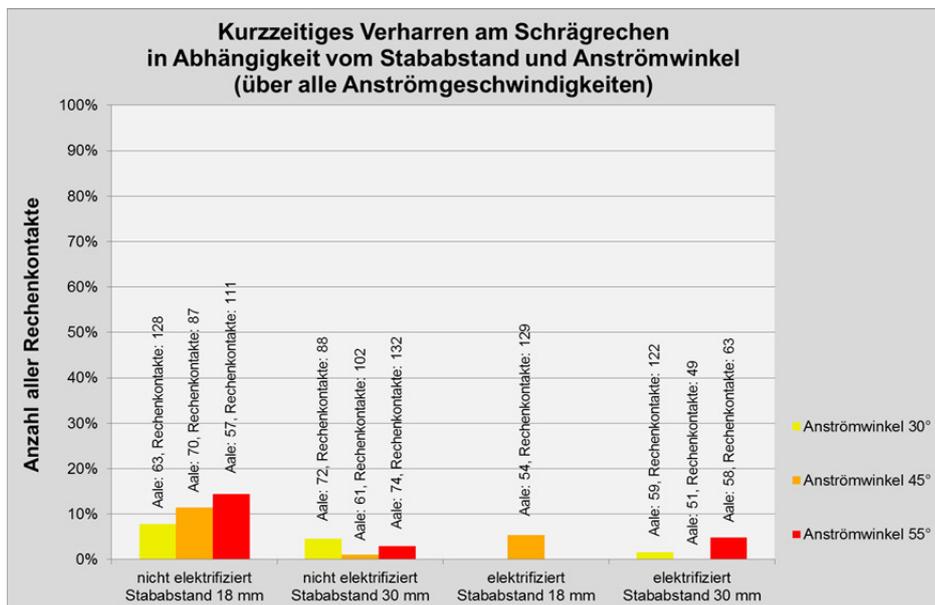


Abb. 147: Häufigkeiten eines kurzzeitigen Verharrens am Schrägrechen bei unterschiedlichen Stababständen und Anström winkeln sowie in Abhängigkeit einer Elektrifizierung.

Ohne Elektrifizierung des Schrägrechens verharrten mehr Aale am Rechen als mit einer Elektrifizierung, was auch die Einzelgegenüberstellung der Versuche in Abhängigkeit des Anström winkels und des Stababstands aufzeigt (Tab. 29). Daher verkürzt eine Elektrifizierung eines Schrägrechens die Verweildauer von Aalen an diesem Barrieretyp und verringert damit das Verletzungs- bzw. Mortalitätsrisiko.

Ausnahme bildet der Stababstand von 30 mm bei einem Anström winkel von 55°, bei dem die Häufigkeit eines Verharrens am Rechen ohne Elektrifizierung höher lag (Tab. 29). Eine schlüssige Erklärung dafür konnte nicht gefunden werden.

Tab. 29: Kurzzeitiges Verharren von Aalen an Schrägrechen mit und ohne Elektrifizierung gleicher Setups.

Rechenetups		ohne Elektrifizierung	mit Elektrifizierung
Stababstand 18 mm	Anström winkel 30°	11,5%	5,4%
	Anström winkel 55°	3,0%	4,8%
Stababstand 30 mm	Anström winkel 30°	4,5%	1,6%
	Anström winkel 45°	1,0%	0,0%
	Anström winkel 55°	3,0%	4,8%

## Umkehrreaktion nach Rechenkontakt

Bereits 1999 wurde von *Adam et al.* an nicht passierbaren konventionellen Rechen eine Umkehrreaktion von Aalen beobachtet. Diese Beobachtungen wurden 2007 von *Jansen et al.* auf passierbare Barrieren ausgedehnt. Der Umkehrreaktion folgte häufig eine aktive Gegenstrombewegung Richtung Oberstrom.

Auch bei den hier durchgeführten ethohydraulischen Laborstudien war diese Umkehrreaktion häufig zu beobachten. Eingeleitet wurde dieses Verhalten durch eine entweder kontrollierte oder passive Drift der Aale zum Rechen hin oder durch eine aktive Abwanderung (Abb. 139) mit anschließender Kollision mit dem Schrägrechen. Dies wurde auch durch *Lehmann et al.* (2016) bestätigt. Die Aale waren entweder mit dem Kopf voran in Strömungsrichtung ausgerichtet, so dass ihr Kopf auf den Rechen traf (= aktive Abwanderung oder aktive Drift) oder aber sie lagen s-linienförmig (= *angiloform*) in der Strömung und berührten die Barriere dann in der Körperstellung, in der sie verdriftet sind. Dies geschah häufig mit einem größeren Teil des Körpers (= passive Drift). Der Kollision der Aale mit dem Schrägrechen folgte größtenteils eine Umkehrreaktion: Die Aale drehten und orientierten sich am Schrägrechen so, dass sie Kopf voran wieder Richtung Oberstrom schwammen ohne an der Rechenebene zu verweilen (Abb. 148).



Abb. 148: Umkehrreaktion eines Aales bei Versuchs Nr. V1.4: Auftreffen auf den Schrägrechen mit dem Kopf nach einer aktiven Abwanderung (links), Umdrehen mit dem Körper (Mitte) und Kopf voran stromaufwärts schwimmend (rechts). Auf dem rechten Bild ist ein zweiter Aal unten sichtbar, welcher ebenfalls in einer aktiven Abwanderung kurz vor der Kollision mit dem Schrägrechen stand.

Ausgewertet wurde die Häufigkeit einer Umkehrreaktion in Relation zur Gesamtheit aller Rechenkontakte. Es war keine Abhängigkeit zu den Anströmgeschwindigkeiten oder zum Anströmwinkel erkennbar. Die Häufigkeiten von Umkehrreaktionen in Relation zur Gesamtheit aller Rechenkontakte lagen eng beieinander. Auch bei hohen Anströmgeschwindigkeiten von 0,8 m/s ließ sich die Umkehrreaktion am Schrägrechen häufig beobachten. Lediglich hinsichtlich des Stababstandes ließ sich ein Unterschied erkennen: Bei 18 mm lag die Häufigkeit einer Umkehrreaktion nach einem Rechenkontakt bei 40%, bei einem Stababstand von 30 mm bei 48%. Obwohl ein Aal bei einem größeren Stababstand hätte problemlos hindurchschwimmen können, entschied er sich sogar etwas häufiger für das Aufwandern als bei geringeren Stababständen. Eine Erklärung dafür könnte sein, dass sich Aale bei kleineren Stababständen eher um diese wickeln als bei größeren Stababständen, bei denen die Gefahr eines „Einsaugens“ besteht und bei denen eher eine schnelle Flucht Richtung Oberstrom erfolgt. Im Schnitt folgten nach 50% aller Rechenkontakte diese Umkehrreaktionen.

Bei Aalen, welche nach einer passiven/aktiven Drift angiloform oder mit dem Kopf voran auf den Rechen trafen, bestand eine größere Häufigkeit zu einer Umkehrreaktion, als zu einem schlängelnden Abwandern entlang der Rechenebene Richtung Bypass, also einer geleiteten Bewegung Richtung Bypass. Letzteres war nur selten zu beobachten: Im Schnitt wanderten nur 1 bis 2 von 20 Aale auf diese Weise ab. Eine Leitwirkung des Schrägrechens ist bei Aalen somit nur in 5% bis 10% aller Fälle zu beobachten.

Die Elektrifizierung hatte keinen Einfluss darauf, wie sich die Aale dem Schrägrechen näherten, da das Stromfeld nur zwischen den Rechenstäben aufgebaut war. Außerdem gab es auch hinsichtlich der Häufigkeit einer Umkehrreaktion keine Unterschiede zwischen den elektrifizierten und nicht elektrifizierten Versuchen. Daher schien es, dass ein schwacher elektrischer Impuls, welcher erst zwischen den Rechenstäben zu spüren war, im Moment der Kollision bei driftenden oder aktiven abwärts wandernden Aalen nicht wahrgenommen wurde. Er konnte daher keine Verhaltensänderung hinsichtlich einer Abwanderung oder einer Umkehrreaktion auslösen.

## Stromaufwärts gerichtetes Suchverhalten am Rechen

Wie bereits bei den Lachssmolts feststellbar, bewegten sich auch einige Aale bei einem Auftreffen im Reaktionsraum vor dem Bypass nicht in diesen hinein, sondern schwammen aktiv gegen die Strömung an der Rechenebene entlang bis zur Rechenmitte oder in die oberstromige strömungsberuhigte Ecke des Schrägrechens zurück und von dort dann weiter stromauf (Abb. 149). Beim Schwimmen entlang der Rechenebene berührten die Aale den Schrägrechen mehrmals, was die Lachssmolts vermieden. Dieses Verhalten konnte auch nach einer Rechenkollision beobachtet werden.



Abb. 149: Stromaufwärts gerichtetes Suchverhalten eines Aals bei Versuch-Nr. V15.1, welcher die Rechenebene entlang schwamm, den Schrägrechen mehrfach berührte (links) und anschließend ab ca. Rechenmitte Richtung Oberstrom schwamm (rechts).

Es zeigte sich, dass unabhängig von der Anströmgeschwindigkeit die Häufigkeit eines stromaufwärts gerichteten Suchverhaltens am Rechen mit größer werdendem Anströmwinkel sinkt. Je näher sich der Anströmwinkel an einer orthogonalen Ausrichtung des Rechens ( $90^\circ$ ) orientiert (also je größer der Anströmwinkel  $\delta$  ist), desto geringer war die Häufigkeit eines Entlangwanderns an der Rechenebene – genau konträr zu den Beobachtungen bei Lachssmolts, welche eher bei großen Anströmwinkeln stromaufwärts gerichtet gierten.

Trotz dieser Unterschiede aufgrund des Anströmwinkels lagen die Häufigkeiten für ein stromaufwärts gerichtetes Suchverhalten bei unterschiedlichen Stababständen bei den Aalen eng beieinander bzw. waren nahezu gleich: 8% bis 12% aller Rechenkontakte fanden bei einem Stababstand von 18 mm auf diese Weise statt und 8% bis 10% bei einem Stababstand von 30 mm. Die Prozentangaben beziehen sich auf die Häufigkeit des stromaufwärts gerichteten Suchverhaltens mit Rechenkontakt in Relation zur Gesamtheit aller Rechenkontakte während der Versuchsdurchgänge.

Daraus wird ersichtlich, dass der Stababstand nur einen geringen Einfluss auf das stromaufwärts gerichtete Suchverhalten von Aalen am Rechen hat. Bei einem Stababstand von 10 mm trat dieses Verhaltensmuster nicht mehr auf. Da die Aale beim stromaufwärts gerichteten Suchverhalten den Schrägrechen häufig berührten, gelangten sie dabei in den Bereich, in dem die Geschwindigkeitszunahmen und Turbulenzen aufgrund der engen Stababstände spürbar waren. Diese turbulenten Zonen bei niedrigen Stababständen wurden von den Aalen gemieden.

Eine Elektrifizierung des Schrägrechens reduzierte die Häufigkeit eines stromaufwärts gerichteten Suchverhaltens an der Rechenebene um rund 50% (Abb. 150). Beim Schwimmen der Aale entlang der Rechenebene berührten die Aale häufig den Rechen und erkundeten die Stabzwischenräume mit dem Schwanz. Dort nahmen die Aale den elektrischen Impuls wahr und flüchteten ruckartig in Richtung Oberstrom. Dabei brachen sie das stromaufwärts gerichtete Suchverhalten schlagartig ab oder verzichteten komplett darauf.

Eine Abhängigkeit von der Anströmgeschwindigkeit konnte bei den durchgeführten Versuchen nicht eindeutig festgestellt werden.

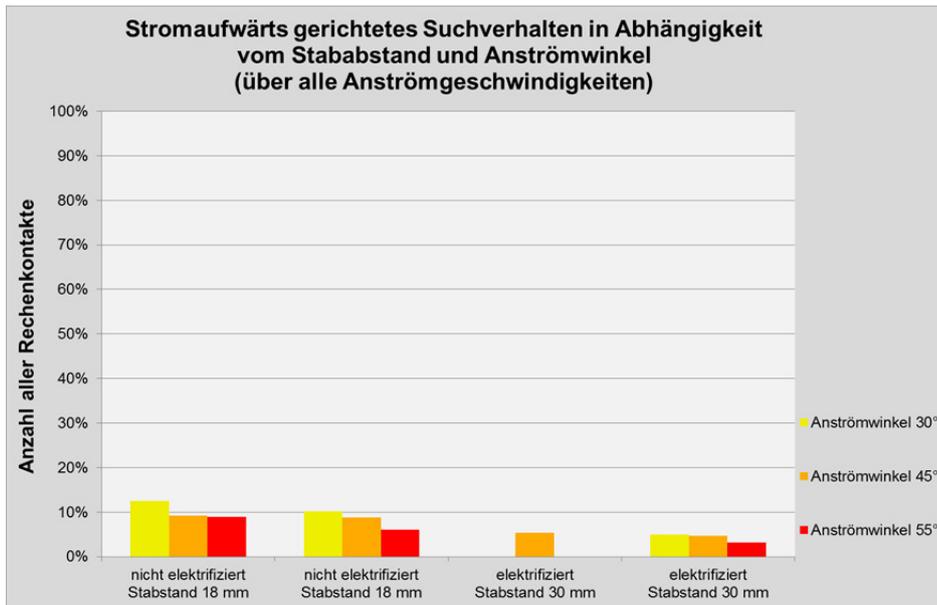


Abb. 150: Häufigkeiten eines stromaufwärts gerichteten Suchverhaltens bei unterschiedlichen Stababständen und Anströmwinkeln sowie in Abhängigkeit einer Elektrifizierung.

### Anguloformer Rechenkontakt mit Abwanderung

Ein Teil der Aale ließ sich linienförmig mit der Strömung treiben (= passive Drift) bis eine Kollision mit dem Schrägrechen stattfand. Entweder war diese Kollision zufällig im unmittelbaren Nahbereich und Reaktionsraum des Bypasses, so dass der Aal direkt abwanderte oder er traf mit dem gesamten Körper auf den Schrägrechen und wanderte an der Rechenebene bis zum Bypass hin ab (Abb. 151). Dieses Abwandern war häufig ein kontrolliertes Entlanggleiten an der Rechenebene, wobei sich der Aal mit dem Schwanz an den Rechenstäben festhielt und so die Geschwindigkeit des Leitens bzw. der Drift Richtung Bypass steuerte.



Abb. 151: Links Aal im Versuch-Nr. V21.1 kurz vor der Kollision mit dem Schrägrechen, seine Körperhaltung war anguloform ausgebildet, er driftete passiv auf den Rechen. Rechts Aal im Versuch-Nr. V5.1 im Augenblick der Kollision mit dem Schrägrechen, seine Körperhaltung war ebenfalls anguloform ausgebildet. Links neben dem Aal (rechte Abb.) verharrte ein Aal auf der Rechenebene.

Etwa 40% aller Abwanderungen bei nicht elektrifizierten Studien erfolgten auf diese Weise, wobei die Mehrzahl an Aalen (durch Zufall) direkt abwanderte (30%), da sie auf der linken Rinnenseite driftend am Hindernis ankamen. Nur ein geringer Teil der Aale driftete nach einer Rechenkollision an der Rechenebene entlang in Richtung Bypass (10%).

Bei den elektrifizierten Versuchen wanderten 45% aller Aale in anguloformer Körperhaltung ab, wobei hier in etwa gleich viele Aale direkt in den Bypass (24%) schwammen wie zunächst auf den Rechen trafen (21%) und dann in den Bypass abwanderten. Damit führten elektrifizierte Schrägrechen Aale doppelt so häufig zu einem Entlangdriften in einen Bypass (21%) als nicht elektrifizierte Schrägrechen (10%).

Das kontrollierte Treiben lassen in der Strömung auf der linken Rinnenseite Richtung Bypass war vom Zufall bestimmt. Die Aale waren hier über die gesamte Wassertiefe (im Labor 60 cm bis 80 cm) verteilt, die meisten hielten sich jedoch in Sohlnähe auf.

Traf ein Aal auf den Schrägrechen, so löste dies mit größerer Häufigkeit eine Umkehraktion aus (siehe Unterkapitel Umkehrfunktion nach Rechenkontakt) als eine Drift an der Rechenebene entlang in den Bypass. Wenn es jedoch bei den nicht elektrifizierten Studien zu einer derartigen Drift kam, so konnte beobachtet werden, dass dieses Verhalten vom Stababstand abhängig war: Je größer der Stababstand, desto seltener wurde dieses Entlangdriften am Rechen gezeigt, da die Aale dann eher den Schrägrechen passiert haben (Abb. 151 und Abb. 153). Dies traf jedoch nicht auf einen Anströmwinkel von 30° zu, hier waren die Häufigkeiten bei größerem Stababstand höher. Ein langer Schrägrechen mit kleinem Anströmwinkel ließ die Aale eher an ihm entlang gleiten als kurze Schrägrechen mit großen Anströmwinkeln. Eine gewisse Leitwirkung des Schrägrechens machte sich hier zwar bemerkbar, wobei sich die Häufigkeiten aus der 18mm- und 30mm-Auswertung nahezu nicht unterschieden (Abb. 152).

Mit hoher Anströmgeschwindigkeit von 0,8 m/s erhöhte sich die Wahrscheinlichkeit eines Abwanderns entlang der Rechenebene mit anschließender Bypasspassage.

Bei den Studien mit elektrifiziertem Schrägrechen waren diese Abhängigkeiten nicht mehr erkennbar. Die Reaktionen der Aale bei Rechenkollisionen hingen davon ab, ob Aale den elektrischen Reiz spüren oder nicht.

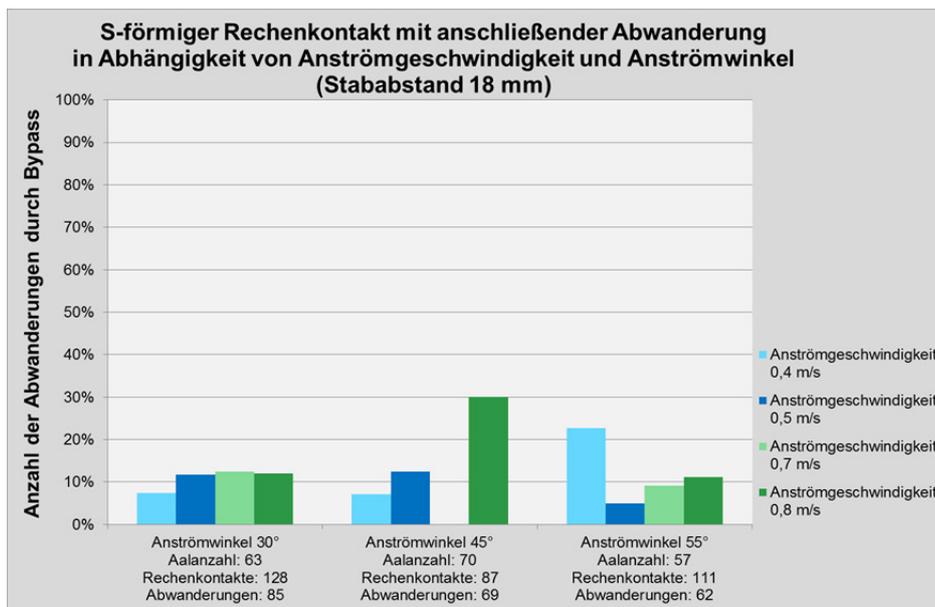


Abb. 152: Häufigkeiten einer anguloformen/s-förmigen Rechenkollision mit anschließender Abwanderung entlang der Rechenebene in den Bypass in Abhängigkeit von Anströmgeschwindigkeit und Anströmwinkel bei einem Stababstand von 18 mm ohne Elektrifizierung.

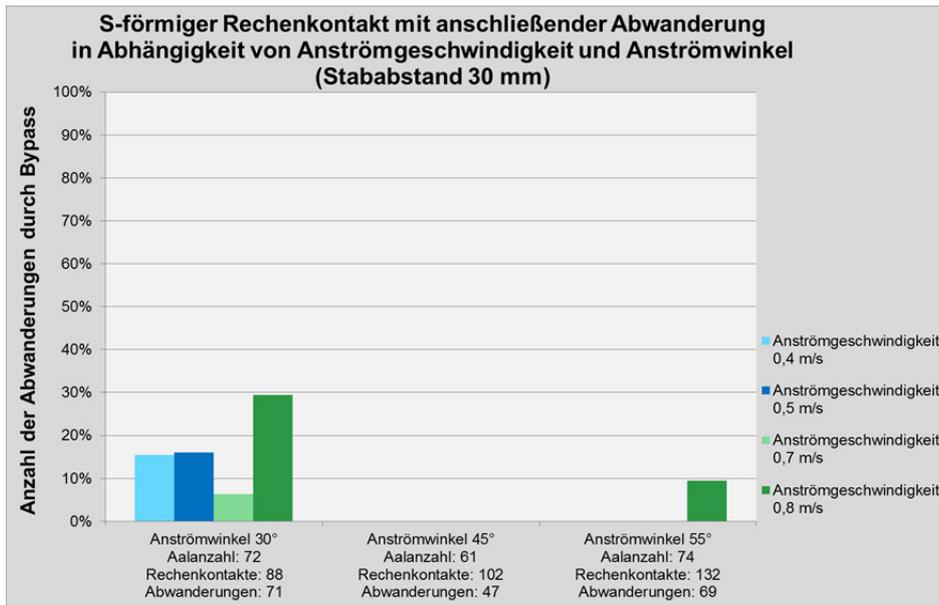


Abb. 153: Häufigkeiten einer anguliformen/s-förmigen Rechenkollision mit anschließender Abwanderung entlang der Rechenebene in den Bypass in Abhängigkeit von Anströmgeschwindigkeit und Anströmwinkel bei einem Stababstand von 30 mm ohne Elektrifizierung.

### Rechenkontakt mittels Kopf oder Schwanz mit anschließender Abwanderung

Aale kollidierten auch häufig mit Kopf oder Schwanz mit dem Schrägrechen nachdem sie aktiv oder passiv verdrifteten. Nach der Kollision wanderten die Aale direkt und kontrolliert mit Kopf oder Schwanz voran ab (Abb. 154). Beide Abwanderungsverhalten waren jedoch maßgeblich vom Zufall bestimmt. Der Erfolg einer Abwanderung wurde maßgeblich durch die Position bestimmt, in welcher sich der Aal innerhalb der Rinnenbreite kontrolliert mit der Strömung verdriften ließ.



Abb. 154: Aal mit Kopf auf Rechen treffend im Versuch-Nr. V5.2 (links oben), den Zwischenraum der Rechenstäbe mit dem Schwanz abtastend im Versuch-Nr. V15.1 (oben rechts) und positiv rheotaktisch im Bereich des Bypasses ausgerichtet im Versuch-Nr. 5.3 (unten).

Verhaltensweisen von Aalen, die mit dem Kopf voran aktiv verdriftend oder in Ausübung einer aktiven Abwärtswanderung, wurden bereits bei *Adam et al.* (1999) und in der vorliegenden Forschungsarbeit erläutert (Kap. 7). Ein kontrolliertes langsames Verdriften in positiv rheotaktischer Ausrichtung wurde bisher noch nicht als spezielles Verhaltensmuster wahrgenommen und beschrieben. Dieses Verhalten stellt damit eine weitere Verhaltensweise zur Abwärtsbewegung dar. Das Verhalten war bereits außerhalb/stromauf des Einflussbereichs des Schrägrechens erkennbar, so dass es auch bei konventionellen Rechen vorkommen kann.

Nachdem Aale langsam mit dem Schwanz die Strömungsänderung im unmittelbaren Nahbereich des Bypasses erspürt hatten, lag die Häufigkeit einer anschließenden Abwanderung hoch. Genau das Gegenteil konnte beobachtet werden, als die Aale mit dem Kopf voran in den Bereich der Strömungszunahme beim Bypass schwammen – die Aale wendeten und schwammen wieder in Richtung Oberstrom zurück. Die Elektrifizierung des Rechens änderte an dieser Verhaltensweise nichts, da der elektrische Reiz im Einlaufbereich des Bypasses nicht zu spüren war. Das Zurückschrecken nach einem Einschwimmen mit dem Kopf voran könnte daran gelegen haben, dass Aale am Kopf Strömungsänderungen sensibler und empfindlicher wahrnehmen als am Schwanz und daher vor der Gefahr einer Geschwindigkeitsbeschleunigung flüchteten. Häufig wurde dabei auch beobachtet, dass Aale eine kurze Strecke (max. 1 m) rückwärts schwammen, um den Kopf möglichst schnell aus dem für sie existierenden Gefahrenbereich zu bringen.

### Gestresstes Verhalten

Grundsätzlich war zu beobachten, dass das unterschiedliche Schwimmverhalten abhängig von der Anströmgeschwindigkeit war. Bei geringen Anströmgeschwindigkeiten (0,4 m/s bis 0,5 m/s) schwammen die Aale ruhig, kontrolliert und eher sondierend zum und am Schrägrechen, wanderten über dessen Rechenebene entweder langsam ab oder führten eine kontrollierte Umkehrbewegung durch. Bei höheren Anströmgeschwindigkeiten (0,7 m/s bis 0,8 m/s) hingegen bewegten sich die Aale gestresster mit hektischen Richtungs- und Bewegungsänderungen nach einem Kontakt mit dem Schrägrechen. Durch einen elektrischen Reiz wurde das gestresste Verhalten noch weiter verstärkt. Derart gestresstes Verhalten nach einem Rechenkontakt trat bei den Versuchen mit Elektrifizierung bei 35% bis 80% aller Rechenkontakte auf, je nach Anströmwinkel und Anströmgeschwindigkeit. Bei nicht elektrifizierten Studien lediglich bei 2% bis 20% aller Rechenkontakte (Abb. 155).

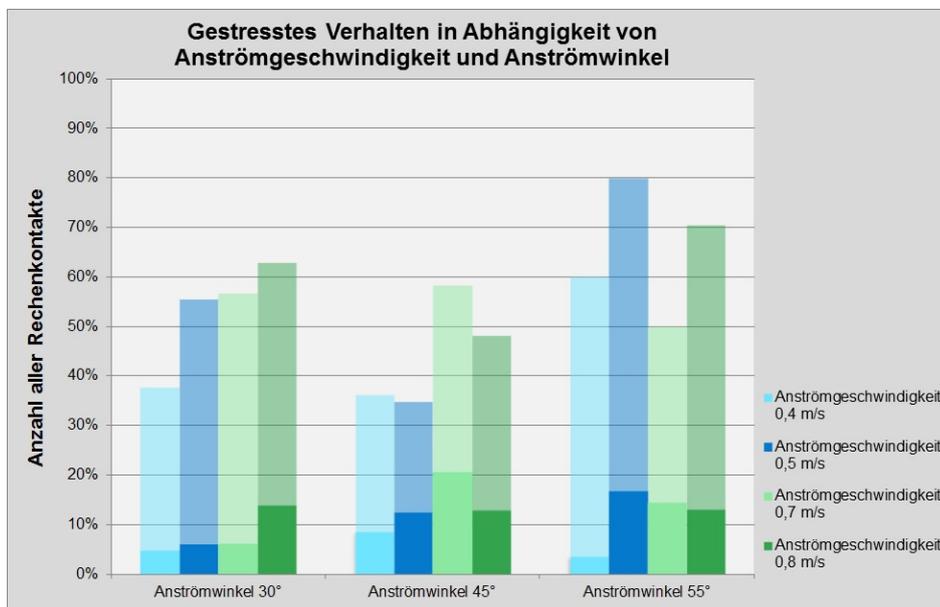


Abb. 155: Häufigkeiten eines gestressten Verhaltens nach einem Rechenkontakt in Abhängigkeit von Anströmgeschwindigkeit und Anströmwinkel bei einem Stababstand von 18 mm. Die kleineren, satt farbigen Balken in der vorderen Ebene geben die Werte ohne Elektrifizierung wieder, die transluzenten/blassen Balken in der hinteren Ebene die Häufigkeit mit Elektrifizierung.

Darüber hinaus verstärkte sich das gestresste Verhalten bei einem größeren Stababstand von 30 mm gegenüber einem Stababstand von 18 mm, unabhängig davon, ob am Rechen ein elektrisches Feld aufgebaut war oder nicht.

---

Das gestresste Verhalten hatte bei den Laborversuchen keine Auswirkung auf den Erfolg einer Abwanderung. Die Bypasspassage wurde dadurch weder begünstigt noch behindert. Schwache elektrische Impulse wirkten sich daher nicht negativ auf die Auffindbarkeit und die Passierbarkeit eines Bypasseinlaufs aus, aber auch nicht fördernd.

## Rechenpassagen

Aale wanderten auch über die Zwischenräume der Rechenstäbe ab (= Rechenpassagen). Dies fand unter Laborbedingungen nur selten statt. Bei Stababständen von 10 mm und 18 mm wurden keine Rechenpassagen beobachtet, unabhängig von Anströmwinkel, Anströmgeschwindigkeit oder einer Elektrifizierung – und das obwohl kleine Aale von ca. 40 cm Länge eine Körperdicke hatten, mit der sie durch den Stababstand von 18 mm hindurch gepasst hätten. Die großen Geschwindigkeitszunahmen in den Rechenzwischenräumen, verbunden mit Ablösungen und Turbulenzen, gestalteten diesen Abwanderungskorridor für Aale als wenig attraktiv, so dass von den Aalen Alternativrouten gesucht wurden. Dieses Phänomen der vena contracta in den Stabzwischenräumen war bei Stababständen von 30 mm weniger ausgeprägt, was den Schluss zuließ, dass nicht nur der reine Stababstand und die Körperdicke für die Rechenpassage eine Rolle spielte, sondern auch hydraulische und verhaltensrelevante Faktoren (Kap. 2.6.1, Abb. 19). Ein großer Stababstand von 30 mm bot bei nicht elektrifizierten Schrägrechen keinen ausreichenden Schutz. Bei Schrägrechen ohne Elektrifizierung sind daher Stababstände von 18 mm oder kleiner zu wählen.

Bei nicht elektrifizierten Schrägrechen, einem Stababstand von 30 mm und einem Anströmwinkel von 45° wanderten 20% der Aale durch den Schrägrechen (Abb. 156). Hier ist bei realen Wasserkraftanlagen die Gefahr eines Verletzungs- oder Mortalitätsrisiko vorhanden. Bei einem Anströmwinkel von 30° hingegen fanden nur 6% und bei 55° nur 14% aller Aal-Abwanderungen per Rechenpassage statt. Bei kleinen Anströmwinkeln wie 30° konnten die Aale nach einem Auftreffen auf den Rechen ruckartig nach links ausweichen und damit den Bypass auffinden oder in Richtung Oberstrom schwimmen. Bei großen Anströmwinkeln verringerte sich diese Möglichkeit. Die Rechenkollisionen, welche häufig vom Zufall bestimmt war, beeinflussten die Abwanderungsquoten durch den Rechen sicher auch.

Die Anströmgeschwindigkeiten spielten für die Rechenpassagen von Aalen bei nicht elektrifizierten Versuchen keine Rolle, die Abwanderungsquoten durch den Schrägrechen lagen jeweils zwischen 13% und 18% (im Schnitt bei 15%).

Wurde der Schrägrechen hingegen elektrifiziert, so reduzierten sich die Rechenpassagen erheblich auf nur noch ungefähr 1%, d.h. nur 2 von 168 Aalen wanderten bei einer Anströmgeschwindigkeit von 0,8 m/s durch den Rechen ab.



Abb. 156: Aale bei der Rechenpassage im Versuch-Nr. V13.1 (links und rechts). Beide Aale trafen mit dem Kopf voraus auf den Schrägrechen und gingen direkt in einen Stabzwischenraum hinein ohne vorheriges Abtasten und Sondieren.

Da die Anströmgeschwindigkeiten keinen Einfluss auf die Anzahl an Rechenpassagen hatten, wurde eine Auswertung nach Anströmwinkel für einen Stababstand von 30 mm durchgeführt. Hieraus sind nochmals die Unterschiede der Rechenpassagen bei elektrifizierten Versuchen gegenüber nicht elektrifizierten Versuchen ersichtlich (Abb. 157): Die Elektrifizierung eines Schrägrechens führte trotz großen Stababständen von 30 mm zu einer hohen Schutzrate/Effizienz.

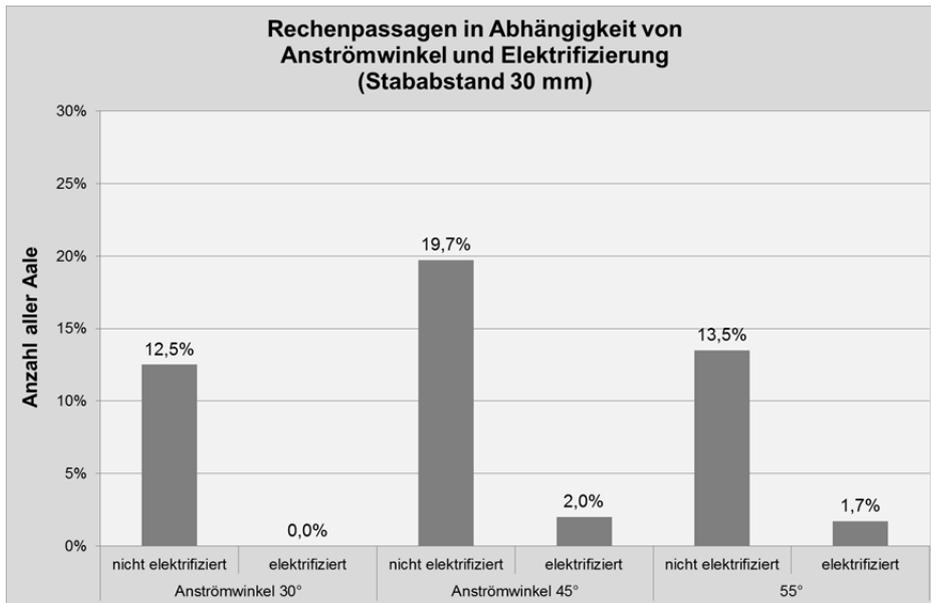


Abb. 157: Rechenpassagen in Relation zur Aalanzahl in den Versuchen in Abhängigkeit von Anströmwinkel und Elektrifizierung bei einem Stababstand von 30 mm.

Die Kombination aus großem Stababstand und Elektrifizierung von Schrägrechen kann für größere Wasserkraftwerke ab einem Ausbaudurchfluss von etwa  $Q_A = 50 \text{ m}^3/\text{s}$  (z. B. am Neckar, Rhein, Main) daher eine sinnvolle Lösung für den Aalschutz darstellen. Enge Stababstände von 15 mm oder 18 mm würden bei größeren Abflüssen schnell verlanden und Bereiche mit deutlich erhöhter Anströmgeschwindigkeit schaffen, welche sich negativ auf den Fischschutz des Schrägrechens auswirken würden. Daher sollten für einen sicheren Betrieb der Anlage und letztendlich zur Aufrechterhaltung der Fischschutzbelange am Schrägrechen in der Praxis größere Stababstände gewählt werden. Mit einer Elektrifizierung könnten betriebliche und ökologische Belange gemeinsam berücksichtigt werden.

Nicht nur Rechenpassagen von Oberstrom nach Unterstrom sondern auch in umgekehrter Richtung waren bei den Versuchen beobachtbar, unabhängig von einer Elektrifizierung. Gründe hierfür könnten in den Strömungsbedingungen der verschiedenen Ablösezonen an der Vorderkante der Stäbe, im Zwischenraum und am Ende der Zwischenräume liegen (Kap. 2.6.1). Die Ablösungen verursachten Turbulenzen, welche die Aale eventuell wieder zurück in Richtung Oberwasser in strömungsberuhigte Bereiche schwimmen ließen.

Bei den nicht elektrifizierten Versuchen wanderten insgesamt 5% aller Aale nach einer Rechen- oder Bypasspassage durch den Schrägrechen wieder auf. Ein Aal zeigte dieses Verhalten sogar bei einem Stababstand von 10 mm (Versuch-Nr. V26.3). Ansonsten beobachtete man dies nur bei Aalen in Versuchen mit einem Stababstand von 30 mm – hier jedoch bei allen Anströmwindeln und Anströmgeschwindigkeiten.

Die Erkenntnisse aus den Versuchen an Schrägrechen stehen im Gegensatz zu Erkenntnissen aus bisherigen Versuchen an konventionellen Rechen oder Flachrechen. Bei konventionellen Rechen wurde von *Adam et al.* (1999) sowie von *Travade et al.* (2010) nachgewiesen, dass Aale mit einer Körperlänge von ca. 70 cm einen Rechen, welcher mit einem Stababstand von 20 mm ausgestattet ist, passieren, was bei den hier durchgeführten Studien an Schrägrechen mit 18 mm nicht bzw. nur sehr selten beobachtet wurde. Ein Schrägrechen kann aufgrund dieser ethohydraulischen Befunde in Aalmanagementgewässern gegenüber konventionellen Rechen mit Stababständen von 18 mm versehen werden und damit größere Stababstände aufweisen.

### **Bypasspassagen**

Der Bypass war analog zu den vorangegangenen Lachssmoltsversuchen als vertikaler 20 cm breiter Schlitz angeordnet und über die gesamte Wassersäule geöffnet. Bei einem Abstieg (= Bypasspassage) schwammen die Aale in den Bereich unterstromig des Bypasses und einige Male auch hinter den Schrägrechen. Es war für sie jederzeit möglich, durch den Bypass oder durch den Rechen wieder Richtung Oberstrom zu schwimmen. Dies zeigten auch zahlreiche Aale, entweder unmittelbar nach der Bypasspassage oder nach mehreren Minuten Aufent-

---

halt im unterstromigen Bereich. Daher kam es bei einigen Versuchen auch vor, dass mehr Abwanderungen als Aale gezählt wurden, da einige Aale mehrmals ab- und wieder aufwanderten. Ein Zusammenhang zwischen Bypasspassage und Aalanzahl herzustellen, macht daher keinen Sinn. Deshalb wurde die Relation zwischen Rechenkontakt und Bypasspassage gebildet, denn nicht nach jedem Rechenkontakt fand eine Bypasspassage statt. Je kleiner die Relation, desto weniger erfolgreiche Bypasspassagen fanden im Versuch statt.

Bei einem Stababstand von 18 mm war bei den nicht elektrifizierten Studien erkennbar, dass der Anströmwinkel die Abwanderungen kaum beeinflusste, da die Relationen bei 0,72 bis 0,79 Bypasspassagen pro Aal lagen und damit eine geringe Streuung hatten. Erst bei einem größeren Stababstand mit 30 mm machte sich der Einfluss des Anströmwinkel bemerkbar: bei größeren Anströmwinkeln nahm die Relation ab, da hier die Aale den Rechen häufig direkt passierten. Gute Werte der Abwanderungsquoten durch den Bypass erreichte man mit einem Stababstand von 30 mm, einem Anströmwinkel von 45° und einer Elektrifizierung des Schrägrechens. Daher spielt es bereits in der Planungsphase bei der Rechenauslegung eine Rolle, ob der Schrägrechen später auch elektrifiziert sein wird oder nicht.

Der beste Einzelwert bei den nicht elektrifizierten Versuchen zeigte sich mit 1,57 Bypasspassagen pro Aal beim Rechensetup „55°/18mm/0,7m/s“. Bei den elektrifizierten Studien hingegen mit 1,38 beim Rechensetup „45°/30mm/0,8m/s“. Dies zeigt, dass auch bei höheren Geschwindigkeiten (0,7 m/s bis 0,8 m/s) unter bestimmten Randbedingungen eine große Anzahl an erfolgreichen Bypasspassagen erfolgte. Geringere Anströmbedingungen müssen daher nicht zwingend vorgesehen werden, solange der Schrägrechen eine ausreichende Schutzrate besitzt.

Daher lässt sich zusammenfassend sagen, dass bei einem Stababstand von 18 mm die Relationen von Rechenkontakten zu Bypasspassagen (leicht) höher lagen, als bei einem Stababstand von 30 mm, da bei letzterem einige Aale auch durch den Schrägrechen abwanderten.

Es ließ sich beobachten, dass die Relationen, also die Anzahl der Bypasspassagen im Vergleich zu den Rechenkontakten, bei elektrifiziertem Schrägrechen leicht unter der Anzahl bei nicht elektrifizierten Versuchen lag. Jedoch muss beachtet werden, dass die Versuche im Labor maximal eine gute Stunde andauerten. In der Natur können Aale, welche durch elektrische Reize Richtung Oberstrom zurückweichen, dieses Abwanderungsprozedere mehrmals und über mehrere Stunden und Tage durchlaufen, bis sie zufällig in den Bypass gelangen, ein anderes Abwanderungsverhalten zeigen oder andere Abwanderungskorridore erschließen. Eventuell ändert sich ihr Verhalten durch äußere Einflüsse, wie Temperaturänderung im Wasser, Tag/Nacht oder Abflussverhalten im Gewässer. Die Laborergebnisse stellen dagegen nur einen kurzen Ausschnitt der Bypasspassage an einem Schrägrechen dar. Außerdem ist die Bypassöffnung mit 20 cm relativ schmal. In der Realität werden mindestens 30 cm bis über 100 cm vorgesehen, da über die Fischabstiegsanlagen häufig auch das Geschwemmsel und Treibgut abgegeben wird und der Bypass nicht verstopfen sollte.

Je häufiger Rechenkontakte am Schrägrechen vorkamen, desto aktiver und lebhafter wurden die Aale (Abwanderungsdrang) und desto höher war die Wahrscheinlichkeit einer Bypasspassage.

## **Rechenkontakte**

Folgende Verhaltensweisen führten bei den Aalen an den untersuchten Schrägrechentypen zu Rechenkontakten. Einige davon wurden bereits beschrieben.

- Rechts verharrend mit regelmäßigem Rechenkontakt mit dem Schwanz;
- S-linienförmig oder mit dem Kopf den Rechen kollidierend (nach einer passiven/aktiven Drift oder einer aktiven Abwanderung), gefolgt von einer Umkehrreaktion;
- Entlangschwimmen an der Rechenebene vom Bypass bis zur Rechenmitte oder bis zur Rinnenecke durch sogenanntes stromaufwärts gerichtetes Suchverhalten;
- Verweilen am Rechen und zwischen den Rechenstäben;
- Mit dem Schwanz voran kontrollierend und langsam in Richtung Rechen abdriftend, kollidieren mit dem Rechen und wieder Kopf voran in Richtung Oberstrom flüchtend;
- Rechenpassagen von Oberstrom nach Unterstrom;

- 
- Rechenpassagen von Unterstrom nach Oberstrom.

Darüber hinaus waren folgende Verhaltensweisen am Schrägrechen erkennbar, welche aber letztendlich zu einer Bypasspassage führten wie:

- S-linienförmig und passiv auf den Rechen treffend, die Rechenebene entlang gleitend oder schwimmend bis in den Bypass;
- Kopf voran auf den Rechen treffend, die Rechenebene entlang bis in den Bypass gleitend.

Um Aussagen zur Häufigkeit von Rechenkontakten zu treffen, wurden bei jedem Rechensetup Relationen von Aalanzahl und Anzahl der Rechenkontakte gebildet. In der Regel waren im Schnitt ein bis drei Rechenkontakte pro Aal während eines Versuchsdurchgangs zu beobachten. Die Anzahl der Rechenkontakte sagt schlussendlich etwas über die erfolgreiche Bypasspassage aus, siehe Unterkapitel Bypasspassagen. Die Bypasspassagen häuften sich mit steigender Anzahl an Rechenkontakten. Es muss beachtet werden, dass mit steigender Versuchsdauer auch die Anzahl der Rechenkontakte stieg und nicht alle Versuche gleich lang verliefen. Im Schnitt dauerten die Versuche 30 bis 40 Minuten.

Eine Abhängigkeit der Rechenkontakthäufigkeit mit den Anströmgeschwindigkeiten war weder bei elektrifizierten, noch bei nicht elektrifizierten Rechen setups erkennbar. Der Anströmwinkel spielte nur bei elektrifizierten Schrägrechen eine Rolle: Je kleiner der Anströmwinkel, desto mehr Rechenkontakte fanden statt. Mit steigendem Anströmwinkel nahmen die Rechenkontakte ab. Dies hat mit dem gestressten Verhalten zu tun, das bei den Aale nach einem elektrischen Reiz zu beobachten war: Unkontrollierte Bewegungen ließen die Aale mehrmals mit der Barriere kollidieren, wenn diese lang war. Bei kurzen Rechen mit großen Anströmwinkeln von  $55^\circ$  konnten die Aale auch bei unkontrollierten Bewegungen eher in Richtung Oberstrom oder durch den Rechen ausweichen.

### **Lernverhalten**

Bei den durchgeführten ethohydraulischen Studien wurden die Versuchsgruppen mit einer Häufigkeit von 1- bis maximal 3-mal verwendet und dies immer bei unterschiedlichen Rechen setups mit einem Tag Pause zwischen den Einsätzen. Des Weiteren wurden die Aale am Ende einer Woche in die Freiheit entlassen und zu Beginn der Folgeweche neue Probanden verwendet. Somit wurde die Möglichkeit zur Bildung von Lerneffekten reduziert. Bei den hier durchgeführten ethohydraulischen Versuchen wurden trotz dieser genannten Vorkehrungen gewisse Lerneffekte festgestellt.

Grundsätzlich ließ sich beobachten, dass sich die Aale mit steigender Versuchsdauer (ab ca. 45 min) an die Umgebungseinflüsse angepasst hatten. Dies zeigte sich durch eine Zunahme der Aktivität und des Schwimmverhaltens (Verharren nahm ab) und einer Ausnutzung der gesamten Wassertiefe. Zu Beginn der Versuche hielten sich die Aale häufig nur im Sohlbereich auf.

Aale, welche bereits bei elektrifizierten Versuchen eingesetzt wurden und am Schrägrechen einen elektrischen Reiz erfahren hatten, zeigten anschließend bei nicht elektrifizierten Versuchen ein ähnlich gestresstes Verhalten nach einem Rechenkontakt. Die Aale hatten sich trotz Pause von mindestens einem Tag und anderem Rechen setup eingepreßt, dass durch den Schrägrechen ein für sie unangenehmer Reiz ausgeht und sie reagierten dann bei Rechenkontakt entsprechend gestresst.

Das Vorhandensein eines Lernverhaltens war auch daran erkennbar, dass Aale von einem strömungsberuhigten Bereich oberhalb des Schrägrechens aus immer wieder Erkundungen am Schrägrechen und in dessen Nahbereich vornahmen oder wieder stromauf schwammen. Die Erkundungen wurden jedes Mal leicht variiert. So sollte vermutlich der Schrägrechen und die Möglichkeit einer Abwanderung untersucht werden.

Zu beobachten war dies auch nach einer Rechenkollision samt Umkehrreaktion: Der gleiche Aal ließ sich kurze Zeit später wieder Richtung Schrägrechen verdriften, stoppte aber kurz vor einem Rechenkontakt aktiv ab, drehte um und schwamm nach Oberstrom zurück. Dies wiederholte er mehrmals und stoppte jedes Mal in einem größeren Abstand zum Rechen (Abb. 158). Die Aale kundschaften auf diese Weise den Schrägrechen, mögliche Abwanderungskorridore und die Strömungsbedingungen aus, bis sie – häufig nur durch Zufall – im Bereich des

---

Bypasses oder einer veränderten Strömungssignatur eintrafen, unter deren Bedingungen sie eine Abwanderung akzeptierten und durchführten.



Abb. 158: Umkehrbewegung vor einer Berührung mit dem Rechen eines Aals bei Versuch-Nr. V15.1.

### Ausnutzung der Wassertiefe

Der Großteil der aktiven und passiven Bewegungen im Nahfeld des Schrägrechens fand an bzw. nahe der Sohle statt (Abb. 159 rechts). Wie aber bereits bei den Lachssmolts beobachtet, nutzten auch Aale die Wassertiefe zum Schwimmen auf kompletter Höhe aus. Zu gleichem Ergebnis kamen auch *Adam et al.* (1999) und *Brown et al.* (2007) in ihren Feld- und Laborstudien. Auch Rechenkollisionen fanden in unterschiedlichen Tiefen statt. Teilweise konnte man auch Aale beobachten, die steil nach oben an die Wasseroberfläche schwammen, aus dem Wasser ragten und sich wieder zurück an die Sohle bewegten (Abb. 159 links).



Abb. 159: Aale mit Kontakten zum Rechen nahezu an der Wasseroberfläche bei Versuch-Nr. V12.1 (links), direkt vor der Plexiglas-scheibe der linken Rinnenwand während der aktiven Abwanderung Richtung Bypass im Versuch-Nr. V6.2 (Mitte) sowie während der Abwanderung in der Versuchsrinne an der Sohle bei Versuch-Nr. V10.1 (rechts).

### Nicht beobachtetes Verhalten – im Gegensatz zu Lachssmoltstudien

Folgende Verhaltensweisen wurden bei den Aalen – im Gegensatz zu den Lachssmolts – nicht beobachtet:

- Schwarmverhalten: Aale sind im Gegensatz zu Lachssmolts als Einzelgänger bekannt und lassen sich lediglich unter Stress, der durch hydraulische oder andere Gründe hervorgerufen werden kann von anderen Aalen beeinflussen. So verharrten z. B. manche Aale bei einer Kollision mit Artgenossen am Schrägrechen bzw. in den Rechenzwischenräumen. Bei der Suche nach strömungsberuhigten Zonen in Rinnenecken verweilten dort auch mehrere Aale gleichzeitig (Abb. 160).



Abb. 160: Mehrere Aale zusammen in der linken Rinnenecke zwischen Rinnenwand und Sohle im Versuch-Nr. V19.2.

- Positive Rheotaxis: Lachssmolts stellten sich vor Schrägrechen positiv rheotaktisch auf, also mit dem Schwanz Richtung Rechen/Unterstrom und kontrollierten aktiv ihre Position. Aale hingegen bewegten sich aufgrund ihrer Körperform sowohl mit dem Kopf, mit dem Schwanz oder auch angiliform voran als aktive oder passive Drift, bzw. als aktive Abwanderung. Sie konnten – unabhängig von ihrer Ausrichtung – ihre Bewegung in der Strömung aktiv kontrollieren. Ein Verharren vor dem Rechen mit Kopf Richtung Oberstrom war nicht zu beobachten, eher ein Verweilen an den Rechenstäben mit dem gesamten Körper oder eine Umkehrreaktion Richtung Oberstrom nach erfolgter Rechenkollision. Lediglich in strömungsberuhigten Zonen war während des dortigen Verweilens eine positiv rheotaktische Ausrichtung erkennbar (Abb. 146 rechts und Abb. 160).
- Gieren: Eine Schrägstellung des Körpers mit anschließender kontrollierter Drift entlang der Rechenebene Richtung Bypass ohne Berührung des Rechens zeigten die Aale bei keinem der 26 bzw. 16 Rechen-Setups unabhängig von einer Nicht-/Elektrifizierung. Dies hing mit der linienförmigen Körperform der Aale zusammen. Aale ließen sich somit an einem Schrägrechen nicht oder kaum leiten, im Gegensatz zu Lachssmolts.
- Trampolinartiges Verhalten: Wie das Gieren, so wurde auch das trampolinartige Verhalten bei Aalen nicht beobachtet. Die Gründe mögen die gleichen wie beim Gieren bzw. Nicht-Gieren sein und liegen hauptsächlich an der Körperform der Aale und an der nicht vorhandenen positiven Rheotaxis vor der Rechenebene mit anschließender Drift in Richtung Bypass.

#### 7.1.4. Empfehlungen für die Schrägrechenbemessung anhand der Laborstudien

Anhand der durchgeführten ethohydraulischen Laborstudien mit Aalen an elektrifizierten und nicht elektrifizierten Schrägrechen und der daraus gewonnenen Erkenntnisse können folgende zusammenfassende Empfehlungen für die Bemessung von Schrägrechen in Aalmanagementgewässern gemacht werden. Ein Abgleich mit den durchgeführten Feldstudien erfolgt in den nachfolgenden Kapiteln (Kap. 7.3.2).

- Ein **Verharren** an einer bestimmten, meist strömungsberuhigten Stelle verzögerte eine schnelle Abwanderung. Die Schnelligkeit war jedoch für eine erfolgreiche Abwanderung nicht allein ausschlaggebend, was die zahlreichen Umkehrreaktionen mit anschließender (zufälliger) Bypasspassage zeigten. Für die Häufigkeit des Verharrens spielte die Elektrifizierung des Schrägrechens keine Rolle. Das Verhalten war bei größeren Geschwindigkeiten (0,7 m/s und 0,8 m/s) etwas ausgeprägter; es wurden dann strömungsberuhigte Zonen aufgesucht und von dort der Schrägrechen erkundschaftet. Bei einem größeren Stababstand von 30 mm wurde weniger verharret, da dann mehr Aale eine Rechenpassage durchführten und diesen als Abwanderungskorridor akzeptierten.

- Ein **Verharren rechts am Rinnenrand vor dem Leitblech mit oder ohne Rechenkontakt** zeigte sich bei einem Anströmwinkel von 45° am seltensten, unabhängig von Stababstand, Anströmgeschwindigkeit oder Elektrifizierung.
- Weder mit elektrischem Feld noch ohne war das **Impingement** häufig beobachtbar (0,7%), auch bei höheren Geschwindigkeiten von 0,8 m/s nicht (unter Laborbedingungen bei einer Wassertemperatur von 18°C bis 20°C). Aufgrund des aktiven Verhaltens am Schrägrechen können die höheren Anströmgeschwindigkeiten auch in der Natur von Aalen akzeptiert werden. Das kurzzeitige Verweilen am Schrägrechen kam selten vor, wurde jedoch durch ein elektrisches Feld weiter reduziert. Eine schwache Elektrifizierung kann damit die Aalmortalität erheblich senken, da das Verletzungs- und Tötungsrisiko durch Rechenreinigungsarme verringert wird.
- Die **Umkehrreaktionen am Rechen mit vorangegangenen Rechenkontakten** häuften sich unabhängig von Anströmwinkel und Anströmgeschwindigkeit gleich oft. Lediglich bei der Änderung des Stababstands gab es Unterschiede in den beobachteten Häufigkeiten dieses Verhaltens dahingehend, dass das Umkehren bei einem Stababstand von 30 mm häufiger zu beobachten war, da hier die Aale seltener die Rechenebene zum Bypass hin entlang glitten. Somit sollte auf einen größeren Stababstand verzichtet werden. Eine Elektrifizierung zeigte keine Auswirkungen.
- Das **stromaufwärts gerichtete Suchverhalten** entlang der Rechenebene kam bei elektrifizierten Versuchen seltener vor, als bei nicht elektrifizierten Schrägrechen. Dies lag bei elektrifizierten Versuchen an den Meidungsreaktionen, welche die Aale an der Rechenebene zeigten. Sie nutzten ruckartig andere Wege in Richtung Oberstrom, als kontrolliert und ruhig den Schrägrechen entlang an sein oberstromiges Ende zu schwimmen.
- Bei einem **anguloformen Rechenkontakt nach einer passiven Drift** unterstützte ein schwach elektrisches Feld mit der Anode (Rechenebene) das Entlanggleiten des Aals bis zum Bypass. Eine Flucht in Richtung Oberstrom fand nicht statt, da der Reiz in diesem Versuchsaufbau erst zwischen den Stäben zu spüren war.
- Eine **Bypasspassage nach einem Rechenkontakt mit Kopf oder Schwanz** (im Zuge einer aktiven Drift oder in einer aktiven Abwanderung) wird maßgeblich durch den Zufall bestimmt. Trafen die Aale mit Schwanz voran in den Bypass, so war die Häufigkeit eines Abwanderns höher als mit dem Kopf voran.
- Das **gestresste Verhalten** war abhängig von der Anströmgeschwindigkeit und häuften sich mit deren Anstieg. Das Verhalten kann jedoch für die Abwanderung vernachlässigt werden, da es die Bypasspassage weder positiv noch negativ beeinflusste. Bei einer Elektrifizierung nahm das gestresste Verhalten in Form von ruckartigen Bewegungen zu.
- Elementar wichtig ist bei einem Schrägrechen die Schutzrate gegen **Rechenpassagen**, da das Schrägrechensystem gleichermaßen dem Fisch- wie dem Turbinenschutz dient. Eine 100%-ige Schutzrate für die getesteten Aale weist ein Schrägrechen mit einem Stababstand von 10 bis 18 mm auf. Bei einem Stababstand von 30 mm lag die Rate an Turbinenpassagen bei 15% aller Aale. Bei elektrifiziertem Schrägrechen mit 30 mm-Schrägrechen reduzierte sich die Häufigkeit der Turbinenpassagen auf nur noch 1% und besaß damit eine ausreichende Schutzwirkung und Effizienz gegenüber einer Passage.
- Für die **Bypasspassagen** spielten eher der Zufall und die Bypassausgestaltung eine Rolle als geometrische oder hydraulische Randbedingungen an der Schrägrechenebene. Ein Stababstand von 30 mm ließ kleine Nachteile erkennen, da hier einige Aale die Turbinenpassage bzw. die Rechenpassage als Abwanderungskorridor wählten. Häuften sich die Rechenkontakte, so stieg damit auch die Anzahl der Bypasspassagen.
- Bei der Häufigkeit der **Rechenkontakte** ohne Elektrifizierung spielten Anströmwinkel und Anströmgeschwindigkeit eine untergeordnete Rolle, wobei bei geringeren Geschwindigkeiten (0,4 m/s bis 0,5 m/s)

---

die Aale etwas aktiver waren und damit etwas mehr Rechenkontakte verursachten. Mit einem elektrischen Feld häuften sich die Rechenkontakte mit kleiner werdendem Anströmwinkel im Vergleich zu großen Anströmwinkeln von 55°, da die Aale durch gestresstes Verhalten und unkontrollierte Bewegungen häufiger auf einen längeren Rechen trafen. Viele Rechenkontakte sorgten entsprechend auch für viele Bypasspassagen.

- Der **Lerneffekt** hatte in den Laborstudien ebenfalls Einfluss auf eine erfolgreiche Bypasspassage. Aale erkundeten den Schrägrechen immer wieder, bis (häufig durch Zufall) der Bypass gefunden wurde. Daher ist eine entsprechende Bypassanordnung (möglichst in Fließrichtung) vorzusehen.

## Fazit

Grundsätzlich hat der Stababstand den größten Einfluss auf das Verhalten von Aalen am Schrägrechen, nachgeordnet die Anströmgeschwindigkeit und der Anströmwinkel. Eine signifikante Leitwirkung des Schrägrechens konnte bei Aalen nicht beobachtet werden, nur wenige Aale glitten an dessen Rechenebene entlang Richtung Bypass. Der Lerneffekt darf bei Aalen nicht unterschätzt werden und trug in den Laborstudien zu einer – wenn auch verzögerten – Abwanderung bei.

Eine Elektrifizierung hatte erheblichen Einfluss auf die Erhöhung der Schutzrate und die Effizienz von Schrägrechen bei größeren Stababständen. Aale verhielten sich nach einer Reizwahrnehmung zwar gestresst, wanderten aber nicht weniger häufig ab als ohne Elektrifizierung.

Es wurde im Rahmen der ethohydraulischen Studien an Schrägrechen weniger Rechenpassagen bei einem Stababstand von 18 mm beobachtet als bei den ethohydraulischen Versuchen von *Adam et al.* (1999) an konventionellen Rechen und Flachrechen, bei ansonsten ähnlichen Randbedingungen (beide Untersuchungskampagnen in der gleichen Versuchsrinne der TU Darmstadt). Daher unterscheidet sich das Verhalten von Aalen an Schrägrechen von dem an konventionellen Rechen und Flachrechen. Bisherige Erkenntnisse von konventionellen Rechen und Flachrechen dürfen daher nicht ohne Weiteres auf Schrägrechen adaptiert werden.

Bemessungswerte für die Planung von Schrägrechen werden nach den Anforderungen von Aalen in der vorliegenden Arbeit nach einer Ergebnissynthese der Laborversuche mit den Feldstudien in Kapitel 7.5 gegeben.

## 7.2. Feldversuche mit Aalen am Wasserkraftwerk Ottenau (Schrägrechen)

Zur Verifizierung der ethohydraulischen Laborstudien und zur Prüfung der Übertragbarkeit der Ergebnisse auf Schrägrechen unter Naturbedingungen wurden mit Aalen Feldversuche mittels Telemetrie am nicht elektrifizierten Schrägrechen in Ottenau durchgeführt. Es wurden die von den Aalen genutzten Abwanderungskorridore dokumentiert sowie das Verhalten am Schrägrechen untersucht.

### 7.2.1. Versuchsaufbau und -durchführung

Wie bereits erläutert (Kap. 4.2.1, Abb. 64), handelt es sich bei der Wasserkraftanlage Ottenau um ein Ausleitungskraftwerk mit Schrägrechen im Einlaufkanal. Der Aufbau und die Platzierung der einzelnen Antennen vor dem Schrägrechen, im Kraftwerkskanal nach dem Schrägrechen, in der Fischabstiegsanlage sowie in der Ausleitungsstrecke wurden analog den Lachssmoltstudien im Frühjahr 2016 durchgeführt (Kap. 6.2.1).

Aale wandern größtenteils mit dem Einsetzen eines Abflussanstiegs, dem sogenannten Peak, ab (*Weibel* mündlich, 2017). Daher wurde der Pegel Rotenfels an der Murg auf der Website der HVZ (Hochwasservorhersagezentrale Baden-Württemberg bei der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz) regelmäßig beobachtet. Mit der Vorhersage eines Peaks für den 09./10.11.2016 wurde der Beginn der Untersuchungskampagne auf den 09.11.2016 festgesetzt. Regelmäßige Ergebniskontrollen fanden meist nach weiteren Abflusspeaks statt. Ein Peak von 50 m<sup>3</sup>/s am 11.11.2016 und ein Peak von 40 m<sup>3</sup>/s am 17.11.2016 veranlasste bereits zu Beginn der Kampagne mehrere Aale abzuwandern und damit an den Versuchen teilzunehmen (Abb. 161).

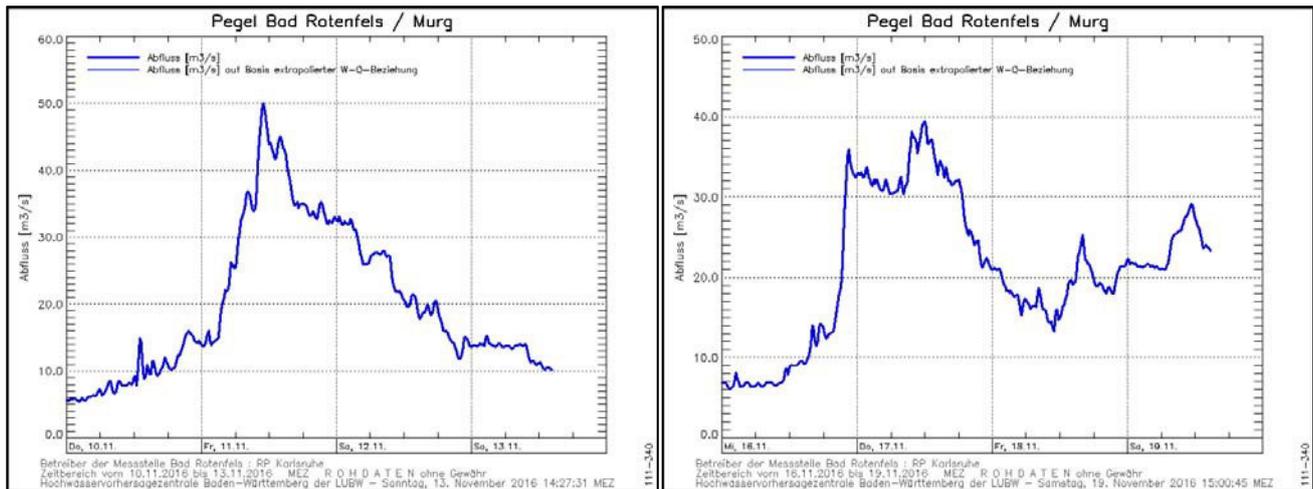


Abb. 161: Abflüsse am Pegel Rotenfels an der Murg mit Abflusspeaks am 11. und 17.11.2016 (Quelle: LUBW, Hochwasservorhersagezentrale Baden-Württemberg, abgerufen am 13. und 19.11.2016).

Der Herbst 2016 sowie der Winter 2016/2017 waren aufgrund fehlender bzw. extrem geringer Niederschläge sehr trocken. Die Murg hatte zeitweise einen Abfluss von nur 3 bis 8 m<sup>3</sup>/s. Zum Vergleich: Der mittlere Abfluss beträgt am Standort Ottenau 16,1 m<sup>3</sup>/s, der mittlere Niedrigabfluss (MNQ) 3,43 m<sup>3</sup>/s. Deshalb verzögerten sich die abflussinitiierten Aalabwanderungen und viele Tiere verharrten oberhalb des Schrägrechens von Ottenau. Die EnBW AG erhöhte daher für die Aalversuche den Abfluss in der Murg vom 16.12.2016 bis 18.12.2016 von 6 m<sup>3</sup>/s über mehrere Stunden schrittweise auf 9 m<sup>3</sup>/s mittels erhöhter Wasserabgabe aus der Schwarzenbachtalsperre und dem anschließenden Niederdruckwerk in Forbach. Dies sollte eine Signalwirkung für eine weitere Aalabwanderung sein. Trotz Abflusserhöhung wanderten dennoch keine weiteren Aale in diesem Zeitraum ab, die 9 m<sup>3</sup>/s schienen noch immer als Auslöser einer abflussinitiierten Abwanderung zu gering zu sein. Eine höhere Abgabe aus der Schwarzenbachtalsperre war jedoch aus EnBW-internen Gründen nicht möglich. Die ersten größeren Abflüsse wurden zum Zeitpunkt des Versuchsstarts verzeichnet, worauf sich der Großteil der insgesamt abgewanderten Aale bereits in den ersten 9 Tagen in Bewegung setzte. Anschließend gab es bis Februar 2017 so gut wie keine nennenswerten Niederschläge mehr. Erst im Februar und März 2017 wurden aufgrund längerer und ergiebiger Niederschläge und der parallel einsetzenden Schneeschmelze erhöhte Abflüsse verzeichnet.

Die verwendeten Aale stammten alle aus einer Schokker-Befischung am Main. Es handelte sich daher um wanderwillige Aale, die während ihres Abwanderungsweges gefangen wurden. Die Transponder der Aale waren im Vergleich zu den Smolttranspondern etwas größer. Das ermöglichte eine längere Batterielebensdauer, was für eine lang ausgedehnte Versuchskampagne vorteilhaft erschien. Die Sender wurden in die Bauchhöhle der Aale implantiert, so dass die Antennen aus dem Tieren herauschauten.

Wie bei den Lachssmoltversuchen wurden alle 124 Versuchsaale gewogen, gemessen, einer Code- und Fischnummer zugeordnet und deren Einsetzdatum und -uhrzeit festgehalten. Die Blankaale hatten eine durchschnittliche Länge von 71 cm (kleinster Aal 53 cm, größter Aal 103 cm) und ein durchschnittliches Gewicht von 783 Gramm. Eine Liste mit den exakten Werten aller Blankaale ist im Anhang 8 aufgeführt. Die Aale wurden in fünf Tranchen zwischen dem 09.11.2016 und 17.11.2016 in die Murg gesetzt und umfassten jeweils zwischen 5 und 40 Aale.

Nachdem Anfang März 2017 bei einem Hochwasserereignis mit einem Abfluss von 265 m<sup>3</sup>/s keine weiteren Aale mehr abgewandert waren, wurde der Versuch am 04.03.2017 für beendet erklärt. Bis dahin waren jedoch laut Erfassungsdaten noch nicht alle Aale abgewandert. Vermutlich waren zu diesem Zeitpunkt bereits alle Batterien leer.

Im Abwanderungszeitraum vom 09.11.2016 bis 04.03.2017 betrug die Kraftwerksleistung zwischen 4 kW am 25.12.2016 bei sehr geringem Niedrigwasserabfluss und 322 kW am Ende der Versuchszeit Anfang März 2017 (Abb. 129) während eines kleineren Hochwassers. Aufgrund technischer Probleme war eine Volllastnutzung des Kraftwerks im Versuchszeitraum leider nicht möglich. Daher korrelierte die Kraftwerksleistung nicht immer mit den Abflüssen in der Murg. Gründe hierfür sind andere Einflussfaktoren wie hohe Verlandung und technische

Probleme. Weitere Schwierigkeiten während der Aalversuche in Ottenau werden in Anhang 9 erläutert. Die durchschnittliche Kraftwerksleistung betrug im Versuchszeitraum 145 kW.

Die unten dargestellten Kraftwerksleistungen im Versuchszeitraum entsprachen einer Anströmgeschwindigkeit vor dem Schrägrechen von 0,10 m/s bis maximal 0,47 m/s während den Abflusspeaks, z. B. am 11.11.2016 und 17.11.2017. Die Ergebnisse sind daher mit den Laborerkenntnissen der Anströmgeschwindigkeiten von 0,4 m/s und 0,5 m/s zu vergleichen, um eine situative Ähnlichkeit herzustellen.

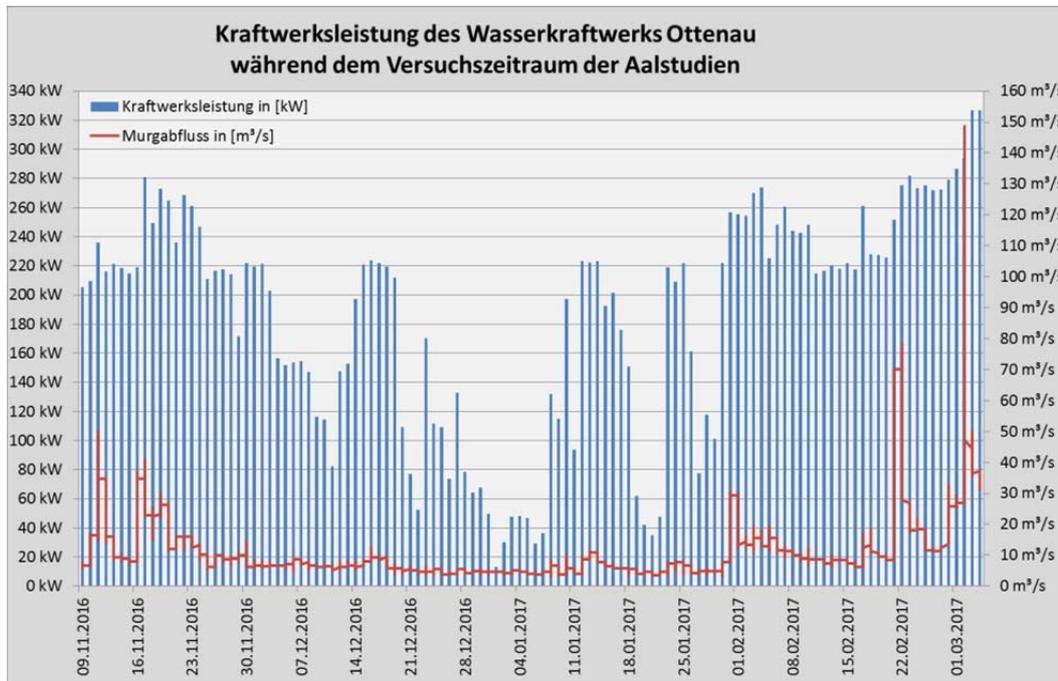


Abb. 162: Kraftwerksleistung im Versuchszeitraum vom 09.11.2016 bis 05.03.2017 mit schwankenden Abflüssen und einer Maximalleistung von knapp 330 kW am Wasserkraftwerk Ottenau.

Trotz der eingestellten über den Fließquerschnitt gemittelten Anströmgeschwindigkeit von 0,5 m/s ergaben sich am Schrägrechen Ottenau auch Bereiche mit höheren Geschwindigkeiten von über 1,0 m/s, was die Strömungssignatur (Abb. 163) belegt. Daher müssen sich die Aale nicht nur der gemittelten Anströmgeschwindigkeit am Schrägrechen aussetzen, sondern Bereiche verschiedener und damit auch höherer Anströmgeschwindigkeit.

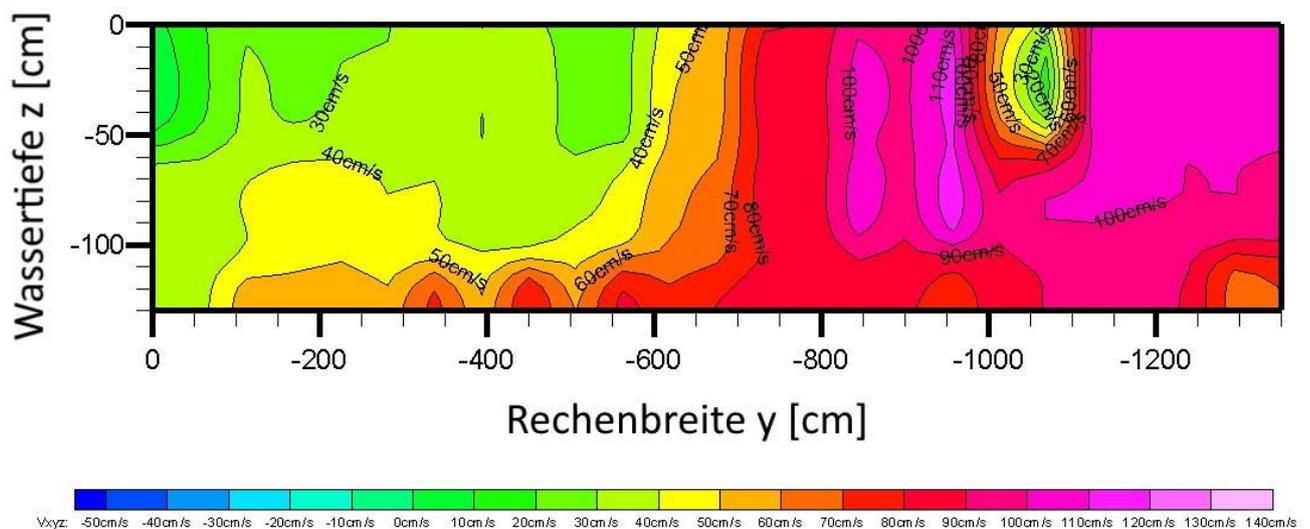


Abb. 163: Strömungssignatur am Schrägrechen Ottenau bei einer gemittelten Anströmgeschwindigkeit von 0,5 m/s. Vor allem rechts lagen Bereiche mit über 1,0 m/s (Quelle: verändert nach Schwab, 2016).

## 7.2.2. Befunde der Feldversuche mit Aalen

Wie bereits bei den Lachssmoltsstudien wurden auch bei den Aalen die genutzten Abwanderungskorridore identifiziert und ausgewertet, um Aufschluss über die Auffindbarkeit und Passierbarkeit dieser Korridore zu erhalten. Ebenfalls wurde das Verhalten am Schrägrechen näher untersucht, um Aussagen über die Leitwirkung und Schutzwirkung des Schrägrechens zu bekommen sowie über das Verhalten der Aale am Schrägrechen.

### Abwanderungskorridore

Bis zum 04.03.2017 waren von den 124 besenderten Aalen 68 Versuchstiere in Ottenau abgewandert. Von 5 weiteren Aalen wurden Detektionen am Schrägrechen aufgenommen, ihr Verbleib ist jedoch unbekannt. Sie könnten in Richtung Oberstrom geschwommen und erst nach Ende der Batterielebensdauer abgewandert sein. Von 51 Aalen (41%) wurden keine Signale empfangen.

Betrachtet man die Häufigkeit der genutzten Abwanderungskorridore, so ist auffällig, dass keiner der 73 besenderten und detektierten Blankaale den 18mm-Schrägrechen in Ottenau passierte. Dies entspricht einer 100%igen Schutzrate bei den hier getesteten Aalen mit einer durchschnittlichen Länge von 71 cm (Abb. 164). Diese hohe Schutzrate bzw. Effizienz bedeutet, dass ein 18mm-Schrägrechen mit einem Anströmwinkel von  $44^\circ$  für Blankaale – unter einer über den Fließquerschnitt gemittelten Anströmgeschwindigkeit von bis zu 0,5 m/s – als ausreichend erscheint und deshalb keine kleineren Stababstände und keine kleineren Anströmwinkel erforderlich sind.

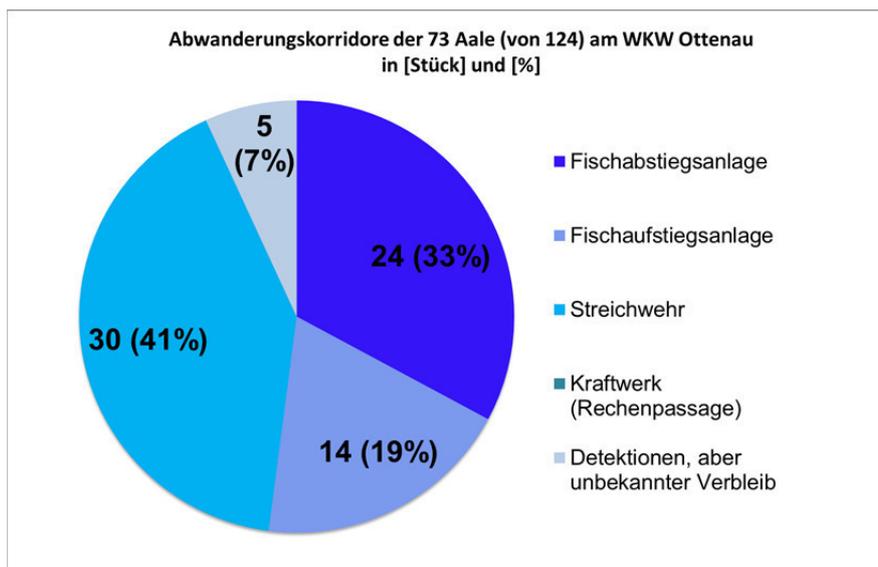


Abb. 164: Abwanderungskorridore der besenderten Aale während der Versuchsdurchführung in Ottenau vom 09.11.2016 bis 04.03.2017.

Bei der Anlage Rothenburg an der Saale, die ebenfalls mit einem Schrägrechen ausgestattet ist, wurde anhand einer Effizienzkontrolle eine Rechenpassagenquote von 16,7% bei Aalen festgestellt (Ebel *et al.*, 2015). Der Stababstand liegt dort bei 20 mm, der Anströmwinkel bei  $38^\circ$ , der maximale Ausbaudurchfluss bei  $68 \text{ m}^3/\text{s}$ , also erheblich höher als in Ottenau mit  $14,56 \text{ m}^3/\text{s}$ . Die Rechenpassagenquote liegt höher als die in Ottenau. Dies kann durch höhere Anströmgeschwindigkeiten verursacht worden sein, durch eine zu geringe Dotierung des Bypasses oder lag an kleinen Probanden, welche aufgrund Ihrer Körpergröße physikalisch durch einen 20 mm Stababstand passten.

Mit insgesamt 38 Tieren (52%) ist die Mehrzahl der Aale in Ottenau über die Abwanderungskorridore der Fischaufstiegs- und Fischabstiegsanlage abgewandert, wie bereits bei den Versuchsreihen mit den Lachsen im Mai 2016 (Kap. 6.2). Außerdem wurde die Fischabstiegsanlage von den Aalen – wie auch von den Lachssmolts – häufiger als die Fischaufstiegsanlage passiert. Die Fischaufstiegsanlage wurde bei den Aalen in Relation zur Gesamtaalanzahl häufiger als Abwanderungsweg genutzt, als bei den Lachssmolts. Ursache hierfür könnte sein, dass sich die Lachssmolts durch den Schrägrechen leiten ließen und an dessen Rechenebene bis zum Bypass

verdrifteten. Zum anderen könnte eine sohnnahe Orientierung der Aale ein Grund für die etwas geringere Annahme der Fischabstiegsanlage sein, die über einen oberflächennahen Abfluss dotiert wurde und keine sohnnahe Öffnung oder Rohrlösung besitzt.

Als Abwanderungskorridor wurde das Streichwehr von 41% aller abgewanderten Aale angenommen. Zu Beginn der Versuche im November 2016 lagen hohe Abflüsse in der Murg vor, so dass innerhalb der ersten 9 Tage bereits 54 der 68 Aale in Ottenau abwanderten. Die restlichen 14 Aale traten vorwiegend erst Anfang Februar 2017 die Abwanderung an. Aufgrund der niedrigen Lufttemperaturen und des regelmäßigen Schneefalls im Schwarzwald betrug die Wassertemperatur der Murg Anfang Februar nur noch 5,5°C bis 6,5°C, was für die Aale ungünstige Bedingungen darstellte (Weibel et al., 2017).

Die beobachteten Abwanderungszeiten während Abflussspeaks waren Beleg dafür, dass die Aale so lange verharrten bis die Abflüsse für ihre Abwanderung entsprechend hoch bzw. ausreichend für eine Abwanderung waren. Eine Abflusserhöhung signalisiert den Aalen den Beginn der Abwanderungsphase. Mit den höheren Abflüssen waren auch Abwanderungskorridore wie Streichwehre für Aale auffindbar und passierbar, welche sich erst bei erhöhten Abflüssen für eine Abwanderung eigneten. Dies widerspricht der qualitativen Aussage von *Hydro-Energie Roth GmbH*, welche 2014 eine Bestandsaufnahme der Durchgängigkeit an der Murg, u.a. in Ottenau, durchführten und das Streichwehr aufgrund verschiedener Gründe für einen Abwanderungskorridor als ungeeignet ansahen (*Hydro-Energie Roth*, 2014). Niedrige Wassertemperaturen hemmten trotz Abflusspeak im Februar 2017 eine Abwanderung von weiteren Aalen.

### Abwanderungsverhalten

Wie bereits bei den Lachssmoltstudien lieferten auch bei den Aalstudien die Empfänger Daten zum Verhalten der Aale vor dem Schrägrechen, in den Abstiegskorridoren von Fischabstiegsanlage und Fischaufstiegsanlage, unterhalb des Streichwehrs in der Ausleitungsstrecke sowie im Kraftwerkskanal. Von den 68 abgewanderten Aalen lagen für 43 Aale ausreichend Detektionsdaten, um sinnvolle Auswertungen durchzuführen, vor.

Der Aufbau der Diagramme wurde bereits erläutert (Kap. 6.2.2). Auch bei den Daten der Aalversuche waren nicht zu jeder Minute Detektionen vorhanden, teilweise fehlten einige Minuten pro Stunde an Aufzeichnungen. Der Antennenaufbau und deren Nummerierung waren die gleichen wie bei den Lachssmoltstudien (Abb. 165). Wanderten Aale über den Bypass ab, so zeigte Antenne 4 einen kurzzeitigen Peak an. Wurde die Fischaufstiegsanlage als Abwanderungskorridor benutzt, so zeigte sich dieser Peak nicht.



Abb. 165: Antennenbereiche am Schrägrechen (Quelle: verändert nach Wüst auf Basis von Google.maps, 2016).

Aus den Daten der 43 Aale wurden vier unterschiedliche Verhaltensmuster im Nahbereich des Schrägrechens und in der Aalabwanderung festgestellt, nach denen die Auswertungen und Diagramme aufgeteilt wurden:

- Aalabwanderung über Fischaufstiegs-/abstiegsanlage schnell: Abwanderung innerhalb von 20 Minuten nach Ankunft am Schrägrechen (51% aller Aale)
- Aalabwanderung über Fischaufstiegs-/abstiegsanlage langsam: Abwanderung dauerte mehr als 20 Minuten nach Ankunft am Schrägrechen, teilweise mit Suchbewegungen vor dem Schrägrechen (23% aller Aale)

- Aalabwanderung am Wehr mit Schrägrechenkontakt: Aaldetektionen wurden am Schrägrechen wahrgenommen, die Abwanderung fand aber am Streichwehr statt (14% aller Aale)
- Aalabwanderung am Wehr ohne Schrägrechenkontakt: Eine direkte Abwanderung über das Streichwehr ohne Detektionen am Schrägrechen (12% aller Aale)

Eine Abwanderung durch die Fischaufstiegsanlage oder Fischabstiegsanlage innerhalb von 20 Minuten nach einem Auftreffen auf den Schrägrechen führten von den 43 Aalen mit ausreichender Datenmenge insgesamt 22 Aale durch (51%). Weitere 23% wanderten ebenfalls an Fischaufstiegs- oder Fischabstiegsanlage ab, benötigten dafür aber mehr als 20 Minuten. Damit liegt eine Quote von 74% aller Aale vor, welche die Fischaufstiegsanlage oder die Fischabstiegsanlage aufgefunden und passiert haben. Damit wird eine grundsätzliche Akzeptanz dieser Anlagen aufgezeigt.

Weiterhin wurde festgestellt, dass sämtliche Abwanderungen in den Dämmerungsstunden oder nachts vollzogen wurden, nicht tagsüber bei Helligkeit (Anlage 10). Diese Beobachtungen deuten auf eine Abhängigkeit der Aalabwanderungen von den Lichtverhältnissen hin.

#### Gruppe Aalabwanderung über Fischaufstiegs-/abstiegsanlage schnell:

Die nachfolgend dargestellte schnelle Abwanderung führte z. B. Aal Nr. 12 (Code 80) aus, welcher am 09.11.2016 um 16:15 Uhr in die Murg gesetzt wurde (Abb. 166). Nur wenige Stunden später am 10.11.2016 um 3:58 Uhr nachts detektierten die ersten Empfänger am Schrägrechen diesen Aal. Innerhalb von drei Minuten wanderte er alle Antennenbereiche vor dem Rechen ab und übte somit ein Suchverhalten aus, bis er um 4:01 Uhr den Bypass passierte. Nach weiteren 30 Sekunden wurden bereits die ersten Signale in der Ausleitungsstrecke detektiert. Dieser Aal führte vor einer Abwanderung ein Sondierverhalten am Schrägrechen aus, näherte sich bzw. vergrößerte den Abstand zum Schrägrechen wieder, bis er den Bypass auffand und ihn zur Abwanderung nutzte.

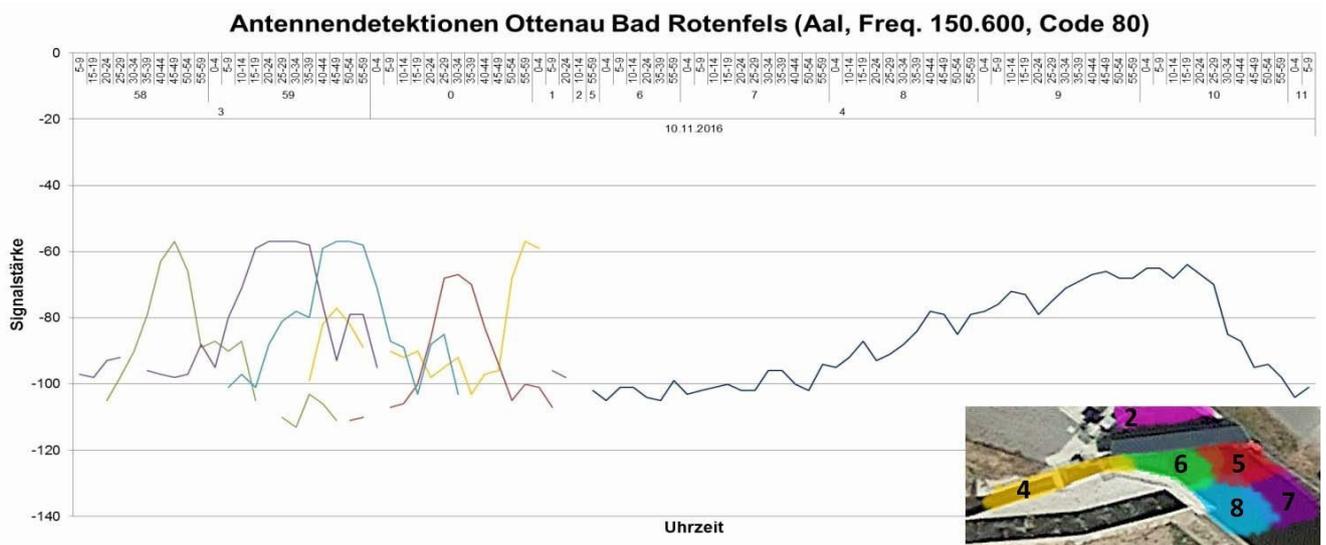


Abb. 166: Signalstärken, welche das Verhalten des Aals mit Code-Nr. 80 am 10.11.2016 zwischen 3:50 und 4:11 Uhr vor dem Schrägrechen Ottenau wiedergeben.

Ein weiteres typisches schnelles Abwanderungsverhalten zeigte Aal Nr. 18 (Code 82), welcher ebenfalls am 09.11.2016 in die Murg gesetzt wurde (Abb. 167). Er erschien gegen 0:45 Uhr am Schrägrechen und führte innerhalb der nächsten 3 Minuten Suchbewegungen zwischen den Antennen 5-8 durch, bevor er um 0:48 Uhr die Antenne 4 im Bypass erreichte. Er verblieb dort weitere 4 Minuten, bevor er über den Bypass abwanderte. Bereits ca. 1-2 Minuten später detektierte ihn Antenne 1 in der Murg.

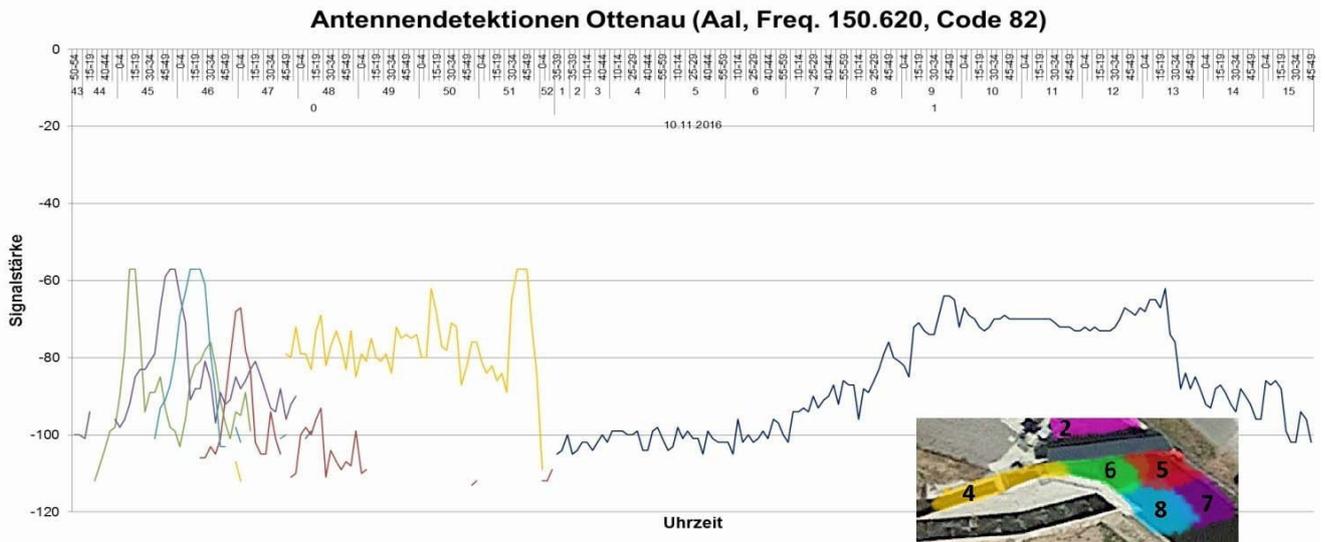


Abb. 167: Signalstärken, welche das Verhalten des Aals mit Code-Nr. 82 am 10.11.2016 zwischen 0:43 und 1:15 Uhr vor dem Schrägrechen Ottenau wiedergeben.

Gruppe Aalabwanderung über Fischaufstiegs-/Fischabstiegsanlage langsam:

Es wurden auch Aale beobachtet, die länger für eine Abwanderung durch die Fischaufstiegsanlage oder die Fischabstiegsanlage benötigten als die vorherige Gruppe. Es wurde daher eine Gruppe gebildet, welche länger als 20 Minuten für eine Abwanderung benötigte. 10 von 43 Aalen (23%) mit ausreichender Datenmenge benötigten länger als 20 Minuten. Es wanderten somit mehr als doppelt so viele Aale schneller als 20 Minuten ab als Aale mit einer Abwanderungszeit von mehr als 20 Minuten.

Ein Aal mit einer längeren Verweilzeit vor dem Schrägrechen ist Nr. 52 (Code 140), der am 15.11.2016 um 16:05 Uhr in die Murg gesetzt wurde. Auch er fand sich bereits wenige Stunden nach dem Einsetzen vor dem Rechen wieder – auch wiederum nachts. Er verweilte ab 4:17 Uhr bis 4:50 Uhr vorwiegend bei, bzw. sehr nah an Antenne 7 an der rechten Uferwand. Ab 4:50 Uhr wurden die Signale der Antenne 7 schwächer und es wurden kurz Detektionen der Antenne 4 vor dem Bypass aufgezeichnet. Anschließend wurde er kurz vor 5 Uhr nur noch in der Ausleitungsstrecke detektiert – er war über die Fischaufstiegsanlage abgewandert. Er fand den Abwanderungskorridor der Fischaufstiegsanlage relativ zielstrebig, obwohl er ca. 30 Minuten lang auf der rechten Einlaufseite verharrete, ohne größere Sondierbewegungen durchzuführen. Die gemittelte Anströmgeschwindigkeit von 0,4 m/s bis 0,5 m/s (max. über 1,0 m/s bei Antenne 5, Abb. 163) ließ dem Aal noch eine ausreichende Manövrierfähigkeit zu.

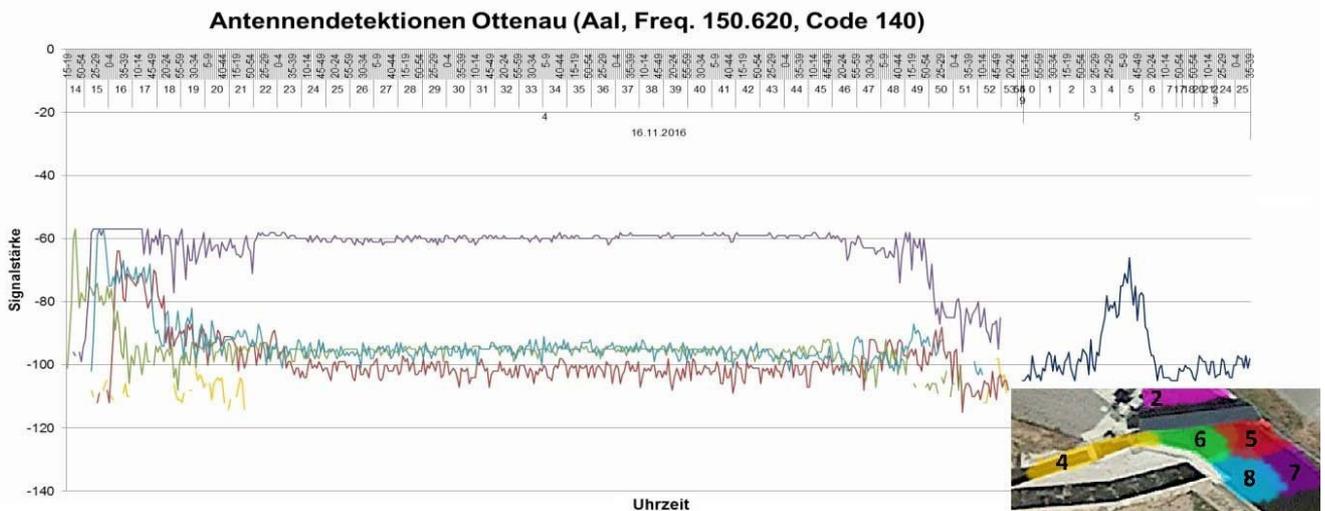


Abb. 168: Signalstärken, welche das Verhalten des Aals mit Code-Nr. 140 am 16.11.2016 zwischen 4:14 und 5:25 Uhr vor dem Schrägrechen Ottenau wiedergeben.

Aal Nr. 118 (Code 88), der mit der letzten Tranche am 17.11.2016 um 15:05 Uhr in die Murg gesetzt wurde, wanderte über die Fischabstiegsanlage ab (Abb. 169). Etwa 24 Stunden später verzeichneten die Antennen 5, 6 und 8 direkt vor dem Rechen starke Signale, wobei er sich 7 Minuten relativ statisch zwischen Antenne 5 und 8 aufhielt. Anschließend wurden die Signale der Antennen schwächer, bevor Antenne 7 um 16:17 Uhr wieder gleichbleibende Signale empfing. Der Aal verhartete also etwas entfernt von der Antenne, womöglich an der rechten Uferwand; aufgrund fehlender Signale von Antenne 5 jedoch nicht direkt an der Rechenebene. Gegen 16:45 Uhr wurden die Signale der Antennen vor dem Rechen wieder stärker, bevor er mit dem Peak der Antenne 4 um 16:51 Uhr über den Bypass abwanderte. Dies zeigt auf, dass erfolgreiche Abwanderungen von Aalen auch nach einer längeren Zeit des Verharrens, evtl. in strömungsberuhigten Zonen, erfolgen können.

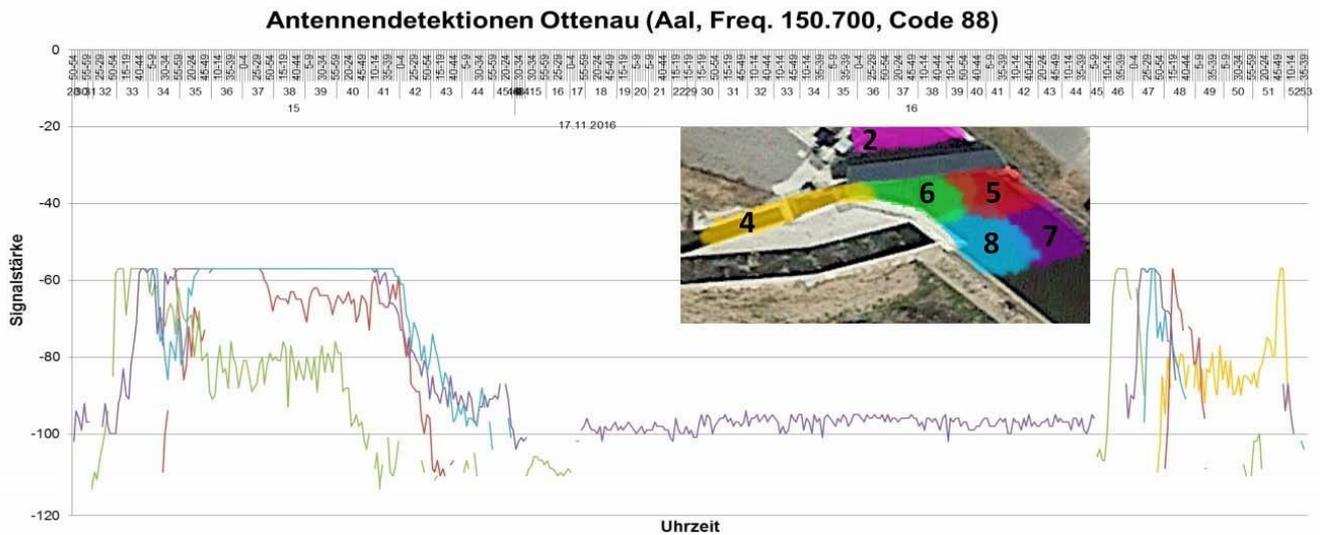


Abb. 169: Signalstärken, welche das Verhalten des Aals mit Code-Nr. 88 am 17.11.2016 zwischen 15:28 und 16:53 Uhr vor dem Schräg-rechen Ottenau wiedergeben.

#### Gruppe Aalabwanderung am Wehr mit Schrägreckenkontakt:

Im Rahmen der Aalabwanderung gab es auch einige wenige Aale, welche zunächst vor den Schrägrecken schwammen, dann jedoch umdrehten und über das Streichwehr abwanderten. Diese Art der Abwanderung führten 6 von den 43 Aalen (14%) durch. Dies waren deutlich weniger Aale als die der Gruppe, welche vor einen Schrägrecken schwammen und dort dann über Fischaufstiegsanlage oder Fischabstiegsanlage abwanderten.

Dieses Verhalten zeigte z. B. Aal Nr. 2 (Code 2), welcher mit der ersten Tranche am 09.11.2016 um 16:15 Uhr in die Murg gesetzt wurde (Abb. 170). Die Empfänger am Schrägreden nahmen seine Signale ab dem 17.11.2016 gegen 3 Uhr nachts auf, es dauerte also mehrere Tage, bis er zum Schrägreden hin abwanderte. Es wurden über 2-3 Stunden hauptsächlich Signale der vom Schrägreden entfernten Antennen 7 und 8 aufgenommen, bevor diese wieder schwächer wurden. Der Aal verhartete in einem Abstand zum Rechen und zur Antenne 7, evtl. an der rechten Uferwand in einem strömungsberuhigten Bereich. Erst am 22.11.2016 wurden Signale in der Ausleitungsstrecke verzeichnet, der Aal ist über das Streichwehr abgewandert. Dieses Beispiel zeigt, dass nicht alle Aale vor dem Schrägreden die angebotenen Abwanderungskorridore auffanden und/oder für die Abwanderung akzeptierten. Aale konnten über Tage in für sie angenehmen Bereichen verharren, bevor sie womöglich einen anderen Abwanderungskorridor fanden und annahmen. Im entsprechenden Zeitraum kam es zu einem Streichwehrüberfall, den der Aal zur Abwanderung nutzte.

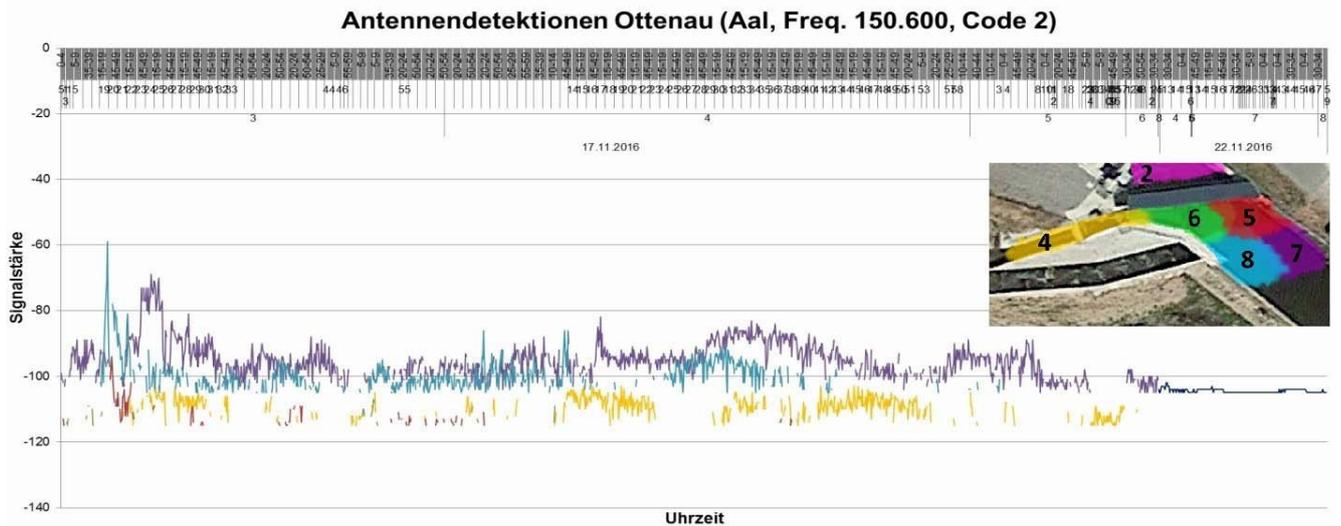


Abb. 170: Signalstärken, welche das Verhalten des Aals mit Code-Nr. 2 am 17.11.2016 zwischen 3 Uhr und 8 Uhr vor dem Schrägrechen und in der Ausleitungsstrecke Ottenau wiedergeben.

Gruppe Aalabwanderung am Wehr ohne Schrägrechenkontakt:

Diese Gruppe Aale (12% der Aale mit ausreichender Datenmenge) bestand aus wenigen Individuen, welche ohne Annäherung an den Schrägrechen eine Abwanderung über das Streichwehr favorisierten.

Aal Nr. 47 (Code 53) wurde am 15.11.2016 um 16:05 Uhr in die Murg gesetzt (Abb. 171). Bei der Narkotisierung bzw. der anschließenden Senderimplantation fiel auf, dass er – vermutlich durch eine vorhergehende Turbinenpassage – deutliche Schäden am Rückgrat aufwies. Dennoch machte er einen schwimmfähigen Eindruck, so dass er für den Versuch besendert wurde.

Die Signale des Aals wurden lediglich von Antenne 7 detektiert, welche sich entfernt vom Schrägrechen und von der rechten Uferwand befand. Er verharrte dort ohne große Such- oder Schwimmbewegungen über fast 2 Stunden, bevor seine Signale um kurz nach 4 Uhr in der Ausleitungsstrecke detektiert wurden.

Diese Abwanderung fand ebenfalls während einer Phase des Streichwehrüberfalls statt, so dass dieser Abwanderungskorridor attraktiv genug für die Aale war und diese keinen alternativen Bypass suchen mussten.

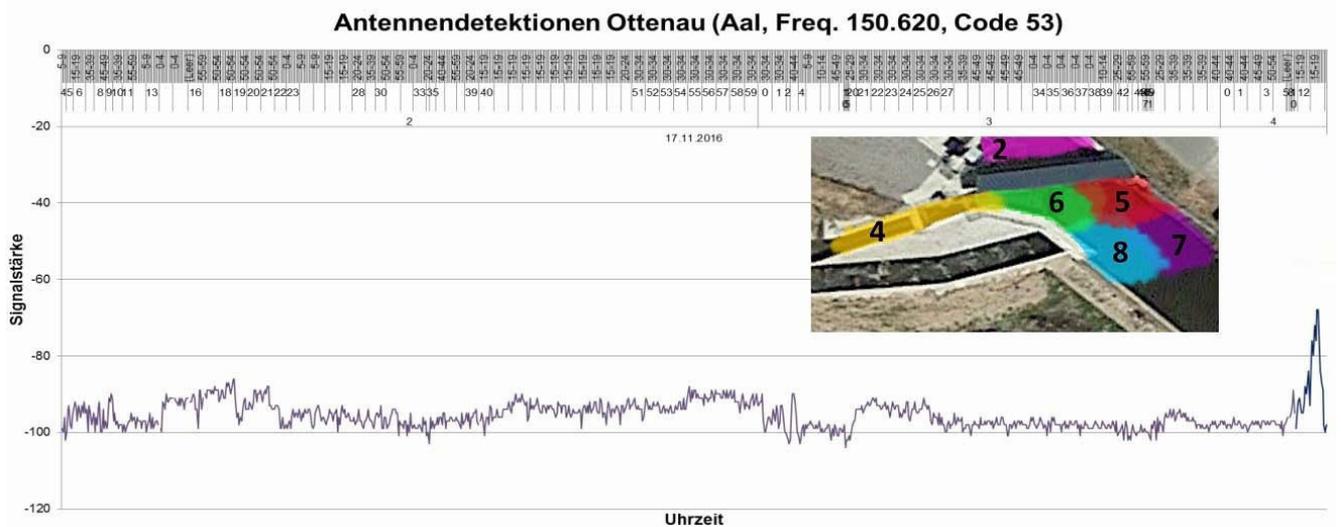


Abb. 171: Signalstärken, welche das Verhalten des Aals mit Code-Nr. 53 am 17.11.2016 zwischen 2:04 Uhr und 4:15 Uhr vor dem Schrägrechen und in der Ausleitungsstrecke Ottenau wiedergeben.

Sämtliche hier nicht dargestellten Schaubilder der Verhaltensweisen und Abwanderungskorridore aller Aal-Gruppen sind im Anhang 10 aufgeführt.

---

### 7.2.3. Empfehlungen für die Schrägrechenbemessung anhand der Freilandstudien

Die nachfolgend aufgeführten Ergebnisse und daraus resultierenden Empfehlungen für die Bemessung eines Schrägrechens wurden auf Basis der telemetrischen Feldversuche und unter Berücksichtigung der Randbedingungen im Versuchszeitraum mit einer über den Fließquerschnitt gemittelten Anströmgeschwindigkeit von maximal 0,5 m/s (und Bereichen mit Anströmgeschwindigkeiten über 1,0 m/s) erstellt:

- Die Schutzrate des 18mm-Schrägrechens mit Rechteckprofil in Ottenau betrug 100%: Kein besonderer Aal passierte den Rechen. Ein **Stababstand** von 18 mm oder kleiner ist daher bei einem Schrägrechen für Aalmanagementgewässer ausreichend.
- Die Auswertungen zeigten, dass die **mittlere Anströmgeschwindigkeit** von 0,4 – 0,5 m/s noch eine ausreichende Manövrierfähigkeit der Aale zuließ sowie zu teilweise ausgedehnten Suchbewegungen im Nahbereich des Schrägrechens führte. Die eingestellten Anströmgeschwindigkeiten stellen immer nur den Mittelwert über die gesamte Rechenebene dar und weisen damit sowohl Bereiche mit geringerer Anströmgeschwindigkeit als auch Bereiche mit höherer Anströmgeschwindigkeit (über 1,0 m/s) auf. Dies lässt den Schluss zu, dass auch höhere Anströmgeschwindigkeiten bis 1,0 m/s ein sicheres Manövrieren vor dem Schrägrechen erlauben, solange genügend strömungsberuhigte Zonen für ein Verharren angeboten werden.
- Der **Anströmwinkel** von 44° wurde aufgrund der guten und schnellen Abwanderungsergebnisse an der Fischaufstiegsanlage und der Fischabstiegsanlage als geeignet angesehen.
- In den meisten Fällen wanderten die Aale nach Auftreffen auf den Schrägrechen innerhalb weniger Minuten ab. Aber auch längere Zeiten des **Verharrens** am Schrägrechen führten zu erfolgreichen Abwanderungen.
- Der oberflächennahe **Bypass** wurde aufgefunden und passiert, obwohl sich Aale eher am Boden orientieren. Führt eine Strömung bzw. eine Geschwindigkeitszunahme zu einer oberflächennahen Öffnung, wurden die Aale von dieser zur Öffnung geleitet.
- Auch bei Aalen unterstützte eine optimal angeordnete **Fischaufstiegsanlage** die Abwanderung. Wie bei den Lachsgewässern sollte auch in Aalmanagementgewässern auf eine entsprechende Anordnung der Fischaufstiegsanlage geachtet werden, sofern es die Örtlichkeit zulässt. Gerade bei Aalen haben Alternativmöglichkeiten in der Abwanderung eine große Bedeutung, da das Auffinden eines Bypasses häufig vom Zufall abhängt.
- Ein **Streichwehr** kann an Überfalltagen trotz geringer Überfallhöhe als Aalabstiegskorridor geeignet sein. Da Aale größtenteils mit ansteigendem Abfluss, was zu einem Überfall an den Streichwehres führt, abwandern, ist diese Abwanderungsmöglichkeit von Bedeutung.

### 7.3. Ergebnissynthese aus Labor- und Feldversuchen

Nicht alle Randbedingungen der Aalversuche im Labor und in der Murg waren exakt gleich und müssen somit bei einem Vergleich der Labor- und der Feldstudien sowie bei einer möglichen Übertragbarkeit von Ergebnissen berücksichtigt werden.

#### 7.3.1. Unterschiede der Versuchsaufbauten

Unterschiede zwischen den Versuchsaufbauten der Labor- und Freilandstudien mit Aalen gegenüber denen der Lachssmoltstudien sind gleich. Dazu gehören die Verlandungsproblematik, Wasserqualität, Prädatoren, Strömungssignaturen, usw. (Kap. 6.3.1). Sie sollen hier jedoch nicht nochmals aufgeführt werden. Bei den Aalversuchen bestand zusätzlich folgender Unterschied zwischen Labor- und Feldstudien:

- Die Feldstudien erfolgten während einer langen Versuchsdauer von knapp vier Monaten. In dieser Zeit konnten sich die Tiere eingehend mit ihrer Umgebung beschäftigen, diese akzeptieren oder Bereiche meiden, strömungsberuhigte Zonen aufsuchen und nach einer gewissen Zeit Erkundungen durchführen. Die Versuchsdauer im Labor betrug lediglich maximal eineinhalb Stunden.

### 7.3.2. Übertragbarkeit der Labor- und Feldbefunde

Die Erkenntnisse der Freilandstudien wurden mit den situativ ähnlichen Laborsetups verglichen (Stababstand 18 mm, Anströmwinkel 45°, gemittelte Anströmgeschwindigkeit 0,4 m/s bis 0,5 m/s). Diese Rechenstudien wurden mit insgesamt 36 Aalen durchgeführt, im Feld kamen 73 von den ursprünglichen 124 Aalen zum aktiven Einsatz, die übrigen Aale verharrten im Oberwasserbereich des Schrägrechens Ottenau und wurden nicht detektiert.

In beiden Versuchskampagnen (Labor / Feld) betragen die Rechenpassagen im Labor und in Ottenau jeweils 0% und damit lag die Schutzrate bzw. Effizienz des Schrägrechens bei 100% (Abb. 172). Damit ist die Übertragbarkeit der Laborversuche auf die Realität, zumindest was die Effizienz eines Schrägrechens anbelangt, sicher gestellt.

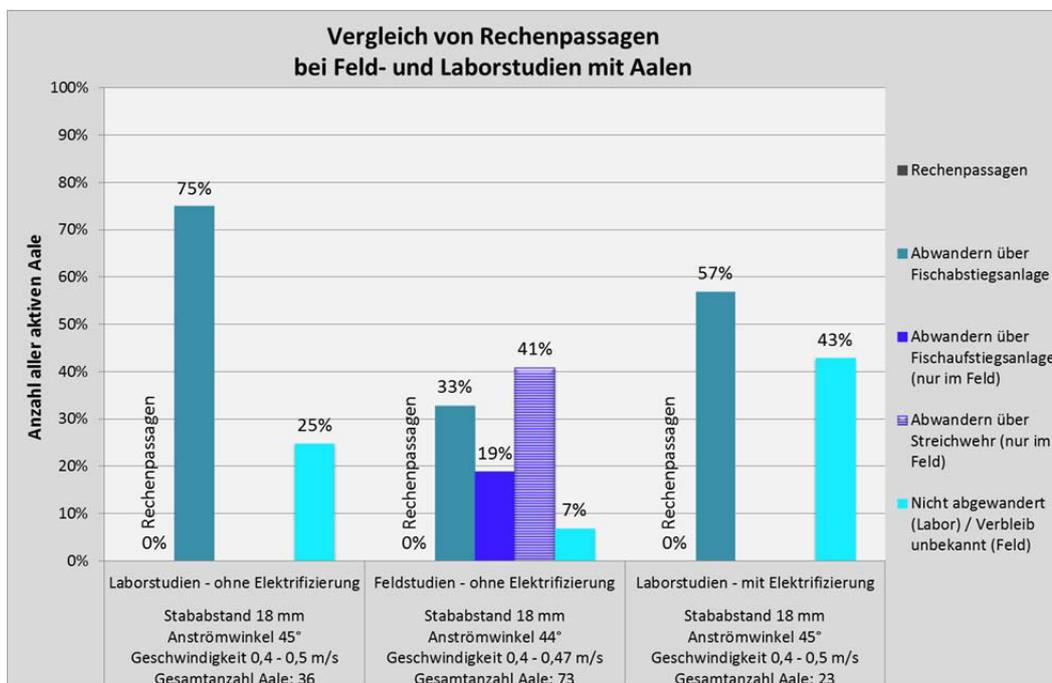


Abb. 172: Vergleich der Rechenpassagen sowie der aufgefundenen Abwanderungskorridore bei Feld- und Laborstudien.

Die Fischabstiegsanlage in Ottenau wurde bei den Aalversuchen mit 33% im Vergleich zu allen Abstiegskorridoren seltener als Abstieg genutzt als bei den Lachssmoltversuchen mit 63%. Dies bestätigt die im Labor gewonnenen Erkenntnisse, dass sich Aale nur selten durch die Schrägstellung des Rechens in Richtung eines seitlich angeordneten Bypasses leiten lassen. Der Abstiegskorridor wurde häufig zufällig gewählt. Alternativmöglichkeiten wurden aufgefunden und als Abstiegskorridor genommen.

Betrachtet man Fischaufstiegsanlage und Fischabstiegsanlage in Ottenau als einen Abwanderungskorridor – wie im Labor mit einem Bypass – so liegt die Abwanderungsquote bei 52%. Damit liegt die Abwanderungsquote im Labor mit 75% über der in Ottenau. Dies liegt mitunter an der relativ schmalen Versuchsrinne im Forschungslabor von nur 2 m – Aale finden aufgrund dieses beengten Platzangebotes durch Zufall eher den Bypass als bei einem 9 m breiten Einlaufkanal in Ottenau. Darüber hinaus ist der Bypass im Labor über die gesamte Wassersäule geöffnet. Für sohlnah schwimmende Fischarten wie den Aal war dies sicher von Vorteil, ebenso wie die Anordnung des Laborbypasses in Fließrichtung und nicht seitlich davon abzweigend, wie in Ottenau. Als weite-

---

rer Grund kann der Konkurrenzbypass des Streichwehrs genannt werden, über den viele Aale abgewandert sind und welcher im Labor nicht angeboten wurde, da es hier keine konkurrierenden Bypässe gab.

#### **7.4. Elektroscheuchversuche am Wasserkraftwerk Rotenfels an der Murg**

In Ottenau konnten keine situativ ähnlichen Feldstudien mit Aalen an einem elektrifizierten Schrägwehren durchgeführt werden. Gründe dafür waren:

- Kosten für Absperrung des Einlaufbereichs mittels Dammbalken, für den Einbau einer stabilen Elektrode (Kathode) hinter dem Schrägwehren und Kosten aufgrund des Erzeugungsausfalls während des Umbaus;
- Nicht vorhandene bauliche Durchführbarkeit hinsichtlich des Einbaus und Verankerung der Kathode und der Elektrifizierung des Schrägwehrens als Anode;
- Mögliche mangelnde Arbeitssicherheit und mangelnder Personenschutz durch Einbau eines elektrifizierten Schrägwehrens (hohe Vorgaben hinsichtlich des Arbeitsschutzes bei EnBW);
- Hoher Genehmigungsaufwand (Kosten und Zeit) für Antragstellung für die Elektrifizierung des Schrägwehrens samt Anhörung, Verhandlung und Genehmigungskosten sowie nicht bekannter und abzuschätzender Auflagen.

Um dennoch elektrifizierte Aalversuche in der Murg durchführen zu können und aufgrund den Erkenntnissen aus vorangegangenen Elektroscheuchversuchen der EnBW AG wurde am EnBW Wasserkraftwerk Rotenfels an der Murg temporär eine elektrische Fischechanlage aufgebaut. Der Aufwand war geringer als der Einbau einer Elektrifizierung eines Schrägwehrens, da der Einbau mittels Taucher bei Normalabfluss der Murg durchgeführt wurde. Des Weiteren wurde auf vorhandenes Equipment zurückgegriffen sowie auf eine noch gültige wasserrechtliche Erlaubnis aus den vorangegangenen Elektroscheuchversuchen an diesem Standort, welche lediglich verlängert wurde. Das Projektteam konnte daran nahtlos anknüpfen. Das WKW Rotenfels ist das Unterturbinenkraftwerk von Ottenau. Die Elektroscheuchanlage entspricht in ähnlicher Form der bereits in 2014 und 2015 getesteten Anlage (Kap. 7.4.2). Die Abwanderungskorridore für die besenderten Aale wurden analog Ottenau mittels Antennen aufgezeichnet.

Reine Verhaltensbarrieren wie elektrische Fischechanlagen sind bei Kühlwasserentnahmen von thermischen Kraftwerken seit Jahrzehnten in Betrieb. Beispielhaft genannt werden können die Fischechanlage des Blocks 7 am EnBW Rheinhardtdampfkraftwerk Karlsruhe (RDK 7) (Abb. 173) oder die des EnBW Kernkraftwerks Philippsburg am Rhein. Zwischen den Elektroden, also zwischen der Anodenreihe und der Kathodenreihe, wird ein elektrisches Feld aufgebaut, das Fische am Einschwimmen in die Kühlwassersysteme hindern soll. Die Grob- und Feinwehren sowie Siebbandanlagen zur Reinigung des Kühlwassers sind üblicherweise erst nach der Elektroscheuchanlage im Kühlwassereinfluss angeordnet.

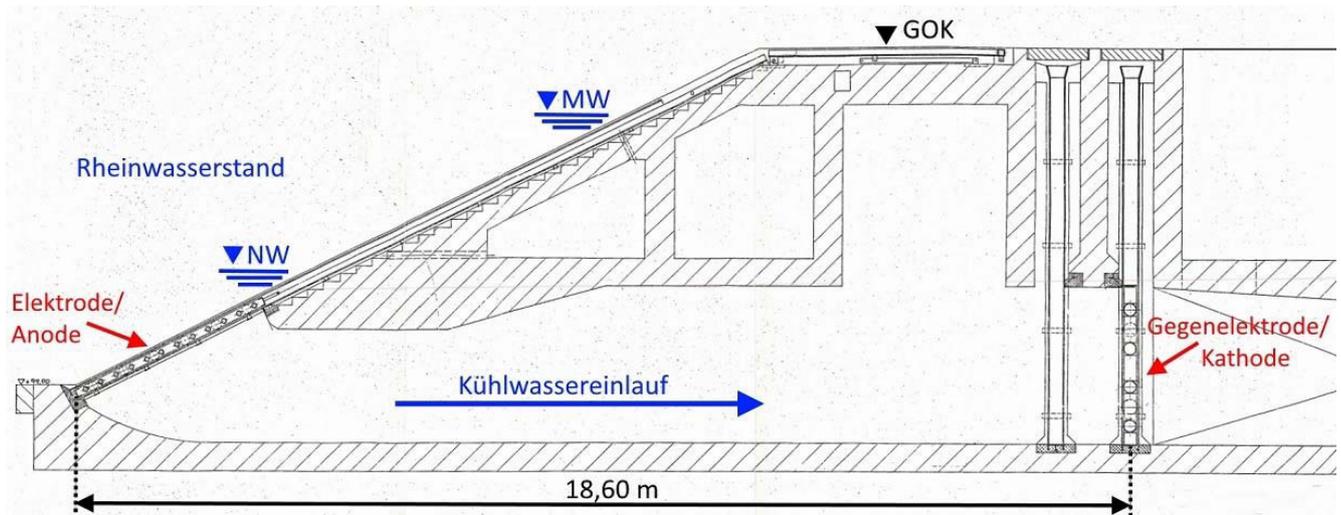


Abb. 173: Elektroscheuchanlage am Kühlwassereinlauf RDK 7 (Quelle: verändert nach EnBW, 1982).

Der entscheidende Unterschied zwischen Elektroscheuchanlagen an Wasserkraftanlagen und an Kühlwasserentnahmen von thermischen Kraftwerken ist die Richtung der Hauptströmung. Bei Kühlwasserentnahmen verläuft die Hauptströmung im Fluss, nur ein kleiner Teil zweigt in die Kühlwasserentnahme ab. Damit ist die tangential Komponente nach Gleichung 12 auf die Elektroscheuchanlage höher als die normale (orthogonale) Komponente nach Gleichung 11 (Kap. 2.3). Beim RDK 7 werden bei einem Mittelwasserabfluss des Rheins von  $1.265 \text{ m}^3/\text{s}$  am Pegel Maxau maximal  $15 \text{ m}^3/\text{s}$  Kühlwasser entnommen, was 1,2% des Mittelwasserabflusses entspricht. Bei Wasserkraftanlagen wird der Hauptbestandteil des Gewässerabflusses abturbiniert, d.h. die Hauptströmung wirkt häufig orthogonal auf die Elektroscheuchanlage oder einen Rechen. In Ottenau werden vom Mittelwasserabfluss mit  $16,1 \text{ m}^3/\text{s}$  abzüglich der Mindestwassermenge  $1,7 \text{ m}^3/\text{s}$  maximal  $14,4 \text{ m}^3/\text{s}$  für die Stromerzeugung entnommen, was einer Quote von 89,4% entspricht.

Aus diesen bisher gemachten Erfahrungen ergeben sich geringe Anströmgeschwindigkeiten vor Elektroscheuchanlagen, welche häufig nur bei Kühlwasserentnahmen eingehalten werden können und daher bei Wasserkraftanlagen bislang keine verbreitete Anwendung fanden.

#### 7.4.1. Versuchsaufbau und -durchführung

Die Freilanduntersuchungen an der Elektroscheuchanlage Rotenfels wurden vom 09.11.2016 bis 04.03.2017 zeitgleich mit denen am Schrägrechen Ottenau durchgeführt. Aufgrund der räumlichen Nähe beider Wasserkraftwerke konnten die Aale die Versuchseinrichtungen an beiden Anlagen durchwandern. Der Aufbau der temporären Elektroscheuchanlage als Einbau in ein Gewässer wurde vom Landratsamt Rastatt bis zum 31.03.2017 auf Grundlage einer bestehenden Erlaubnis nachgenehmigt. Aufgrund der begrenzten Lebensdauer der Batterien von ca. 3 Monaten wurde der Versuch bereits am 04.03.2017 für beendet erklärt und die Versuchsanlage Ende März 2017 abgebaut.

Die 1923 in Betrieb genommene Wasserkraftanlage Rotenfels liegt auf Gemarkung Gaggenau und knapp 3 km unterhalb von Ottenau an der Murg. Es handelt sich ebenfalls um ein Ausleitungskraftwerk. Am Streichwehr im Bereich der Rotherma-Querspange (Umgehungsstraße) von Rotenfels zweigt der Einlaufkanal in Richtung Kraftwerk ab. Die Ausleitungsstrecke verläuft südlich um den Kanal und das Kraftwerk und mit einer behördlich festgelegten Mindestwassermenge von  $1,7 \text{ m}^3/\text{s}$  wie in der Ausleitungsstrecke von Ottenau (Abb. 174). Der Einlauf in den Kraftwerkskanal ist als Brücke mit dreiteiliger Wehranlage aufgebaut, auf der ein Betriebssteg der EnBW AG und die Umgehungsstraße von Rotenfels angeordnet sind. Der konventionelle Rechen befindet sich in Rotenfels – im Gegensatz zu Ottenau – direkt vor den beiden Maschineneinläufen.

Die beiden installierten Francis-Maschinen wurden für einen Ausbaubfluss von je  $5,90 \text{ m}^3/\text{s}$  und für eine Fallhöhe von  $4,30 \text{ m}$  ausgelegt und besitzen eine installierte Leistung von je  $230 \text{ kW}$  bei Vollast.

Neben dem Wehr sind eine Fischaufstiegsanlage und eine Fischabstiegsanlage angeordnet, über die ein Großteil der Restwassermenge abgegeben wird. Der verbleibende Restwasserabfluss fließt über einen Wehreinschnitt auf der linken Seite des Streichwehres ab. An Tagen mit höherem Abfluss als  $13,5 \text{ m}^3/\text{s}$  (Turbinenabfluss  $11,8 \text{ m}^3/\text{s}$  und Mindestwassermenge  $1,7 \text{ m}^3/\text{s}$ ) erfolgt der restliche Murgabfluss über das Streichwehr.

Aufgrund der Rechtskurve, welche die Murg kurz vor Rotenfels beschreibt, wird das Wehr in einem Anströmwinkel  $\delta$  von  $39^\circ$  angeströmt.



Abb. 174: Luftbild des Einlaufbereichs Rotenfels mit Streichwehr, Fischauf- und -abstiegsanlage und eingebauter Scheuchanlage (Quelle: verändert nach Google.maps).

Die Elektroscheuchanlage „Neptun“ (Fa. Procom System S.A.) ist ein mobiles System aus Einzelelektroden, das variabel vor Einlaufbauwerken oder Wehren standortspezifisch eingebaut werden kann (Abb. 175 links). In Rotenfels wurde die Elektroscheuchanlage in einem Abstand von ungefähr  $2 \text{ m}$  zum Wehr errichtet und verläuft spitz zulaufend entlang des Wehres in Richtung Fischabstiegsanlage, um eine Leitwirkung zu den Abwanderungskorridoren Fischabstiegsanlage und Fischaufstiegsanlage herzustellen. Damit der Abwanderungskorridor am Bypass nicht zu eng wird, wurde die Elektroscheuchanlage abgelenkt und verläuft die letzten  $5 \text{ m}$  parallel zur Fließrichtung durch das Wehr (Abb. 175 rechts). Während der Versuchsdauer war das linke Wehrfeld Nr. 1 (Abb. 175 rechts) geschlossen, das Kraftwerk lief im Normalbetrieb. Bei Hochwasser wurden die restlichen beiden Wehrfelder (Nr. 2 und 3) ebenfalls geschlossen und das Kraftwerk abgeschaltet. Das linke Wehrschütz wurde permanent geschlossen gehalten, damit ein ausreichend breiter Abwanderungskorridor zum Fischabstieg hin möglich war. Abflüsse in Richtung Wasserkraftanlage wurden daher nur durch das mittlere und das rechte Wehrfeld abgegeben.

Die Elektroscheuchanlage besteht aus drei Reihen Einzelelektroden, welche von Tauchern mittels Ketten an der Sohle der Murg befestigt wurden. Die drei Reihen sowie die Einzelelektroden untereinander haben einen Abstand von  $50 \text{ cm}$  bis  $60 \text{ cm}$ . Die Einzelelektroden besitzen an ihrem oberen Ende einen gelben Kunststoffschwimmer (Abb. 176). Dieser Schwimmer sorgt für eine stabile Schwimmelage der Elektrode, unabhängig von den Strömungsverhältnissen oder von herbstlich bedingtem Geschwemmseilanfall. Die Wassertiefe und damit die Höhe der Elektroscheuchanlage betragen zwischen  $80$  und  $120 \text{ cm}$ .

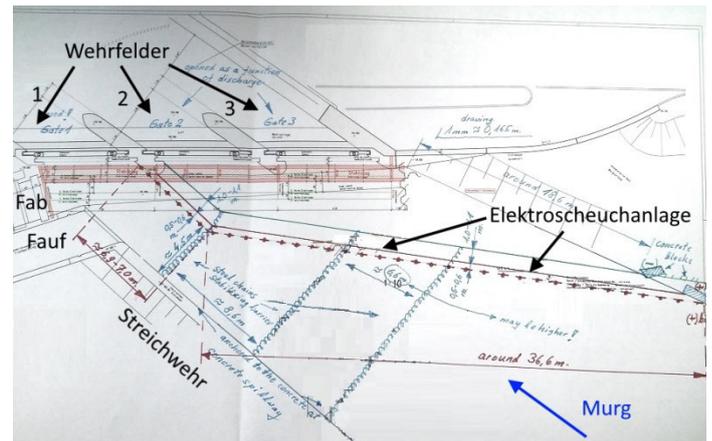
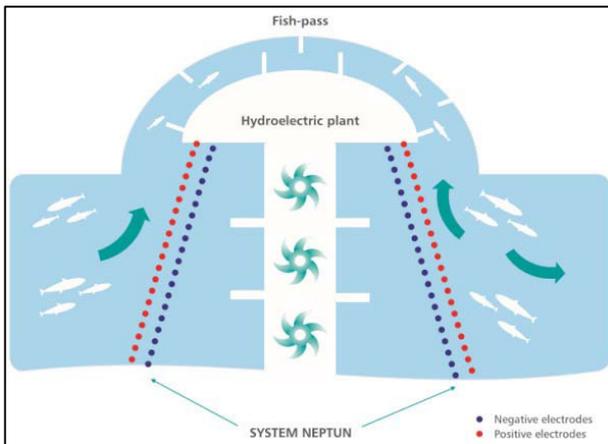


Abb. 175: Links Prinzipskizze Elektroscheuchanlage Neptun (Quelle: Procom Homepage, abgerufen 2017). Rechts Skizze des Versuchsaufbaus in Rotenfels (Quelle: Procom, persönlich überreicht 2016).



Abb. 176: Luftbild der Fischeicheuchanlage in Rotenfels.

Die Elektroden wurden vom Schaltschrank mit einer Gleichspannung von 65 Volt und 72 Volt versorgt. Mit den drei Elektrodenreihen wurden zwei Scheuchzonen realisiert (Weibel, 2016):

- 1. Zone (65 Volt): Die erste Zone bestand aus der ersten Elektrodenreihe als Pluspol (Anode) und der zweiten Elektrodenreihe als Minuspol (Kathode);
- 2. Zone (72 Volt): In der zweiten Zone waren die Elektroden des Pluspols (Anode) in der zweiten Elektrodenreihe angeordnet, deren Minuspol (Kathode) bildet die der dritten Elektrodenreihe.

Zwischen Anode und Kathode entstand mit diesem Aufbau ein elektrisches Feld, welches direkt an den Elektroden stärker, als zwischen den Einzelelektroden und damit heterogen aufgebaut war. Die Fische spürten damit bei Annäherung an das elektrische Feld – wie beim elektrischen Feld des Schrägrechens im Labor – die zunehmende Intensität und verließen den Bereich dann wieder in Richtung schwächer werdende Feldstärke. Aufgrund der Anordnung parallel zur Wehranlage und schräg in Richtung des Bypasses und der Fischaufstiegsanlage sollte zusätzlich zur Blockadewirkung eine Leitwirkung zur Abwanderung initiiert werden.

Zur Detektion der besenderten Aale wurden wie in Ottenau an verschiedenen markanten Stellen Antennen vorgesehen: Eine Yagi-Antenne vor dem Einlaufbereich bzw. vor der Elektroscheuchanlage, eine Unterwasser-Antenne in der Fischabstiegsanlage, eine Yagi-Antenne an der Rotherma-Brücke (Ausleitungsstrecke) und eine Yagi-Antenne am Kraftwerk. So konnten alle möglichen Abwanderungskorridore detektiert werden; die Fischaufstiegsanlage konnte über die Signalstärke der Fischabstiegsantenne mit in die Untersuchungen einbezogen

werden. Aus den Erfahrungen der vergangenen Jahre wurde vor dem Einlaufbereich keine Unterwasser-Antenne installiert, da diese dort gegenüber Hochwasser und Geschwemmsel anfällig war. Daher entschied man sich für eine Yagi-Antenne.

Die Abflussverhältnisse der Murg in Rotenfels sind vergleichbar mit denen in Ottenau, da sich zwischen den Standorten kein weiteres Wasserkraftwerk, kein Speicherbecken und auch kein Rückhaltebecken befindet und beide Kraftwerke nur 3 km voneinander entfernt liegen. Lediglich der Sulzbach in Ottenau liegt als Zufluss zwischen den Standorten, bringt aber keinen nennenswerten Abfluss.

Die mittlere Kraftwerksleistung betrug im Versuchszeitraum 171 kW, also etwas höher als in Ottenau. Ursache hierfür war, dass in Rotenfels beide Maschinen liefen und keine technischen Probleme vorlagen. Die maximale Leistung betrug im Versuchszeitraum 380 kW, 83% der möglichen Kraftwerksleistung (Abb. 177). Damit herrschten an der Elektroscheuchanlage Anströmgeschwindigkeiten von maximal 0,5 m/s. Genau diese Anströmgeschwindigkeit sollte soweit möglich an Elektroscheuchanlagen vorgesehen werden (Weibel *et al.*, 2012 und Weibel *et al.*, 2015), damit Aale die Möglichkeit zur Flucht gegeben werden kann, bzw. Aale die alternativen Abwanderkorridore auffinden können. Während des Versuchszeitraums waren die Abflüsse lediglich zu Beginn erhöht, ab Ende November 2016 bis Anfang Februar 2017 lagen die Abflüsse auf einem niedrigen Bereich ohne große Schwankungen. Somit waren die Fischabstiegsanlage und die Fischaufstiegsanlage gleichmäßig dotiert.

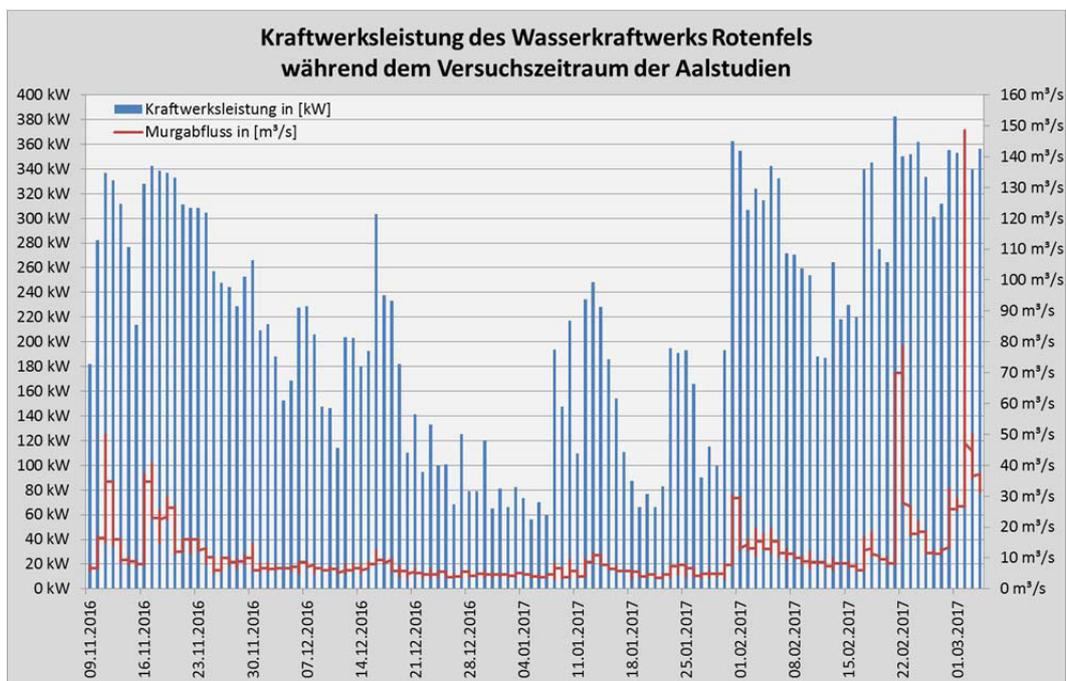


Abb. 177: Kraftwerksleistung im Versuchszeitraum vom 09.11.2016 bis 05.03.2017 mit schwankenden Abflüssen und einer Maximalleistung von knapp 380 kW am Wasserkraftwerk Rotenfels.

Aufgrund der räumlichen Nähe der Standorte Ottenau und Rotenfels verursachten die Niedrigwasserabflüsse im Herbst und Winter 2016/2017 ebenfalls eine verzögerte Abwanderung der Aale in Rotenfels (vgl. 7.2.2).

Eine Verlegung der Elektroscheuchanlage, die zu einer Beeinträchtigung der Scheuch- und Leitwirkung führte könnte, wurde nicht beobachtet.

#### 7.4.2. Frühere Elektroscheuchversuche der EnBW AG

Bereits vor einigen Jahren wurden erste Elektroscheuchversuche an EnBW-Versuchsaufbauten und am Wasserkraft Rotenfels unter Begleitung der IUS Weibel & Ness GmbH durchgeführt, so dass die Studien von 2016 auf bereits vorhandenem Wissen aufbauen konnten.

## Elektroscheuchversuche im KKP 2011 und 2012

Das Forschungsprojekt der EnBW AG zum Elektroscheuchen von Fischen vor Kühlwassereinläufen und Wasserkraftanlagen wurde von 2011 bis 2012 in einem temporären Rundstrombecken im EnBW Kernkraftwerk Philippsburg (KKP) durchgeführt. Dabei wurde das Prinzip eines elektrischen Rechens untersucht und verschiedene Frequenz- und Spannungsbereiche getestet. Außerdem wurden sowohl die Blockadewirkung als auch die Leitwirkung von Elektroscheuchanlagen mit Stahlstäben untersucht. Im Jahr 2011 wurde das Verhalten von Blankaalen an einer derartigen Scheuche mit vertikal angeordneten Stäben untersucht, im Jahr 2012 folgten Versuche mit Lachssmolts und Regenbogenforellen (Rost *et al.*, 2014). Bei den Aalen wurde eine erhöhte Rückhaltewirkung an Scheuchen mit vertikalen Stäben beobachtet, was auch bei den hier durchgeführten Laborversuchen an Schrägrechen beobachtet wurde. Ein erhöhtes gestresstes Verhalten der Aale nach einer Reizwahrnehmung beim Einsatz einer Elektroscheuche wurde ebenfalls bereits im KKP festgestellt (Weibel, 2012).

## Elektroscheuchversuche in Rotenfels 2014

Aufgrund der relativ guten Ergebnisse im KKP wurden 2014 Feldversuche mit Lachssmolts, Regenbogenforellen und Aalen am WKW Rotenfels durchgeführt. Zum Zählen der Fische, welche die Elektroscheuchanlage passierten, wurden keine besenderten Fische eingesetzt, sondern erfolgte mit einem Hamen im Kraftwerkskanal. Diese Fangmethode war günstiger als die Telemetrie (Telemetrie-Kosten in Höhe von 150 US Dollar pro Sender). Bei den Untersuchungen stand nur der reine Abwanderungskorridor im Mittelpunkt des Interesses, welcher mit den Hamen auf einfache Art und Weise feststellbar war. Eine aufwändige Auswertung von Signaldaten entfiel damit. Zusätzlich wurde in der Fischabstiegsanlage eine Fangbox installiert, um auch die Anzahl der über die Fischabstiegsanlage abgewanderten Fische zu bestimmen. Die drei Elektrodenreihen der Elektroscheuchanlage waren an Seilen befestigt und arbeiteten mit Gleichspannung. Verwendet wurden 450 Blankaale aus dem Catch & Carry Programm der EnBW am Neckar (Rost, 2014). Hochwasser und angeschwemmtes Treibgut beschädigten den Hamen sowie die Elektroden stark, weshalb der Versuch leider ohne Ergebnis abgebrochen werden musste.

## Elektroscheuchversuche in Rotenfels 2015

2015 wurde die Anlage dahingehend modifiziert, dass die Elektroden zusätzliche Fixierungsseile und Verstrebungen untereinander erhielten, um die Konstruktion bei Hochwasser oder bei erhöhtem Treibgutanteil zu stabilisieren. Die Einzelelektroden untereinander hatten einen Abstand von 80 cm, die drei Elektrodenreihen einen Abstand von 110 cm zueinander (Abb. 178). Statt des Hamens verwendete man die Methodik der Telemetrie mit 128 besenderten Lachssmolts und 149 besenderten Aalen zur Nachverfolgung des Abstiegskorridors, analog den Aalversuchen in 2016/2017. Zusätzlich wurde in der Nähe der Scheuchanlage ein DIDSON Sonar zur Beobachtung der Aale installiert. Die Fließgeschwindigkeiten in Richtung Kraftwerk/Elektroscheuchanlage lagen im Durchschnitt bei 0,6 m/s bis 0,85 m/s und bei 0,45 m/s bis 0,6 m/s in Richtung Fischabstieg (tangential zur Strömung Richtung Kraftwerk).



Abb. 178: Elektroscheuchanlage in Rotenfels im Jahr 2015 mit Elektroden, welche an Seilen und Fixierungsseilen befestigt waren (links). Die rechten drei Bilder zeigen die Veränderungen an der Elektroscheuchanlage von 2014 nach 2015: Der linke Zustand zeigt die Elektroscheuchanlage von 2014, das mittlere Bild die zusätzlichen Fixierungsseile, das rechte Bild die Verstrebungen der einzelnen Elektroden untereinander (Quelle: verändert nach Weibel *et al.*, 2015a).

Innerhalb weniger Tage waren, wie auch bei den im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Feldstudien am Schrägrechen in Ottenau 2016, alle Lachssmolts abgewandert. 2015 passierten 12 Lachssmolts (9,4%) die Elektroscheuchanlage, was einer Schutzrate von 90,6% für Lachssmolts entsprach (Abb. 179).

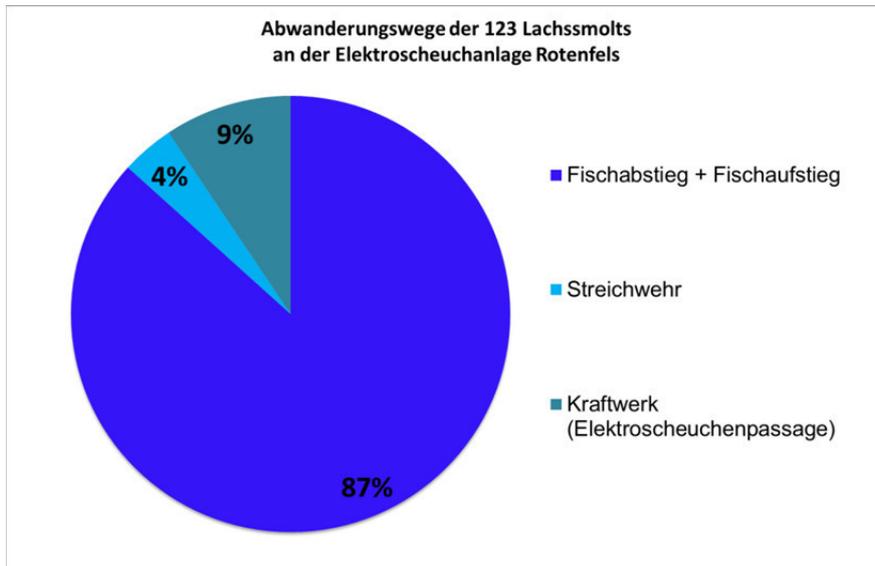


Abb. 179: Abwanderungskorridore der Lachssmolts bei den Elektroscheuchversuchen im Jahr 2015 mit einer hohen Abwanderungsquote über Fischaufstiegsanlage und Fischabstiegsanlage.

Die Aalstudien verliefen aufgrund äußerer Umstände nicht zufriedenstellend: Zunächst waren die Abflusswerte der Murg nicht ausreichend für eine Abwanderung (ca. 5 m<sup>3</sup>/s), so dass zu Beginn keine Aale abwanderten. Anschließend wurden ein Peak von 78 m<sup>3</sup>/s sowie ein 2-jährliches Hochwasser in Höhe von 245 m<sup>3</sup>/s verzeichnet. Im Zuge der Hochwasserereignisse war die Elektroscheuchanlage zeitweise außer Betrieb und wurde beim zweiten Hochwasserereignis so stark beschädigt, dass der Versuch abgebrochen werden musste. Bis auf zwei wurden sämtliche Antennen vom Wasser fortgerissen, so dass keine Analysen der Abwanderungskorridore mehr möglich waren. Das Hochwasser zeigte somit auf, dass das verwendete System keinen ausreichenden Hochwasserschutz aufwies und hohe betriebliche Wartungskosten erzeugte. Daher wurde die Elektroscheuchanlage für die in 2016/2017 ausgeführten Feldstudien durch die Fa. Procom System erneut modifiziert (Kap. 7.4.1). 2015 konnte lediglich festgestellt werden, dass eine Abwanderung auch über das Streichwehr erfolgte, sobald ein ausreichender Abfluss darüber vorhanden war. Dies ließ sich auch bei den Ergebnissen in 2016/2017 beobachten.

Ein weiterer Befund aus den Versuchen von 2015 war, dass Lachssmolts eher schnell abwanderten und dass sich Aale über Wochen und Monate im Oberwasser aufhielten – ohne einen ausreichend starken Abwanderungsdrang zu verspüren. Dies konnte bei den 2016/2017 durchgeführten Feldstudien ebenfalls beobachtet werden. Anhand der nach den Schadensereignissen verbliebenen Detektionsergebnissen von 2015 konnte jedoch im Zuge der Untersuchungen keine Wirksamkeit der getesteten Elektroscheuchanlage auf abwandernde Aale nachgewiesen werden (Weibel *et al.*, 2016).

### 7.4.3. Befunde der Elektroscheuchversuche

Bei den Versuchen an der Elektroscheuchanlage sollte insbesondere die grundsätzliche Wirksamkeit elektrischer Scheuchanlagen bezogen auf Aale und nicht das Verhalten von Aalen an Elektroscheuchanlagen untersucht werden. Daher erfolgte keine Verhaltensuntersuchung an der Elektroscheuchanlage, sondern eine reine Nachverfolgung der Abwanderungskorridore. Dies wurde mit Yagi-Antennen durchgeführt, welche die Signale der abwandernden Aale detektierten. Diese Antennen wurden an allen Abwanderungskorridoren installiert (Abb. 180). Yagi-Antennen sind weniger hochwassergefährdet als Unterwasser-Antennen, ein Ausfall durch Hochwasserereignisse war daher nicht zu erwarten.

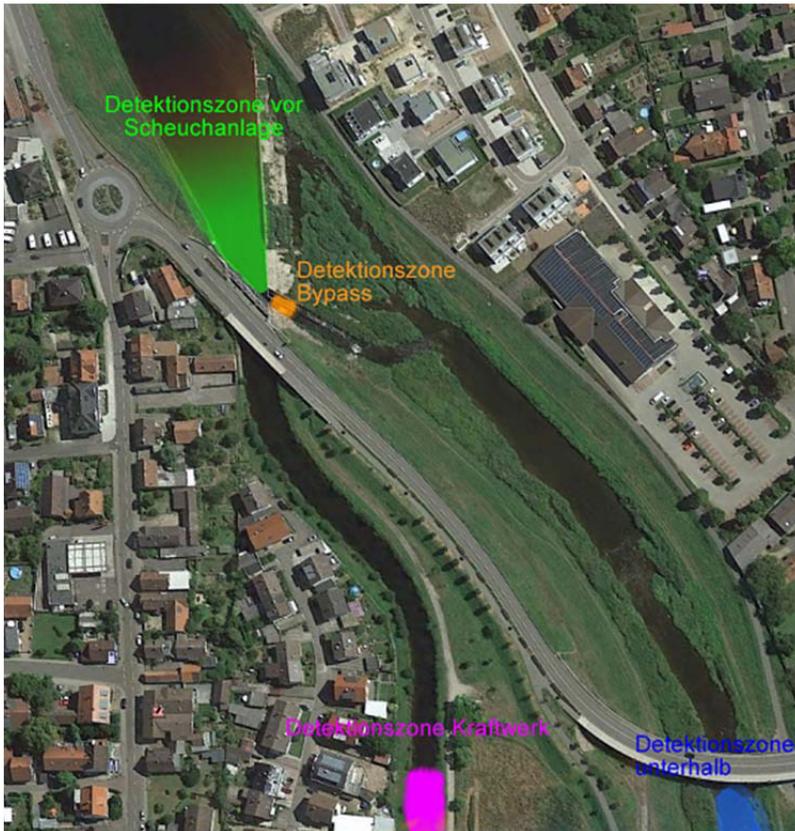


Abb. 180: Detektionszonen in Rotenfels zur Aufnahme der Signale der besenderten Aale während der Versuchsdurchführung vom 09.11.2016 bis 04.03.2017.

Von den 124 besenderten Aalen erreichten 73 Aale das Oberliegerkraftwerk Ottenau, von denen in Ottenau 68 Aale abgewandert sind. Von den in Ottenau abgewanderten Aalen erreichten 46 Aale die Elektroscheuchanlage in Rotenfels. Davon wiederum wanderten 4 Aale wieder in Richtung Oberstrom zurück und nicht zur Scheuchanlage. Im Bereich der Elektroscheuchanlage wanderten insgesamt 42 Aale über verschiedene Abwanderungskorridore ab. Die verbliebenen 22 Aale verharrten zwischen Ottenau und Rotenfels und konnten bei deren Abwanderung in Rotenfels nicht mehr detektiert werden, da die Senderbatterie verbraucht war. Wie bereits bei den Aalversuchen in Ottenau wurden auch in Rotenfels die von den Aalen genutzten Abwanderungskorridore identifiziert und ausgewertet (Abb. 181).

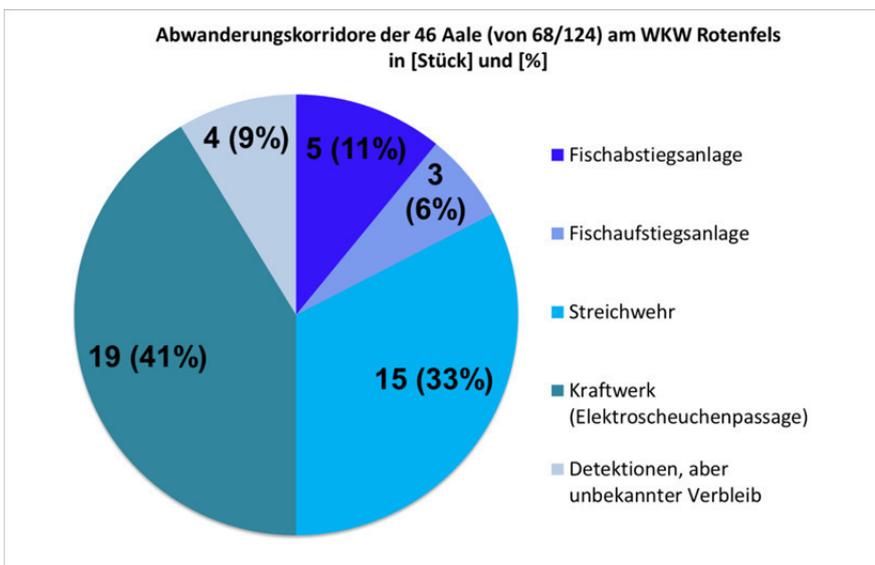


Abb. 181: Abwanderungskorridore der besenderten Aale während der Versuchsdurchführung in Rotenfels vom 09.11.2016-04.03.2017.

---

59% aller in Rotenfels angekommenen Aale mieden die Elektroscheuchanlage und suchten einen alternativen Abwanderungskorridor. 41% aller Aale wanderten durch die Elektroscheuchanlage Richtung Kraftwerk. Diese Scheuch- und Blockadeeffizienz von 59% liegt unter der des Schrägrechens in Ottenau mit 100% bei gleichen Randbedingungen wie Wasserqualität und -temperatur, etc. und gleichen Probanden.

Die Fischabstiegsanlage (11%) und die Fischaufstiegsanlage (6%) wurden im Vergleich mit den hohen Abwanderungsquoten am Schrägrechen in Ottenau seltener aufgefunden, obwohl die Elektroscheuchanlage mit 39° schräg zu beiden Abwanderungskorridoren angeordnet war und dadurch eine Leitwirkung initiiert werden sollte. Wie aus den Untersuchungen im Forschungslabor ersichtlich, ließen sich die Aale kaum durch eine Rechen- oder Barrierenschrägstellung leiten. Die Auffindbarkeit eines Abwanderkorridors war eher zufällig. Da der Einlaufbereich in Rotenfels deutlich breiter war als in Ottenau, gelangten weniger Aale per Zufall in die Fischauf- und Fischabstiege, eine Abwanderung über das Streichwehr war demgegenüber wahrscheinlicher. Das Streichwehr wurde mit 33% stark in die möglichen Abwanderungswege einbezogen. Gleiches war bereits in Ottenau zu beobachten. Diese Ergebnisse belegen, dass Aale innerhalb einer erhöhten Abflusswelle über beide Streichwehre hinweg Richtung Rhein abwanderten.

#### **7.4.4. Empfehlungen für die Installation einer Elektroscheuchanlage**

Anhand der vorliegenden Befunde (Kap. 7.4.3) liegt die Schutzrate der Elektroscheuchanlage mit 59% unter der eines Schrägrechens mit 100% mit einem Stababstand von 18 mm (Ottenau-Setup). Die Elektroscheuchanlage besitzt mit einer 59%-igen Effizienz eine nicht ausreichende Schutzwirkung. Die Installation einer wie oben beschriebenen und in Rotenfels untersuchten Elektroscheuchanlage in dieser Ausführung und Elektrifizierung muss daher in Aalmanagementgewässern mit einem zusätzlichen Rechen bzw. einer mechanischen Barriere vor den Turbineneinläufen kombiniert werden, um den Schutzgrad weiter zu erhöhen.

Da die elektrifizierten Versuche in Rotenfels aus 2015 gute Ergebnisse mit Lachssmolts aufzeigten, besteht hinsichtlich des Einsatzes bei Aalvorkommen noch Forschungsbedarf.

#### **7.4.5. Übertragbarkeit der elektrifizierten Labor- und Feldbefunde**

Eine Elektroscheuchanlage kann nicht mit einem elektrifizierten Schrägrechen im Labor verglichen werden, da es sich um zwei völlig verschiedene Schutzsysteme mit unterschiedlichen Wirkungsweisen handelt; es herrscht keine situative Ähnlichkeit. Die Elektroscheuchanlage wirkt als reine Verhaltensbarriere, bei einem elektrifizierten Schrägrechen wurde eine mechanische Barriere mit einer Verhaltensbarriere kombiniert – ein sogenannter Hybridrechen entstand.

Statt der Installation einer Elektroscheuchanlage kann auf Grundlage der Laborergebnisse die Errichtung eines elektrifizierten Schrägrechens zielführend sein. Hier liegt die Schutzrate bei einem Stababstand von 30 mm und einer Elektrifizierung bei 99%, ohne Elektrifizierung bei 85%.

### **7.5. Fazit**

Ethohydraulische Signaturen entstehen durch die Überschneidung der Strömungssignaturen mit den Erkenntnissen aus den ethohydraulischen Laborstudien. Anhand derer können für Aalmanagementgewässer folgende Bemessungsempfehlungen für Schrägrechen gegeben werden (Tab. 30):

Tab. 30: Bemessungswerte für einen Schrägrechen im Aalmanagementgewässer, aufgestellt anhand ethohydraulischer Studien und hydraulischer Strömungssignaturen mit Aalen an Schrägrechen.

Gewässertyp/Zielarten	Aalmanagementgewässer
Anströmwinkel $\delta$	$30^\circ \leq \delta \leq 55^\circ$
max. Stabweite s	max. 18 mm ohne Elektrifizierung des Schrägrechens
	max. 30 mm mit Elektrifizierung des Schrägrechens
Anströmgeschwindigkeit $v_a$	$0,4 \leq v_a \leq 0,8 \text{ m/s}$

Allgemein eignen sich Schrägrechen sehr gut zum Schutz von abwandernden Aalen vor einer Turbinenpassage. Eine Leitwirkung wurde zwar nahezu nicht beobachtet, jedoch bewirkte die Schrägstellung des Rechens und die horizontale Ausrichtung der Stäbe eine hohe Schutzwirkung. Schrägrechen sind daher bei gleicher Anströmgeschwindigkeit und gleichem Stababstand für den Schutz von Aalen besser geeignet als vergleichbare konventionelle Rechen. Erkenntnisse aus Aalversuchen an konventionellen Rechen können nicht auf Schrägrechen übertragen werden.

Die hier untersuchten Schrägrechen wiesen sowohl in den ethohydraulischen Laborstudien als auch in Ottenau eine hohe Schutzwirkung für Blankaale auf, bei einem Stababstand von 18 mm betrug die Schutzeffizienz 100%. Lediglich bei einem Stababstand von 30 mm waren im Forschungslabor einige Rechenpassagen zu beobachten.

Bei hohen Anströmgeschwindigkeiten (0,7 m/s bis 0,8 m/s) war bei den Aalen ein gestresstes Verhalten zu beobachten. Dieses Verhalten wirkte sich nicht auf die Anzahl der Rechenkontakte oder auf die Bypasspassagen aus. Der Anströmwinkel von Schrägrechen war für die Aale eher unbedeutend, da sie sich nur selten vom Rechen in Richtung eines Bypasses leiten ließen. Die Lage einer Rechenkollision war meist vom Zufall und deren Lage in der Versuchsrinne bzw. im Einlaufkanal bestimmt.

Die über den Fließquerschnitt gemittelte Anströmgeschwindigkeit von 0,4 m/s bis 0,5 m/s führte am Schrägrechen Ottenau zu Bereichen mit Geschwindigkeiten über 1,0 m/s und trotzdem zu keinem Impingement und zu keinen Abwanderungen durch den Schrägrechen. Damit können Aale auch bei höheren Anströmgeschwindigkeiten als die derzeit postulierten 0,5 m/s sicher im Nahbereich von Schrägrechen navigieren.

Aale nutzten zwar die gesamte Wassertiefe aus und somit auch oberflächennahe Abstiegsmöglichkeiten wie Überfallklappen, aber im Vergleich zu Lachssmolts seltener. Aale orientieren sich bodennah, aber sobald die Strömung nach oben zu einem Bypass führte, ließen sich Aale von ihr dorthin leiten. Weiterhin wurde festgestellt, dass sämtliche Aale nachts abwanderten, es also eine Abhängigkeit der Aktivität/Abwanderung von der Tageszeit/Helligkeit gibt.

Eine schwache Elektrifizierung von Schrägrechen – unabhängig von der Anströmgeschwindigkeit – löste bei den Aalen ein noch gestressteres Verhalten und noch unkontrolliertere Bewegungen aus als hohe Anströmgeschwindigkeiten bei nicht elektrifiziertem Schrägrechen.

Bei einer Elektrifizierung kombiniert mit kleinen Anströmwinkeln, also bei langen Schrägrechen, häuften sich die Rechenkontakte und damit auch die Bypasspassagen.

Die Elektrifizierung bewirkte bei 30 mm Stababstand eine Reduzierung der Rechenpassagen auf 1% im Vergleich zu nicht elektrifizierten Versuchen mit 15% und könnte bei Wasserkraftanlagen zu einer geringeren Aalmortalität durch Rechenreinigungsarme führen. Trotzdem darf bei der Planung einer derartigen Elektrifizierung nicht vergessen werden, dass auf diese Weise zwar ein wirksamer Fischschutz entsteht, aber parallel dazu auch ein auffindbarer und passierbarer Bypass geschaffen werden muss.

---

Ein schwacher elektrischer Impuls könnte bei Rechensystemen kurz vor dem Start der RRM initiiert werden, um verharrende Aale am Schrägrechen zu lösen. Damit könnte eine Verletzung oder eine Mortalität durch den Reinigungsprozess vermieden oder zumindest verringert werden. Nach dem Reinigungsvorgang könnte das elektrische Feld wieder abgeschaltet werden. Prinzipiell kann dieses Verfahren auch bei konventionellen Rechen angewandt werden, um Aale vor einem Aufenthalt am Rechen fernzuhalten.

Die in Rotenfels getestete Elektroscheuchanlage hatte keine ausreichende Scheuch- und Leitwirkung gegenüber Aalen und besaß somit eine zu geringe Schutzeffizienz. Weitere Schutzvorrichtungen wären notwendig, wie z. B. mechanische Barrieren. Durch eine Abstandsverringering der Elektroden untereinander sowie durch ein geändertes Spannungsfeld könnte die Anzahl der Scheuchpassagen ggf. reduziert werden. Da die Kosten für einen derartigen Versuchsaufbau relativ hoch sind (Elektroden, Sohlbefestigungen, Taucherkolonne, Schaltschränke, besenderte Fische, usw.), sollte eine Elektroscheuchanlage vor Durchführung von Feldversuchen zunächst im Forschungslabor getestet und optimiert werden. Im Forschungslabor könnten somit auch weitere hydraulische und geometrische Parameter untersucht und die Aale besser beobachtet werden.

Eine Kombination von mechanischer Barriere (Schrägrechen) und Verhaltensbarriere (Elektrifizierung) könnte als sogenannter Hybridrechen v.a. bei mittleren bis großen Wasserkraftwerken, bei denen geringe Stababstände aus betrieblichen Gründen (Verlandung durch Geschwemmsel) vermieden werden sollten, erfolgreich eingesetzt werden.

---

## 8. Zusammenfassung & Ausblick

---

Das Forschungsprojekt zum Schrägrechen, in dessen Rahmen die vorliegende Arbeit entstanden ist, wurde als Kooperationsprojekt zwischen TU Darmstadt, Lehrstuhl für Wasserbau und Hydraulik und EnBW Energie Baden-Württemberg AG durchgeführt.

Horizontalstabrechen, welche schräg zur Anströmung ausgerichtet sind und horizontale Stäbe besitzen (= Schrägrechen), werden eine große Leit- und Schutzwirkung zugesprochen. Dies veranlasst viele Kraftwerksbetreiber zur Installation eines derartigen Rechensystems. Bislang unbekannt war die Ermittlung der Rechenverluste, also der hydraulischen Verluste, welche durch die Anströmung des Schrägrechens entstehen und die sich negativ auf die durch die Turbinen erzeugte Strommenge auswirken. Auch die Geschwindigkeitsverteilungen vor Schrägrechen in den Bereichen, in denen die Fische geleitet und geschützt werden sollen, wurden bislang noch nicht eingehend untersucht. Des Weiteren war bislang unklar, welche Rechenparameter – hydraulisch und/oder geometrisch – die Fische veranlasst, am Schrägrechen entlang in Richtung eines angebotenen Bypasses zu schwimmen und Meidungs- oder Suchreaktionen vor dem Schrägrechen durchzuführen.

Zur Beseitigung dieser Wissenslücken wurde eine rechnerische Ermittlung und eine experimentelle Untersuchung von Rechenverlusten an Schrägrechen im wasserbaulichen Forschungslabor sowie am Schrägrechen des Wasserkraftwerks Ottenau durchgeführt und mit vorhandenen Rechenverlustformeln verglichen. So sollte geklärt werden, ob eine Anwendung der bekannten Rechenverlustformeln für Schrägrechen möglich und empfehlenswert ist.

Im nächsten Schritt folgte eine hydrometrische Aufnahme sowie 2D- und 3D-Darstellungen von Strömungssignaturen der Schrägrechen im Labor und am Wasserkraftwerk Ottenau, um mögliche Strömungsänderungen zu lokalisieren sowie strömungsberuhigte Zonen, in denen sich möglicherweise Fische aufhalten. Es konnte dadurch auch ein Vergleich von Laborrechen und Schrägrechen in Ottenau durchgeführt werden.

Im letzten Schritt wurden ethohydraulische Studien mit Lachssmolts und Aalen an Schrägrechen durchgeführt – im Forschungslabor und am Schrägrechen in Ottenau. Teile der Aalstudien wurden mit einem elektrifizierten Schrägrechen durchgeführt und mit Aalstudien an einer Elektroscheuchanlage am Wasserkraftwerk Rotenfels verglichen. So konnte ermittelt werden, bei welchen Rechenetups sich die Fische mehr oder weniger leiten ließen, welche Verhaltensmuster eine Abwanderung förderten oder welche Situationen zu Meidungsreaktionen am Schrägrechen führten. Die Laborstudien wurden zum Abschluss mit den Felduntersuchungen verglichen.

### 8.1. Rechenverluste an Schrägrechen

Rechenverluste wurden an zwei Schrägrechen im Forschungslabor und am Schrägrechen in Ottenau sowohl experimentell als auch rechnerisch ermittelt. Darüber hinaus wurden die experimentellen Ergebnisse eines anderen Forschungsprojektes ebenfalls rechnerisch mittels vorhandener Rechenverlustformeln nachvollzogen. Bekannte Formeln von u.a. *Kirschmer-Mosonyi*, *Meusbürger* und *Raynal* wurden ausgewertet und den physikalisch ermittelten Ergebnissen gegenübergestellt (Kap. 3).

Die Rechenverluste an Schrägrechen sind abhängig von verschiedenen Einflussfaktoren und werden größer bei

- größer werdendem Verbauungsgrad;
- kleiner werdendem Stababstand;
- größer werdendem Anströmwinkel und
- steigender Anströmgeschwindigkeit.

Den größten Einfluss haben der Verbauungsgrad und der Stababstand. Geringeren Einfluss auf die Rechenverluste haben hingegen der Anströmwinkel und die Anströmgeschwindigkeit. Ein Einfluss der Rechenverlegung durch Geschwemmsel (Verlegungsgrad) wurde nicht untersucht.

Die rechnerischen Verluste aus den Formeln der oben genannten Autoren steigen hingegen mit kleiner werdendem Anströmwinkel, was an der Schräganströmung der untersuchten Schrägrechen liegt. Die Formeln wurden für konventionelle Rechen mit vertikal ausgerichteten Stäben ermittelt. Bei derartigen Rechen entstehen bei

---

kleineren Anström winkeln größere Ablösungen und Turbulenzen, welche die Rechenverluste erhöhen. Einige Rechenverlustformeln sind nur unter bestimmten Randbedingungen anwendbar, welche bei Schrägrechen häufig nicht vorhanden sind.

Eine Anwendung der bisher bekannten Rechenverlustformeln auf Schrägrechen ist daher nicht zulässig. Deshalb muss stets eine physikalische Ermittlung im Labor erfolgen. Für die in dieser Arbeit überprüften Rechen setups wurden Grafiken erstellt, anhand derer die Rechenverluste speziell für die untersuchten Schrägrechen grafisch ermittelt werden können.

Sollten Rechenverluste weiterer Schrägrechentypen experimentell im Forschungslabor ermittelt werden, ist dabei zu beachten, dass die Schrägrechen im Labor die gleichen geometrischen Parameter besitzen, wie die Schrägrechen unter Naturbedingungen. Dazu zählen Stababstand, Rechenstablänge, Rechenstabdicke und Verbaugungsgrad.

## 8.2. Strömungssignaturen und Strömungshydraulik an Schrägrechen

Schrägrechen wird eine Leitwirkung zugesprochen, welche viele Autoren auf eine Vektorenzerlegung von Anströmgeschwindigkeit oder Strömungskräften zurückführen. Experimentelle Versuche mit einer Fadenharfe konnten im Labor keine Kräftezerlegung vor dem Schrägrechen in eine tangentiale und in eine normale Geschwindigkeitskomponente nachweisen. Auch rechnerisch mittels Strömungskräften (Gl. 13) kann solch eine vektorielle Zerlegung nicht begründet werden, da hier kein Einfluss einer Schrägstellung oder eines Anström winkels in die Formel eingeht. Die Größe der Rechenfläche ist damit für die Anströmgeschwindigkeit vor dem Rechen irrelevant. Ebenso sind die auf Fische wirkenden Kräfte nicht vom Anström winkel und damit nicht von einer tangentialen oder normalen Komponente abhängig.

Die experimentell im Forschungslabor ermittelten Strömungssignaturen zeigen eine Zunahme der Anströmgeschwindigkeit zum Bypass hin sowie strömungsberuhigte Zonen im rechten Bereich der Leitwand (Kap. 4). Strömungsberuhigte Zonen entstehen am Schrägrechen in Ottenau ebenfalls an der rechten Seite, sind aber anlagenbedingt durch die Ruheposition des Reinigungsarms verursacht. Die Geschwindigkeiten nehmen zum Bypass hin aufgrund baulicher Randbedingungen zunächst ab, im weiteren Verlauf zur Abstiegsklappe hin aber erwartungsgemäß wieder zu. Der Betriebsabfluss im Bypass betrug im Labor 10% der Gesamtabflussmenge in der Versuchsrinne, in Ottenau – je nach Kraftwerksdurchfluss – zwischen 6% und 11%, sind also vergleichbar. Einen größeren Einfluss besitzt jedoch die Strömungsverteilung und nicht die absolute Wassermenge in Litern pro Sekunde.

Quer- und Rückströmungen wurden in Ottenau ebenfalls beobachtet, was an der Verlegung des Schrägrechens bei niedrigen Anströmgeschwindigkeiten lag. Im Labor wurde eine Rechenverlegung nicht untersucht.

In Ottenau wurde erwartungsgemäß eine Abnahme der Geschwindigkeit über die Tiefe ermittelt. Im Forschungslabor war dies nicht zu messen: Die Geschwindigkeiten blieben über die Tiefe der Versuchsrinne nahezu konstant. Dies hing ursächlich mit der geringen Wassertiefe von 60cm bis 80 cm und mit der glatten Sohle mit geringen Sohlrauheiten zusammen.

Die größten Strömungsinhomogenitäten entstanden in Ottenau wie auch im Forschungslabor direkt am Schrägrechen und nahmen mit größer werdendem Abstand vom Schrägrechen in Richtung Oberstrom ab; sie vereinhlichten sich in Richtung Oberstrom. Dennoch wurden an beiden Schrägrechen auch homogene Bereiche und strömungsberuhigte Bereiche festgestellt. Diese wurden durch Einbauten wie Leitblech, Sohlbalken, Rechenreinigungsarm und sonstige Verbauungen am Schrägrechen verursacht.

Beide Schrägrechen – im Forschungslabor und in Ottenau – waren unter hydraulischen Gesichtspunkten ähnlich und eigneten sich daher gut für situativ ähnliche ethohydraulische Untersuchungen mit Fischen.

## 8.3. Ethohydraulische Versuche mit Lachssmolts

Zur Untersuchung des Fischverhaltens an einem Schrägrechen wurden ethohydraulische Versuche mit Lachssmolts im Forschungslabor und am Wasserkraftwerk in Ottenau durchgeführt. Da die Labor setups der Anlage in

---

Ottenau nachempfunden wurden und eine hydraulische Ähnlichkeit der Strömungssignaturen beider Schrägrechen bestand, war eine Übertragbarkeit der Laborergebnisse auf den realen Schrägrechen möglich und die Erkenntnisse aus beiden Studien konnten verglichen werden.

Die verschiedenen Bewegungsmuster der Fische im Forschungslabor wurden mittels Kameras und Protokollen aufgezeichnet und anschließend intensiv analysiert. Die Feldstudien wurden mittels Telemetrie, also aktiven Sendern in den Lachssmolts und Antennen an entsprechenden Standorten vor dem Schrägrechen und in den Abwanderungskorridoren, durchgeführt. Dadurch konnte sowohl der Abwanderungskorridor der abwandernden Fische, als auch das Verhaltensmuster vor dem Schrägrechen ermittelt werden.

Im wasserbaulichen Forschungslabor wurden im April 2016 insgesamt 22 verschiedene Rechen setups mit 413 Lachssmolts beprobt, beobachtet, aufgezeichnet und analysiert (Kap. 6.1). Jedes Rechen setup wurde mehrmals durchgeführt. Folgende Erkenntnisse wurden gewonnen:

- Die Abwanderung wurde einerseits durch das **Verharren** der Fische in strömungsberuhigten Zonen und andererseits durch die Rechenkontakte verzögert. Beides wurde hauptsächlich bei hohen Anströmgeschwindigkeiten beobachtet. Nach einem Rechenkontakt mieden Lachssmolts die Rechenebene und den Bypass und verharrten längere Zeit in strömungsberuhigten Bereichen. Dies lag an der Wahrnehmung von Turbulenzen und Ablösungen in den Stabzwischenräumen am Schrägrechen (Kap. 2.3), wenn Fische diesen berührten.
- Für eine erfolgreiche Leitwirkung des Schrägrechens und eine Auffindbarkeit des Bypasses am unterstromigen Ende des Schrägrechens gab es zwei Verhaltensmuster, welche eine schnelle Abwanderung begünstigten:
  - **Gieren:** Schrägstellung der Fische mit anschließender Drift in Richtung Bypass
  - **Trampolinartiges Verhalten:** Mehrfaches Berühren des Rechens mit schnellen und kleinen Positionswechseln in Richtung Oberstrom und am Schrägrechen entlang zum Bypass

Das Gieren erfolgte vorwiegend bei Anström winkeln von  $45^\circ$  bis  $55^\circ$  und nahm mit steigender Anströmgeschwindigkeit ab. Bei hohen Anströmgeschwindigkeiten und großen Anström winkeln von  $70^\circ$  nahm das Gieren aufgrund der nur kleinen benötigten Körperschrägstellung der Fische und damit relativ gefahrlosen seitlich Anströmung auf den Fischkörper wieder zu. Der Stababstand spielte beim Gieren eine untergeordnete Rolle und kann auch größer als die derzeit postulierten 15 mm gewählt werden.

Das trampolinartige Verhalten nahm mit steigendem Anström winkel und steigender Anströmgeschwindigkeit ab und wurde grundsätzlich seltener beobachtet als das Gieren. Maßgeblich hierfür war jedoch der Stababstand, da das trampolinartige Verhalten mit steigendem Stababstand bis 30 mm zunahm.

Beide Verhaltensmuster begünstigten die Abwanderung und Leitwirkung am Schrägrechen und sind daher bei der Auslegung von Schrägrechen zu berücksichtigen. Das Gieren ist nur bei Schrägrechen zu beobachten, nicht bei konventionellen Rechen oder Flachrechen.

Die folgenden Kombinationen aus Anströmgeschwindigkeit und Anström winkel können für die Bemessung von Schrägrechen empfohlen werden:

- Anströmgeschwindigkeit von 0,4 m/s bis 0,5 m/s + Anström winkel von  $30^\circ$  bis  $55^\circ$
  - Anströmgeschwindigkeit von 0,7 m/s bis 0,8 m/s + Anström winkel von  $45^\circ$  bis  $55^\circ$
  - Wechselnde Anströmgeschwindigkeiten + Anström winkel von  $45^\circ$  bis  $55^\circ$
- Nach einer Meidungsreaktion am Bypass wurde häufig das sogenannte **stromaufwärts gerichtete Gieren** beobachtet. Es bezeichnet das Zurückschwimmen von Fischen entlang der Rechenebene zum oberstromigen Ende. Das stromaufwärts gerichtete Gieren wurde bei Anström winkeln von  $70^\circ$  am häufigsten beobachtet, da hier die Strömungsverhältnisse am Bypass heterogen waren und Fische bei einem großen Anström winkel nur eine schwache Körperdrehung ausführen mussten, um entlang der Rechenebene stromauf zu schwimmen. Da der Anström winkel von  $70^\circ$  das stromaufwärts gerichtete Gieren begünstigt, ist ein derart großer Anström winkel zu vermeiden.

- Nicht beobachtet wurde das **Impingement** (= Anpressen eines Fisches an den Schrägrechen ohne die Möglichkeit sich aus eigener Kraft selbst zu lösen) bis einschl. einer Anströmgeschwindigkeit von 0,8 m/s. Auch bei diesen hohen Anströmgeschwindigkeiten war dennoch eine Flucht in Richtung Oberstrom oder eine Abwanderung über den Bypass möglich.

- **Rechenpassagen** erfolgten selten am Schrägrechen. Sie waren vom Stababstand abhängig:

0% Rechenpassagen bei einem Stababstand von 10 mm

0,3% Rechenpassagen bei einem Stababstand von 18 mm

5% Rechenpassagen bei einem Stababstand von 30 mm

Die Prozentangaben beziehen sich auf den Rechen passierte Lachssmolts in Relation zu sämtlichen Lachssmolts in den Versuchen. Dies zeigt auf, dass Rechenpassagen an Schrägrechen seltener vorkommen als bei konventionellen Rechen.

- Erfolgreiche **Bypasspassagen** nahmen mit steigender Anströmgeschwindigkeit und damit mit zunehmenden Inhomogenitäten am Bypasseinlauf ab. Bei einem Anströmwinkel von 45° waren die meisten Bypasspassagen zu beobachten.
- Der Schrägrechen wirkt auf Lachssmolts nicht nur als mechanische Barriere, sondern auch als **Verhaltensbarriere**. Da ein Schrägrechen aufgrund seiner Ausrichtung und seiner hydraulischen Signatur andere Verhaltensweisen bei Fischen auslöst als konventionelle Rechen (Gieren, stromaufwärts gerichtetes Gieren), dürfen Ergebnisse aus Untersuchungen eines Rechentyps nicht auf einen anderen Rechentyp übertragen werden.

Die Feldstudien wurden mit 60 besenderten Lachssmolts im Mai 2016 am Schrägrechen in Ottenau durchgeführt (Kap. 6.2). Die gemittelte Anströmgeschwindigkeit betrug im Versuchszeitraum maximal 0,4 m/s. Aufgrund der heterogenen Anströmung lagen auch Bereiche mit bis zu 0,8 m/s am Schrägrechen vor. Folgende Beobachtungen wurden gemacht:

- Etwa zwei Drittel der Lachssmolts (63%) wanderten über die Fischabstiegsanlage ab, 25% über die daneben liegende Fischaufstiegsanlage. Sowohl der Wehrklappenüberfall am Bypass, als auch der Tauchbalken am Fischpass veranlassten die Fische nicht, diese Bereiche zu meiden.
- Das Streichwehr wurde ebenfalls, sobald es überströmt oder der Wehreinschnitt aufgefunden wurde, als Abwanderungskorridor genutzt (8%).
- Lediglich ein Lachssmolt wanderte über den 18 mm-Rechen ab, was einer **98%-igen Schutzrate** bzw. Effizienz des Schrägrechens Ottenau entspricht und somit eine positive Beurteilung der Rechenauslegung zulässt. Der Verbleib eines Lachssmolts ist unbekannt.
- Lachssmolts verhielten sich am Schrägrechen teilweise sondierend und teilweise stationär ohne große Suchbewegungen. Das Verharren in strömungsberuhigten Zonen, wie in den Laborstudien, war auch in Ottenau zu beobachten. Dabei ist festzustellen, dass dennoch jeder Lachssmolt letztendlich innerhalb von 13 Tagen abgewandert war. Meist betrug die Aufenthaltsdauer am Schrägrechen nur wenige Minuten bis Stunden, so dass der Schrägrechen nur eine geringe Verzögerung bei der Abwanderung darstellte.
- Die über den Fließquerschnitt gemittelte Anströmgeschwindigkeit von 0,4 m/s sowie Bereiche mit 0,8 m/s erlaubten den Lachssmolts ein sicheres Navigieren am Schrägrechen.

Einige Unterschiede zwischen den Versuchsaufbauten Labor/Ottenau konnten nicht vermieden werden. Beispielsweise wurde im Labor kein mit der Realität vergleichbar hoher Tauch- und Sohlbalken oder die Anordnung des Bypasses in Verlängerung des Rechens mittels Klappenüberfall realisiert. Dennoch kann aufgrund der vielen übereinstimmenden Aspekte von einer situativen Ähnlichkeit ausgegangen werden (Kap. 6.3) und erga-

---

ben daher hinsichtlich der Effizienz des Schrägrechens auch vergleichbare Ergebnisse und Befunde von Labor- und Feldstudien:

- Rechenpassagen wurden nahezu gleich häufig beobachtet (0% im Labor, 2% (ein Lachssmolt) in Ottenau);
- Abwanderungen über den Bypass (inkl. Fischaufstieg) lagen mit 87% im Labor und 88% in Ottenau gleich auf;
- Das Verharren in strömungsberuhigten Zonen wurde ebenfalls bei beiden Untersuchungskampagnen beobachtet, was zwar zu einer erfolgreichen, aber auch verzögerten Abwanderung führte.

Strömungsberuhigte Zonen an realen Anlagen können hingegen für lokale Zunahmen der Geschwindigkeiten am Schrägrechen beitragen, die teilweise sogar über den Sprintgeschwindigkeiten einzelner Fischarten liegen können. Der Strömungsgradient sollte daher in Richtung eines Bypasses nur langsam zunehmen, damit sich Fische an die Geschwindigkeitszunahmen gewöhnen können und keine Meidungsreaktionen in Richtung Oberstrom zeigen. Über die optimalen Geschwindigkeiten an Bypasseinläufen und in den Bypässen sei hier auf *Lehmann et al.* (2016) verwiesen, die sich maßgeblich mit der Auffindbarkeit und Akzeptanz von Bypässen beschäftigten.

Bei niedrigen Anströmgeschwindigkeiten können im Nahbereich der Rechenebene Rück- und Querströmungen entstehen, welche den Abwanderungsprozess der Fische behindern bzw. diesen maßgeblich stören oder unterbinden können. Schrägrechen sollten daher regelmäßig gereinigt werden. Verlandungen sind durch Messung der Pegeldifferenz genauer zu untersuchen, wenn nach dem Abreinigen die Pegeldifferenz nicht maßgeblich abnimmt. Im wasserbaulichen Forschungslabor unter einheitlichen und konstanten Verhältnissen ohne Verlandung und Tauchbalken waren diese Phänomene nicht beobachtbar.

#### 8.4. Ethohydraulische Versuche mit Aalen

Als ergänzende Untersuchung des Schrägrechens wurden im wasserbaulichen Forschungslabor und am WKW Ottenau ethohydraulische Studien mit Blankaalen durchgeführt (Kap. 7), welche ein anderes Verhalten zeigten als Lachssmolts (vgl. Kap. 5.3.2) (*Adam et al.*, 1999; *Adam et al.*, 2011; *Lehmann et al.*, 2016). Ergänzend wurden zusätzlich elektrifizierte Laborstudien durchgeführt, indem am Schrägrechen ein schwach elektrisches Feld aufgebaut wurde. Dieses elektrische Feld baute seine Feldstärke zwischen den Rechenstäben und Unterstrom des Schrägrechens auf, war also vor dem Schrägrechen und unmittelbar auf der Rechenebene von den Aalen nicht zu spüren. Zum Vergleich der elektrifizierten Laborstudien wurden zusätzlich Aalversuche an einer temporären Elektroscheuchanlage am Wasserkraftwerk Rotenfels an der Murg durchgeführt. Die Beobachtungsmethodik war die gleiche, wie bei den Lachssmoltversuchen mit Kamera und ad libitum-Protokollen im Forschungslabor und der Telemetrie im Gewässer.

Im Labor wurden 26 nicht elektrifizierte und 16 elektrifizierte Rechen setups mit insgesamt ca. 500 Aalen durchgeführt und das Verhalten der Aale beobachtet, analysiert, interpretiert und mit Strömungssignaturen verglichen (Kap. 7.1). Folgende Erkenntnisse wurden gewonnen:

- Eine verzögerte Abwanderung aufgrund eines **Verharrens** der Probanden in strömungsberuhigten Zonen wurde von einer Elektrifizierung des Schrägrechens nicht beeinflusst. Das Verharren wurde jedoch bei steigender Anströmgeschwindigkeit ausgeprägter und wirkte sich dann negativ auf den Zeitfaktor bei der Abwanderung aus.
- Ein **Impingement** wurde lediglich bei 3 von 441 Aalen (0,7%) beobachtet und ist damit vernachlässigbar – bei Anströmgeschwindigkeiten bis einschließlich 0,8 m/s. Eine Begrenzung der Anströmgeschwindigkeit auf 0,5 m/s ist daher bei Aalen nicht notwendig. Beim Vorhandensein eines elektrischen Felds waren keine Impingements zu beobachten. (Kurzzeitige) Aufenthalte der Aale am Schrägrechen oder in den Stabzwischenräumen des Schrägrechens wurden durch eine Elektrifizierung erheblich verkürzt bzw. vermieden. Daher sind schwache elektrische Impul-

---

se geeignet, am Schrägrechen verharrende Aale auf- und wegzuscheuchen, um damit das Verletzungs- und Tötungsrisiko durch einen anfahrens Rechenreinigungsarm zu reduzieren oder zu vermeiden.

- Bei einer passiven oder einer aktiven Drift sowie bei einer aktiven Abwanderung bestimmte häufig der Zufall, ob der Bypass aufgefunden wird. Ebenso verhielt es sich mit den Umkehrreaktionen und ob daraus eine der seltenen Abwanderungen entlang des Schrägrechens ausgelöst wurde. Darauf hatte die Elektrifizierung keinen Einfluss. Der Schrägrechen besitzt bei Aalen keine nennenswerte **Leitwirkung**.
- Bei Aalen wurde ein **stromaufwärts gerichtetes Suchverhalten** beobachtet, ähnlich dem stromaufwärts gerichteten Gieren bei Lachssmolts. Dieses Suchverhalten wurde jedoch begleitet mit regelmäßigen Rechenkontakten während des Entlangschwimmens an der Rechenebene. Das Bewegungsmuster war seltener zu beobachten als bei Lachssmolts. Bei einer Kombination mit einem elektrischen Feld konnte diese Verhaltensweise nahezu nicht mehr beobachtet werden, da die Aale den Schrägrechen und damit den elektrischen Reiz beim stromaufwärts gerichteten Suchverhalten mieden und andere Wege Richtung Oberstrom aufsuchten.
- Das **Schwimmverhalten** der Aale vor dem Rechen war bei niedrigen Anströmgeschwindigkeiten (0,4 m/s bis 0,5 m/s) langsamer und kontrollierter, als bei höheren Anströmgeschwindigkeiten (0,7 m/s bis 0,8 m/s), welche ein gestresstes Verhalten auslösten. Bei einer Elektrifizierung wurde dieser Effekt noch verstärkt. Das gestresste Verhalten hatte aber keinen Einfluss auf die Anzahl der Abwanderungen.
- Abweichend zu *Adam et al. (1999)* und *Travade et al. (2007)* und deren Untersuchungen mit Aalen an konventionellen Rechen wurden bei den hier durchgeführten ethohydraulischen Versuchen an Schrägrechen keine **Rechenpassagen** bei Stababständen von 10 mm und 18 mm beobachtet. Bei Stababständen von 30 mm wanderten 15% aller Probanden durch den Schrägrechen. Wurde der Schrägrechen elektrifiziert, wanderte lediglich nur noch 1% der Aale durch den Rechen. Schrägrechen können damit größere Stababstände aufweisen, als konventionelle Rechen bei gleich hoher Schutzrate bzw. Effizienz.
- Auch bei hohen Anströmgeschwindigkeiten erfolgten viele **Bypasspassagen** und häuften sich mit steigender Anzahl von Rechenkontakten. Dies lässt auf ein lebhaftes Sondieren der Aale am Schrägrechen, das zu einem Auffinden des Abwanderungskorridors führte, schließen. Eine Leitwirkung des Schrägrechens auf die Abwanderung von Aalen wurde hingegen so gut wie nie beobachtet.
- Im Gegensatz zu Lachssmolts wurde bei den Aalen ein gewisser **Lerneffekt** beobachtet, was ihre Verhaltensweisen anbetrifft, obwohl die Aale nach jedem Setup min. ein Tag pausieren konnten und am Ende jeder Woche in die Freiheit entlassen wurden. Sie nahmen den Schrägrechen im Laufe des Versuchs bewusst wahr und mieden nach und nach einen Kontakt mit ihm.

Im Rahmen der Feldversuche am Schrägrechen Ottenau wurden 124 besenderte Schokker-Aale eingesetzt. Die Untersuchungskampagne startete am 09.11.2016 und wurde am 04.03.2017 beendet (Kap. 7.2). Aufgrund der sehr niedrigen Abflüsse an der Murg im Winter 2016/2017 wanderte nur ein Teil der Aale im Versuchszeitraum ab (68 ale), die verbliebenen offenbar erst später, nach Ende der Batterienlebenszeit im Februar/März 2017. Insgesamt konnten in Ottenau Signale von 73 Aalen am Schrägrechen detektiert und ausgewertet werden:

- Mit 52% wanderte die Mehrzahl der Aale über die Abwanderungskorridore Fischabstiegsanlage und Fischaufstiegsanlage ab.
- 41% aller Aale nutzten das überströmte Streichwehr bei Tagen mit Wehrüberfall zur Abwanderung. Streichwehre können daher in ein Abwanderungskonzept einbezogen werden.
- Der Verbleib von 5 Aalen ist unbekannt (7%), nachdem deren Signale am Rechendetektiert wurden.
- Sowohl Fischabstiegsklappe, als auch Streichwehr erforderten für eine Passage ein Schwimmen nahe der Wasseroberfläche – Aale hielten sich daher nicht ausschließlich an der Sohle auf.

- Kein Aal wanderte über den 18mm-Schrägrechen mit 44° Anströmung und einer gemittelten Anströmgeschwindigkeit von bis 0,5 m/s ab, was einer **100%-igen Schutzrate** gegenüber Blankaalen entspricht.
- Aufgrund der heterogenen Strömungsverteilung am Schrägrechen Ottenau hielten sich Aale nicht nur in Bereichen mit einer Strömungsgeschwindigkeit von bis zu 0,5 m/s auf, sondern auch in Bereichen höherer Anströmgeschwindigkeiten (über 1,0 m/s), welche trotzdem ein sicheres Navigieren der Aale im Nahbereich des Schrägrechens zuließen.
- Die Mehrheit der Aale mit ausreichend detektierten Signalen wanderte innerhalb von 20 Minuten nach dem Auftreffen auf den Schrägrechen ab. Die angebotenen Abwanderungskorridore werden demnach von Aalen schnell aufgefunden.
- Es gab wenige Aale, welche nach einem Sondieren am Schrägrechen doch am Streichwehr abwanderten. Dies zeigte jedoch auf, dass alternative Abwanderungskorridore auch außerhalb der unmittelbaren Anströmbereiche des Bypasses bei entsprechenden Abflüssen aufgefunden werden.

Beide Versuchskampagnen zeigten, dass sich die Laborversuche mit denen in Ottenau ähnelten, was folgende Befunde aufzeigen:

- Aale halten sich nicht nur sohnah auf, sondern suchten auch oberflächennahe Öffnungen auf, um diese zur Abwanderung zu nutzen.
- Lange Verharrenszeiten können zu einer erfolgreichen jedoch verzögerten Abwanderung führen.
- Aale ließen sich kaum durch einen Schrägrechen in Richtung eines Bypasses leiten. Im Forschungslabor war die Abwanderung über den Bypass vom Zufall bestimmt. In Ottenau wurde das Streichwehr als konkurrierender Abwanderungskorridor häufiger zu Abwanderung genutzt, als die Fischabstiegsanlage.
- Die Schutzrate eines 18mm-Schrägrechens beträgt in Ottenau sowie bei den vergleichbaren Laborstudien mit Blankaalen 100%.

Zusätzlich zur Untersuchung des Schrägrechens in Ottenau wurde am Unterliegerkraftwerk in Rotenfels eine temporäre Elektroscheuchanlage errichtet, welche Ähnlichkeit mit bereits vorangegangenen Elektroscheuchversuchen der EnBW AG hatte. Von den 68 in Ottenau abgewanderten und besenderten Aalen wurden in Rotenfels lediglich 46 detektiert, der Rest verharrte in der 3 km langen Gewässerstrecke dazwischen (Kap. 7.4). Der Verbleib von 4 Aalen ist unbekannt, nachdem deren Signale in Rotenfels detektiert wurden; sie schwammen wahrscheinlich in Richtung Oberstrom zurück und verharrten dort. Anhand der 42 verbliebenen Aale konnten folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

- Die Elektroscheuchanlage besitzt eine Effizienz bzw. Blockadewirkung von 59% und liegt damit niedriger als die des Schrägrechens in Ottenau mit 100%. Damit wanderten 41% aller Aale durch die Elektroscheuchanlage in Richtung Kraftwerk ab.
- Mit 33% wurde – wie in Ottenau (41%) – das Streichwehr als Abwanderungskorridor genutzt. Es wird vermutet, dass die Aale im Zuge einer Abflusswelle an beiden Versuchsanlagen vorbei abwanderten.
- Die Installation einer Elektroscheuchanlage in dieser technischen Ausführung ist bei Aalvorkommen nicht ausreichend wirksam und sollte zur Erhöhung der Schutzrate immer mit einer weiteren (mechanischen) Barriere kombiniert werden, um die Gesamteffizienz des Fischschutzsystems zu erhöhen.

## 8.5. Empfehlungen

Anhand der vorliegenden Untersuchungserkenntnisse für Rechenverluste und Strömungssignaturen an Schrägrechen sowie der ethohydraulischen Erkenntnisse, welche im wasserbaulichen Forschungslabor und an zwei Wasserkraftanlagen ermittelt wurden, können unter Berücksichtigung der verwendeten Versuchstiere (Lachss-

---

molts und Blankaale) folgende Empfehlungen für die Bemessung und Planung von Schrägrechen aufgestellt werden:

- Wichtig für die Bemessung sind nicht nur die reinen Stababstände und Körperdicken der Fische, sondern auch deren Verhalten an Schrägrechen sowie an Hybridrechen. Bestehende Grenzwerte, welche auf der Körpergröße der Zielfischarten beruhen, können überschritten werden, wenn dazu ethohydraulische Erkenntnisse vorliegen.
- Das Verhalten an einer mechanischen Barriere aufgrund hydraulischer und geometrischer Randbedingungen, z. B. Gieren oder trampolinartiges Verhalten bei Lachssmolts, ist ausschlaggebend für eine erfolgreiche Abwanderung.
- Grundsätzlich ist für die Abwanderung von Fischen nicht nur eine ausreichende Schutzwirkung des Rechensystems erforderlich, es müssen auch die Auffindbarkeit, die Akzeptanz und die Passierbarkeit des angebotenen Bypasses vorhanden sein. Funktioniert eine dieser Komponenten nicht, so muss das Gesamtsystem des Fischabstiegs in Frage gestellt und damit überarbeitet werden.
- Die Geschwindigkeitszerlegung in eine normale und eine tangentielle Strömungskraft ist weder hydraulisch, rechnerisch, ethohydraulisch noch experimentell zu belegen und damit für die Bemessung des Schrägrechens als Leiteinrichtung nicht relevant.
- Schrägrechen für Lachssmolts und Blankaale können innerhalb folgender Bemessungswerte ausgelegt werden: Stababstand 18mm, Anströmwinkel zwischen 30° und 55° und eine Anströmgeschwindigkeit von 0,8 m/s oder kleiner für eine nahezu 100%-ige Schutzwirkung. Verschiedene Verhaltensmuster, welche eine Abwanderung initiieren, nehmen bei einem Anströmwinkel von 70° ab. Des Weiteren gieren potamodrome Arten bei einem Anströmwinkel von 70° nicht (*Lehmann et al.*, 2016), weshalb dieser Anströmwinkel für eine gesamtheitliche Betrachtung mehrerer Fischarten nicht empfohlen wird.
- Stababstände bei Schrägrechen können größer sein, als bei konventionellen Rechen oder Flachrechen. Lachssmolts lassen sich auch bei größeren Stababständen bis zu 30 mm leiten.
- Schwach elektrifizierte Schrägrechen können die Aalmortalität, welche durch die Ausgestaltung des Rechens und der RRM beeinflusst wird, erheblich verringern.
- Hybridrechen haben mit einem Stababstand von 30 mm und einer Elektrifizierung eine sehr gute Effizienz von 99% gegenüber den getesteten Blankaalen. Für Wasserkraftwerke mit einem Abfluss größer als 50 m<sup>3</sup>/s könnten diese Hybridrechen damit eine Lösung darstellen: Eine Kombination aus mechanischer Barriere (Schrägrechen) und aus einer Verhaltensbarriere (Elektrifizierung). Es könnten somit betriebliche Belange wie ein großer Stababstand zur Vermeidung eines großen Getreibselanfalls sowie fischökologische Belange hinsichtlich eines ausreichenden Fischschutzes vereint werden.
- Eine Schrägrechenbemessung muss immer standortspezifisch durchgeführt und lokale und bauliche Zwänge berücksichtigt werden.
- Eine zu schnelle Geschwindigkeitszunahme in Richtung eines Bypasses ist zu vermeiden, da diese zu Meidungsreaktionen bei Fischen führen kann.
- Regelmäßige und kurze Reinigungszyklen (kleine Pegeldifferenz Ober- und Unterstrom des Schrägrechens) sollten leittechnisch hinterlegt werden, um eine größere Verlegung zu vermeiden, wodurch homogene Strömungsbereiche erzeugt werden.
- Strömungsgleichrichter können standortspezifisch vorgesehen werden, um Strömungslinien entsprechend so umzuleiten, damit diese die Rechenebene über die gesamte Länge einheitlich schneiden. So finden Fische möglichst homogene Strömungssignaturen am Schrägrechen vor. Meidungsreaktionen könnten so verringert werden.

- 
- Die Empfehlungen hinsichtlich der zulässigen Anströmverhältnisse für die Schrägrechenbemessung gelten auch für Fische mit vergleichbaren Schwimmgeschwindigkeiten bzw. Körpergrößen.

Mittlerweile werden Schrägrechen von vielen Stahlwasserbauunternehmen hergestellt, so dass ein breites Spektrum von Anbietern den Markt mit günstigen und oftmals selbst entwickelten Rechenlösungen bedient. Das Schrägrechensystem hat sich auch unter betrieblichen Gesichtspunkten bewährt, da der manuelle Reinigungsaufwand, die damit verbundenen Betriebskosten vergleichsweise gering ausfallen und die Entsorgungskosten aufgrund der Geschwemmselweitergabe ins Unterwasser reduziert werden konnten.

## 8.6. Ausblick und weiterer Forschungsbedarf

Für die Auslegung und Planung von Schrägrechen konnten im Rahmen dieser Forschungsarbeit viele offene Punkte geklärt und Hilfestellungen für die Bemessung gegeben werden. Dennoch blieben einige Fragen zum Schrägrechen offen, welche weiteren Forschungsbedarf erforderlich machen:

- Rechenverlustermittlung von weiteren Stabprofilen, wie bspw. Profile mit abgerundeter Vorderkante oder Fischbauchprofil, da diese mehr und mehr Verwendung bei Wasserkraftanlagen finden. Hierzu sollten Rechenverlustdiagramme experimentell im Labor ermittelt oder eine Rechenverlustformel für Schrägrechen aufgestellt werden.
- Ermittlung von Rechenverlusten bei Geschwindigkeiten größer als 1,0 m/s, da bei vielen Bestandsanlagen sowie größeren Wasserkraftanlagen mit Ausbauwassermengen über 100 m<sup>3</sup>/s häufig hohe Anströmgeschwindigkeiten vorhanden sind.
- Untersuchung der Auswirkung der Verlegung/Verlegungsarten auf die Rechenverluste und auf die Strömungssignaturen, da bisher nur Betrachtungen ohne Verlegung durchgeführt wurden.
- Die Entwicklung eines stabilen, standsicheren Schrägrechens mit geringem Verbauungsgrad, da dieser maßgeblich die Rechenverluste beeinflusst.
- Die Durchführung von ethohydraulischen Versuchen mit Aalen an Schrägrechen mit abgerundeten Stabprofilen an der Vorderkante: Aale verharren häufig längere Zeit am Schrägrechen mit Kontakt zum Rechen, daher sollte der Einfluss der Stabprofile auf die Verharrungsdauer untersucht werden.
- Die Untersuchung des Aalverhaltens an Schrägrechen bei hohen Geschwindigkeiten ab 0,7 m/s bei niedrigeren Wassertemperaturen von ca. 10°C. Bei *Adam et al.* (1999) wird ein Impingement bei Aalen und niedrigen Temperaturen ab etwa 0,5 m/s beobachtet, bei den hier durchgeführten Versuchen mit 18°C bis 20°C Wassertemperatur jedoch bis einschl. 0,8 m/s nicht. Aale wandern auch bei hohen Strömungsbedingungen und niedrigen Umgebungstemperaturen bis zur Sargassosee, was auf einen eher kleinen Einfluss der Temperatur schließen lässt.
- Eine Untersuchung der Auswirkung von Wasserqualität und Temperatur auf die Übertragbarkeit von Feld- und Laborstudien: Im Labor wurde nahezu Trinkwasserqualität mit 18°C bis 20°C verwendet, im Feld lag die Temperatur der Murg bei ca. 10°C.
- Die Durchführung von ethohydraulischen Studien mit weiteren Fischarten, z. B. FFH-relevante Kleinfischarten wie Groppe oder Bachneunauge, an 18mm-Schrägrechen könnte die Belastbarkeit der in dieser Forschungsarbeit gemachten Befunde erhöhen. Auch der Einfluss der Elektrifizierung eines Schrägrechens auf weitere Fischarten sollte untersucht werden, da die bisherigen Untersuchungen sehr gute Ergebnisse im Labor zeigten und den Ausschlag für den Bau solcher Pilotanlagen geben könnten.
- Die Elektroscheuchanlage könnte für weitere Laboruntersuchungen mit unterschiedlichen Spannungen und elektrischen Feldern modifiziert werden.

- 
- Für tiefe und lange Schrägrechen an Wasserkraftwerken mit Ausbauabflüssen größer  $90 \text{ m}^3/\text{s}$  bis  $100 \text{ m}^3/\text{s}$  müssen ggf. zwei RRM vorgesehen werden, welche jeweils einen Teil des Schrägrechens abreinigen. Die Möglichkeit einer Weitergabe von Geschwemmsel und Treibgut von RRM 1 zu RRM 2 wäre zu untersuchen und ob Quer- und Rückströmungen dies überhaupt zulassen.
  - Aufgrund der guten Laborergebnisse eines elektrifizierten 30mm-Schrägrechens ist dieser an einer Pilotanlage zu installieren und mittels geeignetem Monitoringprogramm zu untersuchen.

---

---

## Abbildungsverzeichnis

---

Abb. 1: Einwirkungen auf die Reproduktion von Fischpopulationen ( <i>Quelle: 4.0 Ecologic Institut &amp; IGF Jena / FLUSS im Auftrag des Forum Fischschutz, 2015</i> ). _____	2
Abb. 2: Aufbau der Methodik in vorliegender Forschungsarbeit. _____	4
Abb. 3: Systemskizze eines Schrägrechens in 3D-Draufsicht (links) und in 3D-Schrägsicht (rechts) mit Definition des variablen horizontalen Anströmwinkels $\delta$ und der Anströmgeschwindigkeit $v_a$ . _____	7
Abb. 4: Verschiedene Anströmsituationen eines 45°-Schrägrechens mit unterschiedlichen Anordnungen. Schrägrechen mit Bypass und Wehr im Kanal (links), Schrägrechen mit Bypass im Kanal (Mitte), Schrägrechen im Kanal mit seitlichem Bypass (rechts) ( <i>Quelle: Hassinger, 2016</i> ). _____	7
Abb. 5: Neu eingebauter Schrägrechen am WKW Künzelsau mit Tauchbalken und konstruktiv bedingter kleiner Sohlschwelle (links). Planausschnitt (Querschnitt) der gleichen Anlage mit Tauchbalken (obere grüne Schraffur) und kleinem Sohlbalken mit 19,2 cm Höhe (untere grüne Schraffur) (rechts) ( <i>Quelle rechts: Jank GmbH im Auftrag der EnBW, 2015</i> ). _____	8
Abb. 6: Geschwemmselbalken aus Holz am WKW Siglingen (links) und begehbarer und höhenverstellbarer Stahlgeschwemmselbalken am Niederdruckwerk Forbach (rechts). _____	8
Abb. 7: Schrägrechen am WKW Künzelsau mit 42°-Anströmwinkel und 15 mm Stababstand. Links mit Blickrichtung entgegen der Leitrichtung/Reinigungsrichtung und rechts im fertig gebauten aber noch nicht gefluteten Zustand mit Stahlschütz im Oberwasser. _____	9
Abb. 8: Schrägrechen am WKW Ottenau mit 44°-Anströmwinkel und 18 mm Stababstand während der Bauzeit in Blickrichtung Unterwasser (links) und in Blickrichtung Oberwasser (rechts) ( <i>Quelle: EnBW, 2012</i> ). _____	9
Abb. 9: Querschnittsfläche A (rot) im Kanal bzw. in der Versuchsrinne vor einem Schrägrechen. _____	10
Abb. 10: Energiehöhenlinie im Störungsbereich eines Rechens mit dem Wasserspiegelunterschied $\Delta h$ ober- und unterwasserseitig des Rechens ( <i>Quelle: verändert nach Kirschmer, 1925</i> ). _____	12
Abb. 11: Normale und tangentielle Komponenten der Anströmgeschwindigkeit bei einem Anströmwinkel $\delta$ . _____	14
Abb. 12: Fadenharfe am Schrägrechen im Labor der TU Darmstadt (links) und unterwasserseitige Wollfäden am Schrägrechen im Labor des KIT ( <i>Quelle rechts: Nestmann, 2010</i> ). _____	15
Abb. 13: Lachssmolt vor einem Schrägrechen, auf dessen Luvseite Überdrücke wirken und auf seine Leeseite Unterdrücke. _____	15
Abb. 14: Links Vertikalrechenquerschnitt mit dem zur Sohle geneigten Winkel $\alpha$ ( <i>Quelle: verändert nach Giesecke, 2009</i> ). Rechts Foto des Vertikalstabrechens am WKW Ottenau vor den beiden Maschineneinläufen. _____	16
Abb. 15: Flachrechen mit dem vertikalen Anströmwinkel $\alpha$ . _____	17
Abb. 16: Flachrechen mit einem vertikalen Anströmwinkel von 45° und einem Stababstand von 20 mm am WKW Esslingen mit oben angeordneter Fischabstiegs-/Sammelrinne. _____	17
Abb. 17: Links Sammelrinne nach Fertigstellung am WKW Esslingen mit Möglichkeit zur Installation einer Spülpumpe (Rohrleitung mit Blindflansch am hinten liegenden Ende der Spülrinne). Rechts verstopfte Sammelrinne mit Ästen und Müll am WKW Künzelsau. _____	18
Abb. 18: Links Schemaskizze der Anordnung von Louver und Bar Rack ( <i>Quelle: Kriewitz-Byun, 2014</i> ). Rechts sohlnaher Ausschnitt eines Louvers in der Versuchsrinne bei ethohydraulischen Versuchen ( <i>Quelle: VAW, ETH Zürich, 2017</i> ). _____	18
Abb. 19: Schema eines Rechenquerschnitts mit Stromlinien durch die Stabzwischenräume mit den drei Zonen, welche für die Turbulenzbildung verantwortlich sind. _____	20
Abb. 20: Geometrische Parameter am Versuchsrechen mit Stababstand $s$ , Rechenstabdicke $d$ und der Rechenfeldlänge (Letztere hängt von den Modulen des Laborrechens ab). _____	21
Abb. 21: Zunahme der energiezehrenden Wirbel durch Ablösungen zwischen und am Ende der Stäbe in Abhängigkeit des Stababstands ( <i>Quelle: Meusburger, 2002</i> ). _____	22
Abb. 22: Links Stababstand am Schrägrechen Ottenau und in der Mitte Übersichtsbild des Schrägrechens am WKW Ottenau ( <i>Quelle: EnBW, 2012</i> ). Rechts Stababstand des Schrägrechens im wasserbaulichen Forschungslabor Darmstadt mit 18 mm. _____	22
Abb. 23: Geschwemmsel-, Laub- und Geästandrang am WKW Ladenburg am Neckar (links) und am WKW Mühlhausen an der Enz (Mitte) sowie am Schrägrechen des WKW Künzelsau im Frühjahr mit großen Holzstämmen und Zivilisationsmüll (rechts). _____	23

Abb. 24: Links Stabprofile, Beiwerte und Abmessungen nach <i>Kirschmer (1925)</i> ( <i>Quelle: verändert nach Giesecke verändert, 2009</i> ). Rechts von Fa. Jank entwickeltes Stabprofil, Angaben in mm ( <i>Quelle: Firma Jank per E-Mail, 2017</i> ).	24
Abb. 25: Oppermann-Stabprofil, <i>Quelle links: Fa. Klawa (Homepage 2017)</i> , <i>Quelle rechts: Schmitt (2015)</i> .	24
Abb. 26: Links Rechenfelder des Schrägrechens am WKW Ottenau mit Blick auf die uw-seitige Rechenebene ( <i>Quelle: EnBW, 2012</i> ). Rechts Rechenfelder des Schrägrechens im wasserbaulichen Forschungslabor.	25
Abb. 27: Beispiel einer inhomogenen Anströmung eines Schrägrechens anhand einer Strömungssignatur. Die Signatur stellt die Verteilung der Strömungsgeschwindigkeiten vor dem Rechen in einer Tiefe von 30 cm unterhalb des Wasserspiegels im Grundriss dar. Dargestellt sind die Strömungsverteilungen an der Rechenebene bis zu einer Entfernung von 1,15 m Richtung Oberstrom in der Draufsicht. Der Bypass liegt außerhalb des dargestellten Bereichs auf der linken Seite. Die Stromlinien zeigen die Strömungsrichtungen mit ihren Pfeilen an, die Farbunterscheidung die Höhe der einzelnen Geschwindigkeiten ( <i>Quelle: verändert nach Schwab, 2016</i> ).	27
Abb. 28: Definition des Anströmwinkels $\delta$ und des Komplementärwinkels $\delta'$ nach <i>Meusburger (Quelle: Meusburger, 2002; verändert von Glock 2017)</i> .	27
Abb. 29: Verlegungstypen 1-16 und Verlegungsgrade der Gruppe 1 und 2 ( <i>Quelle: verändert nach Meusburger, 2002</i> ).	28
Abb. 30: Gesamtverlustbeiwerte für verschiedene Stabprofile in Abhängigkeit des Stababstands ( <i>Quelle: Hübner et al., 2011</i> ).	29
Abb. 31: Zunahme der Strömungsablösungen und der Verluste an den Rechenstäben mit Abnahme des horizontalen Anströmwinkels $\delta$ ( <i>Quelle: verändert nach Göde et al., 2002</i> ).	31
Abb. 32: Stabformen nach <i>Kirschmer (1925)</i> , welche bei <i>Spangler</i> untersucht wurden ( <i>Quelle: Meusburger, 2002</i> ).	32
Abb. 33: Diagramme zur Bestimmung des Verlustbeiwertes $\zeta$ in Abhängigkeit des Durchflussverhältnisses $\epsilon$ und des Anströmwinkels $\delta$ nach <i>Spangler</i> . Schaubild links zeigt lediglich die Verlustbeiwerte für das Rechteckprofil (a), die anderen drei Diagramme führen alle Stabformen auf für drei verschiedene Durchflussverhältnisse $\epsilon$ ( <i>Quelle: verändert nach Spangler, 1928</i> ).	32
Abb. 34: Vergleich der Rechenkonfigurationen. a) Anströmung eines Rechens mit vertikalen Stäben mit Komplementärwinkel $\delta'$ nach <i>Meusburger (2002)</i> und b) Anströmung eines Bar Racks nach <i>Raynal (2013)</i> ( <i>Quelle: verändert nach Raynal, 2013</i> ).	35
Abb. 35: Untersuchte Stabprofile bei <i>Raynal (2013)</i> : oben Rechteckprofil und unten abgerundetes Profil, – jeweils mit der Stabdicke $d$ und der Anströmgeschwindigkeit $v_a$ ( <i>Quelle: verändert nach Raynal et al. 2013a</i> ).	36
Abb. 36: Grundrisssskizze des Stabwinkels $\beta$ und des horizontalen Anströmwinkels $\delta$ bei <i>Kriewitz-Byun (Quelle: verändert nach Kriewitz-Byun, 2014)</i> .	37
Abb. 37: Verlusthöhen der Rechenkonfiguration APA 1.1 für die Anströmwinkel $30^\circ$ , $50^\circ$ und $90^\circ$	41
Abb. 38: Verlusthöhen der Rechenkonfiguration APA 1.2 für die Anströmwinkel $30^\circ$ , $50^\circ$ und $90^\circ$	41
Abb. 39: Verlusthöhen der Rechenkonfiguration SAB 4.1 für die Anströmwinkel $30^\circ$ , $50^\circ$ und $90^\circ$	42
Abb. 40: Verlusthöhen der Rechenkonfiguration SAB 4.2 für die Anströmwinkel $30^\circ$ , $50^\circ$ und $90^\circ$	42
Abb. 41: Rechenverluste bei verschiedenen Anströmgeschwindigkeiten am Schrägrechen in Ottenau.	44
Abb. 42: Abflussverhalten vor der Messkampagne mit einem Hochwasser am 01.12.2015 und Normalabflüsse während der Messkampagne am 07.-10.12.2015 ( <i>Quelle: LUBW, Hochwasservorhersagezentrale Baden-Württemberg, 2015</i> ).	45
Abb. 43: Übersichtsbild der Versuchsrinne im wasserbaulichen Forschungslabor der TU Darmstadt mit dem Messwagen für die hydrometrischen Aufnahmen (in Ruheposition).	46
Abb. 44: Systemskizze des modularen Rechensystems für die Laborrinne (links) mit einem Anströmwinkel von $30^\circ$ ( <i>Quelle: Steinhardt, 2015</i> ). Ansicht des eingebauten Schrägrechens mit einem Anströmwinkel von $30^\circ$ mit Blick in Fließrichtung (rechts).	46
Abb. 45: Rechenstablänge des Laborrechens.	47
Abb. 46: Umlenkverluste, welche durch den Bypass hervorgerufen wurden ( <i>Quelle: Glock, 2017</i> ).	49
Abb. 47: Änderungen des Strömungsbildes am Schrägrechen. Links Umlenkungen und Aufstau an den Pfeilern (Rechensetup $18\text{mm}/45^\circ/0,7\text{m/s}$ ). In der Mitte Turbulenzen und Ablösungen unterwasserseitig des Rechens (Rechensetup $30\text{mm}/55^\circ/0,8\text{m/s}$ ). Rechts Gefälle des Wasserspiegels unterwasserseitig des Rechens (Rechensetup $10\text{mm}/70^\circ/0,7\text{m/s}$ ) ( <i>Quelle rechts: verändert nach Glock, 2017</i> ).	49

Abb. 48: Rechenverlustdiagramme für die vier untersuchten Anströmwinkel in Abhängigkeit von Anströmgeschwindigkeit und Stababstand ( <i>Quelle: Glock, 2017</i> ). _____	50
Abb. 49: Strömungssignaturen im Grundriss mit Anströmgeschwindigkeiten $v_a$ [m/s] ober- und unterwasserseitig von schräg angeströmten Rechen bei unterschiedlichen Anströmwinkeln $\delta$ nach <i>Raynal</i> ( <i>Quelle: verändert nach Raynal et al., 2013a</i> ). _____	51
Abb. 50: Rechenverlustdiagramme für die drei untersuchten Stabstände (10 mm, 18 mm, 30 mm) in Abhängigkeit von Anströmgeschwindigkeit und Anströmwinkel ( <i>Quelle: Glock, 2017</i> ). _____	52
Abb. 51: Schräganströmung von Rechen mit vertikalen Stäben mit Strömungsumlenkung im Grundriss ( <i>Quelle: Glock, 2017</i> ). _____	53
Abb. 52: Alternativrechen mit filigranen Rechenstabdicken (hier wurde die vertikale Ausrichtung fotografiert). _____	55
Abb. 53: Rechenverluste des Alternativrechens im Vergleich zu zwei Setups des vorher untersuchten Schrägrechens. <i>Quelle: verändert nach Glock (2017)</i> . _____	55
Abb. 54: Links Empfängerausrichtung des Nortek Vectrino und die Ausrichtung des Koordinatensystems ( <i>Quelle: BAW verändert nach Nortek, 2014</i> ). Rechts Nortek Vectrino im Einsatz vor dem Schrägrechen im Forschungslabor ( <i>Quelle: Schwab, 2016</i> ). _____	57
Abb. 55: Raster der hydrometrischen Messungen am Schrägrechen im wasserbaulichen Forschungslabor mit dem festgelegten Koordinatensystem nach <i>Schwab</i> (nicht maßstäblich). Draufsicht auf die Versuchsrinne a), Messebenen in z-Richtung bei Anströmgeschwindigkeiten von 0,4 m/s bis 0,7 m/s in b) und bei einer Geschwindigkeit von 0,8 m/s bei c). ( <i>Quelle: verändert nach Schwab, 2016</i> ). _____	58
Abb. 56: Raster der hydrometrischen Messungen am Schrägrechen im wasserbaulichen Forschungslabor nach <i>Glock</i> . Rot dargestellt ist jeweils das Koordinatensystem des ADV-Sensors. Die Messraster in Abhängigkeit des Anströmwinkels sind in a) bis c) abgebildet, d) zeigt die drei Messebenen in z-Richtung, welche für alle Anströmwinkel gelten ( <i>Quelle: Glock, 2017</i> ). _____	59
Abb. 57: Geschwindigkeitsprofile der aus den drei Strömungskomponenten x, y, z ermittelte resultierende Geschwindigkeit $v_{xyz}$ bei Einstellung mittlerer Anströmgeschwindigkeiten von $v_a = 0,4$ m/s bis 0,8 m/s an einem Schrägrechen mit 45° Anströmwinkel und 18 mm Stababstand. Dargestellt ist der gesamte Messquerschnitt über die Wassertiefe z. Die mittlere Anströmgeschwindigkeit $v_a = 0,4$ m/s zeigt z. B. tatsächlich gemessene Werte in einer Bandbreite von 0,3 m/s bis 0,52 m/s ( <i>Quelle: verändert nach Schwab, 2016</i> ). _____	61
Abb. 58: Darstellung der parallel zum Schrägrechen angefertigten Tiefenschnitte ( <i>Quelle: verändert nach Schwab, 2016</i> ). _____	61
Abb. 59: Tiefendiagramme der Strömungsfelder der fünf Schnitte parallel zur Rechenebene eines Schrägrechens mit 45° Anströmwinkel und 18 mm Stababstand bei einer Anströmgeschwindigkeit von $v_a = 0,4$ m/s. Blick in Fließrichtung/Unterwasser, links ist der Bypass angeordnet von $y = 0$ cm bis $y = 20$ cm ( <i>Quelle: verändert nach Schwab, 2016</i> ). _____	62
Abb. 60: Tiefendiagramme der Strömungsfelder des Schnittes 3 in 40 cm Entfernung zur Rechenebene eines Schrägrechens mit 45° Anströmwinkel und 18 mm Stababstand. Die Anströmgeschwindigkeiten variieren von 0,4 m/s bis 0,8 m/s. Blick in Fließrichtung/Unterwasser, links ist der Bypass angeordnet von $y = 0$ cm bis $y = 20$ cm ( <i>Quelle: verändert nach Schwab, 2016</i> ). _____	62
Abb. 61: 2D-Strömungssignaturen in der Draufsicht. Dargestellt ist der Tiefenschnitt bei $z = 10$ cm (= 10 cm unterhalb der Wasserspiegellage) ( <i>Quelle: verändert nach Schwab, 2016</i> ). _____	63
Abb. 62: 3D-Strömungssignaturen verschiedener Anströmgeschwindigkeiten mit Blick von Unterstrom in Richtung Oberstrom auf den Schrägrechen (links strömungsberuhigtes Leitblech, in der Mitte die Rechenebene, rechts Bypass) ( <i>Quelle: verändert nach Schwab, 2016</i> ). _____	63
Abb. 63: Abfluss links und Wasserstand rechts der schnell veränderlichen Murg vom 08.-20.03.2017 am Pegel Rotenfels ( <i>Quelle: HVZ Baden-Württemberg, 2017</i> ). _____	64
Abb. 64: Einlaufbereich zum Kraftwerkskanal mit dem 18mm-Schrägrechen in Ottenau ( <i>Quelle: verändert nach Google.maps</i> ). _____	65
Abb. 65: Links 3D-Planausschnitt des Schrägrechens Ottenau, in der Mitte Planausschnitt des Rechenquerschnitts ( <i>Quellen: Firma Jank im Auftrag der EnBW, 2012</i> ). Rechts Foto des Rechenprofils mit den einzelnen Stäben ( <i>Quelle: EnBW, 2012</i> ). _____	66
Abb. 66: Links für das Rechenschienensystem in Ottenau entworfener Messwagen auf der Rechenführung aufliegend und rechts in der Seitenansicht mit Aluschienen, an welchen das Messgerät befestigt war ( <i>Quelle rechts: Schwab, 2016</i> ). _____	67

Abb. 67: Draufsicht auf den Schrägrechen Ottenau mit x- und y-Achse der hydrometrischen Messungen (Quelle: verändert nach Schwab, 2016).	68
Abb. 68: Ansicht des Schrägrechens Ottenau mit Messstellen der hydrometrischen Messungen sowie der y- und z-Achse (Quelle: verändert nach Schwab, 2016).	68
Abb. 69: Links Querschnitt des Schrägrechens Ottenau mit Messebenen auf der x-Achse sowie der z-Achse in die Tiefe (Quelle: verändert nach Schwab, 2016). Rechts Foto des Messwagens mit Messgerät samt Koordinatensystem (Quelle: Schwab, 2016).	69
Abb. 70: Geschwindigkeitsprofile aller fünf Ebenen der x-Achse (Tab. 18) und aller eingestellten Anströmgeschwindigkeiten. Die Profilbilder sind über die Wassertiefe z aufgetragen und stellen den gesamten Messquerschnitt der gemessenen resultierenden Geschwindigkeitskomponente $v_{xyz}$ für jede Anströmgeschwindigkeit und jeden Tiefenschnitt dar (Quelle: verändert nach Schwab, 2016).	70
Abb. 71: Negative Geschwindigkeiten an der Wasseroberfläche in x- und y-Richtung bis zu -0,5 m/s durch Rück- und Querströmungen bei einer eingestellten Anströmgeschwindigkeit von 0,4 m/s. Die Schaubilder zeigen die Spanne der aufgetretenen Geschwindigkeiten über die Wassertiefe z im gesamten Messquerschnitt der XY-Ebene. (Quelle: verändert nach Schwab (2016).	71
Abb. 72: Tiefendiagramme der Strömungsfelder parallel zur Rechenebene, a) bei einer Anströmgeschwindigkeit von 0,4 m/s und b) bei 0,5 m/s mit Blick in Fließrichtung/Unterwasser (Quelle: verändert nach Schwab, 2016).	72
Abb. 73: Draufsicht auf den Anströmbereich des Schrägrechens Ottenau mit Gründen für das vorwiegend rechte Anströmen des Rechens.	73
Abb. 74: Luftbild des Anströmbereichs am Schrägrechen Ottenau mit leichter Linkskurve der Murg (gestrichelt dargestellt) (Quelle: verändert nach Google.maps).	73
Abb. 75: Strömungsdiagramme der fünf Tiefenschichten (Tab. 19) der Wassertiefe z für die Anströmgeschwindigkeiten 0,4 m/s und 0,8 m/s (Quelle: verändert nach Schwab, 2016).	74
Abb. 76: Strömungsdiagramm mit Blick in Fließrichtung auf den Schrägrechen Ottenau mit der Wassertiefe als z-Achse und der Rechenebene als y-Achse (Quelle: verändert nach Hydro-Energie Roth GmbH, 2014).	75
Abb. 77: Strömungsdiagramm mit Darstellung der z-Komponente der Strömungsgeschwindigkeit des Schrägrechens Ottenau im Schnitt 5 ( $z = -1,30$ m) und mit einer Anströmgeschwindigkeit von 0,8 m/s (Quelle: verändert nach Schwab, 2016).	76
Abb. 78: Gliederung der Ethohydraulik in 3 Phasen (Quelle: verändert nach Adam et al., 2011).	79
Abb. 79: Hälterung im wasserbaulichen Forschungslabor mit Frischwasserzuleitung und Belüftung.	80
Abb. 80: Links Hälterung der Lachssmolts in Rotenfels, rechts OP-Fischhalterung mit einem Aal zum Einsetzen des Senders in dessen Bauchhöhle.	81
Abb. 81: Lebenszyklus des Lachses im Süß- und Salzwasser (Quelle: IKSR, 2005).	83
Abb. 82: Anzahl der gezählten Leitfischarten am Fischpass Iffezheim (Rhein) mit steigender Tendenz für den Lachs (Quelle: IKSR, 2017).	83
Abb. 83: Links Schema des Aal-Lebenszyklus (Quelle: Henkel et al., 2012). Rechts Aalwanderung von der Sargassosee bis nach Europa und Nordafrika (Quelle: WWF, 2014).	85
Abb. 84: Anzahl der gefangenen und umgesetzten Gelb- und Blankaale durch das Catch & Carry Programm der EnBW AG (Quelle: EnBW, 2017).	85
Abb. 85: Links Beobachtungsstand neben der Versuchsrinne und rechts Versuchsrinne mit Abdunkelung (Montageöffnung für den Umbau des Schrägrechens auf Foto geöffnet).	86
Abb. 86: Ad libitum-Protokoll des Aalversuchs mit der Versuch-Nr. V6.2 vom 19.10.2016.	87
Abb. 87: Sendergrößen bei Lachssmolts (links) und bei Aalen (rechts), welche bei den telemetrischen Studien zum Einsatz kamen.	88
Abb. 88: 3D-Darstellung und Nachverfolgung einer Aalabwanderung vor Turbineneinläufen des WKW Arapuni im Norden Neuseelands mittels Acoustic Tag Tracking System nach Brown et al. (Quelle: verändert nach Brown et al., 2007).	89
Abb. 89: Kegelförmiger Beobachtungsbereich eines DIDSON-Sonars am Einlaufbereich des WKW Hirschhorn (links) sowie Ultraschallbilder des DIDSON-Sonars in Hirschhorn mit aufgezeichneten Aalen, Welsen und Barben (Quelle: Weibel et al. im Auftrag der EnBW, 2015b).	90
Abb. 90: Riverwatcher im eingebauten Zustand in den Zugwiesen Ludwigsburg (links) und in Betrieb zur Aufnahme der wandernden Fische (rechts) (Quelle rechts: Württembergischer Anglerverein e.V., 2017).	90
Abb. 91: Links: HDX-Transponder. Mitte: Rahmenantenne aus Holz. Rechts: Aufgespannte Antennen in einem relativ schmalen Gewässer. Quellen: Engler et al. (2014).	91

Abb. 92: Links: Hoher Treibgutanteil in einer Reuse nach einem Hochwasser ( <i>Quelle: Engler et al., 2014</i> ). Rechts: aufwändige Elektrofischerei im Kraftwerkskanal des WKW Ohrnberg in trübem und schlammigem Wasser mit Geschwemmeln, Ästen, schlechten Zugangsmöglichkeiten und baulichen Zwängen (Zugstreben des Kanals).	91
Abb. 93: WKW Hirschhorn mit seiner Lage zwischen der Wehranlage und der rechten Schleusenkammer des Wasser- und Schifffahrtsamtes ohne Möglichkeit zur Vergrößerung des Querschnitts vor den Maschineneinläufen.	94
Abb. 94: Verlängerung des Mittelpfeilers am WKW Künzelsau zum Einbau eines Schrägrechens mit Anströmwinkel von 42°, Anströmgeschwindigkeit von 0,8 m/s und einem Stababstand von 15 mm. Links während des Baus mit Systemschalung für Pfeilerverlängerung und rechts im ausgeschalteten Zustand sowie mit fertiger Sohlenscheibe zum Einbau des Schrägrechens.	95
Abb. 95: Verschiedene Anströmwinkel mittels modularem Rechensystem im Forschungslabor der TU Darmstadt.	95
Abb. 96: Verschiedene Stababstände mittels modularem Rechensystem im Forschungslabor der TU Darmstadt.	96
Abb. 97: Verharren von Lachssmolts an rechter Rinnenwand und an der Sohle bzw. an den Rechenpfeilern sowie der Anteil nicht verharrender Lachssmolts.	99
Abb. 98: Verharren von Lachssmolts an rechter Rinnenwand im Setup V3.3 (links) und im Setup V9.4 (rechts).	100
Abb. 99: 3D-Strömungssignaturen bei $v_a = 0,4$ m/s (links) und $v_a = 0,8$ m/s (rechts) ( <i>Quelle: verändert nach Schwab, 2016</i> ).	100
Abb. 100: Verharren von Lachssmolts an der rechten Rinnenwand in Abhängigkeit der Anströmgeschwindigkeit und des Anströmwinkels, unabhängig vom Stababstand.	101
Abb. 101: Tangentiale Geschwindigkeitskomponente an der rechten Rinnenwand erhöht aufgrund Leitblech bei Anströmwinkel von 30°, Stababstand von 18mm und Anströmgeschwindigkeit von 0,5 m/s ( <i>Quelle: verändert nach Glock, 2017</i> ).	101
Abb. 102: Verharren von Lachssmolts vor der Rechenebene in Abhängigkeit der Anströmgeschwindigkeit und des Anströmwinkels unabhängig vom Stababstand.	102
Abb. 103: Schrägstellung des Fisches (rot gestrichelte Linie) um 20° bis 30° gegenüber der Anströmrichtung geneigt bei einem Anströmwinkel des Schrägrechens von 45° (Foto zeigt Versuch-Nr. V1.5 mit Setupkonstellation 18mm/45°/0,4m/s).	103
Abb. 104: Bewegungsachsen beim Flugzeug (links), Achsen in der Schiffstechnik (Mitte) und beim Fisch (rechts) ( <i>Quellen: verändert nach Google Sketch Up</i> ).	103
Abb. 105: Beschreibung des Driftvektors nach <i>Hassinger</i> analog dem Prinzip des Gierens ( <i>Quelle: Hassinger, 2016</i> ).	104
Abb. 106: Häufigkeit des Gierens in Abhängigkeit der Anströmgeschwindigkeit und unabhängig des Einflusses des Anströmwinkels bei einem Stababstand von 18 mm.	104
Abb. 107: Strömungssignaturen bei Anströmgeschwindigkeiten von 0,4 bis 0,8 m/s mit Zunahme von Geschwindigkeiten und Inhomogenitäten. Die Stababstände betragen 18 mm, der Anströmwinkel 45° ( <i>Quelle: verändert nach Schwab, 2016</i> ).	105
Abb. 108: Häufigkeit des Gierens in Abhängigkeit des Anströmwinkels und ohne Betrachtung der Anströmgeschwindigkeit bei einem Stababstand von 18 mm.	106
Abb. 109: Häufigkeit des Gierens in Abhängigkeit der Anströmgeschwindigkeit und des Anströmwinkels bei einem Stababstand von 18 mm.	107
Abb. 110: Abnahme der Tangentialkomponente mit steigendem Anströmwinkel $\delta$ , bei Stababstand von 18 mm und einer Anströmgeschwindigkeit $v_a$ von 0,8 m/s ( <i>Quelle: verändert nach Glock, 2017</i> ).	107
Abb. 111: Abnahme der Tangentialkomponente mit steigendem Anströmwinkel $\delta$ , Stababstand von 18 mm und einer Anströmgeschwindigkeit $v_a$ von 0,5 m/s ( <i>Quelle: verändert nach Glock, 2017</i> ).	108
Abb. 112: Steigende Häufigkeit des Gierens mit steigendem Stababstand bei einer Anströmgeschwindigkeit von 0,8 m/s.	109
Abb. 113: Häufigkeit des Gierens bei Stababständen von 10 mm und 30 mm in Abhängigkeit von Anströmgeschwindigkeit und Anströmwinkel.	109
Abb. 114: Linkes Bild: Schema des stromaufwärts gerichteten Gierens entlang der Rechenebene bis zur Mitte (2) und Richtung Oberstrom (3a) mit anschließender Wiederholung (4 → 1) oder bis in strömungsberuhigte Zonen (3b). Rechtes Bild: Schrägstellung des Fisches (rot gestrichelte Linie) um 20° bis 30° gegenüber der	

Anströmrichtung geneigt in Richtung der Rechenebene bei einem Anströmwinkel des Schrägrechens von 45° (Foto zeigt Versuch-Nr. V10.3 mit Setupkonstellation 18mm/45°/0,8m/s).	110
Abb. 115: Häufigkeit des stromaufwärts gerichteten Gierens von Lachssmolts in Abhängigkeit des Anström winkels bei einem Stababstand von 18 mm.	111
Abb. 116: Häufigkeit eines stromaufwärts gerichteten Gierens bei unterschiedlichen Stababständen und Anström winkeln sowie bei einer Anströmgeschwindigkeit von 0,8 m/s.	112
Abb. 117: Normale und tangentielle Strömungskomponente mit Geschwindigkeitszunahme im Nahfeld des Bypasses bei 55° und 0,8 m/s und mit unterschiedlichen Stababständen.	112
Abb. 118: Häufigkeit des trampolinartigen Verhaltens und des Gierens in Abhängigkeit der Anströmgeschwindigkeit bei einem Stababstand von 18 mm über alle Anströmwinkel betrachtet.	113
Abb. 119: Häufigkeit des trampolinartigen Verhaltens und des Gierens in Abhängigkeit des Anström winkels bei einem Stababstand von 18 mm über alle Geschwindigkeiten betrachtet.	114
Abb. 120: Häufigkeit des trampolinartigen Verhaltens in Abhängigkeit der Anströmgeschwindigkeit und des Anström winkels bei einem Stababstand von 18 mm.	114
Abb. 121: Anzahl der Rechenkontakte in Relation zu allen Probanden in Abhängigkeit von Anströmgeschwindigkeit und Stababstand.	116
Abb. 122: Rechenkontakte in Abhängigkeit von Anströmgeschwindigkeit und Anströmwinkel bei Stababständen von 18 mm.	116
Abb. 123: Rechenpassagen in Abhängigkeit von Anströmgeschwindigkeit und Anströmwinkel bei einem Stababstand von 30 mm.	117
Abb. 124: Schwarmverhalten im Versuch-Nr. V7.1 bei dem sich alle Probanden in einem Schwarm vor der Rechenebene befanden (links) und ein locker aufgelöster Schwarm im Versuch-Nr. V3.3, bei dem sich alle Lachssmolts aneinander reihten (rechts).	119
Abb. 125: Sohl nah orientierte Lachssmolts (links) bei Versuch-Nr. V13.2 und über 2/3 der Wassertiefe aufgereihte Lachssmolts (rechts) bei Versuch-Nr. V22.2.	120
Abb. 126: Luftbild der Einlaufsituation in Ottenau mit Lage der Fischauf- und Fischabstiegsanlage sowie des Schrägrechens im Einlaufkanal des Kraftwerks Ottenau ( <i>Quelle: verändert nach Google.maps</i> ).	123
Abb. 127: Sogenannte Unterwasser-Antennen (4 Stück) vor dem Schrägrechen Ottenau, welche mit Seilen aufgespannt sind.	124
Abb. 128: Strömungssignatur am Schrägrechen Ottenau bei einer gemittelten Anströmgeschwindigkeit von 0,4 m/s. Vor allem rechts lagen Bereiche mit bis zu 0,8 m/s ( <i>Quelle: verändert nach Schwab, 2016</i> ).	124
Abb. 129: Kraftwerksleistung im Versuchszeitraum vom 04.05.-17.05.2016 mit nur leicht schwankenden Abflüssen in Richtung des Wasserkraftwerks im Kraftwerkskanal und damit auch vor dem Schrägrechen.	125
Abb. 130: Abwanderungskorridore der besenderten Lachssmolts während der Versuchsdurchführung vom 04.-17.05.2016.	126
Abb. 131: Kurzzeitiger Streichwehrüberfall (ggf. durch Sunk und Schwall der Oberliegerkraftwerke hervorgerufen) am Streichwehr in Ottenau zu Versuchsbeginn am 04.05.2017.	127
Abb. 132: Antennenbereiche Ober- und Unterstrom des Schrägrechens, in der Fischabstiegsanlage und in der Ausleitungsstrecke ( <i>Quelle: verändert nach Weibel et al. auf Basis von Google.maps, 2017</i> ).	128
Abb. 133: Signalstärken, welche das Verhalten des Smolts mit Code-Nr. 33 am 06.05.2016 zwischen 10 und 18 Uhr vor dem Schrägrechen Ottenau wiedergeben.	129
Abb. 134: Signalstärken, welche das Verhalten des Smolts mit Code-Nr. 166 am 04.05.2016 zwischen 17 und 23 Uhr vor dem Schrägrechen Ottenau wiedergeben.	130
Abb. 135: Signalstärken, welche das Verhalten des Smolts mit Code-Nr. 62 am 04.05.2016 zwischen 16 und 22 Uhr vor dem Schrägrechen Ottenau wiedergeben.	131
Abb. 136: Signalstärken, welche das rechte sondierend-stationäre Verhalten des Smolts mit Code-Nr. 73 am 06.-07.05.2016 vor dem Schrägrechen Ottenau wiedergeben.	131
Abb. 137: Signalstärken, welche das linke sondierend-stationäre Verhalten des Smolts mit Code-Nr. 116 am 04.05.2016 vor dem Schrägrechen Ottenau wiedergeben.	132
Abb. 138: Vergleich der Rechen- und Bypasspassagen bei Feld- und Laborstudien. Die prozentualen Angaben beziehen sich auf die Gesamtzahl an Probanden (62 Lachssmolts im Labor und 60 Lachssmolts im Feld).	135
Abb. 139: Charakteristische Körperhaltungen beim Aal – A während der Drift, B während der kontrollierten Drift und C während der aktiven Abwanderung ( <i>Quelle: verändert Adam et al., 1999</i> ).	137

Abb. 140: Schrägrechen im Labor mit dahinter liegender Baustahlmatte und Kunststoffhaltungen an der Sohle und am oberen Ende der Baustahlmatte in Blickrichtung Oberstrom bei Teilfüllung der Versuchsrinne (links). Schaltschrank zur Erzeugung des elektrischen Feldes der Fa. Procom (Mitte und rechts).	138
Abb. 141: Aalschäden am Wasserkraftwerk Kostheim/Main. Toter Aal an der Rechenharke des konventionellen Rechens (links), im Rechengut aufgefundene und teils durch die Rechenreinigungsmaschine zertrennte Aale (Mitte und rechts) ( <i>Quelle: WKW Staustufe Kostheim/Main GmbH &amp; Co. KG, 2015</i> ).	140
Abb. 142: Verharren ohne Rechenkontakt in Abhängigkeit von Stabstand und Elektrifizierung bei einem Anströmwinkel von 45°.	143
Abb. 143: Verharren ohne Rechenkontakt in Abhängigkeit von Stabstand, Elektrifizierung und Anströmgeschwindigkeit bei einem Anströmwinkel von 45° ohne Tendenzen in Abhängigkeit der Anströmgeschwindigkeit.	144
Abb. 144: Verharren mit Rechenkontakt in Abhängigkeit von Stabstand und Elektrifizierung bei einem Anströmwinkel von 45°.	145
Abb. 145: Aal, welcher beim Rechensetup V9.1 (30°/18mm/0,8m/s) vom Impingement betroffen ist.	146
Abb. 146: Links: Versuch-Nr. V19.3 mit einem Aal, der sich zwischen die Rechenstäbe gewunden hat und so über die gesamte Versuchsdauer verharrte. Er ist mit seiner Position bei Schrägrechen an Wasserkraftanlagen durch den Rechenreinigungsarm gefährdet, der ihn wahrscheinlich verletzen oder töten würde. Rechts: Versuch-Nr. V24.2 mit einem Aal, welcher an den Schrägrechen angedrückt wurde. Er löste sich jedoch nach 4 Minuten und wanderte entlang der Rechenebene über den Bypass ab.	146
Abb. 147: Häufigkeiten eines kurzzeitigen Verharrens am Schrägrechen bei unterschiedlichen Stababständen und Anströmwindeln sowie in Abhängigkeit einer Elektrifizierung.	147
Abb. 148: Umkehrreaktion eines Aales bei Versuchs Nr. V1.4: Auftreffen auf den Schrägrechen mit dem Klopff nach einer aktiven Abwanderung (links), Umdrehen mit dem Körper (Mitte) und Kopf voran stromaufwärts schwimmend (rechts). Auf dem rechten Bild ist ein zweiter Aal unten sichtbar, welcher ebenfalls in einer aktiven Abwanderung kurz vor der Kollision mit dem Schrägrechen stand.	148
Abb. 149: Stromaufwärts gerichtetes Suchverhalten eines Aals bei Versuch-Nr. V15.1, welcher die Rechenebene entlang schwamm, den Schrägrechen mehrfach berührte (links) und anschließend ab ca. Rechenmitte Richtung Oberstrom schwamm (rechts).	149
Abb. 150: Häufigkeiten eines stromaufwärts gerichteten Suchverhaltens bei unterschiedlichen Stababständen und Anströmwindeln sowie in Abhängigkeit einer Elektrifizierung.	150
Abb. 151: Links Aal im Versuch-Nr. V21.1 kurz vor der Kollision mit dem Schrägrechen, seine Körperhaltung war anguliform ausgebildet, er driftete passiv auf den Rechen. Rechts Aal im Versuch-Nr. V5.1 im Augenblick der Kollision mit dem Schrägrechen, seine Körperhaltung war ebenfalls anguliform ausgebildet. Links neben dem Aal (rechte Abb.) verharrte ein Aal auf der Rechenebene.	150
Abb. 152: Häufigkeiten einer anguliformen/s-förmigen Rechenkollision mit anschließender Abwanderung entlang der Rechenebene in den Bypass in Abhängigkeit von Anströmgeschwindigkeit und Anströmwinkel bei einem Stababstand von 18 mm ohne Elektrifizierung.	151
Abb. 153: Häufigkeiten einer anguliformen/s-förmigen Rechenkollision mit anschließender Abwanderung entlang der Rechenebene in den Bypass in Abhängigkeit von Anströmgeschwindigkeit und Anströmwinkel bei einem Stababstand von 30 mm ohne Elektrifizierung.	152
Abb. 154: Aal mit Kopf auf Rechen treffend im Versuch-Nr. V5.2 (links oben), den Zwischenraum der Rechenstäbe mit dem Schwanz abtastend im Versuch-Nr. V15.1 (oben rechts) und positiv rheotaktisch im Bereich des Bypasses ausgerichtet im Versuch-Nr. 5.3 (unten).	152
Abb. 155: Häufigkeiten eines gestressten Verhaltens nach einem Rechenkontakt in Abhängigkeit von Anströmgeschwindigkeit und Anströmwinkel bei einem Stababstand von 18 mm. Die kleineren, satt farbigen Balken in der vorderen Ebene geben die Werte ohne Elektrifizierung wieder, die transluzenten/blassen Balken in der hinteren Ebene die Häufigkeit mit Elektrifizierung.	153
Abb. 156: Aale bei der Rechenpassage im Versuch-Nr. V13.1 (links und rechts). Beide Aale trafen mit dem Kopf voraus auf den Schrägrechen und gingen direkt in einen Stabzwischenraum hinein ohne vorheriges Abtasten und Sondieren.	154
Abb. 157: Rechenpassagen in Relation zur Aalanzahl in den Versuchen in Abhängigkeit von Anströmwinkel und Elektrifizierung bei einem Stababstand von 30 mm.	155
Abb. 158: Umkehrbewegung vor einer Berührung mit dem Rechen eines Aals bei Versuch-Nr. V15.1.	158
Abb. 159: Aale mit Kontakten zum Rechen nahezu an der Wasseroberfläche bei Versuch-Nr. V12.1 (links), direkt vor der Plexiglasscheibe der linken Rinnenwand während der aktiven Abwanderung Richtung	

Bypass im Versuch-Nr. V6.2 (Mitte) sowie während der Abwanderung in der Versuchsrinne an der Sohle bei Versuch-Nr. V10.1 (rechts).	158
Abb. 160: Mehrere Aale zusammen in der linken Rinnenecke zwischen Rinnenwand und Sohle im Versuch-Nr. V19.2.	159
Abb. 161: Abflüsse am Pegel Rotenfels an der Murg mit Abflussspeaks am 11. und 17.11.2016 ( <i>Quelle: LUBW, Hochwasservorhersagezentrale Baden-Württemberg, abgerufen am 13. und 19.11.2016</i> ).	162
Abb. 162: Kraftwerksleistung im Versuchszeitraum vom 09.11.2016 bis 05.03.2017 mit schwankenden Abflüssen und einer Maximalleistung von knapp 330 kW am Wasserkraftwerk Ottenau.	163
Abb. 163: Strömungssignatur am Schrägrechen Ottenau bei einer gemittelten Anströmgeschwindigkeit von 0,5 m/s. Vor allem rechts lagen Bereiche mit über 1,0 m/s ( <i>Quelle: verändert nach Schwab, 2016</i> ).	163
Abb. 164: Abwanderungskorridore der besenderten Aale während der Versuchsdurchführung in Ottenau vom 09.11.2016 bis 04.03.2017.	164
Abb. 165: Antennenbereiche am Schrägrechen ( <i>Quelle: verändert nach Wüst auf Basis von Google.maps, 2016</i> ).	165
Abb. 166: Signalstärken, welche das Verhalten des Aals mit Code-Nr. 80 am 10.11.2016 zwischen 3:50 und 4:11 Uhr vor dem Schrägrechen Ottenau wiedergeben.	166
Abb. 167: Signalstärken, welche das Verhalten des Aals mit Code-Nr. 82 am 10.11.2016 zwischen 0:43 und 1:15 Uhr vor dem Schrägrechen Ottenau wiedergeben.	167
Abb. 168: Signalstärken, welche das Verhalten des Aals mit Code-Nr. 140 am 16.11.2016 zwischen 4:14 und 5:25 Uhr vor dem Schrägrechen Ottenau wiedergeben.	167
Abb. 169: Signalstärken, welche das Verhalten des Aals mit Code-Nr. 88 am 17.11.2016 zwischen 15:28 und 16:53 Uhr vor dem Schrägrechen Ottenau wiedergeben.	168
Abb. 170: Signalstärken, welche das Verhalten des Aals mit Code-Nr. 2 am 17.11.2016 zwischen 3 Uhr und 8 Uhr vor dem Schrägrechen und in der Ausleitungsstrecke Ottenau wiedergeben.	169
Abb. 171: Signalstärken, welche das Verhalten des Aals mit Code-Nr. 53 am 17.11.2016 zwischen 2:04 Uhr und 4:15 Uhr vor dem Schrägrechen und in der Ausleitungsstrecke Ottenau wiedergeben.	169
Abb. 172: Vergleich der Rechenpassagen sowie der aufgefundenen Abwanderungskorridore bei Feld- und Laborstudien.	171
Abb. 173: Elektroscheuchanlage am Kühlwassereinlauf RDK 7 ( <i>Quelle: verändert nach EnBW, 1982</i> ).	173
Abb. 174: Luftbild des Einlaufbereichs Rotenfels mit Streichwehr, Fischauf- und -abstiegsanlage und eingebauter Scheuchanlage ( <i>Quelle: verändert nach Google.maps</i> ).	174
Abb. 175: Links Prinzipskizze Elektroscheuchanlage Neptun ( <i>Quelle: Procom Homepage, abgerufen 2017</i> ). Rechts Skizze des Versuchsaufbau in Rotenfels ( <i>Quelle: Procom, persönlich überreicht 2016</i> ).	175
Abb. 176: Luftbild der Fischscheuchanlage in Rotenfels.	175
Abb. 177: Kraftwerksleistung im Versuchszeitraum vom 09.11.2016 bis 05.03.2017 mit schwankenden Abflüssen und einer Maximalleistung von knapp 380 kW am Wasserkraftwerk Rotenfels.	176
Abb. 178: Elektroscheuchanlage in Rotenfels im Jahr 2015 mit Elektroden, welche an Seilen und Fixierungseilen befestigt waren (links). Die rechten drei Bilder zeigen die Veränderungen an der Elektroscheuchanlage von 2014 nach 2015: Der linke Zustand zeigt die Elektroscheuchanlage von 2014, das mittlere Bild die zusätzlichen Fixierungsseile, das rechte Bild die Verstrebungen der einzelnen Elektroden untereinander ( <i>Quelle: verändert nach Weibel et al., 2015a</i> ).	177
Abb. 179: Abwanderungskorridore der Lachssmolts bei den Elektroscheuchversuchen im Jahr 2015 mit einer hohen Abwanderungsquote über Fischaufstiegsanlage und Fischabstiegsanlage.	178
Abb. 180: Detektionszonen in Rotenfels zur Aufnahme der Signale der besenderten Aale während der Versuchsdurchführung vom 09.11.2016 bis 04.03.2017.	179
Abb. 181: Abwanderungskorridore der besenderten Aale während der Versuchsdurchführung in Rotenfels vom 09.11.2016-04.03.2017.	179
Abb. 182: Lichteinfall in die Versuchsrinne und auf den Rechen (links) und seitlicher Lichteinfall in die Rinne (rechts)	IV

---

---

## Tabellenverzeichnis

---

Tab. 1: Verlustrelevante Rechenparameter.	21
Tab. 2: Stabprofilbeiwerte für die Rechenstabformen (Abb. 32) nach <i>Spangler</i> bei einer frontalen Anströmung ( <i>Quelle: Spangler, 1928</i> ).	31
Tab. 3: Beiwerte $\beta$ in Abhängigkeit des Anströmwinkels $\delta$ sowie des Quotienten $d/s$ aus Rechenstabdicke und Stababstand ( <i>Quelle: verändert nach Mosonyi, 1966</i> ).	33
Tab. 4: Messkonzept zur Untersuchung der insgesamt 8 Laborrechen ( <i>Quelle: verändert nach Nestmann et al., 2010</i> ).	39
Tab. 5: Rechenparameter der untersuchten Schrägrechen der Firmen APA und SAB bei der Untersuchung von <i>Nestmann et al. (2010)</i>	40
Tab. 6: Rechnerische und hydrometrisch ermittelte Rechenverluste und Rechenverlustbeiwerte am Schrägrechen Ottenau unter verschiedenen Anströmgeschwindigkeiten.	43
Tab. 7: Verbauungsgrade $V_{Re}$ des Schrägrechens im Forschungslabor in Abhängigkeit des Anströmwinkels und des Stababstands.	47
Tab. 8: Untersuchte Rechen setups am Schrägrechen im Forschungslabor, für die Rechenverluste ermittelt und Verlustbeiwerte bestimmt wurden.	48
Tab. 9: Rechenverluste [cm] und Verlustbeiwerte [-] nach der <i>Kirschmer-Mosonyi-Formel</i> in Abhängigkeit von Anströmwinkel und Anströmgeschwindigkeit bei einem Stababstand von 18 mm ( <i>Quelle: verändert nach Glock, 2017</i> ).	53
Tab. 10: Rechenverluste [cm] und Verlustbeiwerte [-] nach der <i>Meusburger-Formel</i> in Abhängigkeit von Anströmwinkel und Anströmgeschwindigkeit bei einer Stababstand von 18 mm ( <i>Quelle: verändert nach Glock, 2017</i> ).	54
Tab. 11: Rechenverluste [cm] und Verlustbeiwerte [-] nach der <i>Raynal-Formel</i> in Abhängigkeit von Anströmwinkel und Anströmgeschwindigkeit bei einer Stababstand von 18 mm ( <i>Quelle: verändert nach Glock, 2017</i> ).	54
Tab. 12: Parameter des Alternativrechens im wasserbaulichen Forschungslabor	55
Tab. 13: Vergleich der Rechenverluste des Schrägrechens in Ottenau und der Rechenverluste aus dem vergleichbaren Rechen setup im Forschungslabor	56
Tab. 14: Durchgeführte hydrometrische Messungen zur Ermittlung der Strömungssignaturen ( <i>Quelle: verändert nach Schwab, 2016</i> ).	59
Tab. 15: Durchgeführte hydrometrische Messungen zur Ermittlung der Strömungssignaturen ( <i>Quelle: verändert nach Glock, 2017</i> ).	60
Tab. 16: Messprogramm in Ottenau zur Aufnahme der Strömungssignaturen ( <i>Quelle: verändert nach Schwab, 2016</i> ).	67
Tab. 17: Positionen der Messebenen auf x- und y-Achse.	69
Tab. 18: Positionen der x-Komponente der YZ-Schnitte der Geschwindigkeitsprofile am Schrägrechen Ottenau.	70
Tab. 19: Positionen der z-Komponente der XY-Schnitte der Geschwindigkeitsprofile am Schrägrechen Ottenau .	74
Tab. 20: Abwanderungszeitraum des Lachssmolts ( <i>Quelle: verändert nach Schmalz et al., 2015</i> ).	82
Tab. 21: Schwimmgeschwindigkeiten von Lachsen ( <i>Salmo salar</i> ) nach Auflistung von <i>Ebel (Quelle: verändert nach Ebel, 2013)</i> .	84
Tab. 22: Abwanderungszeitraum des Europäischen Aals. <i>Quelle: verändert nach Schmalz et al. (2015)</i> .	84
Tab. 23: Schwimmgeschwindigkeiten von Aalen ( <i>Anguilla anguilla</i> ) nach Auflistung von <i>Ebel (Quelle: verändert nach Ebel, 2013)</i> .	86
Tab. 24: 22 verschiedene Rechen setups für die Lachssmoltsstudien im Forschungslabor.	97
Tab. 25: Ablafliste der Rechen setups mit Versuchsnummern und Anzahl der Probanden. Mit einem Stern gekennzeichnet sind die Ottenau-Setups, welche im Forschungslabor untersucht wurden.	98
Tab. 26: Bemessungswerte für einen Schrägrechen im Zielgewässer Lachs, aufgestellt anhand ethohydraulischer Studien und hydraulischer Strömungssignaturen mit Lachssmolts an Schrägrechen.	136
Tab. 27: 26 verschiedene Rechen setups für die nicht elektrifizierten Aalstudien im Forschungslabor (links) und 16 Rechen setups der elektrifizierten Aalstudien (rechts).	141
Tab. 28: Ablafliste der Rechen setups mit Versuchsnummern und Anzahl der Probanden. Mit einem Stern gekennzeichnet sind die Ottenau-Rechen setups, welche im Forschungslabor untersucht wurden.	142

---

---

Tab. 29: Kurzzeitiges Verharren von Aalen an Schrägrechen mit und ohne Elektrifizierung gleicher Setups.	147
Tab. 30: Bemessungswerte für einen Schrägrechen im Aalmanagementgewässer, aufgestellt anhand ethohydraulischer Studien und hydraulischer Strömungssignaturen mit Aalen an Schrägrechen.	181

---

## Abkürzungsverzeichnis

---

### Kürzel    Bezeichnung

Abb.	Abbildung
BAW	Bundesanstalt für Wasserbau
BDEW	Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., Nachfolger des VDEW
BfN	Bundesamt für Naturschutz
Bspw.	Beispielsweise
DGJ	Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EG	Europäische Gemeinschaft
einschl.	einschließlich
EnBW	Energie Baden-Württemberg AG
EPRI	Electric Power Research Institute (Palo Alto, USA)
ETH	Eidgenössische Technische Hochschule (Zürich, Schweiz)
EU	Europäische Union
evtl.	eventuell
Fa.	Firma
Fab	Fischabstiegsanlage
Fauf	Fischaufstiegsanlage
FFH	Flora-Fauna-Habitat
FSR	FischSchonRechen (= Rechen mit Oppermann-Stabprofil)
ggf.	Gegebenenfalls
Gl.	Gleichung
GOK	Geländeoberkante
GWh	als Einheit: Gigawattstunden
HDX	Half-Duplex-Transponder
HFO	Hessische Fischereiverordnung
HVZ	Hochwasservorhersagezentrale (Baden-Württemberg)
ICES	International Council for the Exploration of the Sea
i.d.R.	in der Regel
IKSR	Internationale Kommission zum Schutz des Rheins
Kap.	Kapitel
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
KKP	EnBW Kernkraftwerk Philippsburg
kW	als Einheit: Kilowatt
LUBW	Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg
max.	maximal
min.	minimal
MW	Mittelwasserstand
MW	als Einheit: Megawatt
NW	Niedrigwasserstand
OP	Operation
OTA	(ehemaliges) Office of Technology Assessment der Vereinigten Staaten von Amerika
OW	Oberwasser
RDK 7	Rheinhafendampfkraftwerk Block 7
RRM	Rechenreinigungsmaschine
S.	Seite
sog.	sogenannt
SR	Schrägrechen
Tab.	Tabelle
TierSchG	Tierschutzgesetz
TU	Technische Universität

---

u.a.	unter anderem
UAS	Ultraschall-Abstands-Sensor
UW	Unterwasser
v.a.	vor allem
VAW	Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (der ETH Zürich)
VDEW	Verband der Elektrizitätswirtschaft e.V.
vgl.	vergleiche
WG	Wassergesetz
WHG	Wasserhaushaltsgesetz
WKA	Wasserkraftanlage
WKW	Wasserkraftwerk
WRRL	EU-Wasserrahmenrichtlinie
WWF	World Wide Fund For Nature
z. B.	zum Beispiel

## Symbolverzeichnis

Leider konnte eine Doppelbelegung von Symbolen nicht ganz verhindert werden, da die vorliegende Arbeit verschiedene Themenbereiche abhandelt und Formeln verschiedener Autoren beinhaltet, welche teils eine gleiche Symbolik für unterschiedliche Parameter verwendet haben.

Symbol	Einheit	Beschreibung
A	[m <sup>2</sup> ]	Durchströmfläche
A <sub>K</sub>	[m <sup>2</sup> ]	angeströmte Fläche eines Körpers
A <sub>Re</sub>	[m <sup>2</sup> ]	Gesamtrechenfläche
A <sub>VA</sub>	[m <sup>2</sup> ]	Verbaute Rechenfläche durch Abstandshalter, Querstreben, Pfeiler, statische Elemente
A <sub>VS</sub>	[m <sup>2</sup> ]	Verbaute Rechenfläche durch Stäbe, Pfeiler, Abstandshalter
A <sub>VT</sub>	[m <sup>2</sup> ]	Verlegte Rechenfläche infolge Treibgut, Geschwemmsel, Müll
c	[m/s]	Schallgeschwindigkeit
c <sub>w</sub>	[-]	Formwiderstandsbeiwert
C <sub>E</sub>	[-]	Verlustfaktor für Eintauchtiefe nach <i>Kriewitz-Byun</i>
C <sub>ks</sub>	[-]	Verlustfaktor für die Stabform nach <i>Kriewitz-Byun</i>
C <sub>l</sub>	[-]	Verlustfaktor für Stababstand nach <i>Kriewitz-Byun</i>
d	[mm]	Rechenstabdicke
d	[m]	Durchmesser der bei Fischen kreisförmig angeströmten Fläche
D	[m]	Abstand von UAS zur Wasseroberfläche
F	[N]	Widerstandskraft
g	[m/s <sup>2</sup> ]	Erdbeschleunigung
h	[m]	Wassertiefe
Δh	[m]	Wasserspiegeldifferenzen
h <sub>brutto</sub>	[m]	Bruttofallhöhe
h <sub>D</sub>	[m]	Druckhöhe
h <sub>G</sub>	[m]	Gesamtenergiehöhe
h <sub>Gr</sub>	[m]	Gesamtenergiehöhe für reale Flüssigkeiten
h <sub>K</sub>	[m]	Geschwindigkeitshöhe / kinetische Höhe
h <sub>netto</sub>	[m]	Nettofallhöhe
h <sub>v</sub>	[m]	Verlusthöhe
h <sub>v,EU</sub>	[mm]	Eintritts- und Umlenkverluste am Rechen
h <sub>v,Re</sub>	[m]	Rechenverlust
H <sub>EV</sub>	[m]	Energielinienhöhe vor dem Rechen
H <sub>ED</sub>	[m]	Energielinienhöhe nach dem Rechen
I	[ ]	Impuls des Wassers
k <sub>δ</sub>	[-]	Verlustfaktor des Anströmwinkel δ nach <i>Raynal</i>
k <sub>i</sub>	[-]	Verlustfaktor der Rechenstabform in Abhängigkeit des Anströmwinkels δ nach <i>Raynal</i>
k <sub>s</sub>	[-]	Stabprofilbeiwert von Rechenstäben
k <sub>v</sub>	[-]	Verlegungsfaktor des Rechens
k <sub>v,1</sub>	[-]	Verlegungsfaktor 1 des Rechens
k <sub>v,2</sub>	[-]	Verlegungsfaktor 2 des Rechens
K <sub>i</sub>	[-]	Verlustfaktor der Stabform in Abhängigkeit des Verbauungsgrades P <sub>Re</sub> nach <i>Raynal</i>
K <sub>δ</sub>	[-]	Verlustfaktor des Anströmwinkels δ nach <i>Raynal</i>
l	[mm]	Rechenstablänge
MQ	[m <sup>3</sup> /s]	Mittlerer jährlicher Abfluss im Durchschnitt
MNQ	[m <sup>3</sup> /s]	Mittlerer jährlicher Niedrigabfluss im Durchschnitt
p	[N/m <sup>2</sup> ]	Druck des Wassers
p <sub>v</sub>	[N/m <sup>2</sup> ]	Druckhöhe vor dem Rechen
p <sub>D</sub>	[N/m <sup>2</sup> ]	Druckhöhe nach dem Rechen
P	[W]	Leistung
P <sub>Re</sub>	[-]	Verbauungsgrad des Rechens
Q	[m <sup>3</sup> /s]	Abfluss

$Q_A$	[m <sup>3</sup> /s]	Ausbauabfluss einer Turbine / Turbinendurchfluss
Re	[-]	Reynolds-Zahl
s	[mm]	Lichte Rechenstababstand
t	[s]	Laufzeit beim UAS
$\Delta t$	[s]	Zeiteinheit
v	[m/s]	querschnittgemittelte Geschwindigkeit
$v_a$	[m/s]	Anströmgeschwindigkeit (vor dem Rechen)
$v_d$	[m/s]	Abströmgeschwindigkeit (nach dem Rechen)
$v_N$	[m/s]	Normalkomponente der Anströmgeschwindigkeit
$v_T$	[m/s]	Tangentialkomponente der Anströmgeschwindigkeit
$v_x$	[m/s]	x-Komponente der Geschwindigkeit
$v_y$	[m/s]	y-Komponente der Geschwindigkeit
$v_z$	[m/s]	z-Komponente der Geschwindigkeit
$v_{xyz}$	[m/s]	resultierende Geschwindigkeitskomponente in allen 3 Richtungen
V	[m <sup>3</sup> /s]	Volumenstrom
$V_{Re}$	[-]	Verlegungsgrad des Rechens
z	[m]	geodätische Höhe
$z_V$	[m]	geodätische Höhe vor dem Rechen
$z_D$	[m]	geodätische Höhe nach dem Rechen
$\alpha$	[°]	Winkel der Rechenneigung / vertikaler Anströmwinkel
$\beta$	[-]	<i>Kirschmer</i> -Beiwert für hydraulischen Verlust durch Stabform (= Stabprofilbeiwert $k_s$ )
$\beta$	[-]	Beiwert für die Schräganströmung bei <i>Kirschmer-Mosonyi</i>
$\beta$	[°]	Stabwinkel bei Louver-/Bar Racks-Leitrechen bei <i>Kriewitz-Byun</i>
$\delta$	[°]	Horizontaler Anströmwinkel des Rechens
$\delta'$	[-]	Komplementärwinkel des horizontalen Anströmwinkels $\delta$
$\varepsilon$	[-]	Rechenstabtiefe nach <i>Kriewitz-Byun</i>
$\zeta$	[-]	Verlustbeiwert
$\zeta_B$	[-]	Basisverlustbeiwert nach <i>Kriewitz-Byun</i>
$\eta$	[-]	Wirkungsgrad
$\eta_{gesamt}$	[-]	Gesamtwirkungsgrad
$\kappa$	[-]	Eintauchtiefe nach <i>Kriewitz-Byun</i>
$\nu$	[-]	kinematische Viskosität eines Fluids
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Dichte (des Wassers)
$\sigma$	[-]	axialer Rechenstababstand nach <i>Kriewitz-Byun</i>

---

## Literaturverzeichnis

---

- Adam, Beate; Lehmann, Boris:** Ethohydraulik, Grundlagen, Methoden und Erkenntnisse, Heidelberg, 2011
- Adam, Beate; Schwevers, Ulrich; Dumont, Ulrich:** Beiträge zum Schutz abwandernder Fische – Verhaltensbeobachtungen in einem Modellgerinne, Verlag Natur & Wissenschaft, Solingen, 1999
- Amaral Stephen; Black, Jonathan; McMahon, Brian; Dixon, Douglas:** Evaluation of angled bar racks and louvers for guiding lake and shortnose sturgeon, Alden Research Laboratory Inc., American Fisheries Society Symposium 28:197-210, 2002
- Anderer, Pia; Dumont, Ulrich; Heimerl, Stephan; Ruprecht, A; Wolf-Schumann, U:** Das Wasserkraftpotenzial in Deutschland, WasserWirtschaft 9/2010
- Bates, Daniel W.; Vinsonhaler, Russell:** Use of louvers for guiding fish, Transactions of the American Fisheries Society, Nr. 86, 1957
- Berger, Claudia:** Machbarkeitsstudie zum Fischabstieg und Fischschutz des WKW Staustufe Kostheim/Main, EnBW Energie Baden-Württemberg im Auftrag der WKW Staustufe Kostheim/Main GmbH & Co. KG, unveröffentlicht, Stuttgart, 2015
- Blasel, Klaus:** Beobachtung von Lachssmolts an Fischabstiegsanlagen unterschiedlichen Bautyps in Baden-Württemberg, 2011
- Bonhommeau, Sylvain; Le Pape, Olivier; Gascuel, Didier; Blanke, Bruno; Tréguier, Anne-Marie; Grima, Nicolas; Vermard, Youen; Castonquay, Martin; Rivot, Etienne:** Estimates of the mortality and the duration of the trans-Atlantic migration of European eel *Anguilla anguilla* leptocephali using a particle tracking model, Journal of Fish Biology 74, 2009
- Brämick, Uwe:** Der Lebenszyklus des Europäischen Aals, Was wir wissen und was wir glauben, Tagungsband 28. SVK-Binnenfischereitagung, Fulda, 2017
- Brown, Leah; Haro, Alex; Boubée, Jaques:** Behaviour and fate of downstream migrating eels at hydroelectric power station intakes, 6th International Symposium on Ecohydraulics, New Zealand, 2007
- Bundesanstalt für Wasserbau (BAW):** Messungen mit dem Vectrino, BAW-Empfehlung Ausgabe 2014, Karlsruhe
- Cuchet, Mathilde; Hartlieb, Arnd; Rutschmann, Peter:** Untersuchung des Fischverhaltens an einem geeigneten Rechen, Versuchsbericht Nr. 413, Lehrstuhl und Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU München, 2011
- Deutscher Bundestag:** Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz WHG), Bundesgesetzblatt I Nr. 51, Berlin, 31.07.2009
- Deutscher Bundestag:** Tierschutzgesetz (TierSchG), Bundesgesetzblatt I Seite 2182, Berlin, 04.07.2013
- Dumont, Ulrich; Anderer, Pia; Schwevers, Ulrich:** Handbuch für Querbauwerke, im Auftrag für Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf, 2005
- Dumont, Ulrich; Anderer, Pia; Schwevers, Ulrich:** Methoden zur Untersuchung von Fischwanderungen und der Schädigung von Fischen an Wasserkraftstandorten, Schriftenreihe Umweltbundesamt 21/2012, Dessau-Roßlau, 2012
- DWA, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.:** Merkblatt M-509 Fischabstiegsanlagen und fischpassierbare Bauwerke – Gestaltung, Bemessung, Qualitätssicherung, Mai 2014
- DWA, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.:** Fischschutz- und Fischabstiegsanlagen – Bemessung, Gestaltung, Funktionskontrolle, 2. Korrigierte Auflage, Juli 2005
- Ebel, Guntram:** Fischereibiologisches Gutachten zum Neubau der Wasserkraftanlage Halle-Planena (Saale) – Teil I: Fischfauna und Fischabstiegsanlage. Gutachten im Rahmen des Planfeststellungsverfahrens (Auftraggeber Martin und Andreas Kehl), Büro für Gewässerökologie und Fischereibiologie, Halle (Saale), 2001

- 
- Ebel, Guntram:** Vermeidung turbinenbedingter Fischschäden durch Fischschutz- und Fischabstiegssysteme – Ingenieurbiologische Grundlagen und Fallbeispiele, Tagungsband 21. SVK-Binnenfischereitagung, Fulda, 2010
- Ebel, Guntram:** Büro für Gewässerökologie und Fischereibiologie (Hrsg.): Fischschutz und Fischabstieg an Wasserkraftanlagen, Haale (Saale), 2013
- Ebel, Guntram; Gluch, Arne; Kehl, Martin:** Einsatz des Leitrechen-Bypass-Systems nach Ebel, Gluch & Kehl an Wasserkraftanlagen – Grundlagen, Erfahrungen und Perspektiven, Wasserwirtschaft 7/8 2015
- Engler, Oliver; Adam, Beate:** HDX-Monitoring Wupper, Untersuchungen der Wanderung von Fischen vom 31.10.2013 bis 31.05.2014, Kirtorf-Wahlen, 2014
- Electric Power Research Institute (EPRI):** Review of downstream fish passage and protection technology evaluations and effectiveness. EPRI Report TR-111517, Palo Alto (Kalifornien), 1998
- Electric Power Research Institute (EPRI) und Dominion Millstone Laboratories:** Evaluation of angled bar racks and louvers for guiding fish at water intakes, Palo Alto (Kalifornien) und Waterford (Connecticut), 2001
- ETH Zürich, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie:** Untersuchung über den Einfluss der Geometrie und Anströmung von Einlaufrechen auf den Betrieb von Wasserkraftwerken, Untersuchungsbericht im Auftrag des VDEW (heute BDEW) Nr. 4109, 1999
- Europäisches Parlament und Rat:** Richtlinie 2000/60/EG zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik, Luxemburg 23.10.2000
- Freimann, Robert:** Hydraulik für Bauingenieure, Grundlagen und Anwendungen, 3. Auflage, Hanser Lehrbücher des Bauingenieurwesens, München, 2014
- Giesecke, Jürgen; Mosonyi, Emil:** Wasserkraftanlagen – Planung, Bau und Betrieb, 5. Aktual. und erweiterte Auflage, Stuttgart, 2009
- Glock, Thimo:** Experimentelle Ermittlung von 3D-Strömungssignaturen und hydraulischen Verlusthöhen bei schräg angeströmten Rechenanlagen, Master-Thesis am Institut für Wasserbau und Hydraulik, TU Darmstadt, 2017
- Göde, Eberhard; Ruprecht, Albert:** Einlaufgestaltung und Einlaufrechen an Kleinwasserkraftanlagen, [http://kwk.ihs.uni-stuttgart.de/fileadmin/IHS-startseite/veroeffentlichungen/v2002\\_04.pdf](http://kwk.ihs.uni-stuttgart.de/fileadmin/IHS-startseite/veroeffentlichungen/v2002_04.pdf), Onlineveröffentlichung, Institut für Strömungsmechanik und Hydraulische Strömungsmaschinen, Universität Stuttgart, 2002 (abgerufen am 22.03.2017)
- Hassinger, Reinhard:** Grundlagen des Fischschutzes an Einlaufrechen, PowerPointPräsentation, Versuchsanstalt und Prüfstelle für Umwelttechnik und Wasserbau, Universität Kassel, im Auftrag des Ministeriums für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Landwirtschaft des Landes Brandenburg, 2011, (<http://www.lfu.brandenburg.de/cms/detail.php/bb1.c.293953.de?highlight=fischschutz+einlaufrechen>, abgerufen am 30.03.2014)
- Hassinger, Reinhard:** Hydraulische Grundlagen für Fischschutz und Fischabstieg (Entwurf), Arbeitsgrundlage DWA Arbeitsgruppe 8.1, unveröffentlicht, Kassel, 2016
- Heimerl, Stephan; Dußling, Uwe; Reiss, Johannes:** Ausbaupotenzial der Wasserkraft bis 1.000 kW im Einzugsgebiet des Neckars unter Berücksichtigung ökologischer Bewirtschaftungsziele (ohne Bundeswasserstraße Neckar), im auftrag des Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, Stuttgart, 2011
- Heinemann, Ekkehard; Paul, Runo:** Hydraulik für Bauingenieure, B.G.Teubner Verlag, Stuttgart und Leipzig, 1998
- Henkel Christiaan; Burgerhout, Erik; de Wijze, Danielle; Dirks, Ron; Minegishi, Yuki; Jansen, Hans J.; Spaink, Herman; Dufour, Sylvie; Weltzien, Finn-Arne; Tsukamoto Katsumi; van den Thillart, Guido:** Primitive Duplicate Hox Clusters in the European Eel’s Genome, PloS one, 2012

- 
- Hessischer Landtag:** Verordnung über die gute fachliche Praxis in der Fischerei und den Schutz der Fische (Hessische Fischereiverordnung HFO) , Gesetz- und Verordnungsblatt für das Land Hessen, Teil I vom 30.12.2008, Wiesbaden, 2008
- Hochwasservorhersagezentrale Baden-Württemberg:** Pegelkarte, Pegel Rotenfels, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg. <http://www.hvz.baden-wuerttemberg.de/>, (abgerufen am mehrfach in 2016 und 2017)
- Hübner, Dirk; Menzel, Christoph; Fricke, Roman; Hassinger, Reinhard; Rahn, Silvia:** Laboruntersuchungen zu Auswirkungen von Kraftwerksrechen auf Rotaugen (*Rutilus rutilus*) und Brassen (*Abramis brama*) in Abhängigkeit von Stababstand und Anströmgeschwindigkeit, im Auftrag des Regierungspräsidiums Kassel, Marburg, 2011
- Hydro-Energie Roth GmbH:** Bestandsaufnahme aller Fischauf- und -abstiege an der Murg für das Regierungspräsidium Karlsruhe (Auszug für Ottenau), unveröffentlicht, Karlsruhe, 2014
- International Council for the Exploration of the Sea (ICES):** Report of the Working Group on Eels (WGEEEL) 2016, Cordoba Spain, 2016
- Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR):** Der Lachs kommt voran!, <http://www.iksr.org/de/themen/oekologie/pflanzen-und-tiere/fische/der-lachs-kommt-voran/index.html>, (abgerufen am 18.03.2017)
- Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR):** Rhein & Lachs 2020, Programm für Wanderfische im Rheinsystem, Fachbericht ISBN: 3-935324-48-0, [http://www.iksr.org/fileadmin/user\\_upload/Fachberichte/fb\\_148\\_de.pdf](http://www.iksr.org/fileadmin/user_upload/Fachberichte/fb_148_de.pdf) (abgerufen am 10.01.2016), 2005
- Jank, Klaus:** Aussagen zum Stabprofil und zu den Kosten, JANK GmbH Turbinen- und Stahlwasserbau / Schneepflugbau, Jeggling Österreich, E-Mail vom 25.03.2017
- Jansen, Henrice; Winter, Hendrik; Bruijs, Maarten; Polman, Harry:** Just go with the flow? Route selection and mortality during downstream migration of silver eel in relation to river discharge, ICES, 2007
- Kirschmer, Otto:** Untersuchungen über den Gefällsverlust an Rechen, Dissertation an der TU München, 1925
- Kirschner, Oliver; Ruprecht, Albert; Wang, Huiming; Kretz, Emanuel:** Entwicklung eines verlustarmen Stabprofils für Rechen mit kleiner lichter Stabweite, WasserWirtschaft 10/2015
- Kolmogorov, Andrei Nikolajewitsch:** The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds numbers, Proceedings of the USSR Academy of Sciences Nr. 30, 1941
- Kriewitz-Byun, Carl Robert:** Leitrechen an Fischabstiegsanlagen: Hydraulik und fischbiologische Effizienz, Dissertation an der ETH Zürich, 2014
- Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW):** Handreichung Fischschutz und Fischabstieg an Wasserkraftanlagen, Karlsruhe, September 2016
- Landtag von Baden-Württemberg:** Wassergesetz für Baden-Württemberg (WG), Gesetzblatt Nr. 17, Stuttgart, 03.12.2013
- Larinier, Michel; Travade, Francois:** Downstream migration: problems and facilities. Bulletin Francais de la Peche et de la Pisciculture, 181-207, 2002
- Lehmann, Boris; Adam, Beate; Engler, Oliver; Hecht, Veronika; Schneider, Katharina:** Bundesamt für Naturschutz (Hrsg.): Ethohydraulische Untersuchungen zur Verbesserung des Fischschutzes an Wasserkraftanlagen, BfN-Bericht Nr. 151, Bonn Bad Godesberg, 2016
- Meusburger, Hubert:** Energieverluste an Einlaufrechen von Flusskraftwerken, Dissertation an der ETH Zürich, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, Zürich, 2002
- Morgenschweis, Gerd:** Hydrometrie, Theorie und Praxis der Durchflussmessung in offenen Gerinnen, Springer Verlag Heidelberg, 2010
- Mosonyi, Emil:** Wasserkraftwerke I, Band I Niederdruckanlagen, Düsseldorf 1966

---

**Nestmann, Franz; Lehmann, Boris; Läkemäker, Katrin; Seidel, Frank:** Experimentelle Ermittlung der hydraulischen Rechenwiderstände bei unterschiedlichen Anströmgeschwindigkeiten und –winkeln, Abschlussbericht für die zweite Fischaufstiegsanlage am Wehr Geesthacht, im Auftrag der Vattenfall Europe Generation AG & Co. KG, Karlsruhe, 2010

**Office of Technology Assessment, United States of America:** Fish Passage Technologies: Protection at Hydropower Facilities, OTA-ENV-641, GPO stock #052-003-01450-5, Washington D.C., 1995

**Pavlov, Dmitriï Sergeevich:** Structures assisting the migrations of non-salmonid fish, FAO Fisheries Technical Paper, Food and Agriculture Organisation of the United Nations, Rom, 1989

**Prandtl, Ludwig:** Führer durch die Strömungslehre, 1931

**Procom System S.A.:** Aufbauskinne der Elektroscheuchanlage Rotenfels, 2016

**Procom System S.A.:** The Neptun low-voltage DC fish-guidance system, Infobroschüre der Website <http://procomsystem.pl/index.php?page=neptun> (abgerufen am 19.03.2017)

**Rauschert, Martin:** Fisch und Netz, Ethologische Beobachtungen in der Binnenfischerei, 2013

**Raynal, Sylvain:** Étude expérimentale et numérique des grilles ichtyocompatibles, Dissertation/Thèse an der Université de Poitiers, 2013

**Raynal, Sylvain; Courret, Dominique; Chatellier, Ludovic; Larinier, Michel; David, Laurent:** An experimental study on fish-friendly trashracks – Part 1. Inclined trashracks, Journal of Hydraulic Research Nr. 51, 2013a

**Raynal, Sylvain; Chatellier, Ludovic; Courret, Dominique; Larinier, Michel; David, Laurent:** An experimental study on fish-friendly trashracks – Part 2. Angled trashracks, Journal of Hydraulic Research Nr. 51, 2013b

**Raynal, Sylvain; Chatellier, Ludovic; Courret, Dominique; Larinier, Michel; David, Laurent:** Streamwise bars in fish-friendly angled trashracks, Journal of Hydraulic Research Nr. 52, 2014

**Ritsch, Sebastian:** Hydraulische Untersuchungen an Schrägrechen zum Fischschutz, Masterarbeit, Universität Innsbruck, Arbeitsbereich Wasserbau, 2015

**Rost, Ulrich:** Elektrische Verhaltensbarriere für Fische am Wasserkraftwerk Rotenfels, EnBW-Präsentation, unveröffentlicht, Forbach, 2014

**Rost, Ulrich; Weibel, Uwe; Wüst, Steffen; Haupt, Oliver:** Versuche zum Scheuchen und Leiten von Fischen mit elektrischem Strom, WasserWirtschaft 7/8 2014

**Schmalz, Wolfgang:** Untersuchungen zum Fischabstieg und Kontrolle möglicher Fischschäden durch die Wasserkraftschnecke an der Wasserkraftanlage Walkmühle an der Werra in Meiningen, Büro FLUSS, Breitenbach, 2010

**Schmalz, Wolfgang; Wagner, Falko; Sonny, Damien:** Arbeitshilfe zur standörtlichen Evaluierung des Fischschutzes und Fischabstiegs, Forum „Fischschutz und Fischabstieg“, im Auftrag des Ecologic Institutes gemeinnützige GmbH, 2015

**Schmitt, Daniel:** Untersuchung der Wirkung von Feinrechen auf die Turbulenz in Kraftwerkszuläufen, Bachelorarbeit, Versuchsanstalt und Prüfstelle für Umwelttechnik und Wasserbau, Universität Kassel, 2015

**Schwab, Johannes:** Ermittlung von Rechenverlusten und hydraulischen Signaturen an Horizontalrechen, Master-Thesis am Institut für Wasserbau und Hydraulik, TU Darmstadt, 2016

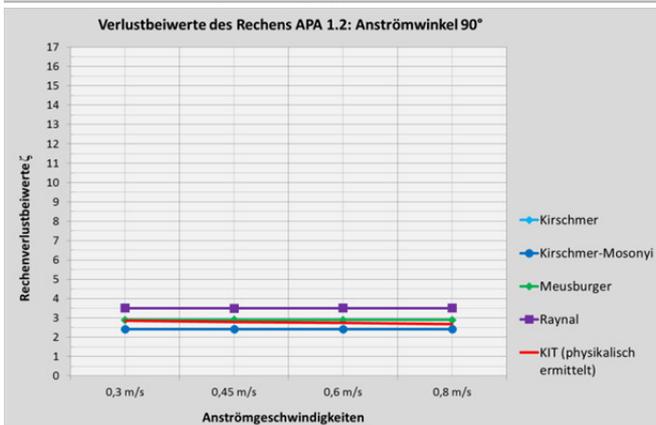
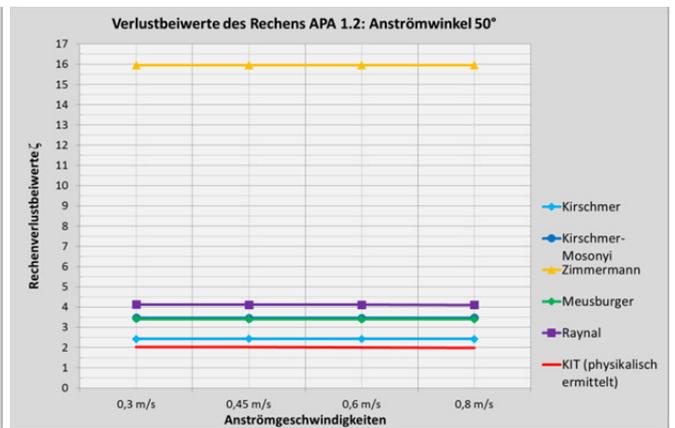
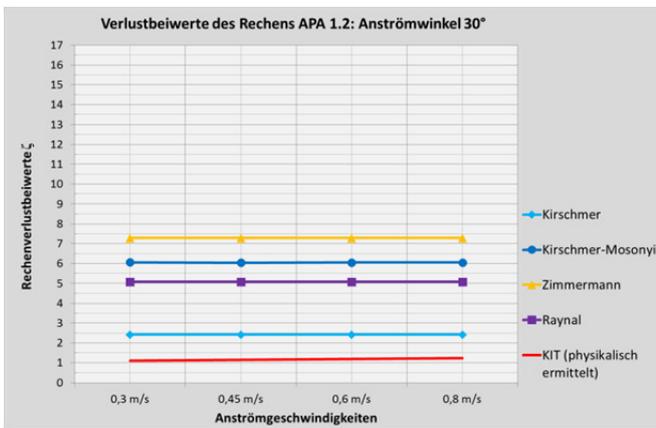
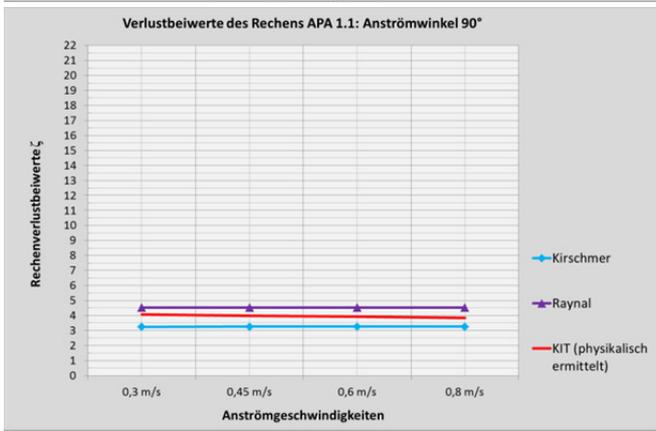
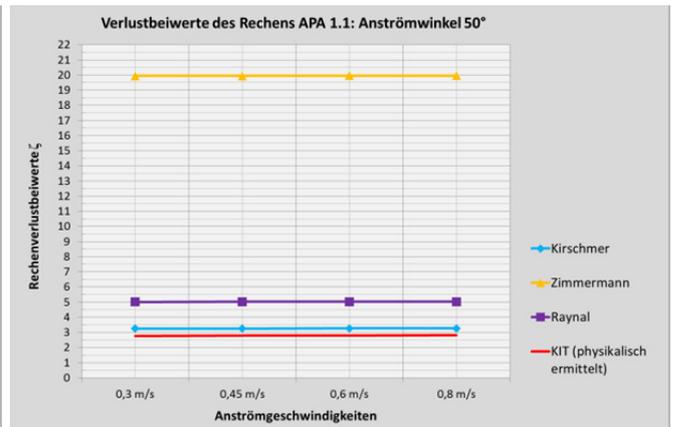
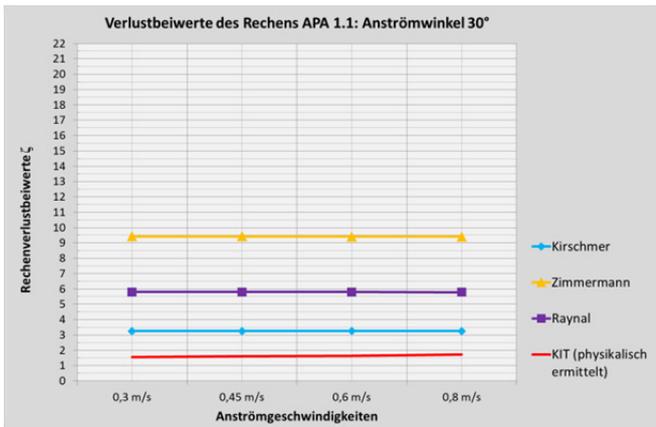
**Spangler, Josef:** Untersuchung über den Verlust an Rechen bei schräger Zuströmung, Mitteilungen des Hydraulik-Institutes der TH München, 1928

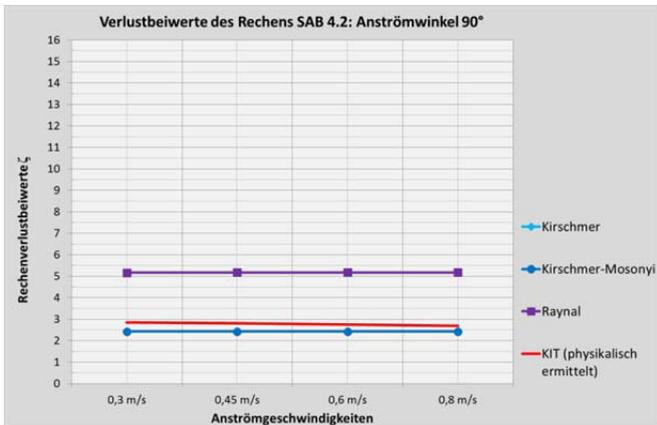
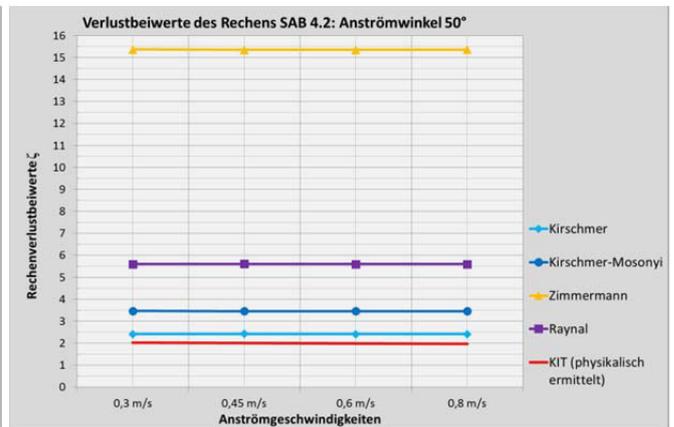
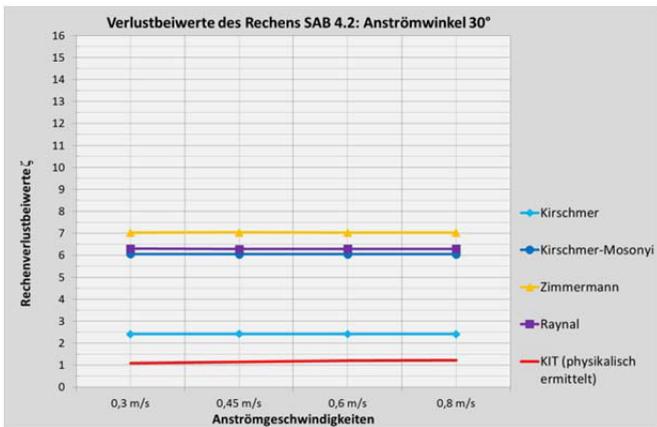
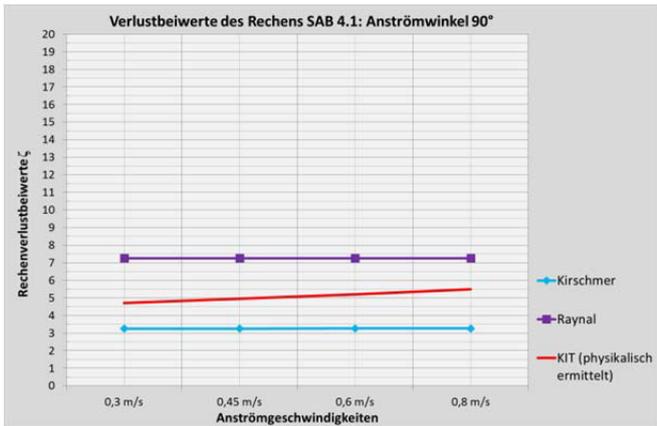
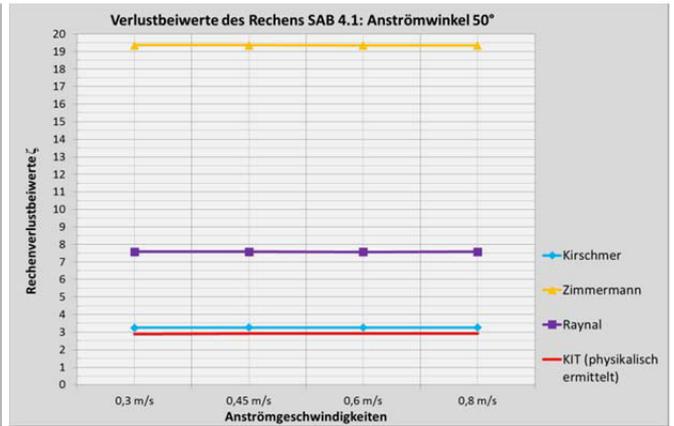
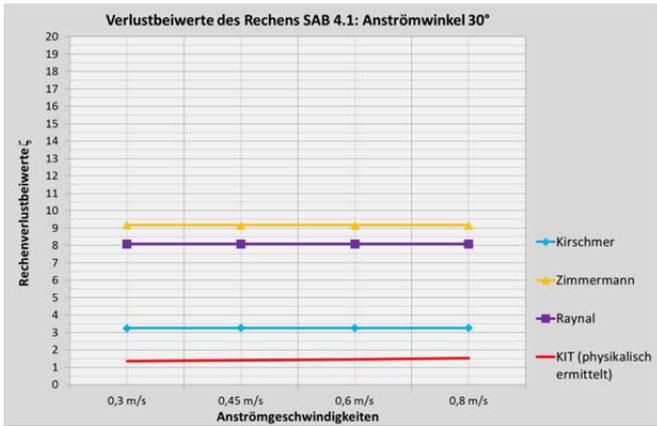
**Taft, E. P.:** Assessment of downstream migrant fish protection technologies for hydroelectric application, EPRI research project 2694-1, Boston (Stone & Webster Engineering Corporation, 1986

**Thonhauser, Stefan; Brunnlechner, Johann:** Untersuchungen zum “Stand der Technik” von Turbineneinlaufrechen an mittleren und größeren Wasserkraftanlagen in Deutschland und Österreich, Vortrag in der DWA-Arbeitsgruppe WW-5.6 Rechen- und Rechenreinigungsanlagen, Kassel, 2017

- 
- Travade, Francois; Larinier, Michel; Subra, Sébastien; Gomes, Peggy; De-Oliveira, Eric:** Behaviour and passage of european silver eel at small hydro power plant during their downstream migration, Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems, 2010
- Wehrhahn, Dirk:** Ultraschall-Abstandsmesssystem UAS, Bedienungsanleitung, Hannover, 2002
- Weibel, Uwe; Wüst, Steffen:** Rechenversuche KKP 2012, Auswertung der Versuche mit Lachsen, Regenbogenforellen und Aalen, unveröffentlicht, Kandel, 2012
- Weibel, Uwe; Wüst, Steffen:** Scheuch- und Leitversuche Bad Rotenfels 2015, Ergebnisse der Versuche mit Lachssmolts und Aalen, unveröffentlicht, Kandel, 2015a
- Weibel, Uwe; Wüst, Steffen:** DIDSON-Untersuchungen zum Fischabstieg Hirschhorn, Erkenntnisse aus den Beobachtungsreihen Winter 2014/2015 und Sommer 2015, unveröffentlicht, Kandel, 2015b
- Weibel, Uwe; Rost, Ulrich:** Elektrische Verhaltensbarriere – Scheuch- und Leitversuche an der Murg, SVK-Tagungsband, Kandel, 2016
- Weibel, Uwe; Wüst, Steffen:** Scheuch- und Leitversuche Ottenau & Bad Rotenfels 2016/17, unveröffentlicht, Kandel, 2017
- Wickert, Gerhard; Schmauß, Gerhard:** Stahlwasserbau – Theorie, Konstruktive Lösungen, Spezielle Probleme, Springer-Verlag, Heidelberg, 1971
- Wikipedia:** Europäischer Aal, [https://de.wikipedia.org/wiki/Europ%C3%A4ischer\\_Aal](https://de.wikipedia.org/wiki/Europ%C3%A4ischer_Aal) (abgerufen am 23.02.2017)
- Wikipedia:** Atlantischer Lachs, [https://de.wikipedia.org/wiki/Atlantischer\\_Lachs](https://de.wikipedia.org/wiki/Atlantischer_Lachs) (abgerufen am 18.03.2017)
- Wikipedia:** Hydromechanik, <https://de.wikipedia.org/wiki/Hydromechanik> (abgerufen am 28.03.2017)
- WKW Staustufe Kostheim/Main GmbH & Co. KG:** Unterlagen zum Neubau des Kraftwerks Kostheim/Main und zur Funktionsfähigkeit von Fischauf- und -abstieg, 2015 an EnBW Energie Baden-Württemberg AG
- Württembergischer Anglerverein e.V.:** Fischzähler Riverwatcher an den Zugwiesen, Video Mai 2016, [https://www.wav-stuttgart.de/Gewaesser/Neckar/Fischzaehler\\_476.html](https://www.wav-stuttgart.de/Gewaesser/Neckar/Fischzaehler_476.html) (abgerufen am 29.04.2017)
- WWF Deutschland, TRAFFIC Europe-Germany:** Hintergrundinformationen Europäischer Flusssaal, 2010, [http://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/WWF-Arten-Portraet-Europaeischer-Flusssaal\\_01.pdf](http://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/WWF-Arten-Portraet-Europaeischer-Flusssaal_01.pdf) (abgerufen am 23.02.2017)
- WWF Deutschland:** Artenlexikon, Europäischer Flusssaal, 2014
- WWF Schweiz:** Fischabstieg: Anlagen in Deutschland überzeugen, Zürich, 2010
- Zimmermann, Joachim:** Widerstand schräg angeströmter Rechengitter, Versuchsanstalt für Wasserbau und Kulturtechnik, Theodor-Rehbock-Flussbaulaboratorium, Universität Fridericiana Karlsruhe, 1969

# Anhang 1: Verlustbeiwerte der untersuchten Schrägrechen in Kap. 3.1





## Anhang 2: Hydrometrisch ermittelte Rechenverluste am Schrägreden im Forschungslabor der TU Darmstadt

<b>Anströmwinkel 30°</b>					
<b>Stababstand 10 mm</b>		<b>Stababstand 18 mm</b>		<b>Stababstand 30 mm</b>	
<b>Anströmgeschwindigkeit [m/s]</b>	<b>Rechenverlust [cm]</b>	<b>Anströmgeschwindigkeit [m/s]</b>	<b>Rechenverlust [cm]</b>	<b>Anströmgeschwindigkeit [m/s]</b>	<b>Rechenverlust [cm]</b>
0,4	1,62	0,4	1,16	0,4	1,02
0,5	2,61	0,5	1,84	0,5	1,45
0,6	3,92	0,6	2,74	0,6	2,54
0,7	5,75	0,7	3,93	0,7	3,31
0,75	7,12	0,77	5,38	0,77	4,68
<b>Anströmwinkel 45°</b>					
<b>Stababstand 10 mm</b>		<b>Stababstand 18 mm</b>		<b>Stababstand 30 mm</b>	
<b>Anströmgeschwindigkeit [m/s]</b>	<b>Rechenverlust [cm]</b>	<b>Anströmgeschwindigkeit [m/s]</b>	<b>Rechenverlust [cm]</b>	<b>Anströmgeschwindigkeit [m/s]</b>	<b>Rechenverlust [cm]</b>
0,32	1,39	0,4	1,52	0,4	1,15
0,4	2,38	0,5	2,42	0,5	1,73
0,5	3,84	0,61	3,73	0,6	2,73
0,6	5,99	0,7	5,70	0,69	3,72
0,72	10,63	0,76	7,52	0,77	5,90
<b>Anströmwinkel 55°</b>					
<b>Stababstand 10 mm</b>		<b>Stababstand 18 mm</b>		<b>Stababstand 30 mm</b>	
<b>Anströmgeschwindigkeit [m/s]</b>	<b>Rechenverlust [cm]</b>	<b>Anströmgeschwindigkeit [m/s]</b>	<b>Rechenverlust [cm]</b>	<b>Anströmgeschwindigkeit [m/s]</b>	<b>Rechenverlust [cm]</b>
0,4	2,96	0,4	1,40	0,4	0,91
0,5	4,55	0,5	2,36	0,5	1,61
0,6	7,04	0,6	3,58	0,6	2,55
0,72	11,74	0,7	5,43	0,7	3,64
-	-	0,76	7,52	0,77	5,70
<b>Anströmwinkel 70°</b>					
<b>Stababstand 10 mm</b>		<b>Stababstand 18 mm</b>		<b>Stababstand 30 mm</b>	
<b>Anströmgeschwindigkeit [m/s]</b>	<b>Rechenverlust [cm]</b>	<b>Anströmgeschwindigkeit [m/s]</b>	<b>Rechenverlust [cm]</b>	<b>Anströmgeschwindigkeit [m/s]</b>	<b>Rechenverlust [cm]</b>
0,32	2,24	0,4	1,93	0,4	1,59
0,4	4,08	0,5	3,75	0,5	2,72
0,5	6,70	0,6	5,76	0,6	3,92
0,6	11,08	0,71	9,60	0,7	6,37
0,69	15,87	0,73	11,07	0,76	8,16

---

### Anhang 3: Probleme bei der Versuchsdurchführung mit Lachssmolts im Forschungslabor

---

Folgende Probleme traten bei der Versuchsdurchführung mit Lachssmolts im Labor auf:

- **Schrägrechenumbau:** Aufgrund der zeitlich begrenzten Versuchsdauer im April 2016 mussten die Schrägrechensysteme meist am frühen Morgen vor Versuchsbeginn umgebaut werden, was eine hohe Flexibilität der Mitarbeiter im Forschungslabor voraussetzte.
- **Pumpenverfügbarkeit:** Zu Beginn der Versuche funktionierte die dritte Pumpe nicht, so dass in der ersten Woche nur die Anströmgeschwindigkeiten 0,4 m/s und 0,5 m/s eingestellt werden konnten. Der Schrägrechen musste daher – über die gesamte Versuchsdauer – häufiger umgebaut werden, da die hohen Anströmgeschwindigkeiten bei sonst gleichem Rechenaufbau erst in der zweiten Woche untersucht werden konnten.
- **Stromversorgung der Hälterungen:** Technische Probleme traten bei der Stromversorgung der Hälterbelüftungen sowie bei den Frischwasserpumpen auf. Daher mussten beide Systeme laufend kontrolliert werden.
- **Durchlässigkeit der Hälterungen:** Die einzelnen Hälterungen waren trotz Deckel und Trenngitter zweimal für je zwei Gruppen so durchlässig, dass sich diese vermischen konnten. Hier wurden die Schlitzlöcher an Sohle und Wänden sowie der Abschluss der Deckel nachträglich abgedichtet.
- **Lichtverhältnisse:** Das Wetter beeinflusste die Versuchsdurchführung im Forschungslabor, da Sonnenstrahlen durch die Dachfenster auf die Rinne fielen und somit helle Bereiche sowie Bereiche mit Schatten schufen (Abb. 182). Bei der Studienanalyse fiel jedoch auf, dass dies keinen Einfluss auf das Verhalten der Fische am Schrägrechen hatte und wurde daher in den weiteren Ausführungen vernachlässigt.



Abb. 182: Lichteinfall in die Versuchsrinne und auf den Rechen (links) und seitlicher Lichteinfall in die Rinne (rechts)

- **Einfangen der Probanden nach Versuchsende:** Das Einfangen der Lachssmolts nach Versuchsende bei reduziertem Durchfluss und geringer Wassertiefe gestaltete sich zunächst schwierig und zeitintensiv, da die Fische schnell und ruckartig schwammen und die gesamte Rinnenlänge in Anspruch nahmen. Daher wurde für das Abfischen der Probanden der Bypass geschlossen, um ein Austausch von Ober- und Unterwasserbereich zu vermeiden. Des Weiteren wurden die Fische mittels eines Rahmens mit engmaschigem Netz in Richtung Unterwasser geleitet und dort innerhalb eines kleinen Bereichs eingefangen.

## Anhang 4: Probandenliste der 60 eingesetzten und besenderten Lachssmolts in Ottenau

Lachssmolt- Nr.	Code-Nr.	Einsetzdatum	Uhrzeit der Freisetzung	Fischlänge [cm]	Fischgewicht [g]
1	121	04.05.2016	15:15	21	100
2	2	04.05.2016	15:15	18,5	75
3	109	04.05.2016	15:15	20,5	75
4	18	04.05.2016	15:15	19	75
5	152	04.05.2016	15:15	20	75
6	62	04.05.2016	15:15	19,5	75
7	178	04.05.2016	15:15	20,5	100
8	138	04.05.2016	15:15	22	100
9	203	04.05.2016	15:15	22	100
10	34	04.05.2016	15:15	21,5	100
11	193	04.05.2016	15:15	23	125
12	80	04.05.2016	15:15	19,5	75
13	92	04.05.2016	15:15	23,5	150
14	46	04.05.2016	20:05	21	100
15	159	04.05.2016	15:15	20,5	75
16	1	04.05.2016	15:15	20	75
17	116	04.05.2016	15:15	19,5	75
18	82	04.05.2016	17:00	21,5	75
19	177	04.05.2016	17:00	18,5	70
20	133	04.05.2016	17:00	20,5	80
21	89	04.05.2016	17:00	20,5	90
22	52	04.05.2016	17:00	19,5	70
23	22	04.05.2016	17:00	20	75
24	64	04.05.2016	17:00	18	75
25	154	04.05.2016	17:00	20	80
26	40	04.05.2016	17:00	19	75
27	210	04.05.2016	17:00	20,5	75
28	111	04.05.2016	20:05	21,5	100
29	93	04.05.2016	17:00	20	75
30	150	04.05.2016	17:00	20,5	75
31	181	04.05.2016	17:00	19,5	75
32	6	04.05.2016	17:00	22	100
33	139	04.05.2016	17:00	20	75
34	166	04.05.2016	17:00	19,5	75
35	120	04.05.2016	17:00	18	75
36	33	04.05.2016	20:05	21	100
37	44	04.05.2016	20:05	22	80
38	212	04.05.2016	20:05	19,5	80
39	110	04.05.2016	20:05	22,5	110
40	24	04.05.2016	20:05	22,5	90
41	61	04.05.2016	20:05	22	110
42	73	04.05.2016	20:05	19	80
43	155	04.05.2016	20:05	21	85
44	122	04.05.2016	20:05	20	75
45	164	04.05.2016	20:05	21	100
46	200	04.05.2016	20:05	22	110
47	53	04.05.2016	20:05	20,5	100
48	63	04.05.2016	20:05	21	100
49	83	04.05.2016	20:05	22,5	125
50	186	04.05.2016	20:05	21	100
51	8	04.05.2016	20:05	19	75
52	140	04.05.2016	20:05	22	100
53	90	04.05.2016	20:05	20	75
54	15	04.05.2016	20:05	19,5	75
55	31	04.05.2016	20:05	21	100
56	101	04.05.2016	20:05	22	125
57	74	04.05.2016	20:05	21	75
58	202	04.05.2016	20:05	23	110
59	35	04.05.2016	20:05	21	85
60	112	04.05.2016	20:05	28	200

---

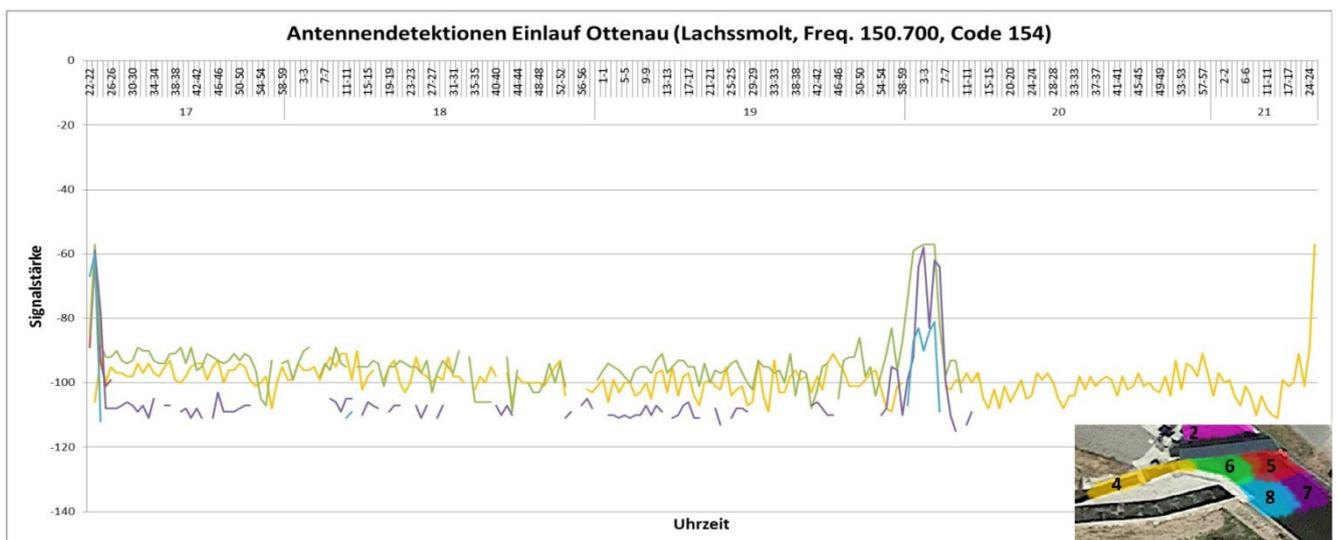
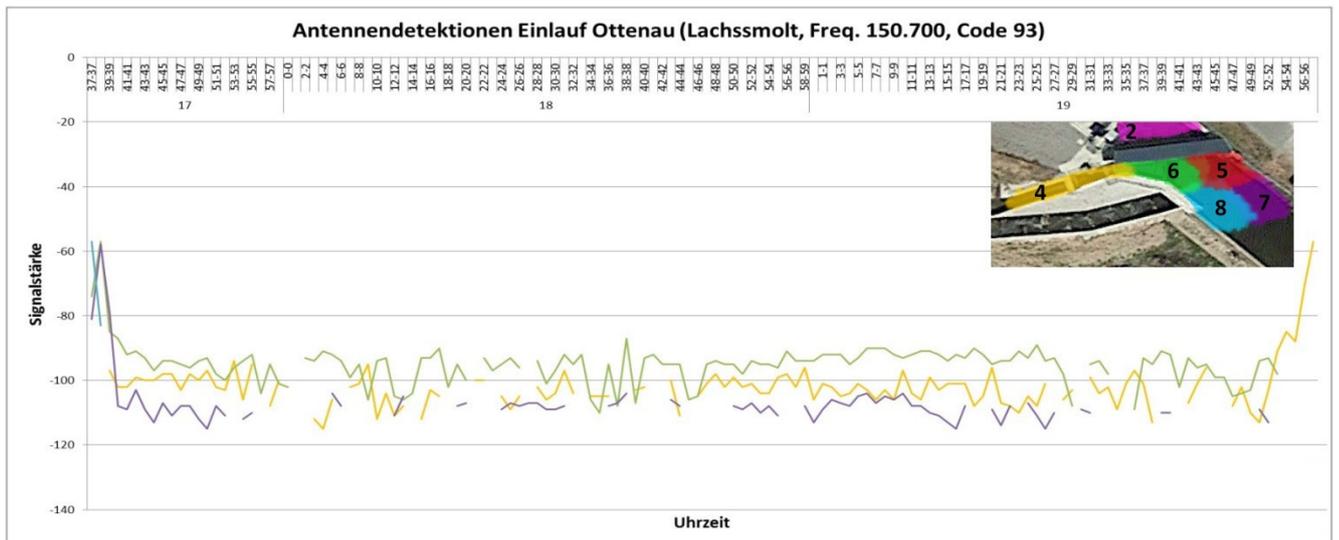
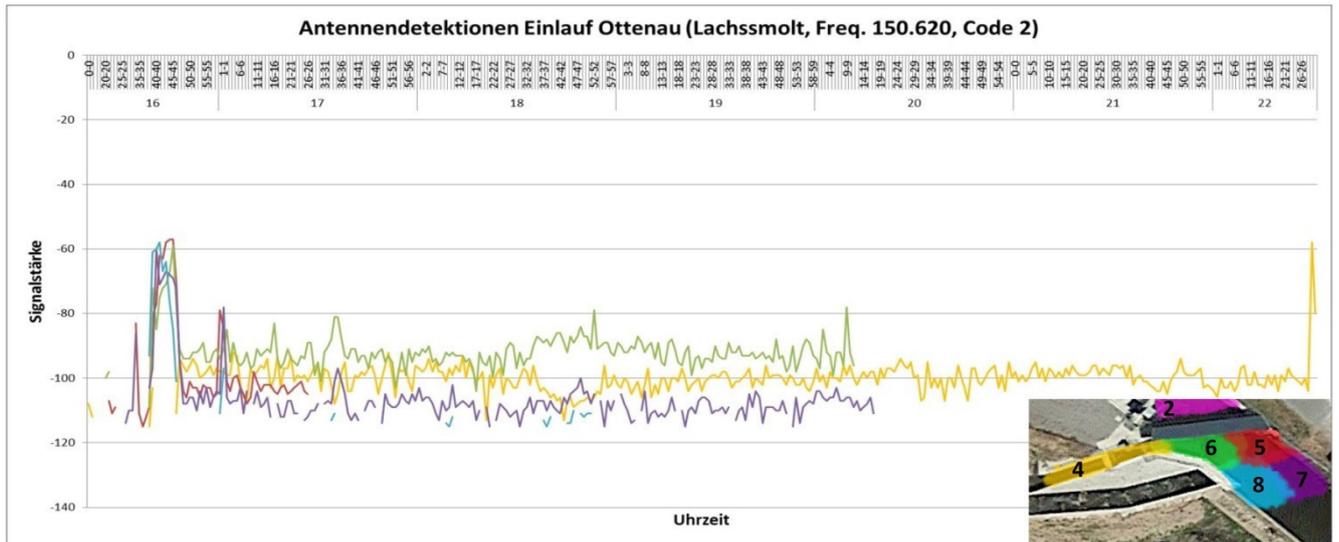
## **Anhang 5: Probleme bei der Versuchsdurchführung mit Lachssmolts im Feld**

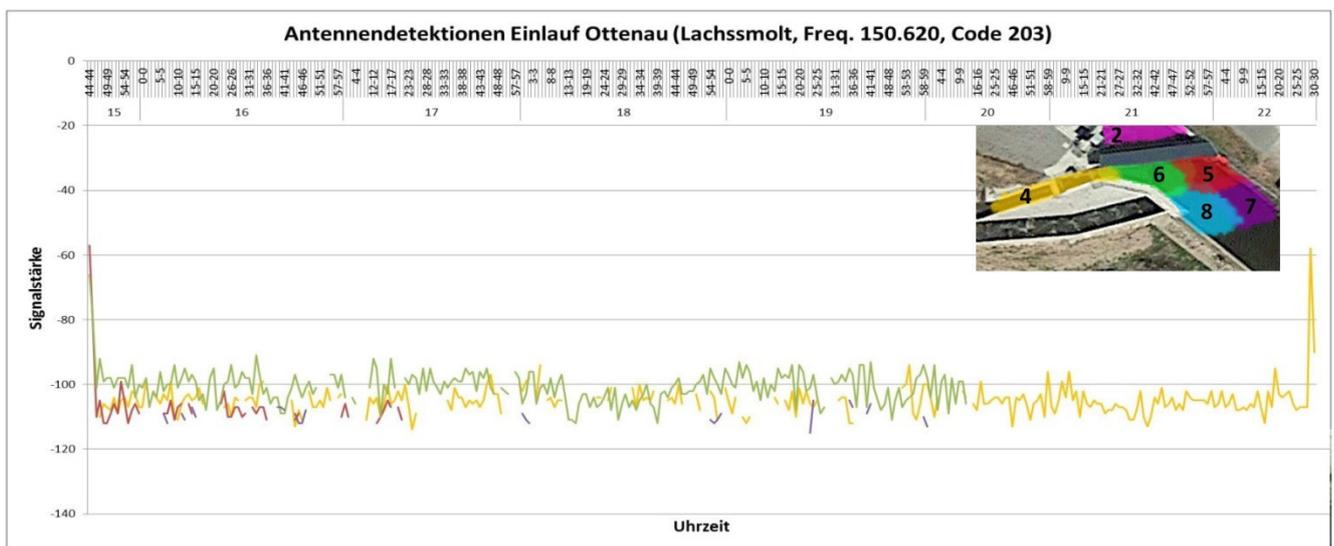
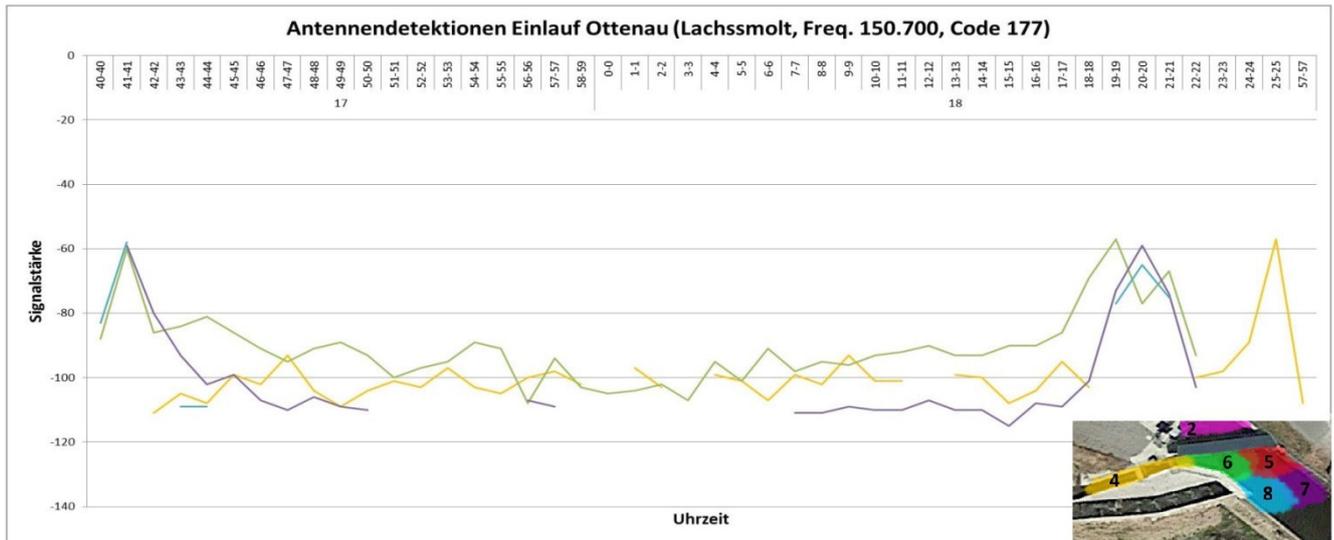
---

Während der Versuchsdurchführung ereignete sich ein zeitweiser Ausfall von Antennen vor dem Schrägrechen. Antennen Nr. 5-8 vor dem Schrägrechen fielen in der Zeit vom 04.05.2016 bis 06.05.2016 teilweise aus. Daten der Lachssmolts, die sich in diesem Zeitraum dem Schrägrechen genähert oder sich dort aufhielten, fehlen bzw. sind nicht vollständig. Die aufgezeichneten Datensätze der Fischbewegungen vor dem Rechen waren aufgrund des Antennenausfalls nicht bei allen 60 Lachssmolts ausreichend. So konnten die am Schrägrechen aufgezeichneten Daten zum Fischverhalten von nur 26 Smolts ausgewertet werden. Die Daten der Abwanderungswege waren jedoch auskömmlich, um jedem Fischcode einen Abwanderungsweg zuzuordnen. Später abgewanderte Lachssmolts ab dem 06.05.2016 wurden wieder aufgezeichnet und konnten ausgewertet werden.

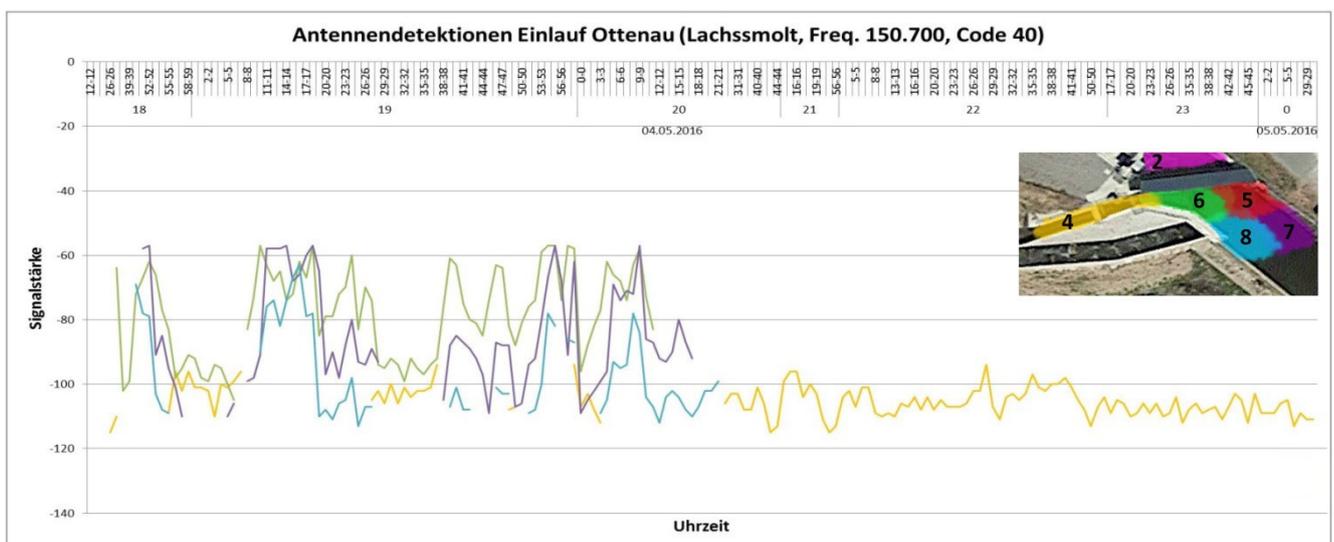
## Anhang 6: Auswertung der Signaldaten der Lachssmolts vor dem Schrägrechen Ottenau

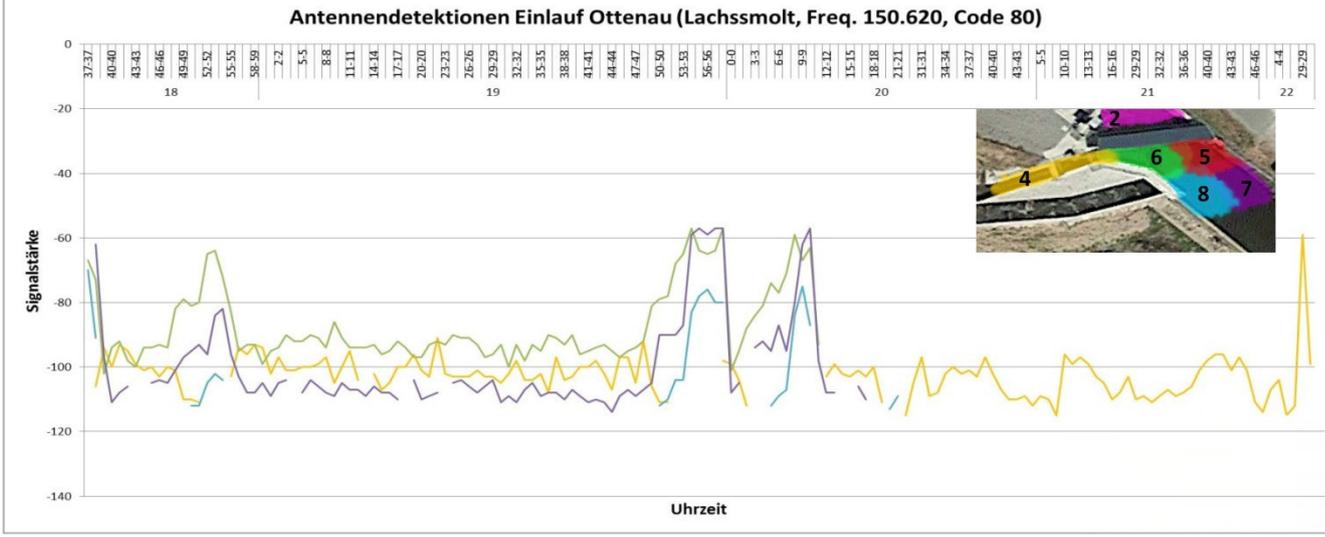
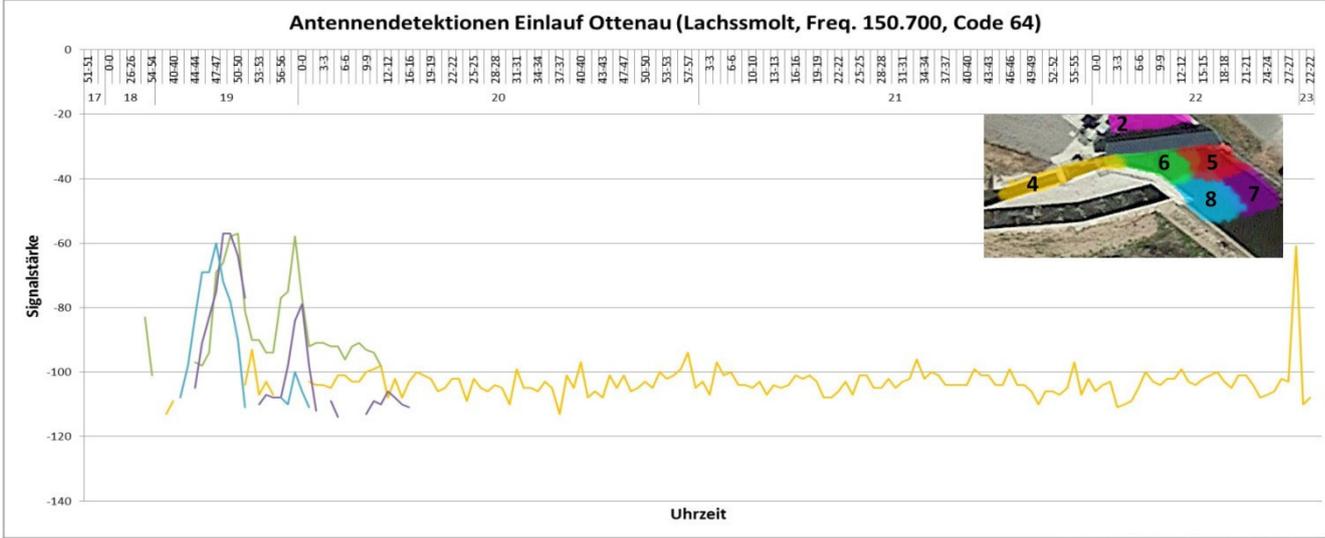
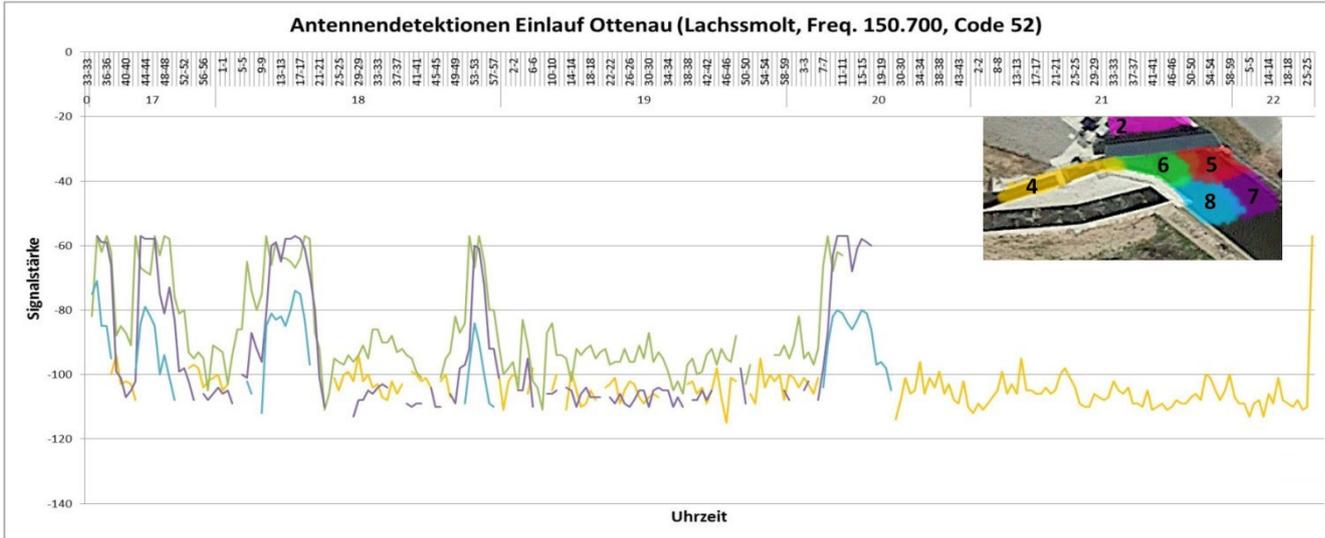
Gruppe der Lachssmolts mit stationärem Verhalten am Schrägrechen:

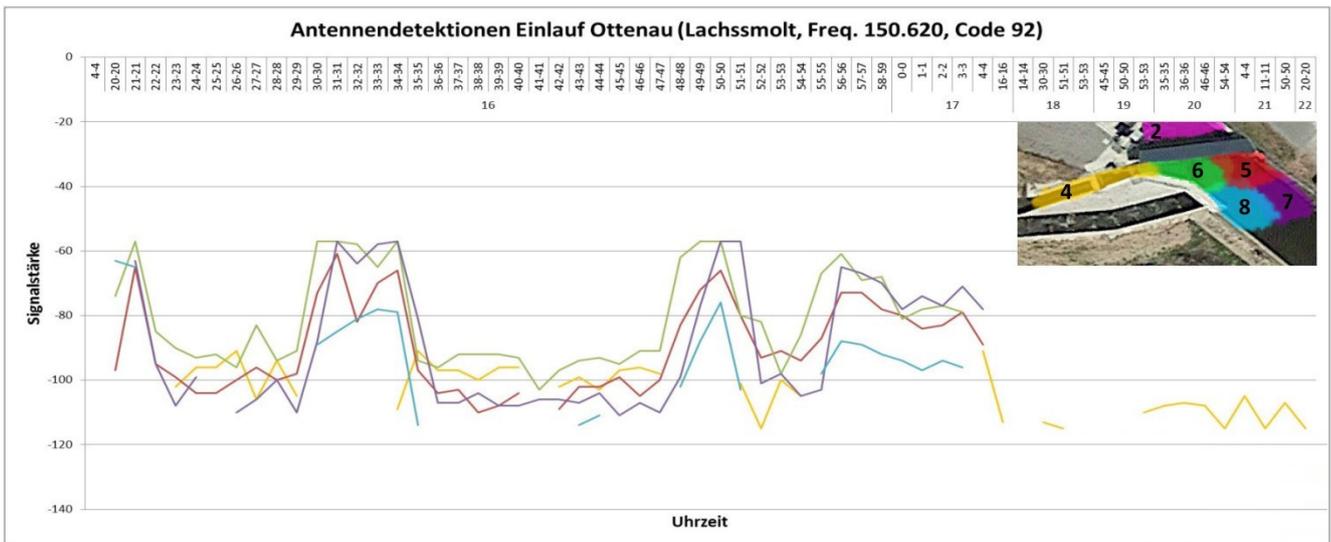
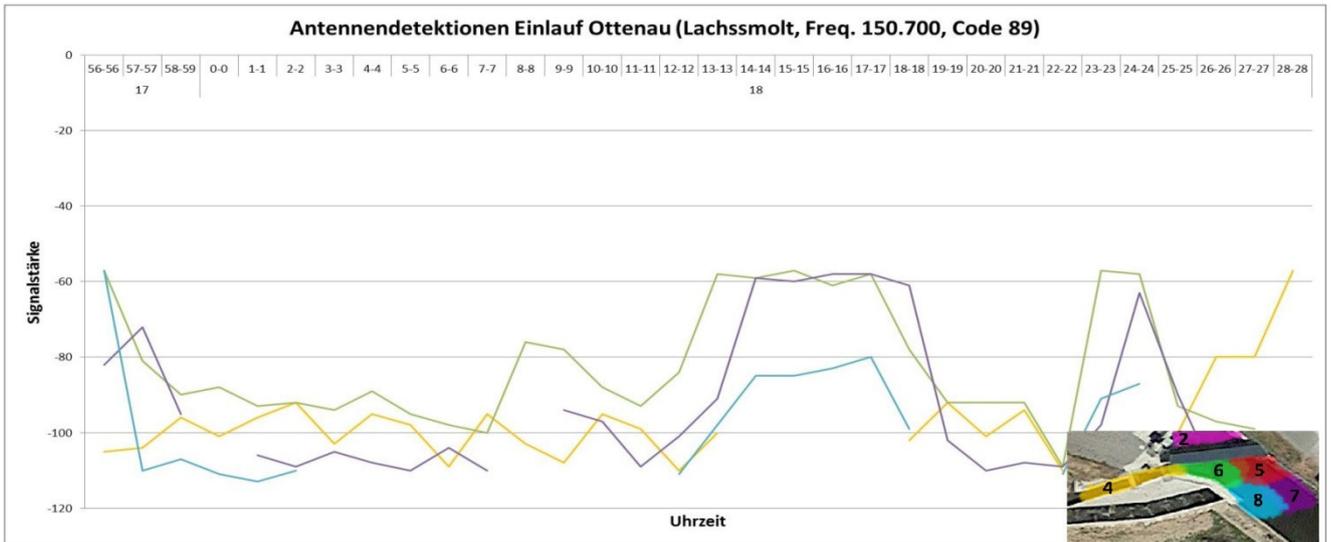
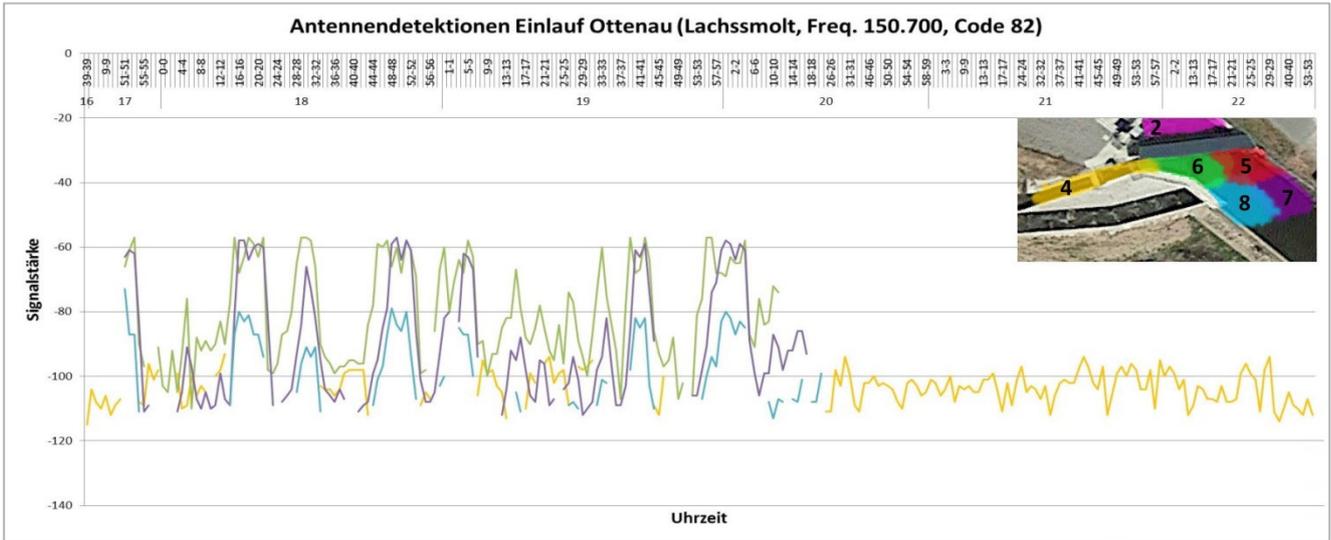


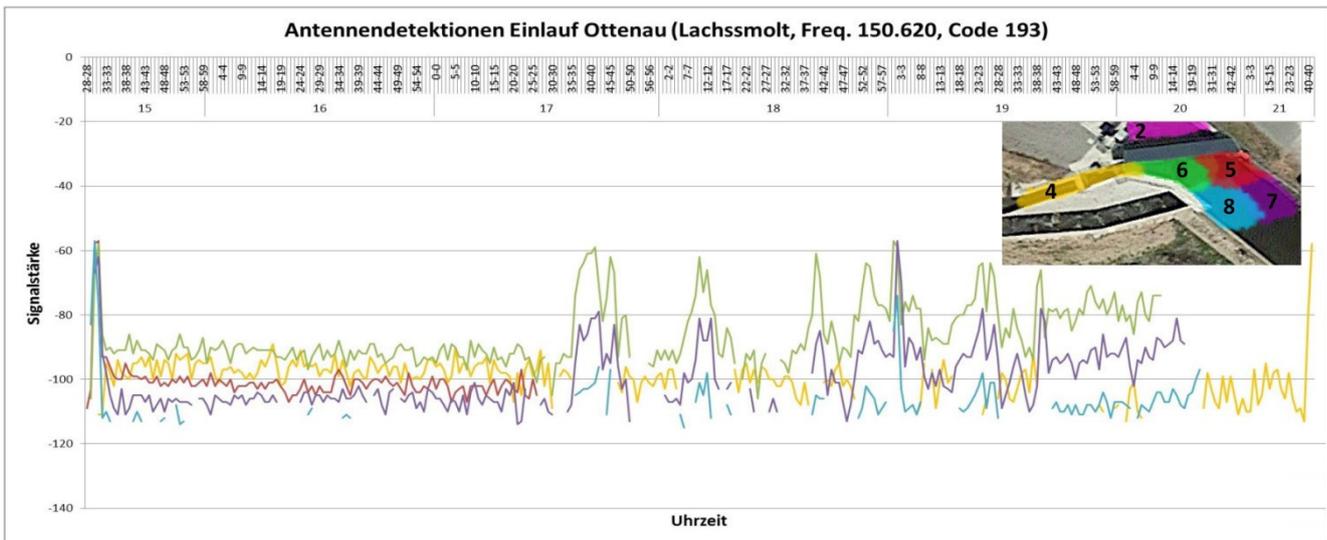
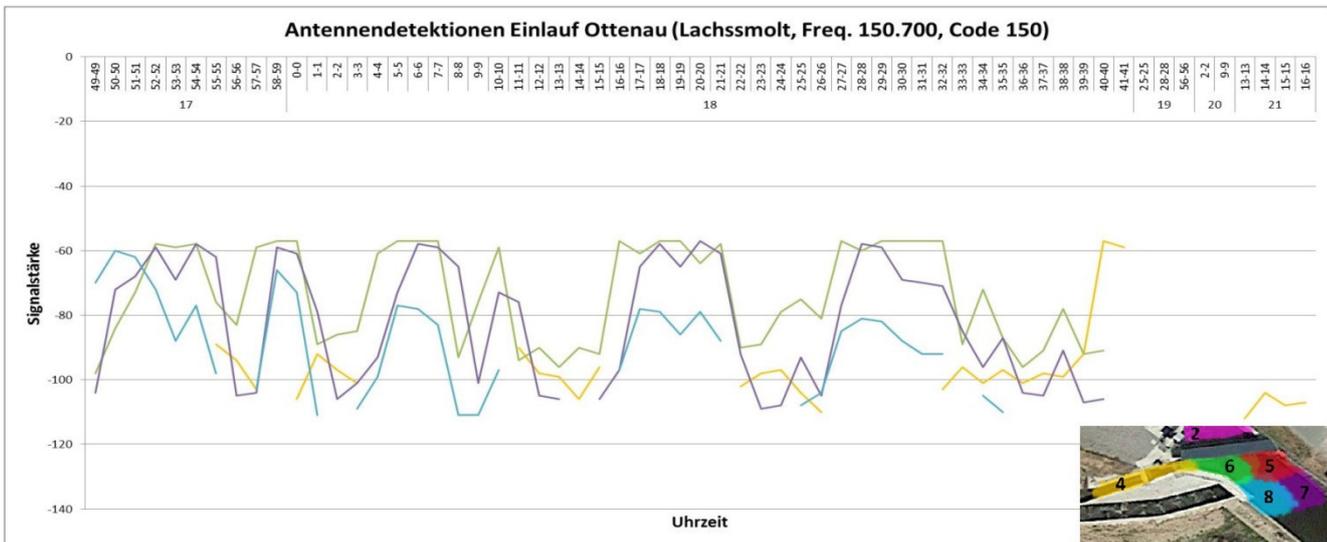
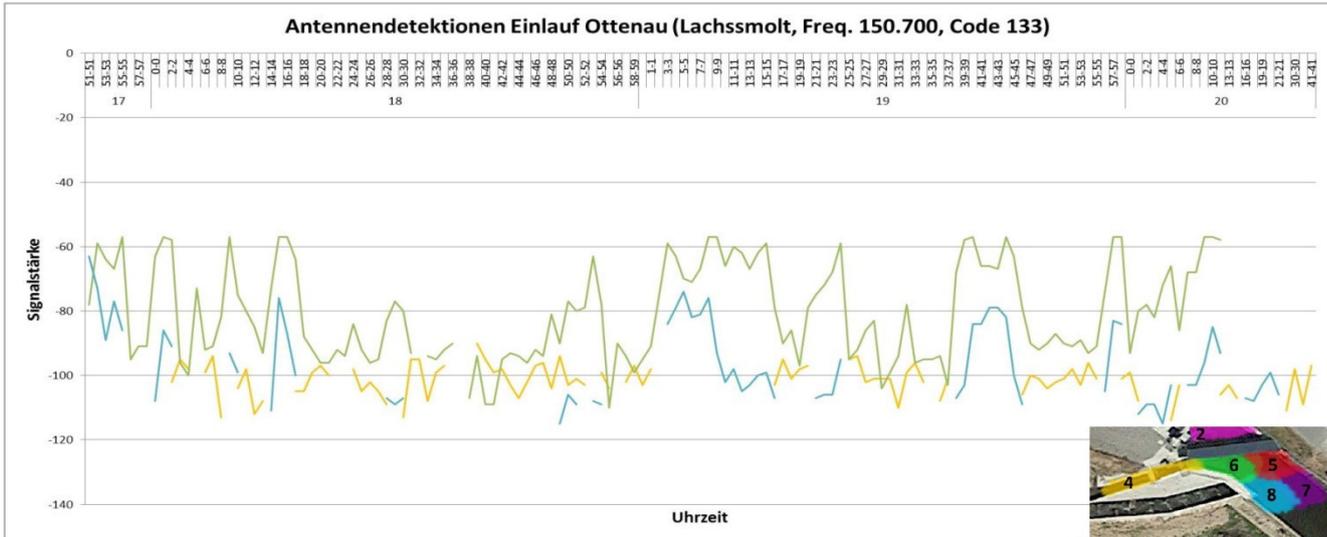


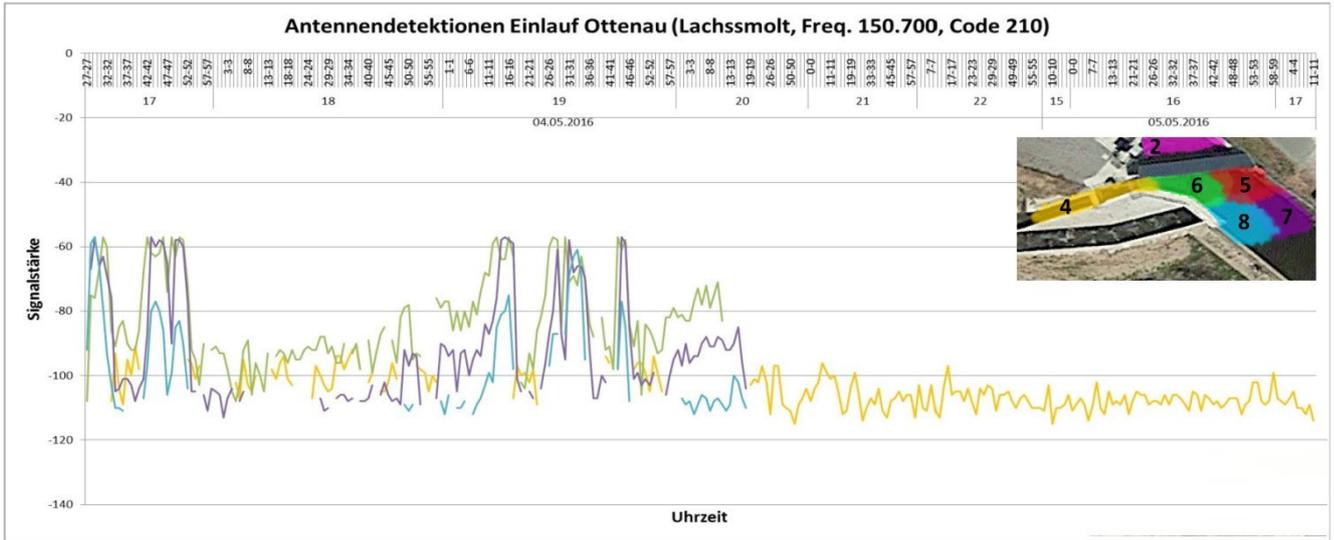
Gruppe der Lachssmolts mit sondierendem Verhalten am Schrägrechen:



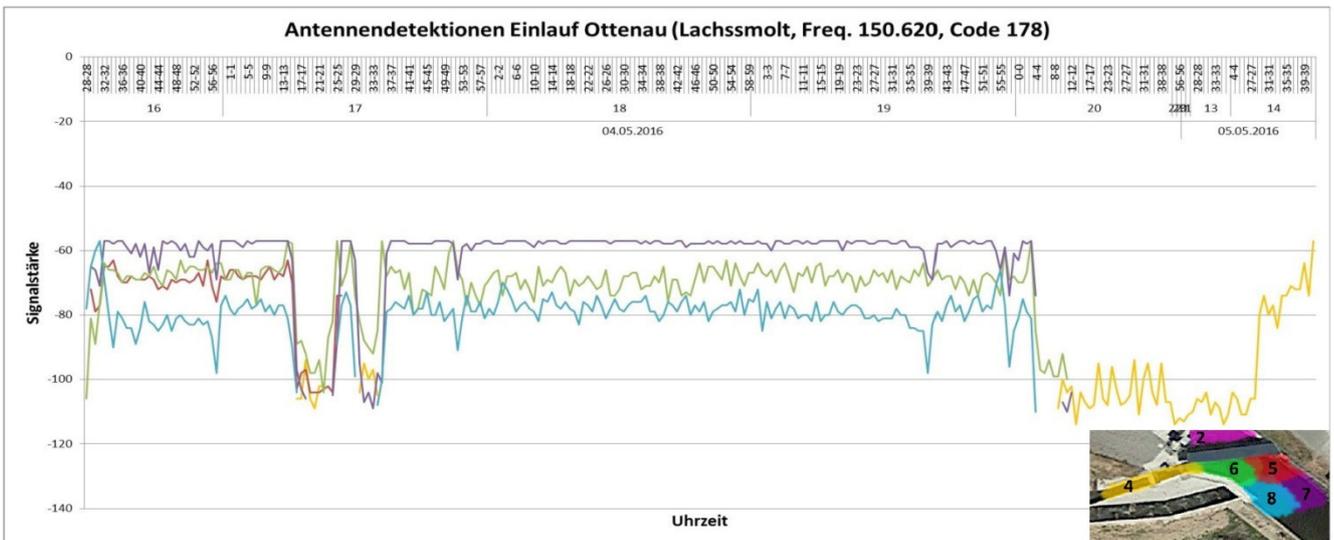
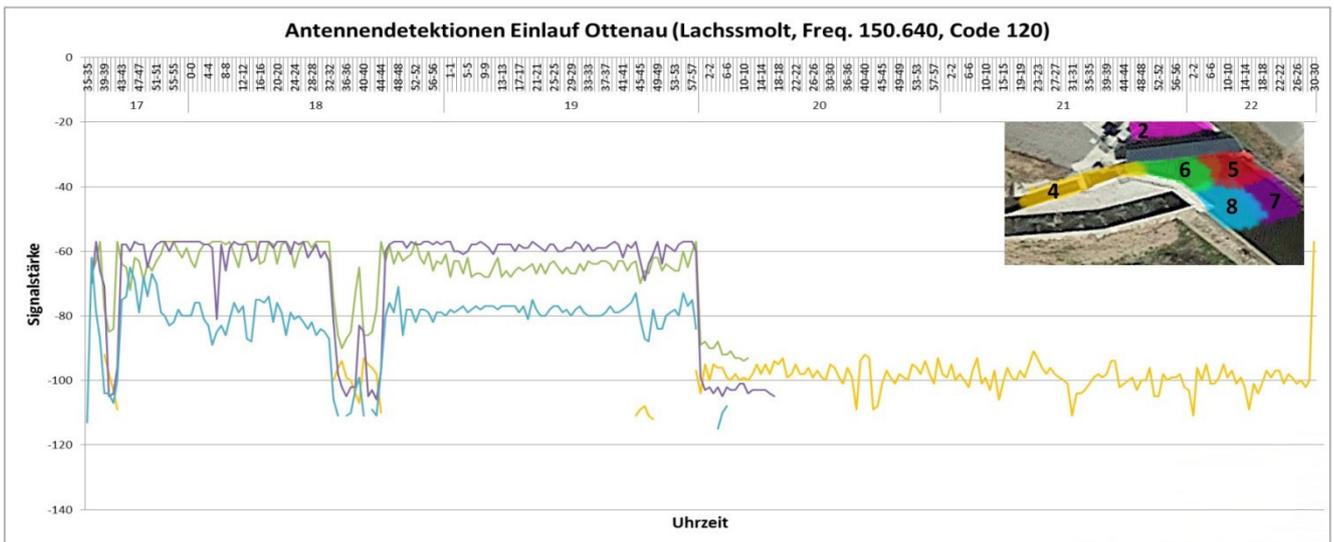




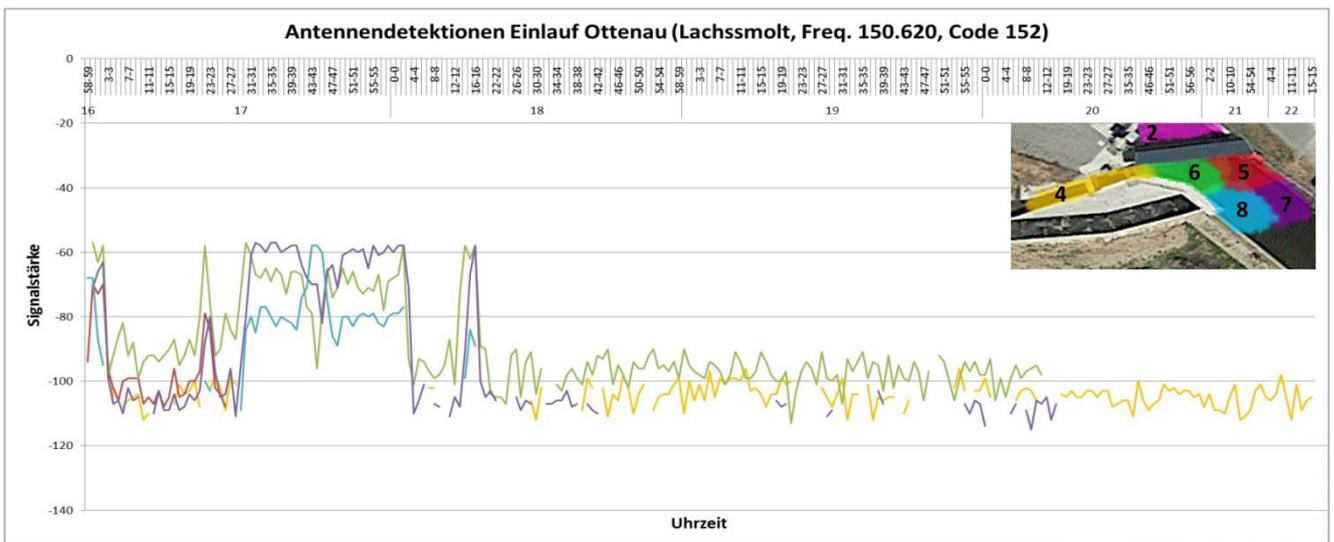
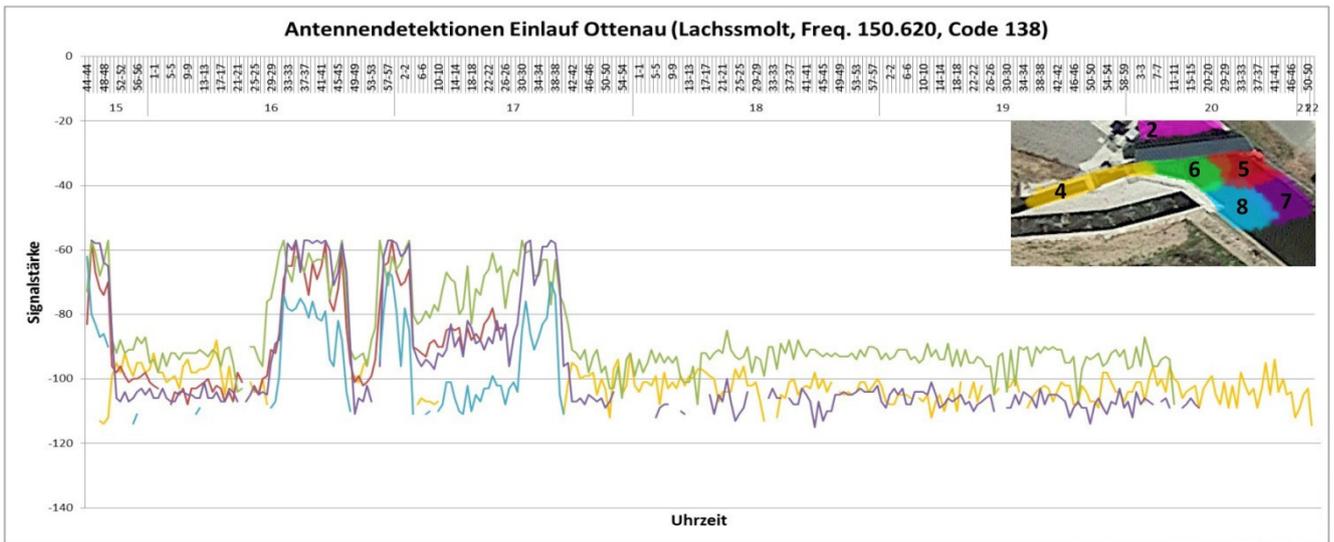
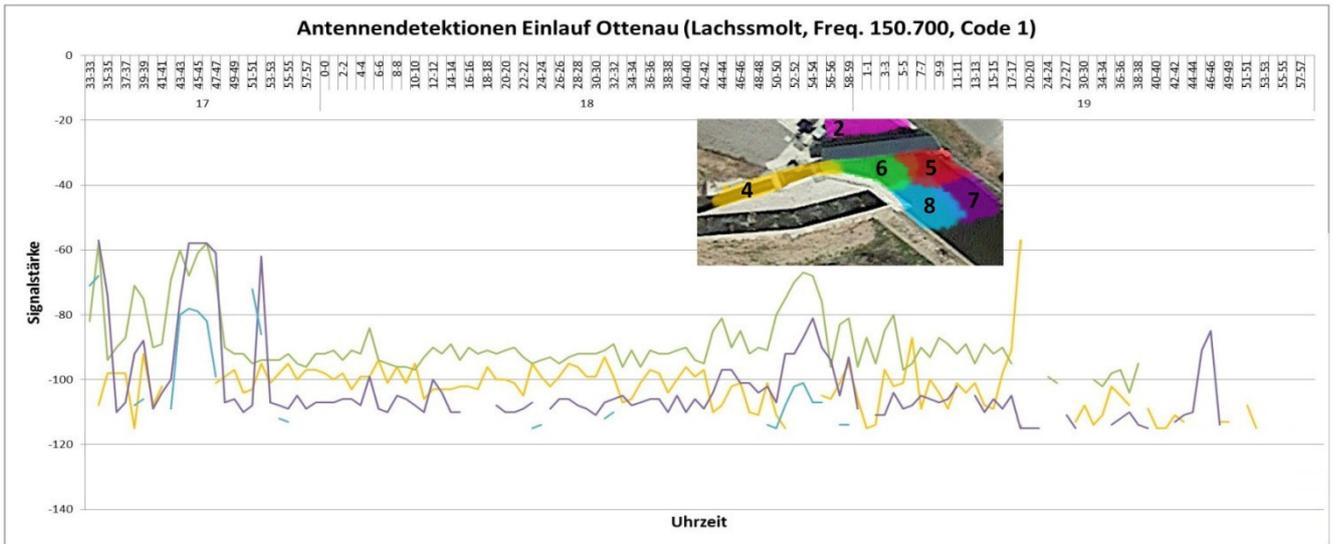




Gruppe der Lachssmolts mit sondierend-stationärem Verhalten im rechten Bereich des Schrägrechens:



Gruppe der Lachssmolts mit sondierend-stationärem Verhalten im linken Bereich des Schrägrechens:



---

---

## **Anhang 7: Probleme bei der Versuchsdurchführung mit Aalen im Forschungslabor**

---

Folgende Probleme sind bei der Versuchsdurchführung mit Aalen im Labor aufgetreten:

- **Lichtverhältnisse:** Zunächst war eine komplette Einhausung der Rinnen mittels schwarzer Folien erfolgt. Da dies jedoch zu dunkel war – eine Protokollführung und Videobeobachtung war nicht mehr möglich – musste die Einhausung am Einlauf der Rinne wieder entfernt werden. Dazu ergänzend wurden Leuchtstrahler so ausgerichtet, dass kein Schattenschlag durch Rinnenwände und Rechenstäbe entstand.
- **Pumpenausfall der Hälterungen:** Die Pumpen der Frischwasserzufuhr an den Hälterungen fielen zu Versuchsbeginn aus, so dass hier eine Pumpe ausgetauscht werden musste. Auf den Zustand der Aale hatte dies keinen Einfluss, Beleg hierfür war die erkennbare Aktivität und körperliche Fitness.

## Anhang 8: Probandenliste der 124 eingesetzten und besenderten Aale in Ottenau

Aal-Nr.	Code-Nr.	Einsetzdatum	Uhrzeit der Freisetzung	Fischlänge [cm]	Fischgewicht [g]
1	121	09.11.2016	16:15	75	950
2	2	09.11.2016	16:15	69	750
3	109	09.11.2016	16:15	78	1000
4	18	09.11.2016	16:15	72	750
5	152	09.11.2016	16:15	75	1150
6	62	09.11.2016	16:15	85	1350
7	178	09.11.2016	16:15	88	1500
8	138	09.11.2016	16:15	70	700
9	203	09.11.2016	16:15	95	1750
10	34	09.11.2016	16:15	72	750
11	193	09.11.2016	16:15	103	2000
12	80	09.11.2016	16:15	73	700
13	92	09.11.2016	16:15	78	1150
14	46	09.11.2016	16:15	91	1600
15	159	09.11.2016	16:15	84	950
16	1	09.11.2016	16:15	70	800
17	116	09.11.2016	16:15	77	1150
18	82	09.11.2016	16:15	83	1300
19	177	09.11.2016	16:15	86	1100
20	133	09.11.2016	16:15	68	550
21	89	10.11.2016	12:30	88	1800
22	52	10.11.2016	12:30	74	750
23	22	10.11.2016	12:30	80	1200
24	64	10.11.2016	12:30	85	1300
25	154	10.11.2016	12:30	69	700
26	40	15.11.2016	16:05	76	850
27	210	15.11.2016	16:05	77	800
28	111	15.11.2016	16:05	65	550
29	93	15.11.2016	16:05	85	1050
30	150	15.11.2016	16:05	75	900
31	181	15.11.2016	16:05	67	600
32	6	15.11.2016	16:05	70	650
33	139	15.11.2016	16:05	72	850
34	166	15.11.2016	16:05	96	1500
35	120	15.11.2016	16:05	64	600
36	33	15.11.2016	16:05	61	450
37	44	15.11.2016	16:05	76	1000
38	212	15.11.2016	16:05	63	500
39	110	15.11.2016	16:05	61	450
40	24	15.11.2016	16:05	68	550
41	61	15.11.2016	16:05	72	650
42	73	15.11.2016	16:05	71	900
43	155	15.11.2016	16:05	69	750
44	122	15.11.2016	16:05	58	450
45	164	15.11.2016	16:05	68	700
46	200	15.11.2016	16:05	55	400
47	53	15.11.2016	16:05	71	550
48	63	15.11.2016	16:05	67	700
49	83	15.11.2016	16:05	68	750
50	186	15.11.2016	16:05	75	750
51	8	15.11.2016	16:05	82	1000
52	140	15.11.2016	16:05	75	750
53	90	15.11.2016	16:05	80	1050
54	15	15.11.2016	16:05	63	550
55	31	15.11.2016	16:05	67	600
56	101	16.11.2016	15:26	70	700
57	74	16.11.2016	15:26	66	600
58	202	16.11.2016	15:26	68	700
59	35	16.11.2016	15:26	69	650
60	112	16.11.2016	15:26	75	900
61	58	16.11.2016	15:26	76	950
62	10	16.11.2016	15:26	61	550

Aal-Nr.	Code-Nr.	Einsetzdatum	Uhrzeit der Freisetzung	Fischlänge [cm]	Fischgewicht [g]
63	26	16.11.2016	15:26	68	650
64	55	16.11.2016	15:26	77	950
65	161	16.11.2016	15:26	67	600
66	117	16.11.2016	15:26	75	1000
67	182	16.11.2016	15:26	73	900
68	94	16.11.2016	15:26	59	550
69	148	16.11.2016	15:26	74	950
70	130	16.11.2016	15:26	71	750
71	190	16.11.2016	15:26	68	700
72	19	16.11.2016	15:26	67	700
73	157	16.11.2016	15:26	66	700
74	153	16.11.2016	15:26	64	550
75	125	16.11.2016	15:26	75	650
76	135	16.11.2016	15:26	55	400
77	179	16.11.2016	15:26	78	850
78	96	16.11.2016	15:26	65	500
79	78	16.11.2016	15:26	67	600
80	188	16.11.2016	15:26	58	450
81	67	16.11.2016	15:26	60	450
82	3	16.11.2016	15:26	74	900
83	113	16.11.2016	15:26	65	600
84	47	16.11.2016	15:26	66	450
85	29	16.11.2016	15:26	77	900
86	86	16.11.2016	15:26	63	550
87	41	16.11.2016	15:26	62	500
88	151	16.11.2016	15:26	66	700
89	168	16.11.2016	15:26	68	550
90	11	16.11.2016	15:26	70	650
91	75	16.11.2016	15:26	58	450
92	23	16.11.2016	15:26	63	500
93	51	16.11.2016	15:26	69	850
94	201	16.11.2016	15:26	64	550
95	118	16.11.2016	15:26	65	600
96	137	17.11.2016	15:05	66	600
97	174	17.11.2016	15:05	70	600
98	102	17.11.2016	15:05	67	650
99	59	17.11.2016	15:05	62	450
100	180	17.11.2016	15:05	65	500
101	106	17.11.2016	15:05	80	1000
102	4	17.11.2016	15:05	70	850
103	131	17.11.2016	15:05	57	400
104	68	17.11.2016	15:05	77	1000
105	48	17.11.2016	15:05	68	650
106	162	17.11.2016	15:05	69	750
107	77	17.11.2016	15:05	74	800
108	95	17.11.2016	15:05	70	650
109	191	17.11.2016	15:05	75	900
110	16	17.11.2016	15:05	55	400
111	114	17.11.2016	15:05	68	650
112	42	17.11.2016	15:05	53	350
113	158	17.11.2016	15:05	63	450
114	45	17.11.2016	15:05	50	350
115	134	17.11.2016	15:05	64	400
116	21	17.11.2016	15:05	65	500
117	12	17.11.2016	15:05	71	900
118	88	17.11.2016	15:05	80	1250
119	194	17.11.2016	15:05	81	1000
120	65	17.11.2016	15:05	83	1150
121	209	17.11.2016	15:05	78	900
122	104	17.11.2016	15:05	74	800
123	72	17.11.2016	15:05	76	950
124	38	17.11.2016	15:05	77	950

---

## Anhang 9: Probleme bei der Versuchsdurchführung mit Aalen im Feld

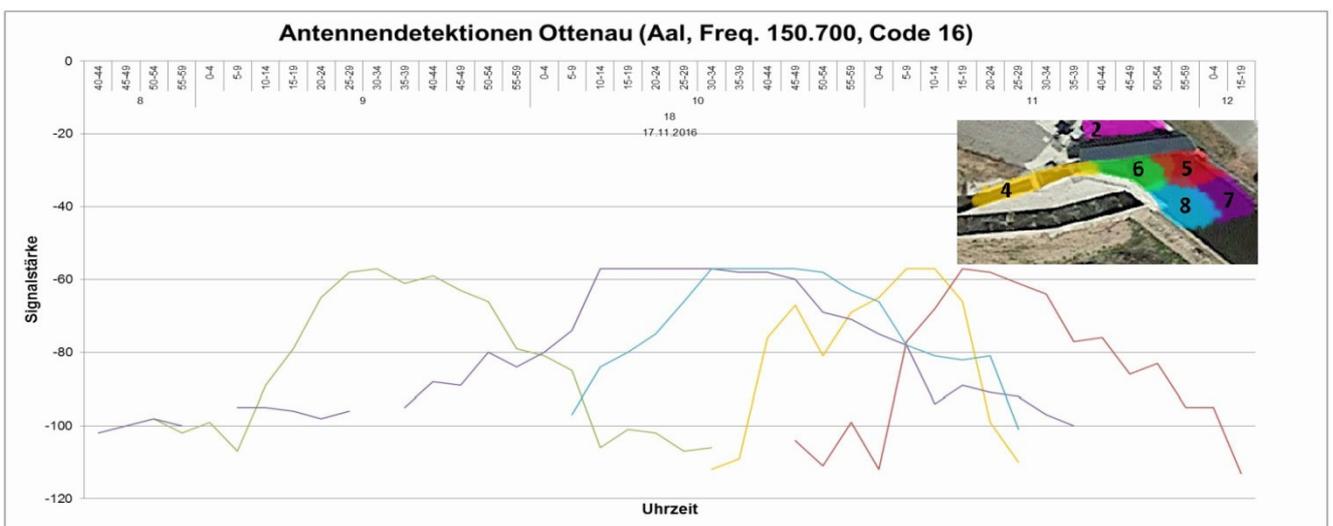
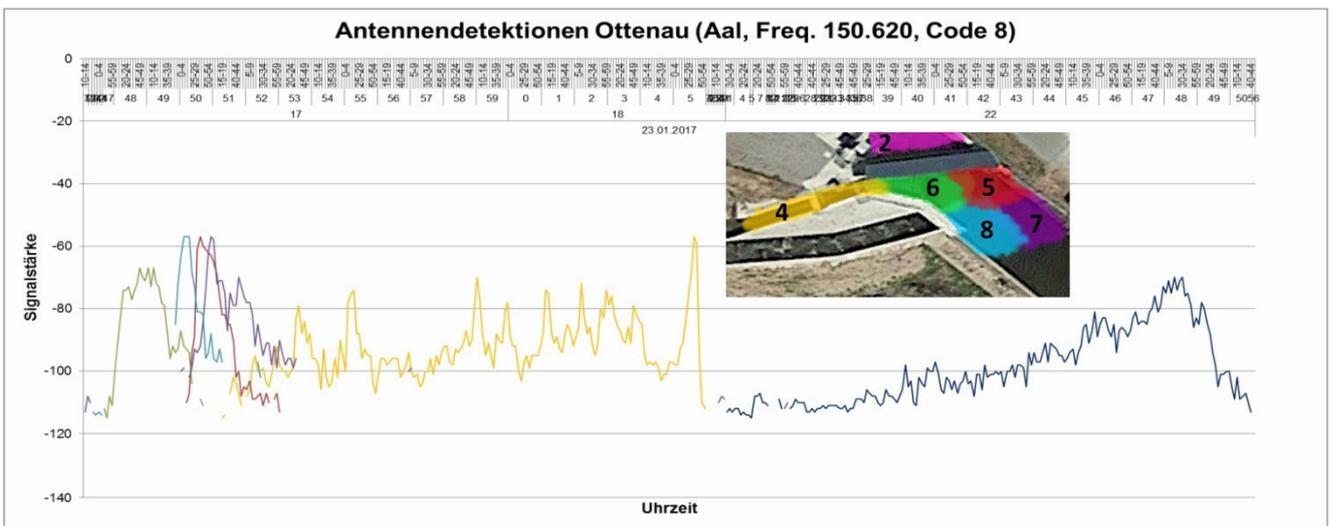
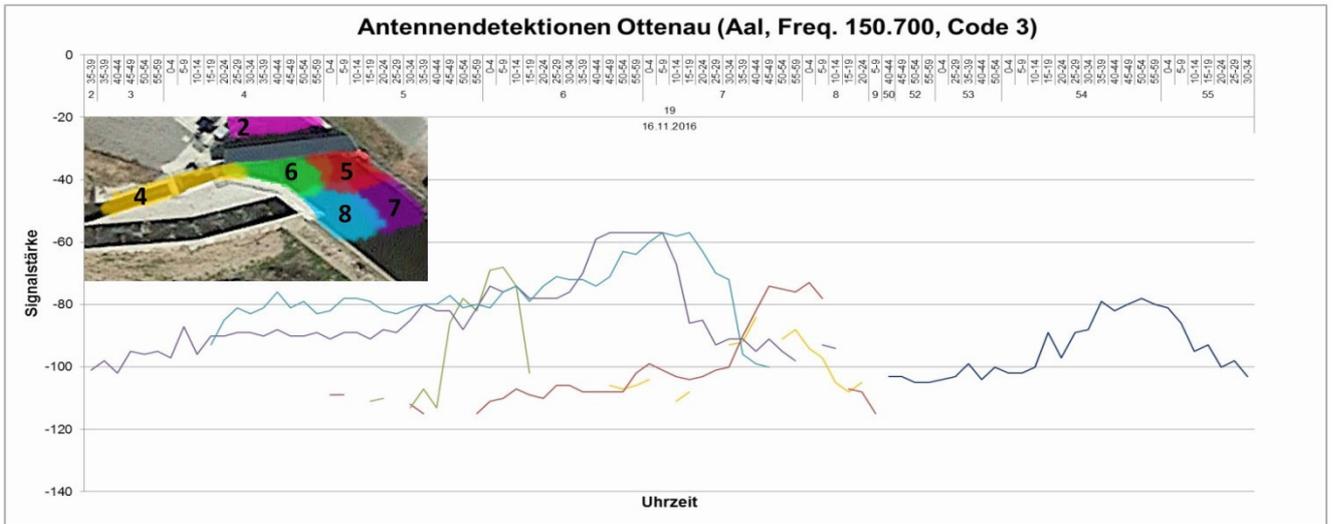
---

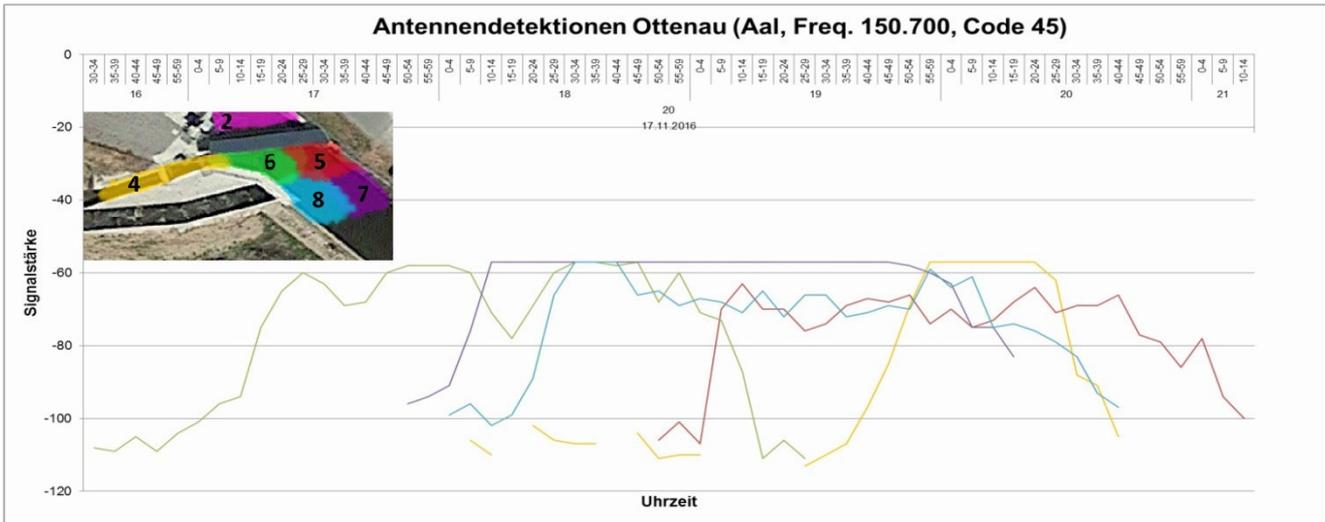
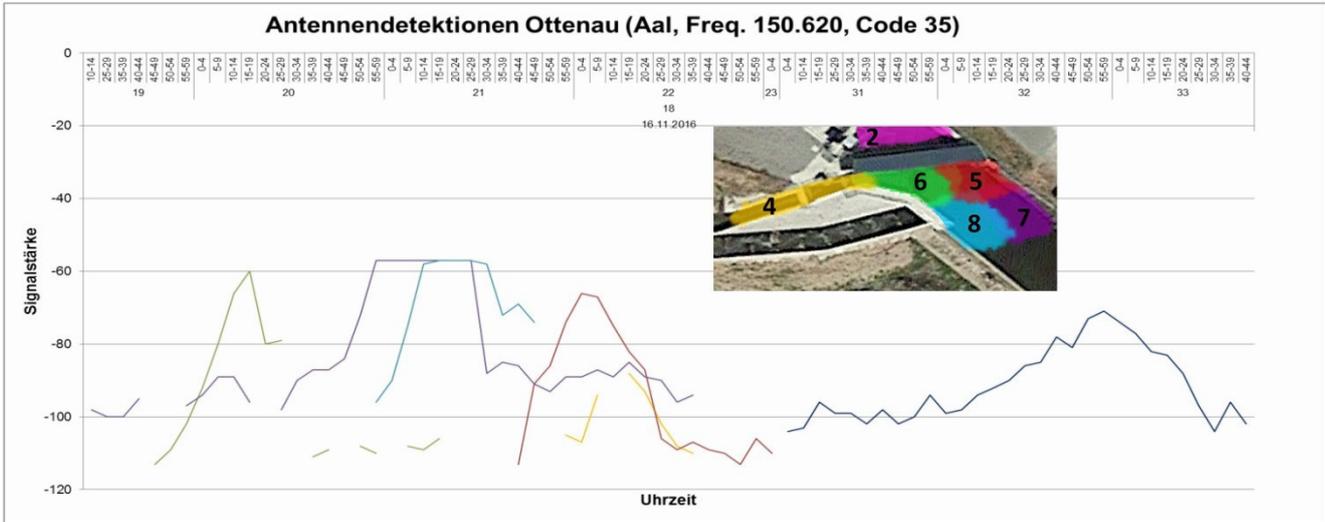
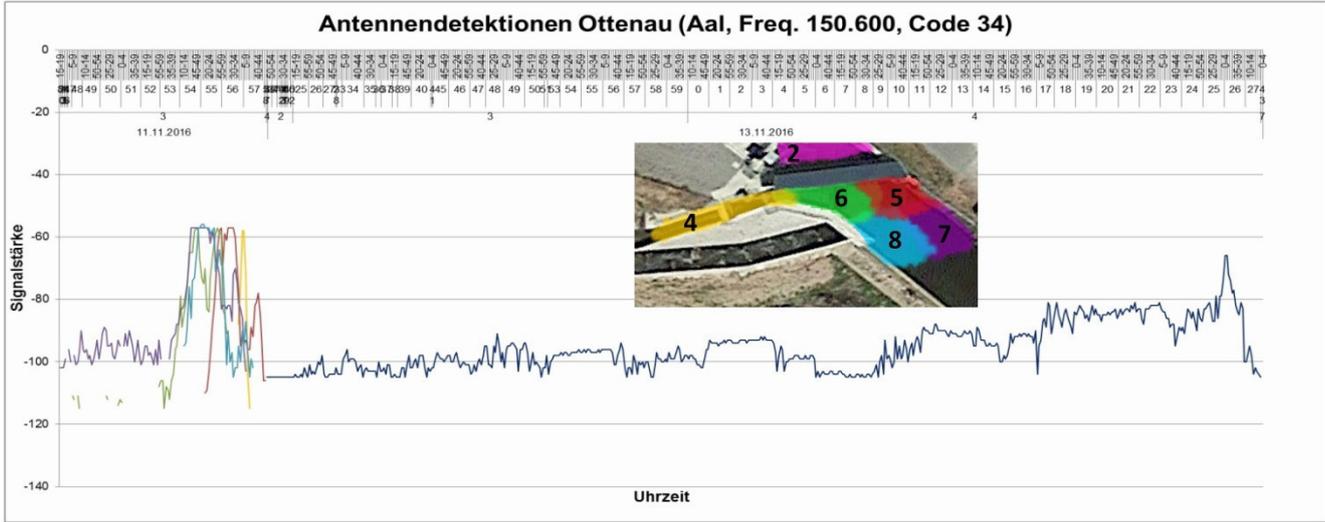
Folgende Probleme sind bei der Versuchsdurchführung mit Aalen im Feld aufgetreten:

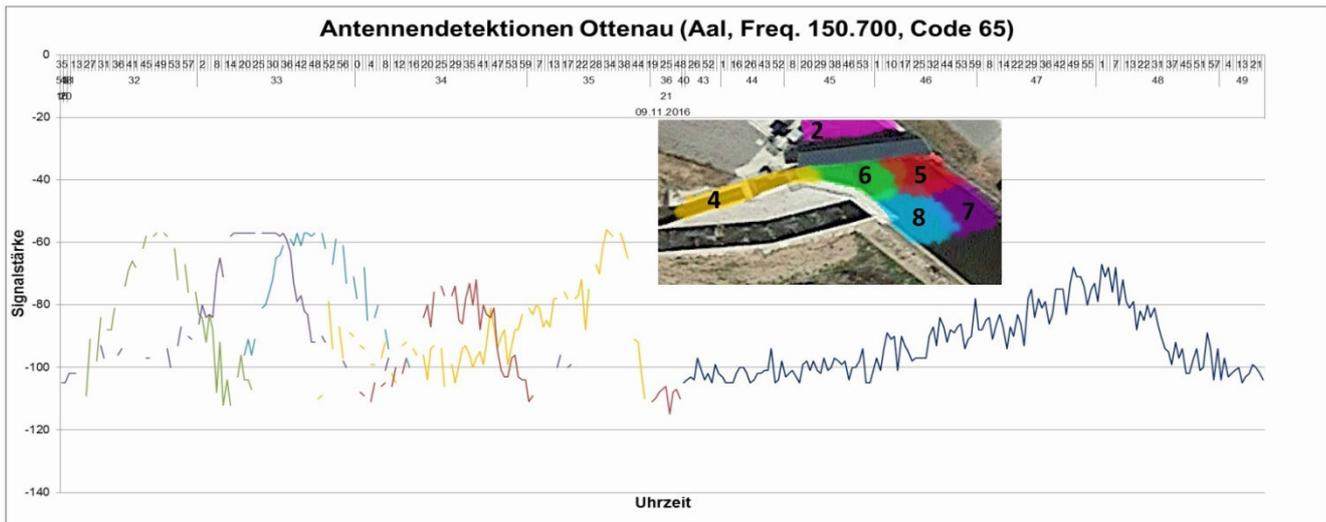
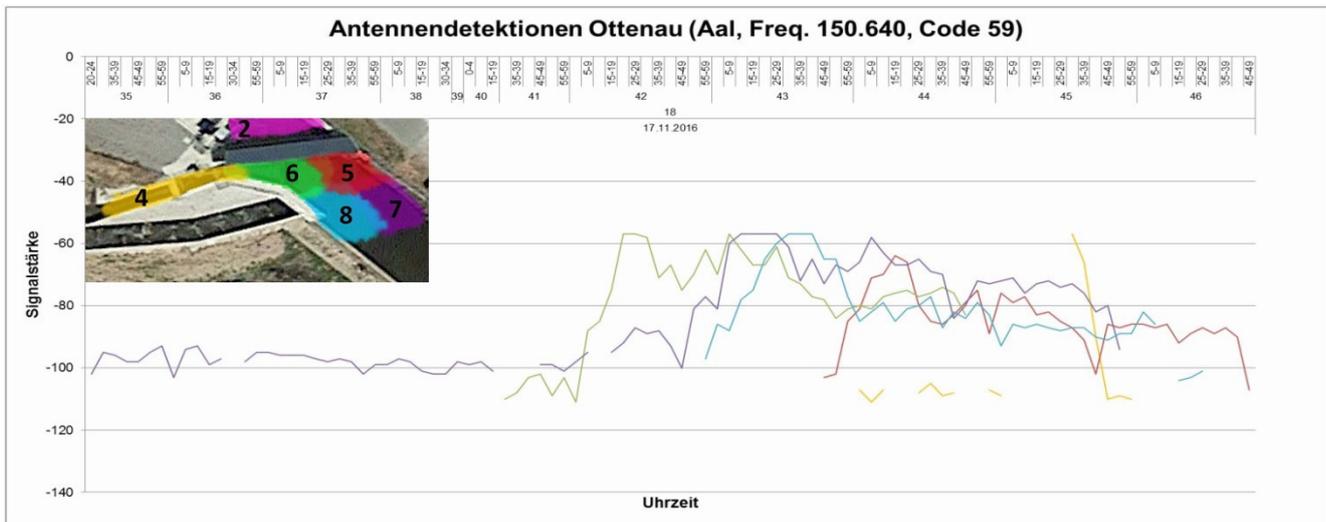
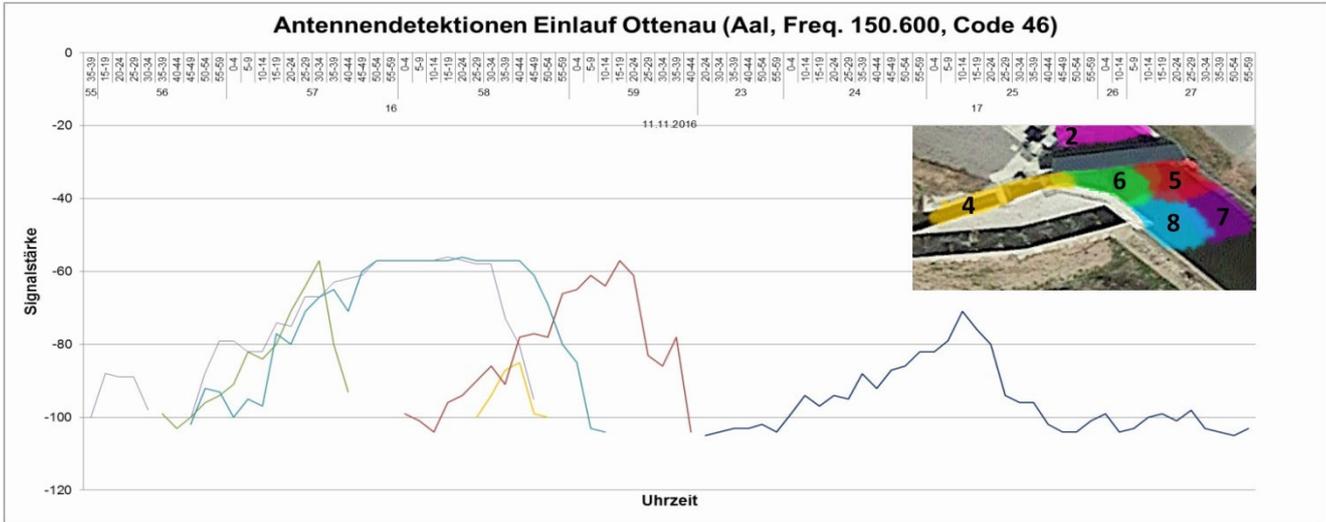
- **Antennenausfall:** Im Zeitraum vom 17.11.2016 bis 21.11.2016 war Antenne 1 (Kontrollstelle unterhalb Ottenau) ausgefallen. Aale, welche in diesem Zeitraum über das Streichwehr abgestiegen waren, konnten daher nicht sicher als „abgestiegen“ klassifiziert werden. Über eine Detektion ihres Codes an einem der flussabwärts installierten Empfänger in Rotenfels konnte die Abwanderung dennoch bestätigt werden.
- **Senderlaufzeit:** Die meisten Senderbatterien waren bis zu den ersten größeren Abflüssen im Februar/März 2017 bereits verbraucht (Batteriedauer ca. 3 Monate). Somit wurden von den 124 besenderten Aalen nur 68 Individuen erfasst, die restlichen verharrten bis in den Spätwinter 2016/2017 und wanderten erst dann ab, als die Batterien bereits leer waren. Für zukünftige Versuche sollten stärkere Batterien mit einer längeren Laufzeit verwendet werden. Da die Sender dann aber auch größer sind, können sie nur bei entsprechend großen Individuen eingesetzt werden. Die Anzahl der Probanden könnte abhängig vom Projekt- bzw. Monitoringbudget erhöht werden. Des Weiteren könnten die einzelnen Tranchen mit Versuchsfischen frühestens einen Tag vor markanten Peaks eingesetzt werden und nicht alle besenderten Aale zum nahezu gleichen Zeitpunkt.

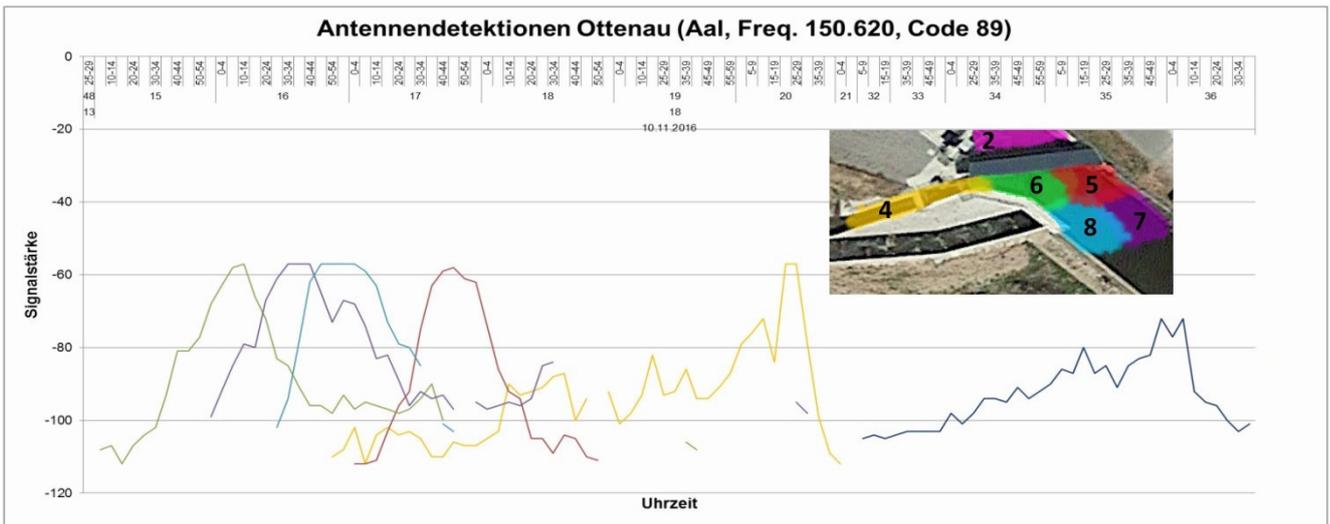
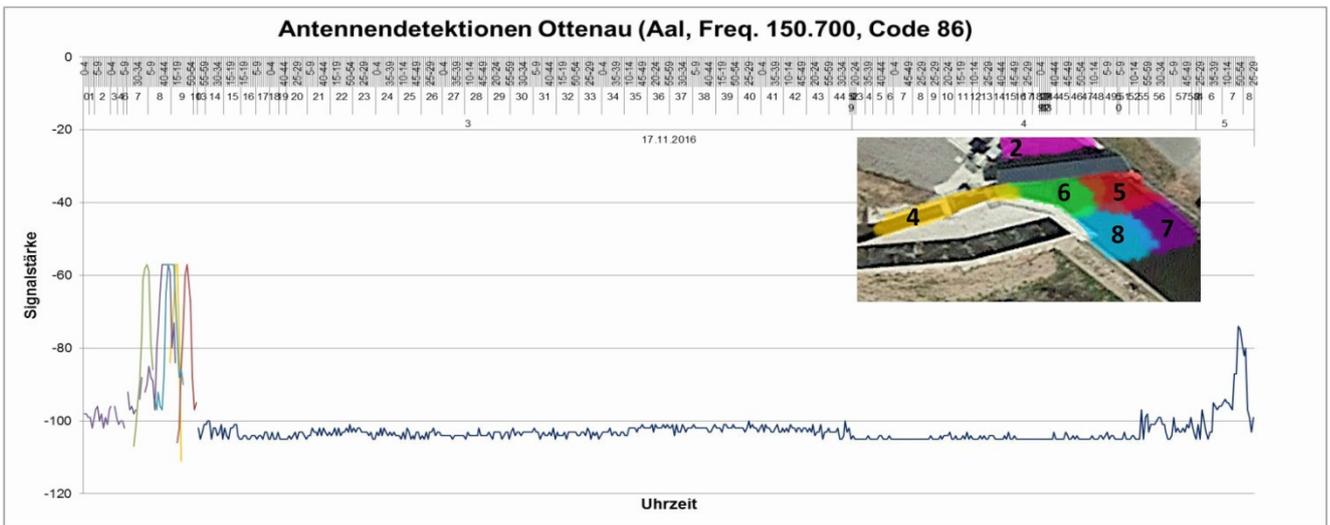
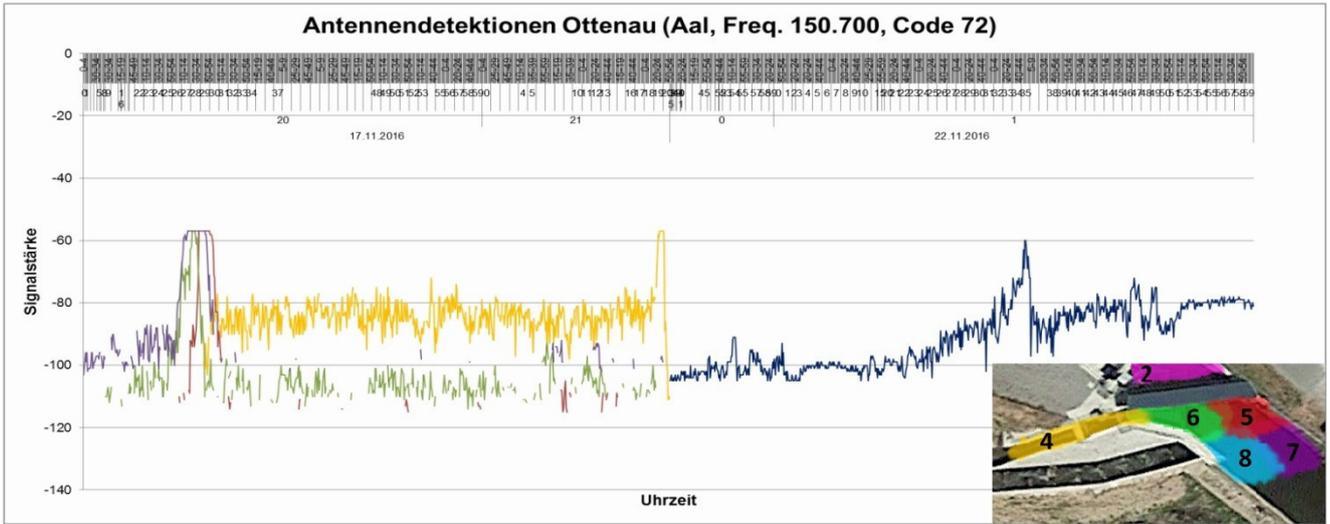
# Anhang 10: Auswertungen der Signaldaten der Aale vor dem Schrägrechen Ottenau

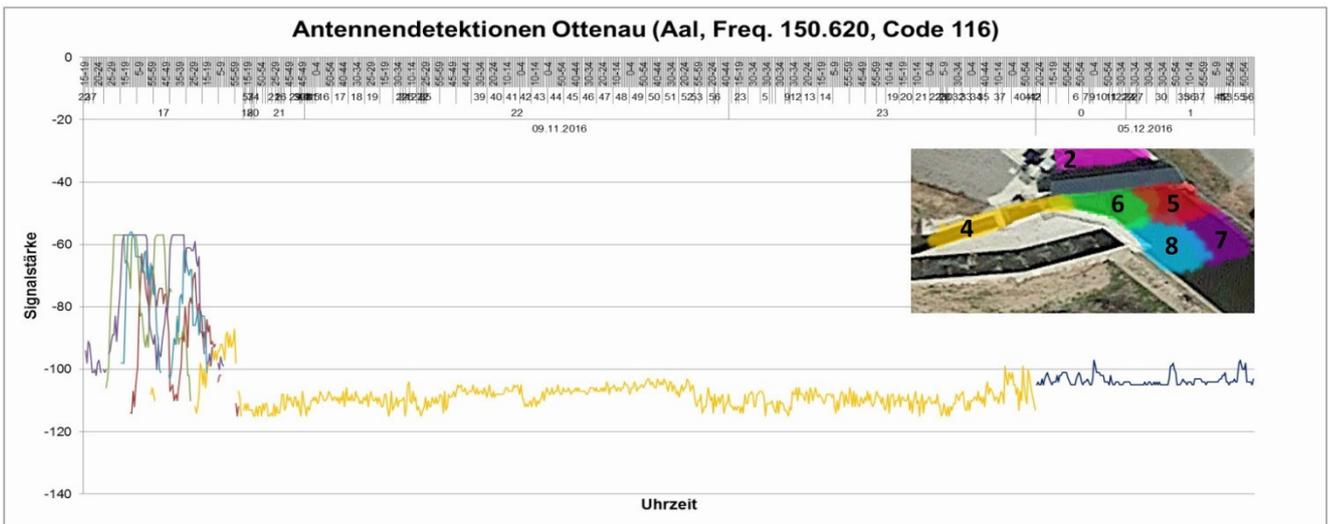
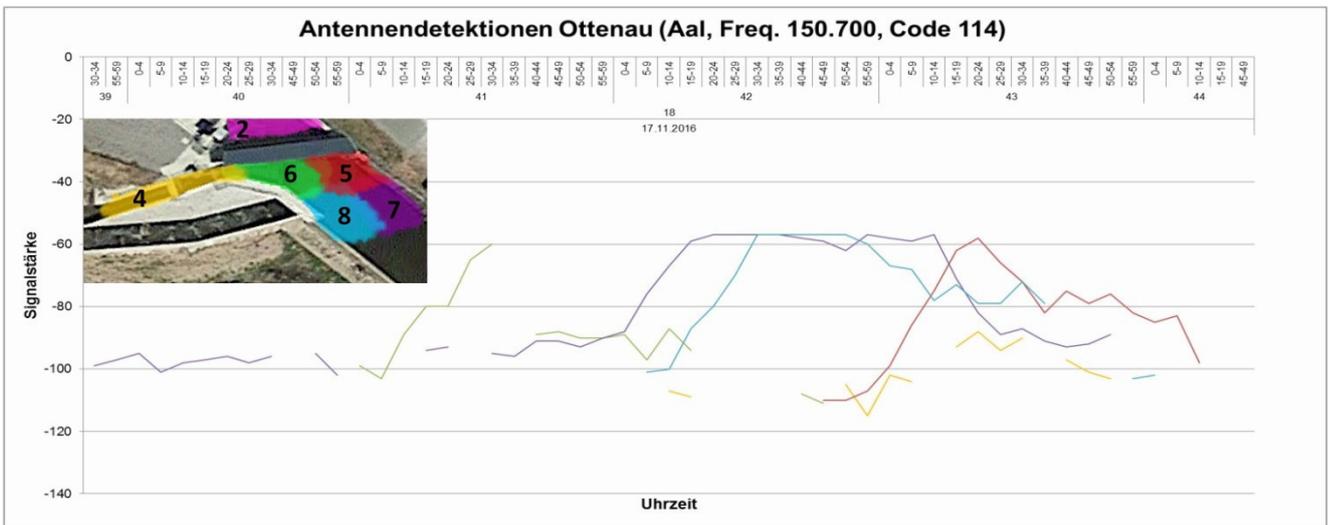
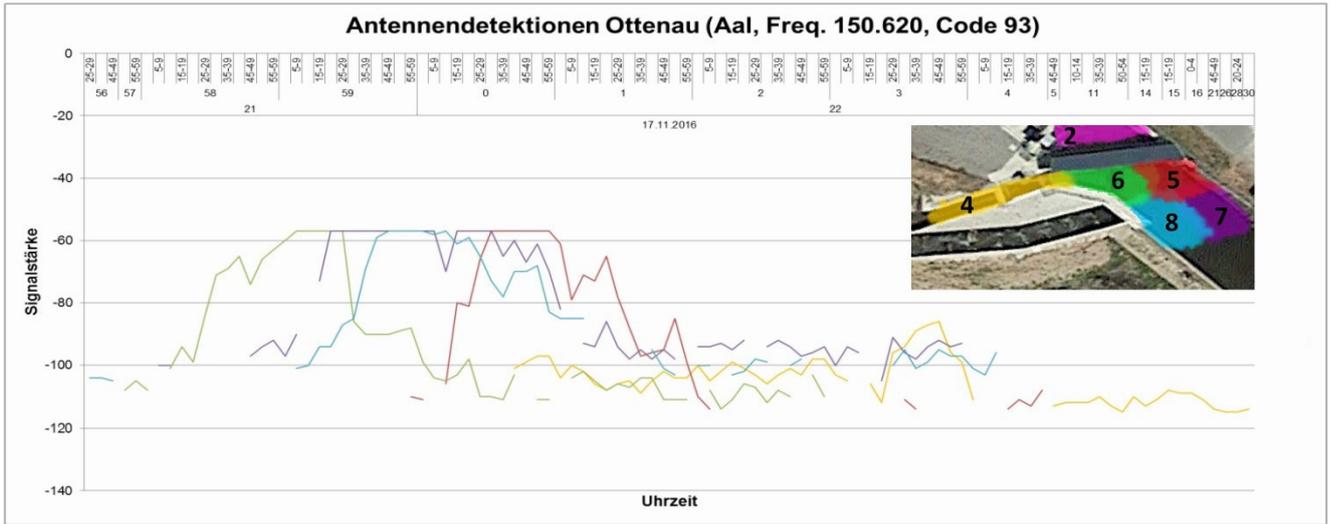
Gruppe der Aale mit schneller Abwanderung am Schrägrechen:

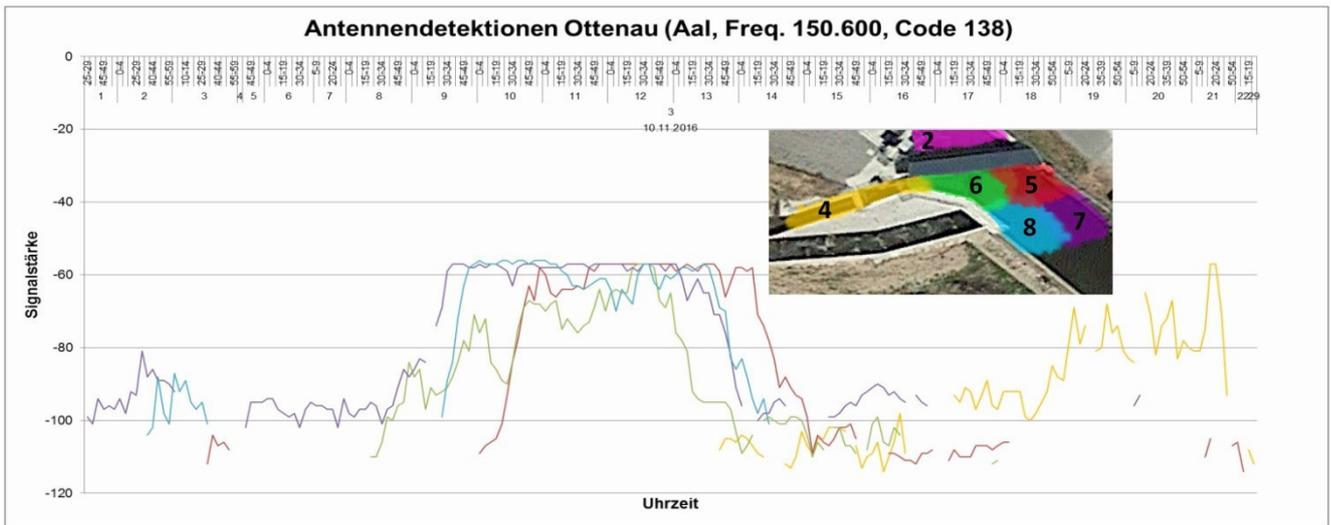
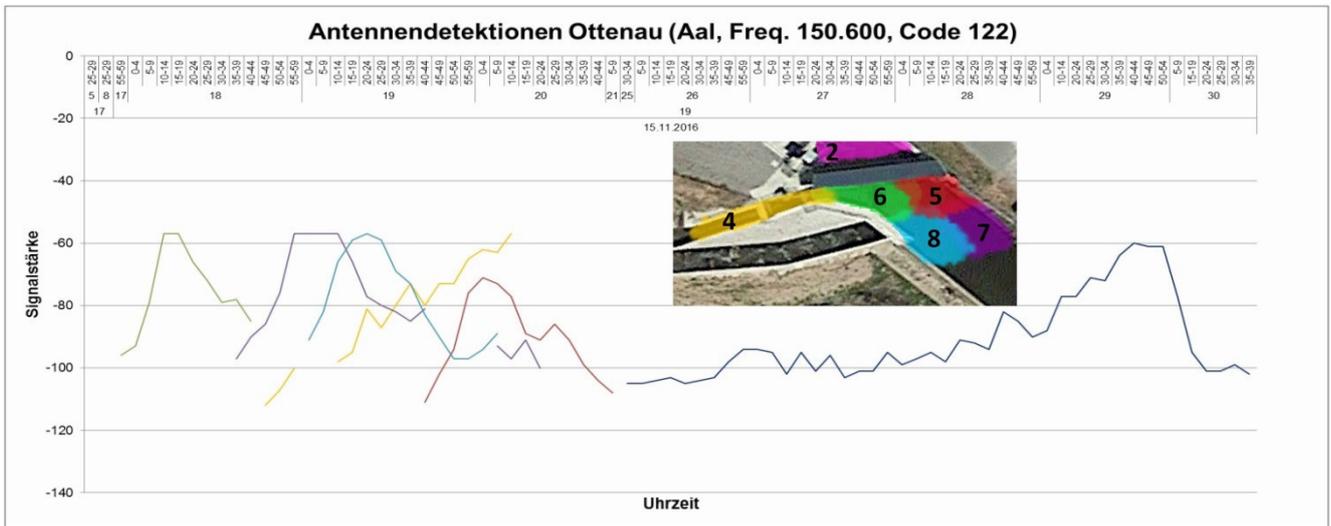
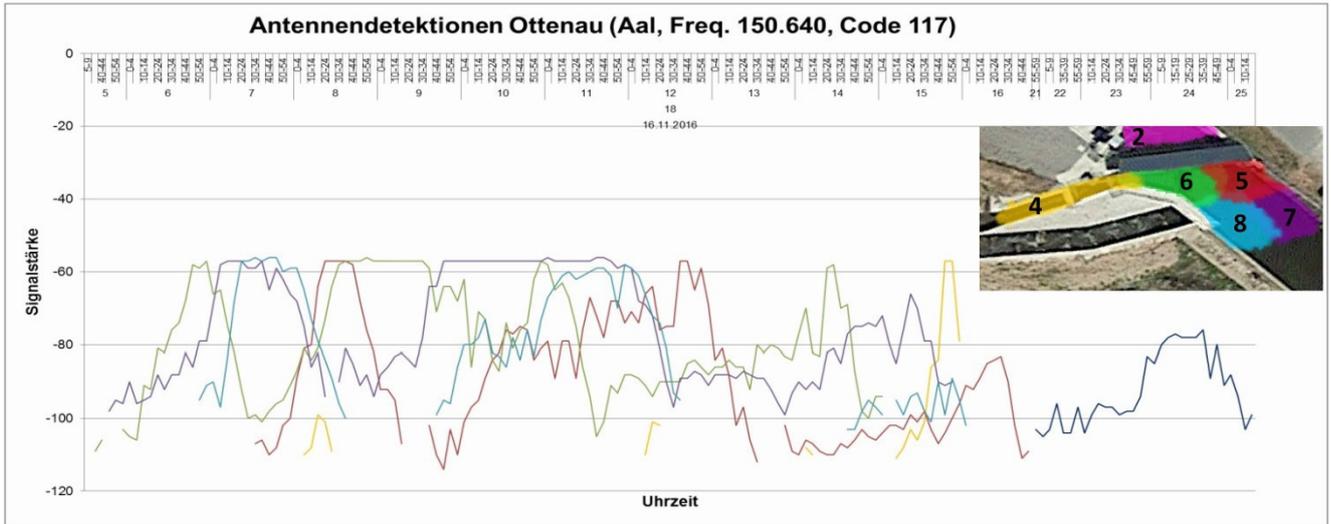


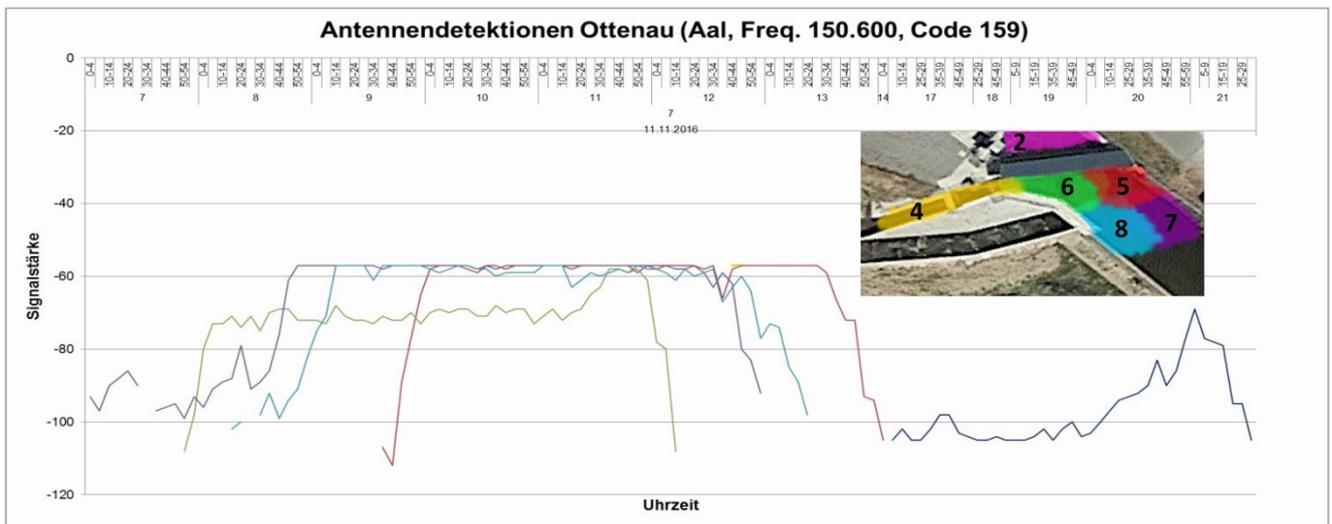
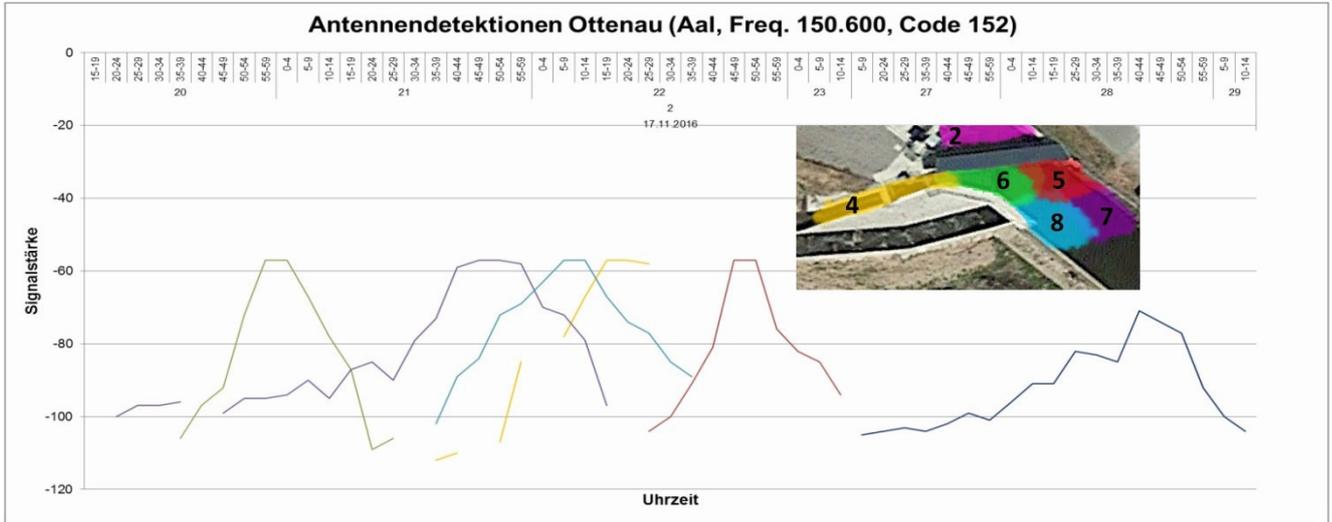




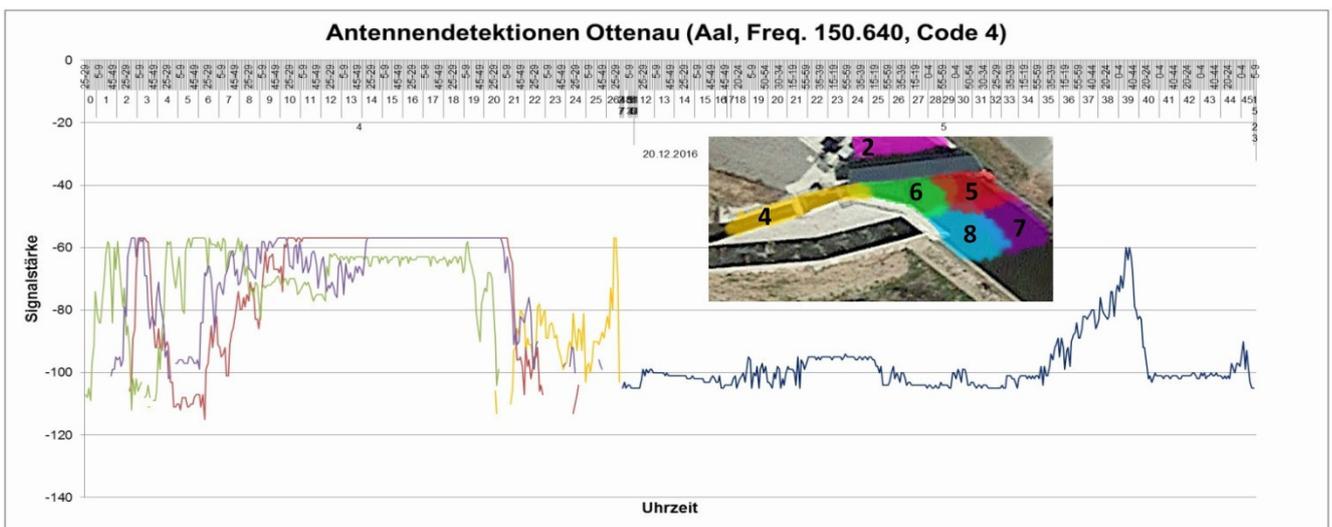


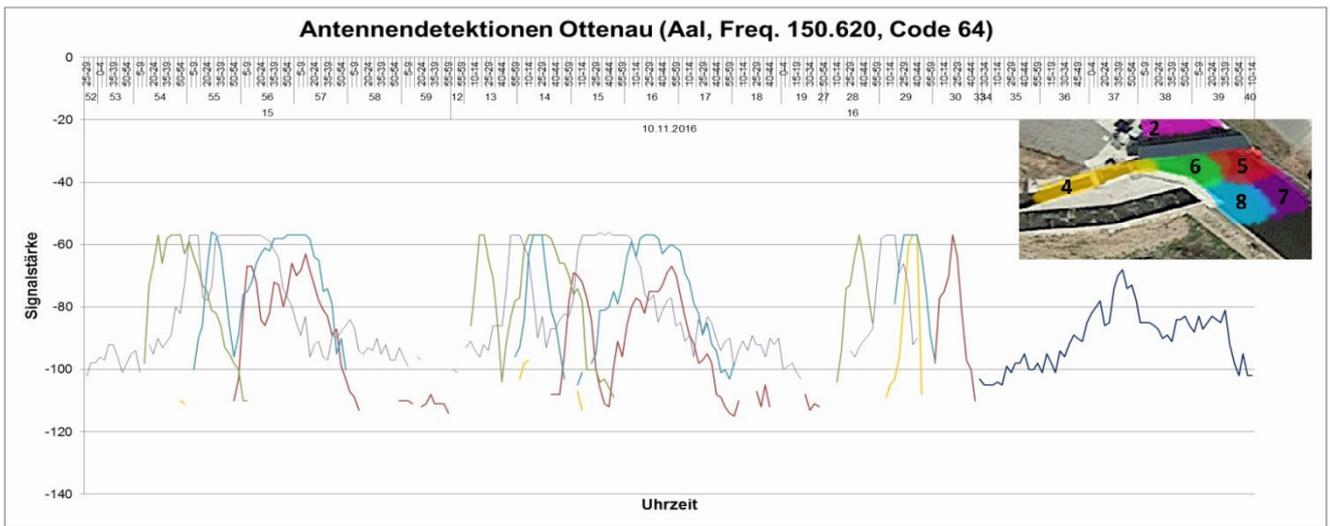
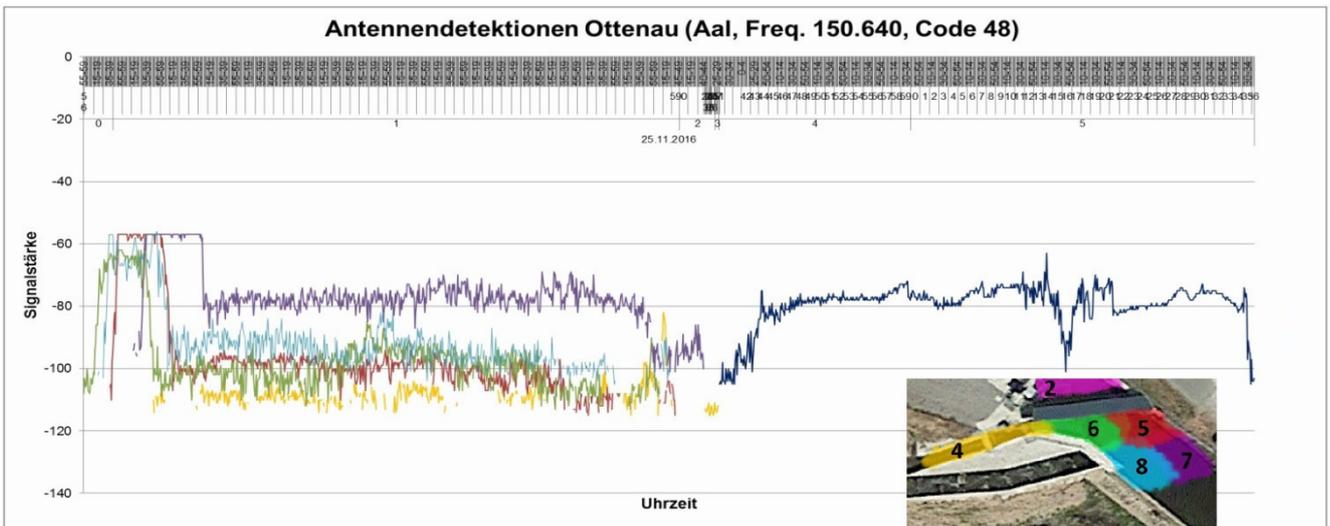
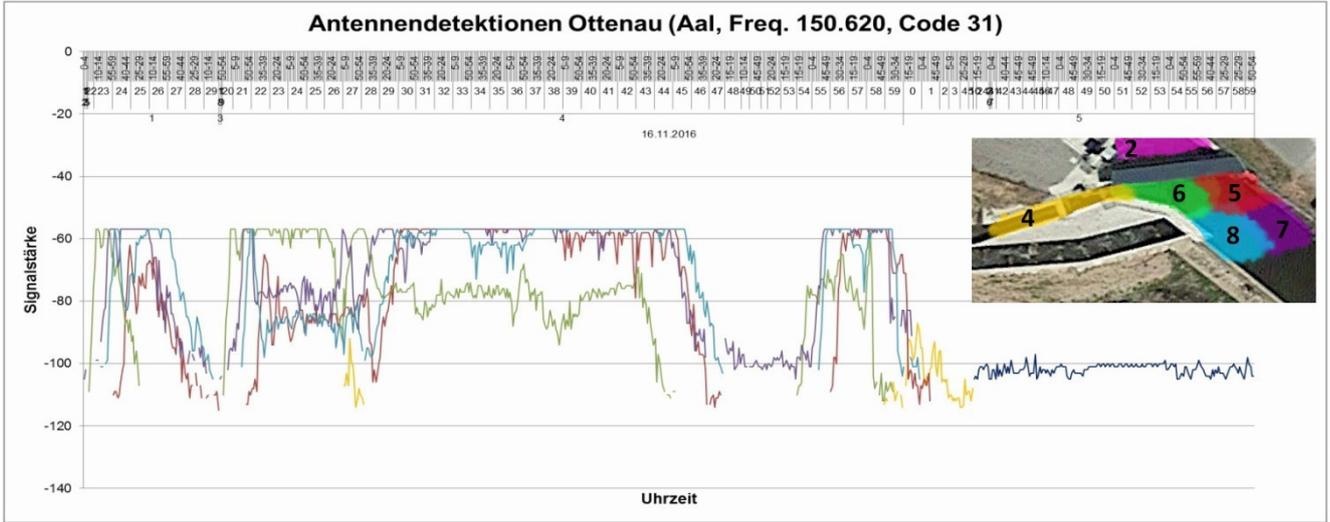


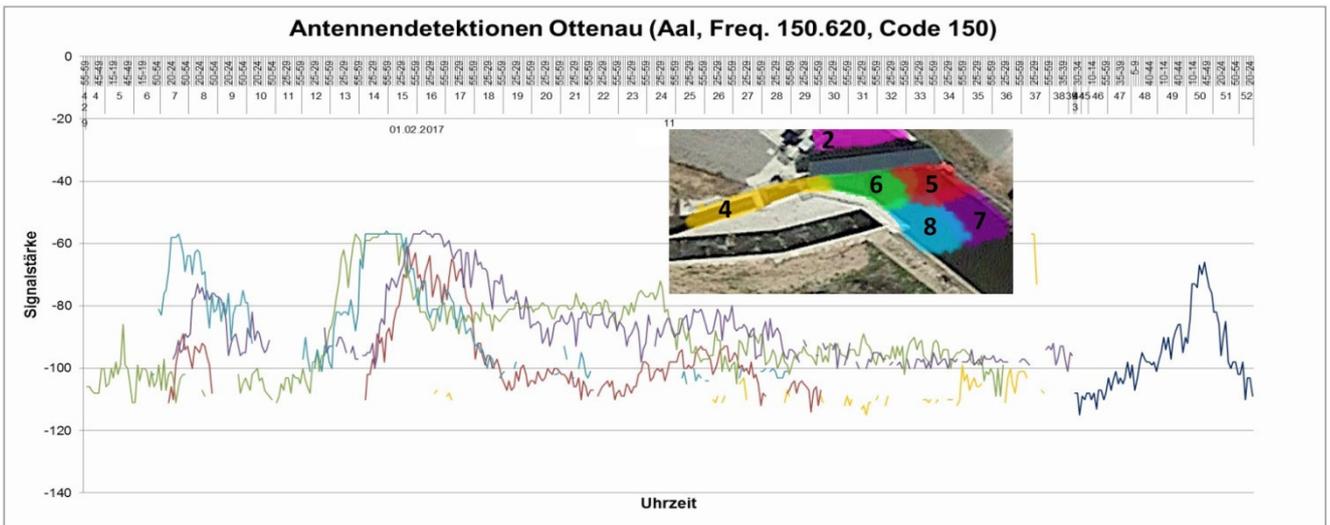
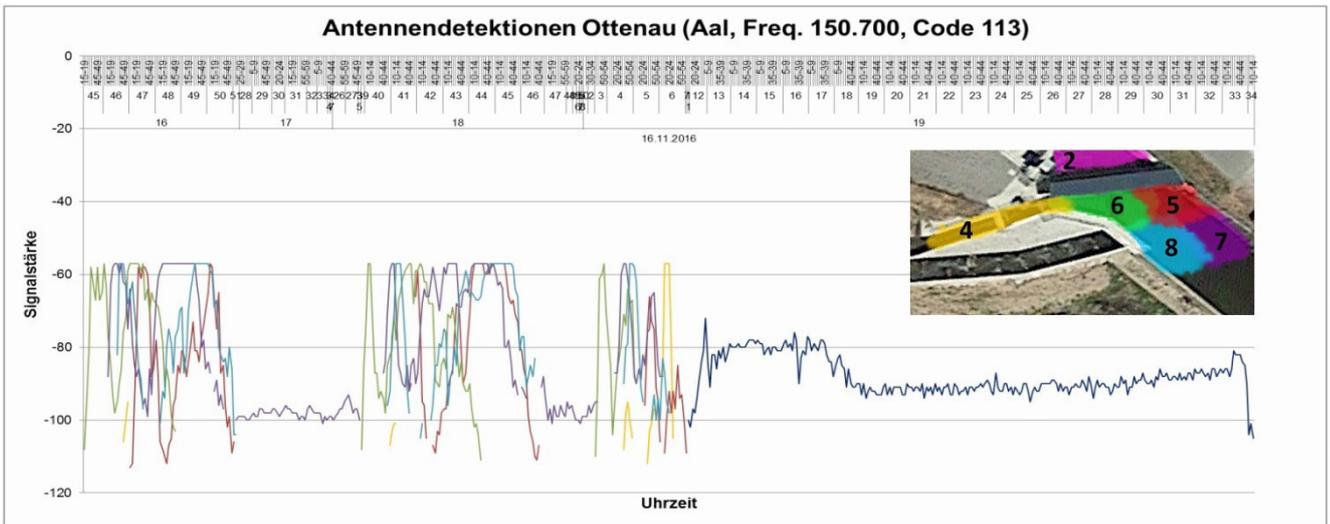
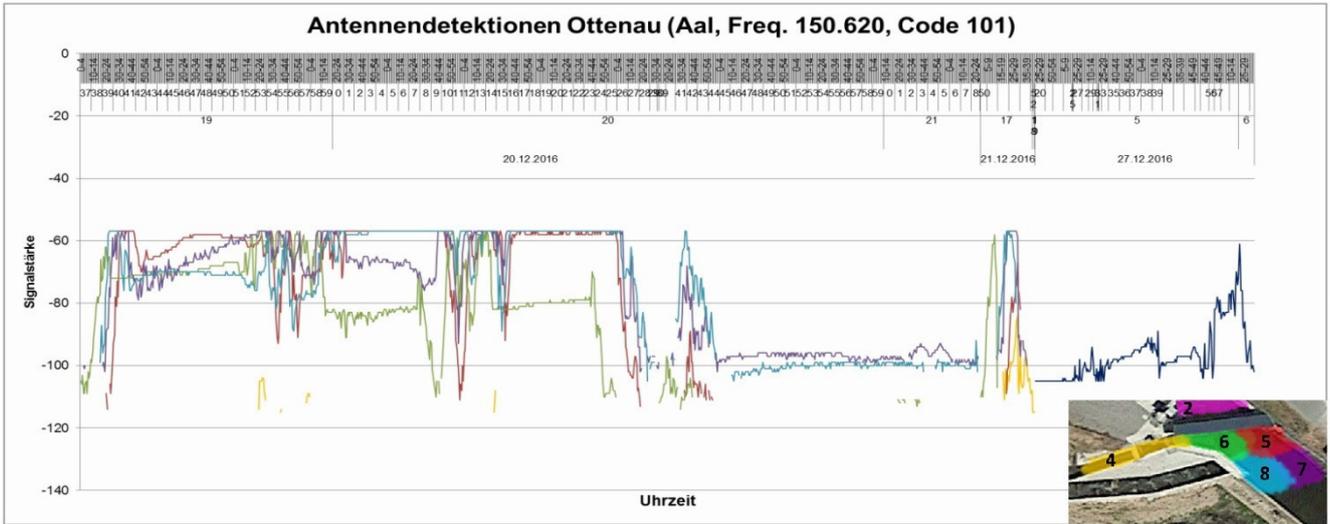


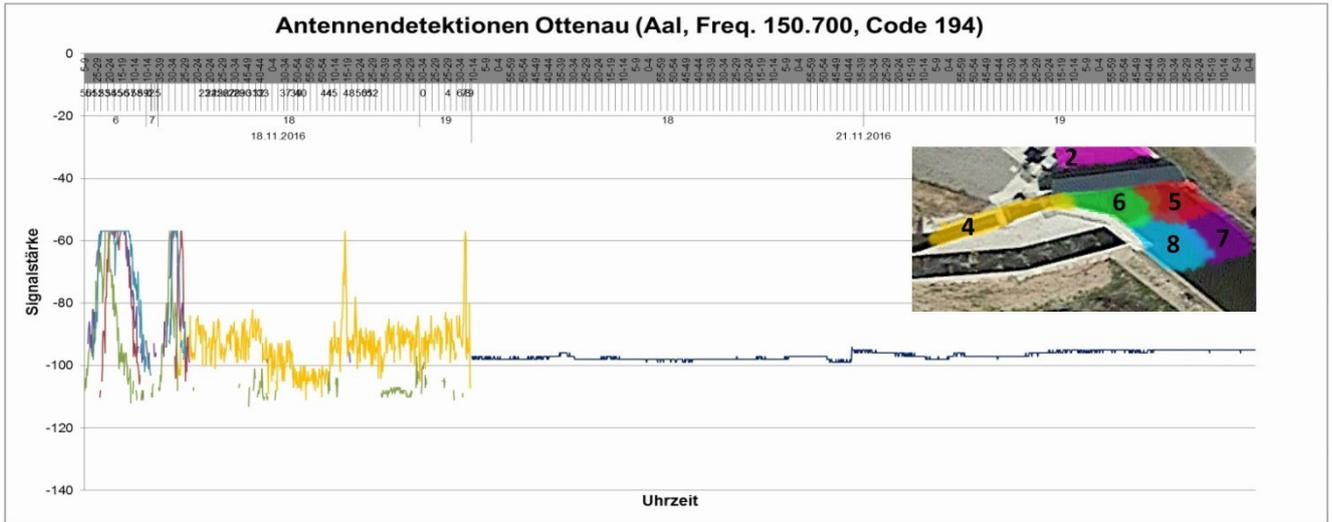


Gruppe der Aale mit langsamer Abwanderung am Schrägrechen:

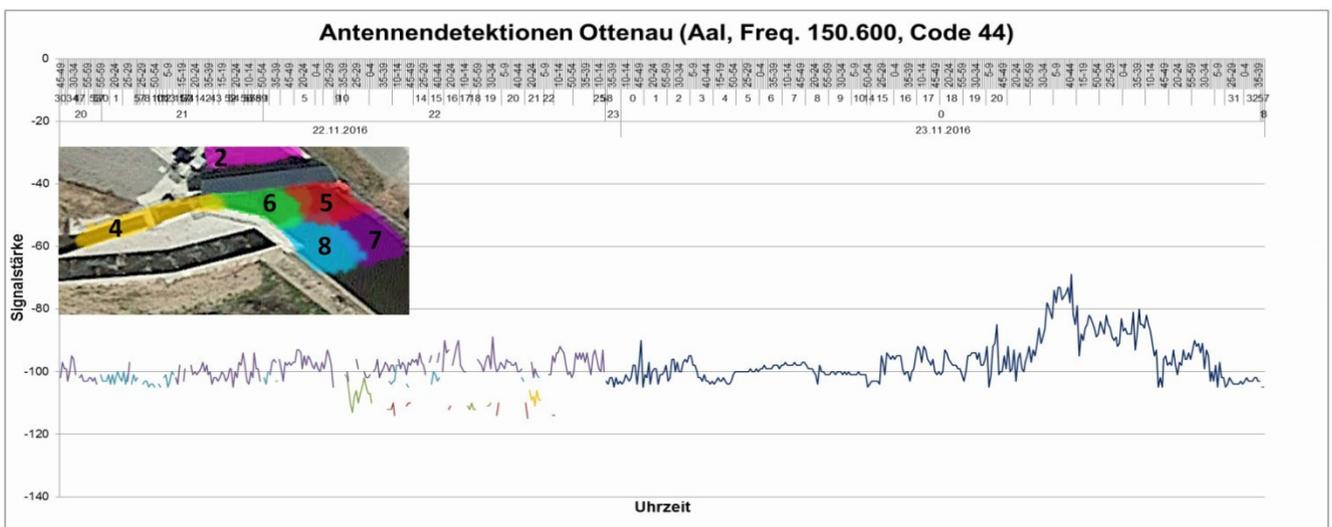
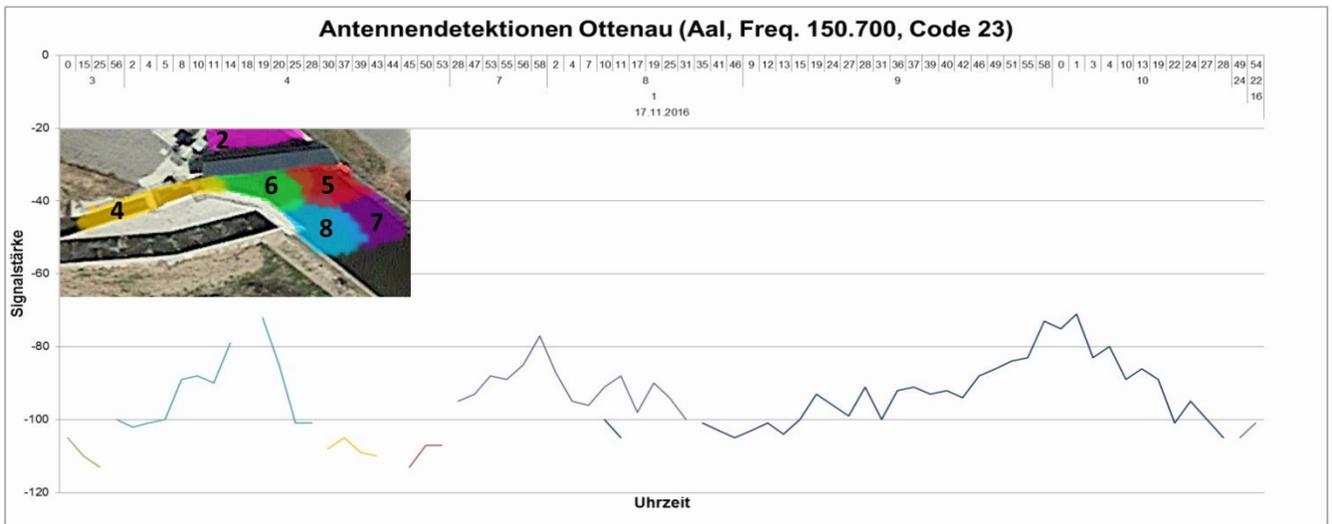


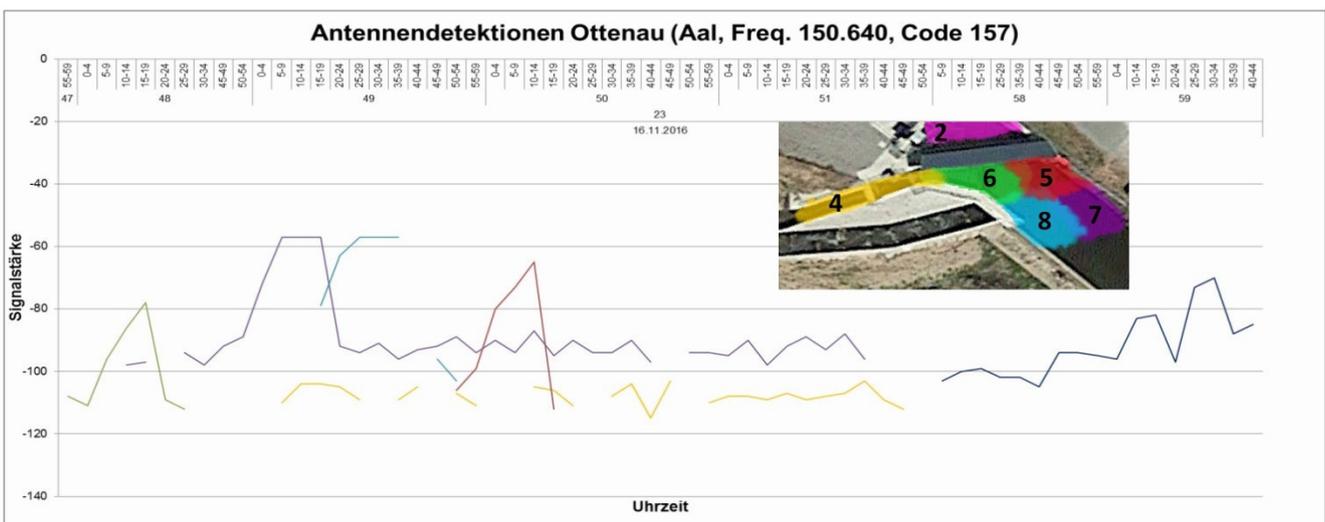
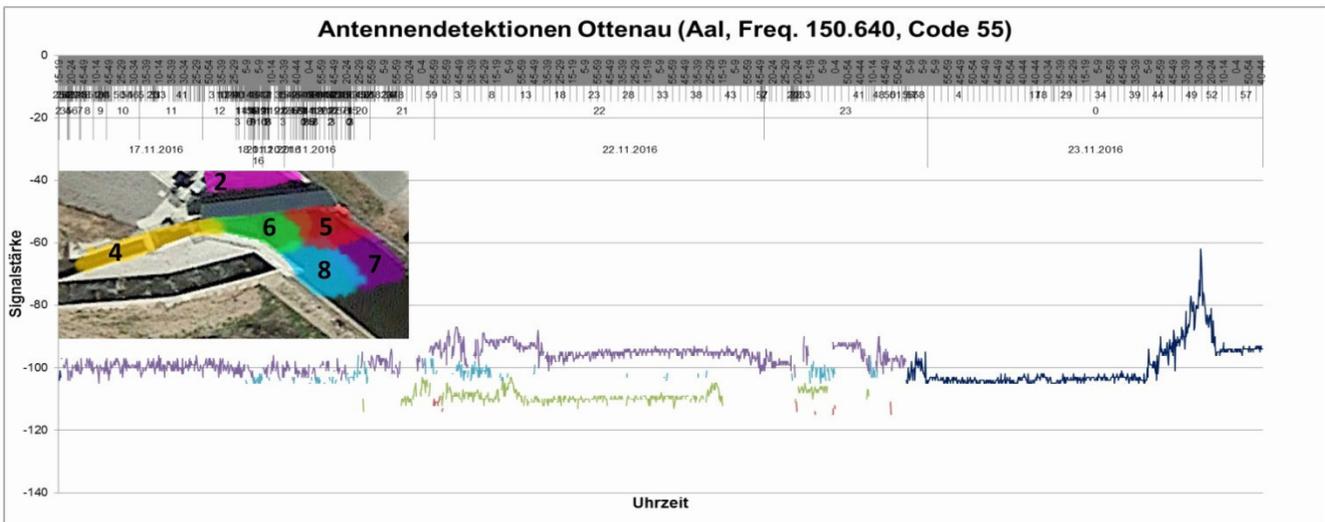
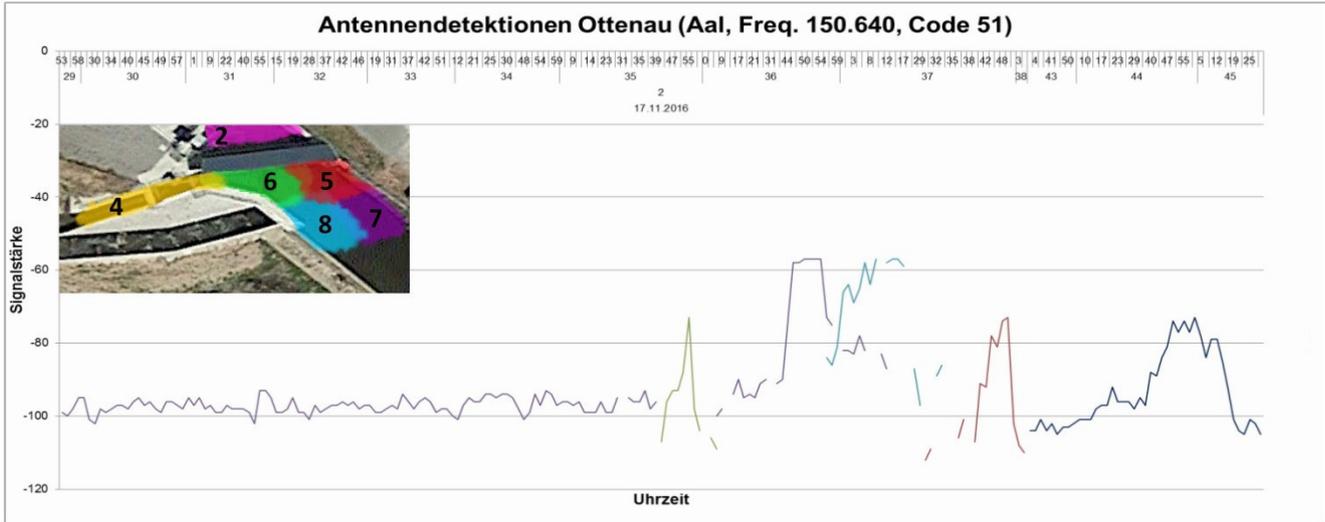




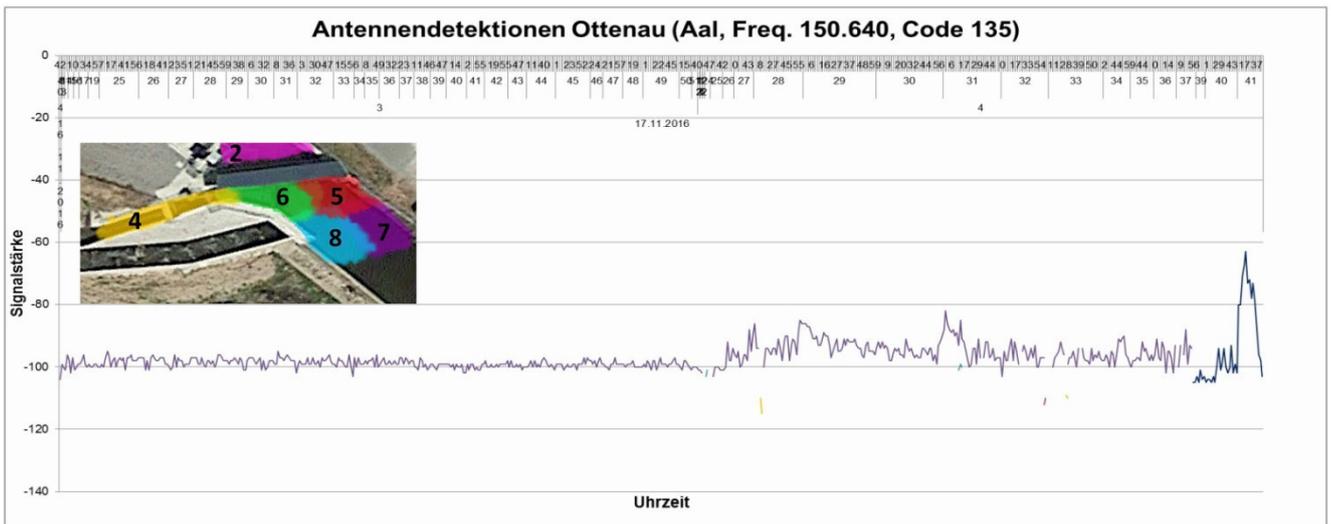
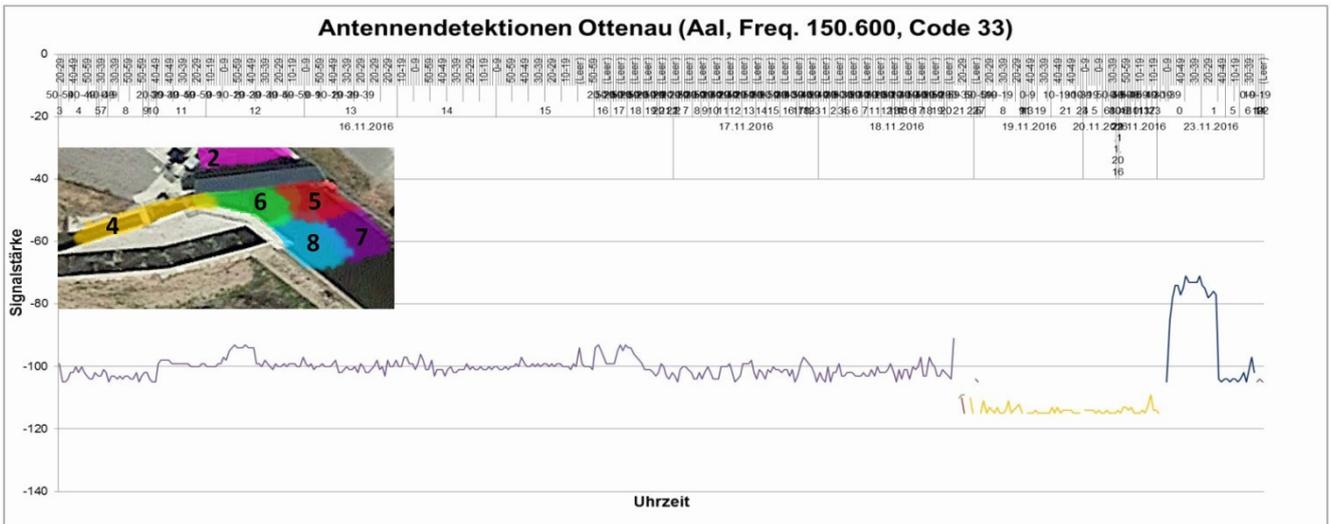
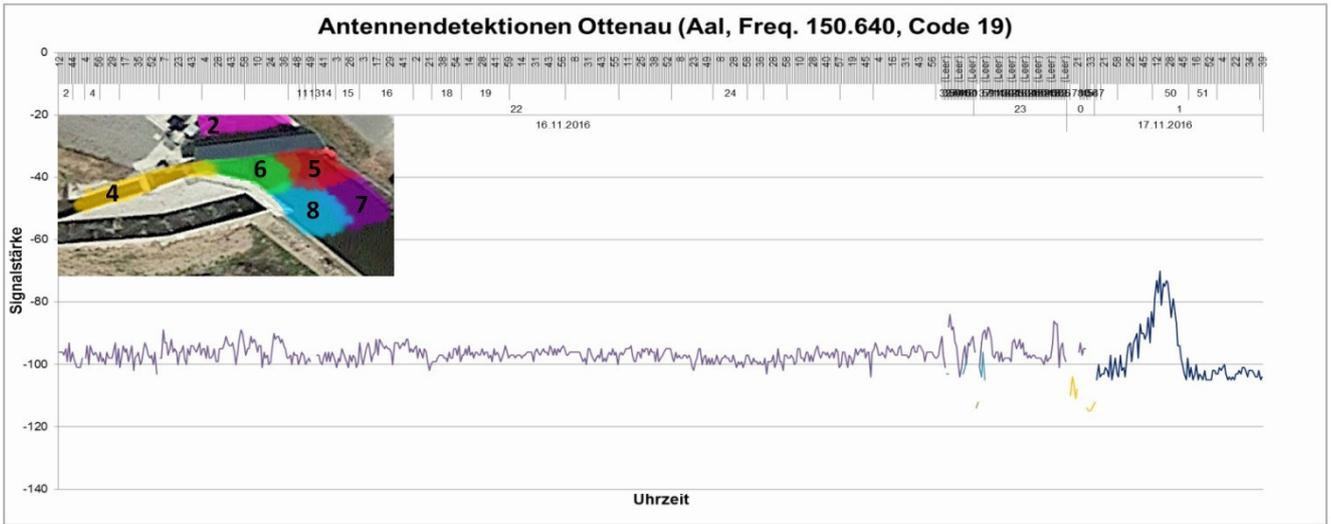


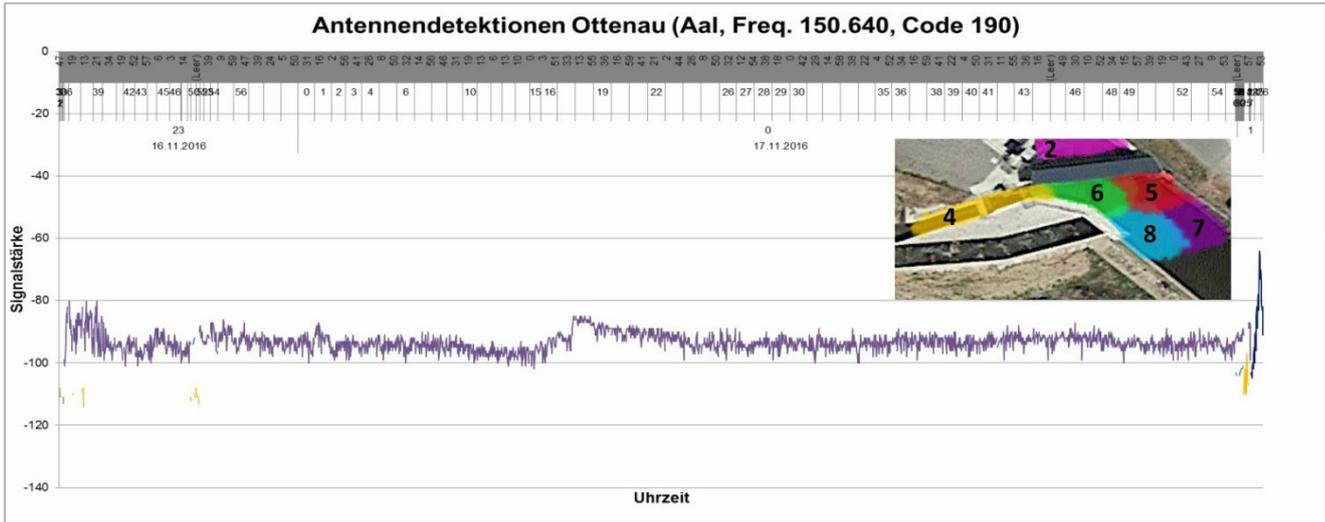
Gruppe der Aale mit Annäherung an den Rechen, jedoch mit anschließender Abwanderung über Streichwehr:





Gruppe der Aale ohne Annäherung an den Rechen, mit direkter Abwanderung über Streichwehr:





## GESAMTVERZEICHNIS

der bisherigen „Technischen Berichte über Ingenieurhydrologie und Hydraulik“

*Bestellungen beim  
Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft  
Fachgebiet Ingenieurhydrologie und Wasserbewirtschaftung  
Franziska-Braun-Straße 7, D-64287 Darmstadt*

- Nr. 1/1965** (vergriffen)  
H. Lacher Über das Kriechverhalten destillierter Bitumina unter Zugrundelegung der Theorie der linearen Viskosität
- Nr. 2/1966**  
J. Bock Einfluß der Querschnittsform auf die Widerstandsbeiwerte offener Gerinne
- Nr. 3/1967** (vergriffen)  
P. Unger Berechnung instationärer Abflußvorgänge in natürlichen Gerinnen unter Verwendung eines von der Gerinneform unabhängigen Rauigkeitsmaßes
- Nr. 4/1968** (vergriffen)  
W. Tiedt Berechnung des laminaren und turbulenten Reibungswiderstandes konzentrischer und exzentrischer Ringspalte
- Nr. 5/1969**  
R. Schröder Häufigkeitsanalyse hydrologischer Daten  
B. Scherer Unverzerrtes Hele-Shaw-Modell für instationäre Grundwasserströmungen mit freier Oberfläche
- Nr. 6/1970**  
D. Krause Einfluß der Trassierungselemente auf den Spiegelverlauf in gekrümmten Schussrinnen
- Nr. 7/1971**  
W. Tiedt Hydrodynamische Untersuchung des Teilfüllungsproblems, Gesetzmäßigkeiten des Abflusses in technisch rauhen Kreisgerinnen bei laminarer und turbulenter Strömung
- Nr. 8/1972**  
M. T. Monzavi Widerstandsgesetz auf statistischer Basis für extreme natürliche Rauigkeiten in Druckrohren
- Nr. 9/1973**  
B. Scherer Die Entwicklung und Anwendung eindimensionaler Modelle der zweidimensionalen Grundwasserbewegungen in Fluß-, Graben- und Drainnähe
- Nr. 10/1973** (vergriffen)  
diverse Autoren Sammlung von Kurzberichten 1965 – 1972

- Nr. 11/1974** (vergriffen)  
 E. Zäschke Widerstandsmindernde Wirkung hochmolekularer Zusätze beim Transport Newtonscher Flüssigkeiten in geschlossenen Leitungen  
 R. Schröder u. Über das hydraulische Widerstandsverhalten von Beton- und Stahlbeton-  
 D. Knauf rohren im Übergangsbereich  
 H. Lacher Konstruktionshilfe für Strömungsnetze ebener Potentialströmungen mittels Elementarströmungen  
 H. Lacher u. Einfluß von Teilfüllungsgrad und von Wanddicke des porösen  
 M. T. Monzavi Rohrmantels auf die Ergiebigkeit von Betonfilterrohren  
 H. Lacher u. Untersuchung zur Ermittlung der Abflußleistung poröser Betonfilterrohre  
 K. J. Ueker unter natürlichen Bedingungen  
 G. Euler u. Berechnung von Hochwasserabläufen mit Näherungsverfahren und  
 A. Koussis Anwendung  
 H. Lacher Neuere Methoden der Wissensvermittlung im Fach „Hydraulik“, erläutert am Lehrbeispiel „Hydrostatik räumlich gekrümmter Oberflächen“
- Nr. 12/1974**  
 H. J. Dallwig Fließformeln und Formbeiwert - eine kritische Untersuchung üblicher  
 Berechnungsmethoden für Gerinneströmungen  
 R. Schröder Wirkung periodischer Wandwelligkeiten auf den Strömungswiderstand
- Nr. 13/1974** (vergriffen)  
 D. Belke Die statistische Analyse von Grundwasserständen mit dem Ziel der  
 Extremwertprognose
- Nr. 14/1975** (vergriffen)  
 G. Euler Die Simulation der Niederschlagsaufteilung für Hochwasserabfluß-Modelle
- Nr. 15/1975**  
 A. Koussis Ein verbessertes Näherungsverfahren zur Berechnung von  
 Hochwasserabläufen
- Nr. 16/1975**  
 G. Lass Berechnung von Horizontalfilterbrunnen mit beliebig angeordneten  
 Filterrohren
- Nr. 17/1976** (vergriffen)  
 D. Knauf Die Abflußbildung in schneebedeckten Einzugsgebieten des Mittelgebirges
- Nr. 18/1977**  
 H. Bischoff Die Berechnung von Potentialfeldern mit der Randintegralmethode,  
 dargestellt am Beispiel der ebenen Grundwasserbewegung
- Nr. 19/1977**  
 I. David Grundwasserfassungsanlagen mit Filterrohren
- Nr. 20/1977** (vergriffen)  
 Diverse Autoren Sammlung von Kurzberichten 1972 - 1977
- Nr. 21/1978**  
 O. Gieseler Einfluß der äquivalenten Sandrauhigkeit auf die Lage des Wechselsprungs  
 bei Umlenkung eines frei fallenden runden Flüssigkeitsstrahls an einer  
 ebenen Platte

**Nr. 22/1978**

- R. Schröder      Forschungsarbeiten des Instituts für Hydraulik und Hydrologie  
D. Belke u.      Simulation zur Nutzraumoptimierung einer Talsperre  
G. Euler u.      Ein detailliertes mathematisches Modell zur Simulation von Hochwasserwellen am Beispiel der Nidda
- R. Wackermann  
T. Brandt      Der Austausch von Oberflächen- und Grundwasser  
R. Schröder      Gestaltung von Offshore-Bauwerken für die Kühlwasserversorgung thermischer Kraftwerke
- H. Lacher u.      Zum Problem des Regenwasserabflusses auf Fahrbahnen  
F. Thiele  
W. Tiedt      Druckspüler/Spülkasten - ein Beitrag zur Hydraulik zweier Spülsysteme der Sanitärtechnik
- O. Gieseler      Hydraulische und mechanische Verfahren zur Ermittlung von Rauigkeiten

**Nr. 23/1978**

- A. Holderbaum      Hydraulische Untersuchung zur Ermittlung der Wasserfilmdicken auf berechneten Fahrbahnoberflächen

**Nr. 24/1979**

- T. Brandt      Modell zur Abflußgangliniensimulation unter besonderer Berücksichtigung des grundwasserbürtigen Abflusses

**Nr. 25/1980**

- N. Könemann      Der wechselseitige Einfluß von Vorland und Flußbett auf das Widerstandsverhalten offener Gerinne mit gegliederten Querschnitten

**Nr. 26/1981**

- R. Wackermann      Ein Rasterverfahren mit flächenvariabler Systemfunktion zur Simulation von Hochwasserganglinien aus großen Einzugsgebieten

**Nr. 27/1981**

- A. Holderbaum      Modellversuche zum Abfluß von Niederschlagswasser auf Verwindungsstrecken

**Nr. 28/1982**

- H. J. Dallwig      Zur Leistungsfähigkeit von Kelchüberfällen

**Nr. 29/1982**

- R. Schröder      In memoriam Hannes Lacher - Geleitwort  
H. Lacher      Über die viskoelastischen Eigenschaften von destilliertem Bitumen  
H. Lacher u.      Experimentelle Erfahrungen mit Filterrohren als Grundlage ihrer hydraulischen Bemessung  
R. Schröder  
H. Lacher      Grundwasserabfluß mit freier Oberfläche, Auszug aus dem Textbuch zur Technischen Hydraulik
- H. Lacher      Anwendung der Randintegralmethode zur Berechnung der Leistungsfähigkeit von teilgefüllten Rohren  
B. Söhngen  
H. Bischoff  
H. Lacher      Verallgemeinertes Berechnungsverfahren nach Dupuit-Forchheimer für Grundwasserleiter beliebig hoher Durchlässigkeit
- H. Lacher      Anwendung der Feldintegralmethode zur Berechnung der Durchströmung von Steinschüttdämmen  
H. Bischoff  
B. Söhngen  
F. Zior u.      Ein neues Meßverfahren für die Bestimmung der Oberflächenrauigkeit von Kanalwandungen  
H. Lacher  
H. Gerdes u.      Die Berechnung dreidimensionaler Grundwasserströmung mit Mitteln der ebenen Potentialtheorie  
H. Lacher

Fortsetzung Nr. 29/1982

- F. Zior u.  
H. Lacher  
H. Lacher u.  
E. Zäschke  
F. Thiele u.  
H. Lacher  
B. Söhngen,  
H. Bischoff u.  
H. Lacher  
H. Lacher
- Entwicklung einer konduktometrischen Sonde zur Messung von Wasserfilmdicken auf Fahrbahnoberflächen  
Schiffahrtsbedingte Wasserdruckausbreitung in Kanalböschungen  
Probleme der Straßenentwässerung und neue Bemessungsmethoden  
Die Berechnung der Ergiebigkeit von Drainagesystemen in horizontal ausgedehnten Grundwassersystemen  
Zur Begründung der Konzentrationszeit aus der Sicht der Hydraulik  
Humor im Wasserbaulichen Versuchswesen: Versuchsanordnung zur Bestimmung der äquivalenten Sandrauhigkeit von Steinzeugrohren

**Nr. 30/1983**

- Diverse Autoren Sammlang von Kurzberichten 1978 - 1983

**Nr. 31/1983**

- F. Thiele
- Fahrbahnlängsentwässerung im Straßengerinne und ein Entwurf für zukünftige Richtlinien zur Bemessung

**Nr. 32/1984**

- U. Höfer
- Beginn der Sedimentbewegung bei Gewässersohlen mit Riffeln oder Dünen

**Nr. 33/1985**

- G. Euler  
C. Heinzelmann  
D. Jacobi
- Die Berechnung des Schmutzwasserabflusses aus Niederschlägen:  
Eine vergleichende Darstellung und Wertung der Modellansätze

**Nr. 34/1985**

- H. Gerdes
- Berechnung dreidimensionaler Grundwasserströmung mit Mitteln der ebenen Potentialtheorie am Beispiel des Sickerstollens

**Nr. 35/1986**

- Diverse Autoren
- Stofftransport im Wasser - Darmstädter Wasserbauliches Kolloquium 1985: Zusammenstellung der Referate

**Nr. 36/1986**

- R. Schröder  
R. Schröder  
C. Kraus
- Diskontinuierliche Abflußvorgänge in Freispiegelrinnen: Randwalzen  
Die turbulente Strömung im freien Wechselsprung: Deckwalze  
Walzenbildung im Kolk

**Nr. 37/1987**

- C. Heinzelmann  
U. Höfer
- Transportbeginn auf geriffelter Sohle unter dem Einfluß einer stationär gleichförmigen Strömung mit überlagerter Schwallwelle

**Nr. 38/1987**

- F. Zior
- Regenwasserabfluß auf Fahrbahnoberflächen: experimentelle und theoretische Untersuchungen

**Nr. 39/1987**

- B. Söhngen
- Das Formbeiwertkonzept zur Berechnung des Fließwiderstandes in Rohren und Gerinnen

**Nr. 40/1988**

Diverse Autoren Lösungsansätze zu aktuellen Problemen im Wasserbau - Darmstädter Wasserbauliches Kolloquium 1987: Zusammenstellung der Referate

**Nr. 41/1987**

G. J. Weiß Abfluß- und Wasserstandssteuerung in offenen Gerinnen mit Hilfe selbstregulierender Schwimmkörper

**Nr. 42/1989**

H. Zaiß Simulation ereignisspezifischer Einflüsse des Niederschlag-Abfluß-Prozesses von Hochwasserereignissen kleiner Einzugsgebiete mit Niederschlag-Abfluß-Modellen

**Nr. 43/1990**

Diverse Autoren Hydraulik und Hydrologie im Stadtbauwesen - Darmstädter Wasserbauliches Kolloquium 1989: Zusammenstellung der Referate

**Nr. 44/1990**

H. Wegner Steuerung für kleine Hochwasserschutzräume

**Nr. 45/1991**

U. Drechsel Repräsentanz und Übertragbarkeit von Niederschlagsersatz-belastungen zur Durchführung von Schmutzfrachtberechnungen

**Nr. 46/1991**

J. Lang Analyse und Simulation des Feuchtekontinuums auf Straßenoberflächen

**Nr. 47/1992**

G. J. Weiß Sohlenbeanspruchung und Sedimenttransport unter Einzelwellen

**Nr. 48/1992**

C. Heinzelmann Hydraulische Untersuchung über den Einfluß benthischer Diatomeenfilme auf Strömungswiderstand und Transportbeginn ebener Sandsohlen

**Nr. 49/1993**

J. Kühlborn Wachstum und Wanderung von Sedimentriffeln

**Nr. 50/1995**

M. Schuster Transportkritische Schubspannungen bei verschiedenen Sohlenzuständen, insbesondere unter Einzelwellenbelastung bei stationärer Grundströmung

**Nr. 51/1993**

(vergriffen)

Diverse Autoren Dezentraler Hochwasserrückhalt - Darmstädter Wasserbauliches Kolloquium 1992: Zusammenstellung der Referate

**Nr. 52/1994**

N. Engel Hydrologische Simulation der Abflußtransformation in Kanalisationsnetzen

**Nr. 53/1995**

Diverse Autoren Die modellgestützte Bewirtschaftung intensiv genutzter Einzugsgebiete - Darmstädter Wasserbauliches Kolloquium 1994: Zusammenstellung der Referate

**Nr. 54/1996**

S. Wallisch

Ein mathematisches Modell zur Berechnung der hydromechanischen Beanspruchung von Riffelsohlen

**GESAMTVERZEICHNIS (ISSN 0340-4005)**  
der bisherigen Wasserbau-Mitteilungen der TH Darmstadt  
(teilweise Kurztitel)

*Bestellungen beim  
Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft  
Fachgebiet Wasserbau und Hydraulik  
Franziska-Braun-Straße 7, D-64287 Darmstadt  
Selbstkostenpreis EURO 20,- je Heft*

- Heft 1/März 66** (vergriffen)  
Bassler, F. Vorwort des Herausgebers  
Linder, R. Hochwasserentlastung von Staustufen durch Schiffsschleusen  
Bassler, F. Beginnt die Epoche der Gezeitenkraftwerke?  
Elshazli, S. Die Bedeutung der Wasserkraft für die ägyptische Wirtschaft
- Heft 2/Juli 67** (vergriffen)  
Uhlig, D. Probleme des landwirtschaftlichen Wasserbaus in Lybien  
Bassler, F. Eindrücke vom ICID-Kongreß in Indien  
Sauer, H.-D. Zentral messendes Wasserstands-Registriergerät für Modelle mit instationärer Strömung  
Bassler, F. Die Nutzung von Meerwasser in der Kattara-Senke/Ägypten
- Heft 3/Dez. 68** (vergriffen)  
Müller, J. Weltregister der Pumpspeicherkraftwerke  
Bassler, F. Wasserwirtschaftliche Sonderaufgaben in Entwicklungsländern  
Bayer, E. Die Versuchseinrichtungen des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft  
Mäder, Ch. Die Exkursionen des Lehrstuhls für Wasserbau und Wasserwirtschaft  
Bassler, F. Scheme for Qattara Depression/Egypt
- Heft 4/Aug. 69**  
Bayer, E. Gestaltung der Rampenbauwerke für Flussfähren
- Heft 5/Nov. 69**  
Sauer, H.-D. Industrierwasserentnahme aus schwebstoffreichen Flüssen
- Heft 6/Okt. 70**  
Schröder, W. Ausbauefällbemessung alluvialer Bachstrecken nach dem Sandtransportvermögen
- Heft 7/Feb. 71**  
Müller, J. Auswirkungen eines Unterbeckens für Pumpspeicherung auf die Wasserwirtschaft  
Bassler, F. Nuklearausbruch und Pumpspeicherung als Kostenfaktoren der Wasserkraftanlage in der Kattara-Senke/Ägypten
- Heft 8/Juli 71**  
Bassler, F. 10 Jahre Lehre und Forschung in Wasserbau und Wasserwirtschaft an der Technischen Hochschule Darmstadt  
Mäder, Ch. Modellversuche zur Umgestaltung des Mains bei Aschaffenburg  
Schmidtke, R. Projektstudie zur Regelung des Rio Mantaro in der Hochebene von Huancayo/Peru  
Schröder, W. Projektstudie zur Ufersicherung am Amazonas bei Iquitos/Peru  
Sulser, P. Gedanken zu den Exkursionen eines Wasserbaulehrstuhls

Fortsetzung Heft 8/Juli 71

- Täubert, U. Modellversuche für Hochwasserentlastungsanlage Staudamm Poza Honda/Ecuador  
Uhlig, D. Das Bewässerungsprojekt Al Hassa/Saudi Arabien  
Bassler, F. Studieneinführung Bauingenieurwesen, Fachgebiet Wasserbau und Wasserwirtschaft

**Heft 9/Nov. 71**

- Mäder, Ch. Strömungen durch Luftblasenschleier in stehenden und fließenden Gewässern

**Heft 10/Aug. 72**

- Schmidtke, R. Ein Kostenzurechnungsmodell für wasserwirtschaftliche Mehrzweckprojekte

**Heft 11/Dez. 73**

- (vergriffen)  
Sulser, P. Berührungslose Wasserstandsmessung mittels kontinuierlicher Kondensatorumladung  
Börner, R. Internationale Pumpspeicherbibliographie 1900 bis 1960  
Bassler, F. Solar Depression Power Plant of Qattara/Egypt  
Täubert, U. Der Abfluß in Schußrinnenversuchen  
Bassler, F. Pumpspeicherkraftwerke an schiffbaren Wasserstraßen u. a.

**Heft 12/Apr. 74**

- Täubert, U. Wasserwirtschaftliche Systemanalyse des Wärmehaushalts von Flüssen

**Heft 13/Dez. 75**

- (vergriffen)  
Bassler, F. Neue Vorschläge für die Entwicklung der Kattara-Senke/Ägypten  
Bassler, F. New Proposals to Develop Qattara Depression/Egypt  
Börner, R. Moorentwässerung in Finnland  
Börner, R. Internationale Pumpspeicherbibliographie 1961 bis 1965  
Gräß, E. Konstruktion und Umbau einer Kipprinne  
Sulser, P. Die Wasserbau-Exkursionen des Instituts in den Jahren 1970 bis 1975, Forschungsvorhaben und Veröffentlichungen 1970 bis 1975

**Heft 14/März 77**

- Kriesel, E. Wasserwirtschaftliche Aspekte thermischer Energiequellen

**Heft 15/Mai 77**

- Börner, R. Einsatzmöglichkeiten der Mehrzweckpumpspeicherung in Entwicklungsländern

**Heft 16/Juli 77**

- (vergriffen)  
Franzius, V. Der Sickerwasserabfluß aus Mülldeponien - Ein mathematisches Modell

**Heft 17/ Aug. 77**

- (vergriffen)  
Tönsmann, F. Verringerung des Feststoffbetriebs in Entnahmebauwerken an Bächen

**Heft 18/Dez. 77**

- (vergriffen)  
Bassler, F.D. Die Energiequellen Fluss- und Meerwasser  
Bassler, F. Speisung der Schiffahrtskanäle mit Scheitelhaltung  
u.a.  
Bassler, F. 100 Jahre Bauingenieurwesen Arab Republic of Egypt : Qattara Depression  
Bassler, F. Tätigkeiten als Ordinarius für Wasserbau und Wasserwirtschaft

**Heft 19/Dez. 78**

- Sulser, P. Drucklufteinleitung in Flüsse zur Steuerung des Geschiebetransports

- Heft 20/Juni 79** (vergriffen)  
Friedrich Bassler 70 Jahre/Ansprache und Aufsätze zu seiner Emeritierung
- Heft 21/März 81**  
Döring, M. Einflüsse der Wassernutzung thermischer Kraftwerke auf Gewässer
- Heft 22/Aug. 83**  
Albert, W. Solarteich - Kollektor und Wärmespeicher  
Gonsowski, P. Bodenluftkompression bei Wasserinfiltration  
Gonsowski, P. Selbstdichtung von Fließgewässern  
Kaiser, W. Modellversuch HW-Entlastung Sösetalsperre  
Wieland, H.  
Krier, H. Erfahrungen bei Beregnungsanlagen im Hessischen Ried  
Krier, H. Erosionsbeginn bei kohäsiver Wasserlaufsohle  
Wieland, H. Modellversuch zur Hochwasser-Entlastung der Kulmke-Sperre/Harz
- Heft 23/Sep. 84** (vergriffen)  
Kaiser, W. Fließwiderstandsverhalten in Gerinnen mit durchströmten Ufergehölzonen
- Heft 24/Febr. 85** (vergriffen)  
Darmstädter Wasserbauliches Kolloquium 1984 „Hochwasser am Oberrhein“
- Heft 25/Aug. 87**  
Wieland, H. Hydraulische Bemessung von Tosbecken für Überfallstrahlen und der Druckbelastung der Sohle
- Heft 26/Febr. 87** Darmstädter Wasserbauliches Kolloquium 1986 „Planungsansätze Ökologie - Wasserwirtschaft, so nicht! - wie dann?“
- Heft 27/Juli 87**  
Krier, H. Zum Langzeiterosionsverhalten kohäsiver Fließgewässersohlen
- Heft 28/Sep. 87**  
Gonsowski, P. Der Einfluß der Bodenluftkompression auf die vertikale Infiltration von Wasser in Sanden
- Heft 29/Dez. 89** Darmstädter Wasserbauliches Kolloquium 1988 `Fließgewässer – Stillgewässer
- Heft 30/Dez.89** (vergriffen)  
Albert, W. Die Gebietsverdunstung von Waldstandorten aus der Simulation von Grundwasserganglinien mit klimatischem Bodenwasserhaushaltsmodell
- Heft 31/Febr. 90**  
Weiß, J. Berücksichtigung der Hysterese der Wasserspannung bei der Berechnung der vertikalen Wasserbewegung in natürlichen Sandböden
- Heft 32/März 90** Festschrift zum 60. Geburtstag von Prof. Dr.-Ing. Josef Mock

- Heft 33/Aug. 90**  
Theune, Ch. Hydrological and Economical Aspects of Agronomically Productive Percolation Systems
- Heft 34/Dez. 90** (vergriffen)  
Darmstädter Wasserbauliches Kolloquium 1990  
Umweltverträglichkeitsprüfung in der Wasserwirtschaft
- Heft 35/Nov. 91** (vergriffen)  
Nuding, A. Fließwiderstandsverhalten in Gerinnen mit Ufergebüsch - Entwicklung eines Fließgesetzes für Fließgewässer mit und ohne Gehölzufer, unter besonderer Berücksichtigung von Ufergebüsch
- Heft 36/Dez. 91** Darmstädter Wasserbauliches Kolloquium 1991 „Boden- und Grundwasserschutz - anwendungsorientierte Forschung und Verfahren“
- Heft 37/März 92**  
Zimmermann, E. Phänomenologische Untersuchungen bei der Erosion einer kohäsiven Sohle
- Heft 38/Dez. 93** Darmstädter Wasserbauliches Kolloquium 1993 `Ökologisch orientierte Gewässersanierung und -pflege
- Heft 39/Dez. 93**  
Ruiz  
Rodriguez, E. Bodenluftströmung in teilgesättigten Böden
- Heft 40/Dez. 95** Darmstädter Wasserbauliches Kolloquium 1995 „Hochwassergefahren am Oberrhein“ und Fachseminar „Abflußabhängigkeit der morphologischen und biologischen Verhältnisse von Fließgewässern bei Niedrigwasser“
- Heft 41/Juli 99**  
von der Hude Die Kapillarsperre als Oberflächenabdichtungssystem von Deponien und Altlasten - Rinnenversuche und Bemessungsregeln

Die Reihe der „Wasserbau-Mitteilungen der TH Darmstadt“ wird zusammen mit den „Technischen Berichten über Ingenieurhydrologie und Hydraulik“ als **„Mitteilungen des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU Darmstadt“** (ISSN 1430-3434) fortgesetzt. Die neue Nummerierung ergibt sich aus der Summe der Hefte beider Vorgängerreihen.

# Mitteilungen des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU Darmstadt

## GESAMTVERZEICHNIS (ISSN 1430-3434)

*Selbstkostenpreis EURO 20,- je Heft. Bestellungen beim*

*Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft  
Fachgebiet Ingenieurhydrologie und Wasserbewirtschaftung  
Franziska-Braun-Straße 7, D-64287 Darmstadt*

*oder*

*Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft  
Fachgebiet Wasserbau und Hydraulik  
Franziska-Braun-Straße 7, D-64287 Darmstadt*

- Heft 96/1996** (vergriffen)  
Träbing, K. Ökomorphologische Kenngrößen für die Strukturvielfalt von Fließgewässern
- Heft 97/1997**  
Jelinek, D. Die Kapillarsperre als Oberflächenbarriere für Deponien und Altlasten - Langzeitstudien und praktische Erfahrungen in Feldversuchen
- Heft 98/1997** Darmstädter Wasserbauliches Kolloquium 1996 `Numerische Simulationen im Wasserbau
- Heft 99/1997** Berichte zur Ingenieurhydrologie und Wasserbewirtschaftung
- Heft 100/1998**  
Kilian, T. Abflußcharakteristika und potentiell natürliche Gerinnegrundrißformen hessischer Fließgewässer
- Heft 101/1997**  
Döring, M. Die römische Wasserleitung von Pondel im Val d'Aosta/Italien. Bestandsaufnahme des Bauwerks aus dem Jahre 3 v. Chr.
- Heft 102/1998**  
Schmidt, T.R. Einfluß der Wandrauheitsstruktur auf die Geschwindigkeitsverteilung ausgebildeter, turbulenter Strömungen in Kreisrohren
- Heft 103/1998** Darmstädter Wasserbauliches Kolloquium 1997 „Betrieb und Steuerung von Speichern und Stauhaltungen unter sich ändernden Randbedingungen“
- Heft 104/1998**  
Bettmann, T. Dezentrale Regenwasserbewirtschaftung und deren Auswirkungen auf die Regenwasserbehandlung in urbanen Gewässereinzugsgebieten
- Heft 105/1998**  
Seid, A.H. Modelling the Influence of Shrinkage Cracks on Overland Flow
- Heft 106/1999** (Nachdruck)  
Zanke, U. Zur Physik von strömungsgetriebenem Sediment (Geschiebetrieb)
- Heft 107/1999**  
Obermann, I. Modellierung des Wasserhaushaltes von Deponien vorbehandelter Siedlungsabfälle

- Heft 108/1999** Darmstädter Wasserbauliches Kolloquium 1998  
Mischwasserbehandlung - Planung, Prüfung, Vollzug -
- Heft 109/2000**  
Kämpf, M. Fließprozesse in Kapillarsperren zur Oberflächenabdichtung von Deponien  
und Altlasten - Grundlagen zur hydraulischen Bemessung
- Heft 110/2000**  
Lempert, M. Ein GIS gekoppeltes rasterbasiertes Modell zur Berechnung des  
Wasserhaushaltes kleiner Einzugsgebiete
- Heft 111/2000** (vergriffen)  
Darmstädter Wasserbauliche Kolloquium 1999 „Fließ- und Ausbreitungs-  
vorgänge in aquatischen Grenzräumen“
- Heft 112/2000** 100-Jahr-Feier des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft mit  
Festvortrag von Prof. Dr.-Ing., Dr.-Ing. E.h. J. Plate
- Heft 113/2000** (vergriffen)  
Mehler, R. Mischwasserbehandlung - Verfahren und Modellierung
- Heft 114/2000** (Nachdruck)  
Lenk, M. Hydraulische Austauschvorgänge zwischen fließender Welle und Interstitial  
- Felduntersuchungen in einer Pool-Riffle-Sequenz an der oberen Lahn
- Heft 115/2000** (Nachdruck)  
Saenger, N. Identifikation von Austauschprozessen zwischen Fließgewässer und  
hyporheischer Zone
- Heft 116/2000**  
Sieker, H. Generelle Planung der Regenwasserbewirtschaftung in Siedlungsgebieten
- Heft 117/2001**  
Hailu, D. Optimal planning and water management of irrigation systems
- Heft 118/2001**  
Lohr, H. Simulation, Bewertung und Optimierung von Betriebsregeln für  
wasserwirtschaftliche Speichersysteme
- Heft 119/2001**  
Bente, St. Eine Software-gestützte Methodik zur Voreinschätzung der wasserwirt-  
schaftlichen Auswirkungen von Maßnahmen der naturnahen  
Regenwasserbewirtschaftung
- Heft 120/2001**  
Zanke, U. Zum Einfluß der Turbulenz auf den Beginn der Sedimentbewegung
- Heft 121/2002**  
Hirschhäuser, T., Zanke, U. Morphologische Langfristprognose für das System Tidebecken-  
Außensände am Beispiel Sylts und der Dithmarscher Bucht
- Heft 122/2002** Darmstädter Wasserbauliches Kolloquium 2000  
Integrierte Gewässerbewirtschaftung in Verwaltung, Wissenschaft und  
Praxis
- Heft 123/2002**  
Kraus, T. Rauheitsänderung durch Biofilmbewuchs in Druckrohrleitungen
- Heft 124/2002**  
Luckner, T. Zum Bewegungsbeginn von Sedimenten

- Heft 125/2002**  
Holfelder, T. Temperaturbeeinflusste Transportprozesse in Kapillarsperren zur Oberflächenabdichtung von Deponien und Altlasten
- Heft 126/2003**  
Mewis, P. Morphodynamisch-numerische Modellierung von Flußkurven
- Heft 127/2003**  
Wetzstein, A. Berechnung von Entlastungsabflüssen an gedrosselten Streichwehren auf der Basis von gemessenen Wasserständen
- Heft 128/2003**  
Hirschhäuser, T. Sedimentologische und biologische Aspekte der morphodynamischen Modellierung von Tidebecken
- Heft 129/2003** Darmstädter Wasserbauliches Kolloquium 2003 „Hochwasserschutz“
- Heft 130/2003** Darmstädter Wasserbauliches Kolloquium 2001  
Aktuelle Themen aus Hydromechanik, Wasserbau und Hydrologie
- Heft 131/2003**  
Witting, M. Simulation von Küstenlängs- und Küstenquertransport im 2DH-morphodynamischen Modell TIMOR3
- Heft 132/2003**  
Krebs, M. Untersuchung instationärer oszillierender Strömungen in buhnenverbauten Flußabschnitten und ihre Bedeutung für morphodynamische Berechnungen
- Heft 133/2004**  
Kudo, Eiji Sustainable Water Management in an Urbanizing River Basin in Japan, Based on Integrated Modeling Technique
- Heft 134/2005**  
Gebrewebet, Y. Numerical Modeling of Koka Reservoir Sedimentation
- Heft 135/2006**  
Schadrac, I. Nouvelle approche méthodologique pour l'analyse de la sécurité hydrologique des barrages en contexte sahélien soumis à une variabilité climatique
- Heft 136/2006**  
Link, O. Untersuchung der Kolkung an einem schlanken zylindrischen Pfeiler in sandigem Boden
- Heft 137/2006**  
Muschalla, D. Evolutionäre multikriterielle Optimierung komplexer wasserwirtschaftlicher Systeme
- Heft 138/2006**  
Klawitter, A. Ein Modellkonzept zur integrativen Betrachtung von Urban- und Ruralhydrologie auf Einzugsgebietsebene
- Heft 139/2006** Darmstädter Wasserbauliches Kolloquium / DWA-Seminar 2005  
„Feststofftransportmodelle“
- Heft 140/2006**  
Wurpts, A. Numerische Simulation von Dichteeffekten am Beispiel der Umlagerung von Baggergut im Ästuarbereich

- Heft 141/2007**  
Seydell, I. Einlagerung von Feinstoffen in eine Flusssohle und Wasseraustausch zwischen Fluss und Interstitial – Naturuntersuchungen an einer Kiesquerbank der Lahn bei Marburg
- Heft 142/2007**  
Döring, M. Römische Häfen, Aquädukte und Zisternen in Campanien: Bestandsaufnahme der antiken Wasserbauten
- Heft 143/2007**  
Winterscheid, A. Szenariotechnik im Hochwasserrisikomanagement
- Heft 144/2008**  
Zanke, U.C.E. On Applicability of Morphodynamic Acceleration in Morphodynamic Simulations
- Heft 145/2009**  
Schröter, K.A. Contribution to the Uncertainty Analysis of Distributed Hydrological Models
- Heft 146/2009**  
Roland, A. Entwicklung von WWM II -Zur Seegangmodellierung auf unregelmäßigen Gitternetzen-
- Heft 147/2009**  
Wiesemann, J.-U. Zum Sedimenttransport auf quergeneigter Sohle
- Heft 148/2009**  
Zhou, X. Morphodynamic Response of Yangtze River Estuary to Sea Level Rise and Human Interferences
- Heft 149/2011**  
Diab, R. ExperimentallInvestigation on Scouring around Piers of different Shape and Alignment in Gravel
- Heft 150/2015**  
Nasner, H.  
Pieper, R.  
Torn, P. Sedimentation in Brackwasserhäfen
- Heft 151/2015**  
Kubetzek, T. Erosion an geotextilbewehrten Deichen bei langeinstauenden Hochwassern und Deichüberströmung
- Heft 152/2016**  
Schneider, S. Funktionsanalyse und Wirkungsoptimierung einer Wasserdruckmaschine
- Heft 153/2017**  
Dietsch, H. Entwicklung des Mekong in eine bedeutende internationale Schifffahrtsstraße
- Heft 154/2018**  
Dahlem, J.-G. Zur gekoppelten morphologischen Simulation der Dynamik sandiger Küsten unter Strömungs- und Seegangseinfluss
- Heft 155/2018**  
Berger, C. Rechenverluste und Auslegung (elektrifizierter) Schrägrechen anhand ethohydraulischer Studien

**ISSN-Nr.: 1430-3434**