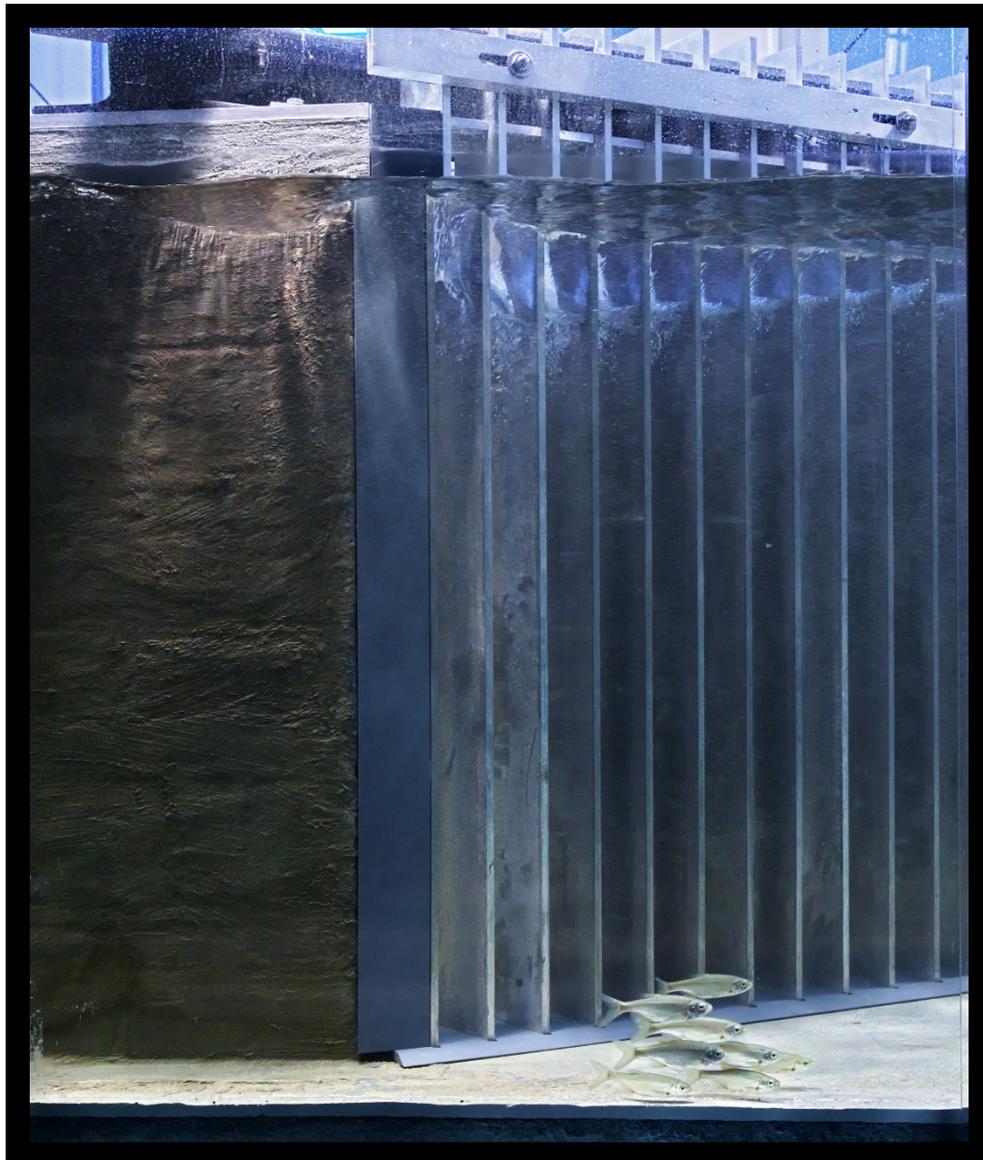


**Forschungsprojekt:
Massnahmen zur Gewährleistung eines schonenden
Fischabstiegs an grösseren mitteleuropäischen
Flusskraftwerken**

Ethohydraulische Untersuchungen zum Fischabstieg entlang eines vertikalen, schräg ausgerichteten Fischleitrechens



Zusammenfassung

Zielsetzung

Im Rahmen des Forschungsprojekts „Massnahmen zur Gewährleistung eines schonenden Fischabstiegs an grösseren mitteleuropäischen Flusskraftwerken“ – (Auftraggeber Verband Aare-Rheinwerke VAR) wurde durch die Eawag und die Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich untersucht, ob mechanische Verhaltensbarrieren möglicherweise eine Lösung für eine funktionsfähige und effektive Abwanderung bei grösseren Wasserkraftwerken darstellen können.

Um dringend notwendiges Wissen über funktionsfähige und effektive Abwanderhilfen zu erhalten wurde dieses Gemeinschaftsprojekt ins Leben gerufen. Dabei wurde ein Strömungskanal gebaut, in dem ethohydraulische Versuche durchgeführt und wichtige, grundlegende Daten gesammelt werden können. Die Fischleitreechen Louver und Bar Rack wurden auf die Bedürfnisse unserer heimischen potamodromen und katadromen Fischarten ausgehend untersucht. Zielarten der Untersuchungen waren Barben, Schneider, Bachforellen, Äschen und Aale. Im Rahmen dieses Projektes wurden verschiedene Konfigurationen der Leitreechen in Bezug auf Ihre Effektivität, Fische stromabwärts in einen Bypass zu leiten, untersucht. Die untersuchten, schräg im Kanalquerschnitt angeordneten Leitreechen waren bezüglich der Parameter Rechenausrichtung, Stababstand, Stabausrichtung variabel. Um die Leitwirkung zu bestimmen, wurde das Fischverhalten gegenüber den unterschiedlichen Konfigurationen bei definierten Fliessgeschwindigkeiten analysiert. Die Ergebnisse sollen dazu beitragen, eine bestmögliche Konfiguration der getesteten Leitreechen auf die untersuchten Fischarten zu bestimmen.

Versuchsaufbau

Der Versuchsstand besteht aus einer Rinne, die sowohl über die messtechnische Ausrüstung zur Bestimmung der hydraulischen Parameter verfügt, als auch über die zur Durchführung von Tierversuchen nötigen Einbauten. Das Versuchsgerinne ist ca. 30 m lang, 1,8 m breit und 1,4 m hoch. Dabei ist der Abflussquerschnitt 1,5 m breit und 0,9 m tief. Der Zufluss ist stufenlos von 0 bis 1200 l/s regelbar. Dies entspricht einer resultierenden mittleren Fliessgeschwindigkeit bis zu 0,9 m/s. Unmittelbar an das Ende des Leitreechens schliesst der 20 cm breite Bypass an. Mittels Elektrofischung wurden die Versuchsfische in umfangreichen Abfischungskampagnen aus der Suhre (LU), der Thur (TG), der Birs (BE) und dem Mühlitalbach (LU) entnommen und nach den Versuchen wieder dorthin zurück gebracht.

Ergebnis

Wichtige Versuchsparameter waren die Stabausrichtung, der Stababstand, die Verwendung eines Leitbleches, die Fischart und die Fliessgeschwindigkeit:

- Die Leiteffizienz für Barben und Schneider war höher bei 5 cm Stababstand als bei 11 cm.
- Die Leiteffizienz für Barben und Schneider war höher für das Bar Rack (45° Stabausrichtung) als für den Louver (90° Stabausrichtung).
- Die Verwendung eines Leitbleches führte zu mehr Bypass-Einstiegen, weniger Verweigerern und weniger Rechenpassagen.

- Eine Erhöhung der Fließgeschwindigkeit hatte, ausser bei Schneidern, keinen Einfluss auf das Versuchsergebnis. Bei Schneidern führte eine Erhöhung der Fließgeschwindigkeit zu einer erhöhten Abstiegsverweigerung
- Die Rechenausrichtung (15° oder 30°) hatte keinen Effekt auf das Versuchsergebnis.
- Die Fischlänge hatte keinen Einfluss auf die Leiteffizienz.

Die Versuche mit 15° beziehungsweise 30° Rechenausrichtung, 45° Stabausrichtung und 5 cm Stababstand hatten bei allen Fischarten die höchste Leitwirkung.

Danksagung

Ganz besonders möchten wir Robert Kriewitz danken, der im Rahmen dieses Projektes seine Dissertation erstellte und für die technischen Bereiche der Anlage zuständig war. Danken möchten wir auch Prof. Dr. Robert Boes, Dr. Ismail Albayrak und Adriano Lais durch deren Unterstützung und Betreuung an der VAW (Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie) das Projekt verwirklicht werden konnten.

Speziell möchten wir den folgenden Projektpartnern danken: Verband Aare-Rheinwerke (VAR) für die Initiierung des Projekts, der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), dem Bundesamt für Umwelt (BAFU), dem Bundesamt für Energie (BFE) und swisselectric research für die Unterstützung.

Für die tatkräftige Mithilfe bei den Versuchsdurchführungen, den Befischungen, und den Arbeiten am Kanal möchten wir Nils Schölzel, Cyrill Kern, Brigitte Gehrmann und dem VAW Werkstatt- und Hallenteam danken. Für die Entwicklung des Fish-Tracking Moduls danken wir Dr. Martin Detert. Ebenfalls geht der Dank an die kantonalen Fischereiverwaltungen, welche es ermöglichten, Wildfische aus ihren Gewässern für diese Versuche zu verwenden (LAWA Jagd und Fischerei Kanton Luzern, Jagd- und Fischereiverwaltung Kanton Thurgau, Fischereisinspektorat Kanton Bern, Jagd- und Fischereiverwaltung Kanton Schaffhausen mit tatkräftiger Unterstützung durch den Fischereiverein Schaffhausen).

Inhaltsverzeichnis

1.	EINLEITUNG.....	1
1.1	PROJEKT FISCHABSTIEG: VERANLASSUNG UND ZIELSETZUNG.....	2
1.2	GRUNDLAGEN – TECHNISCHER TEIL	2
1.2.1	<i>Louver und Bar Racks.....</i>	2
1.2.2	<i>Bypass.....</i>	6
1.3	GRUNDLAGEN – FISCHÖKOLOGISCHER TEIL	11
1.3.1	<i>Relevante fischökologische Verhaltensweisen.....</i>	11
1.3.2	<i>Reaktionen gegenüber Stimuli</i>	15
1.4	DIE BIOLOGIE DER ZIELARTEN.....	19
1.4.1	<i>Die Barbe – Barbus barbus</i>	19
1.4.2	<i>Die Äsche – Thymallus thymallus</i>	21
1.4.3	<i>Der Schneider – Alburnoides bipunctatus</i>	23
1.4.4	<i>Die Bachforelle – Salmo trutta fario</i>	26
1.4.5	<i>Der Aal – Anguilla anguilla.....</i>	27
1.4.6	<i>Der Einsatz von Wild- und Zuchtfischen.....</i>	28
1.4.7	<i>Individual- und Schwarmverhalten.....</i>	28
1.5	ENTWICKLUNG UND ANWENDUNG EINES AUTOMATISIERTEN FISH-TRACKING MODULS	30
2.	MATERIAL UND METHODEN	32
2.1	VERSUCHSSTAND.....	32
2.2	VERSUCHSFISCHE	35
2.3	VIDEODOKUMENTATION UND FISH-TRACKING MODUL	35
2.4	VORVERSUCHE	35
2.5	VERHALTENSBEOBSACHTUNG UND DOKUMENTATION	36
2.6	GRÖSSENSPEKTRUM UND ANZAHL UNTERSUCHTER FISCHE.....	38
2.7	VERSUCHSDURCHFÜHRUNG	38
2.8	VERSUCHSZEITRAUM.....	39
2.9	VERSUCHSVARIABLEN.....	39
2.10	DATENANALYSE	41
2.10.1	<i>Statistische Analysen.....</i>	41
3.	ERGEBNIS - VERSUCHSREIHE 1	45
3.1	BARBEN	45
3.2	SCHNEIDER	48
3.3	STABAUSRICHTUNG.....	50
3.4	STABABSTAND.....	51
3.5	FLIESSGESCHWINDIGKEIT.....	52
3.6	SCHNEIDER-SCHWÄRME.....	53
3.7	FAZIT UND SCHLUSSFOLGERUNGEN	54
4.	ERGEBNIS - VERSUCHSREIHE 2	55
4.1	BARBEN	55
4.2	SCHNEIDER	56
4.3	BACHFORELLEN.....	57
4.4	AALE.....	59
4.5	ÄSCHEN	61
4.6	LEITBLECH.....	62
4.7	ERSTER ODER ZWEITER EINSATZ IM VERSUCH	64
4.8	RECHENAUSRICHTUNG	65
4.9	TABELLARISCHE DARSTELLUNG ALLER ERGEBNISSE.....	66
4.10	MULTIVARIATE REGRESSION - GLM	67
4.11	GRÖSSENVERTEILUNGEN.....	69
4.11.1	<i>Barben.....</i>	69
4.11.2	<i>Schneider</i>	69

4.11.3	Bachforellen.....	70
4.11.4	Äschen.....	70
4.11.5	Aale.....	71
5.	DISKUSSION.....	72
5.2	AUSBLICK.....	77
6.	LITERATUR.....	79
7.	ANHANG.....	89
7.1	STATISTISCHE ANALYSEN.....	89
7.1.1	Multivariate Regression - glm - Tabellen.....	89
7.1.2	Interaktionen.....	92
7.2	MESSUNGEN DER FLIESSGESCHWINDIGKEIT.....	96
7.2.1	Louver-Konfiguration mit $\alpha = 15^\circ$	96
7.2.2	Bar Rack-Konfiguration mit $\alpha = 15^\circ$	97
7.2.3	Bar Rack-Konfiguration mit $\alpha = 30^\circ$	98
7.2.4	Kontroll-Konfiguration mit $\alpha = 30^\circ$	99
7.3	MESSDATEN DER WASSERQUALITÄT.....	100
7.4	ERGEBNISSE FISH TRACKING.....	102

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Strömungsverhältnisse an einem Louver.....	3
Abbildung 2:	Vektordiagramm.....	4
Abbildung 3:	Fischverhalten vor einem Louver (Bates & Vinsonhaler 1957).....	6
Abbildung 4:	Zusammenhang Leitwirkung, Anström- und Bypassgeschwindigkeit.....	9
Abbildung 5:	Seitenlinienorgan.....	11
Abbildung 6:	Ansicht des Versuchsstandes.....	32
Abbildung 7:	Ansichten des Versuchsstandes (VAW 2014).....	33
Abbildung 8:	Leitrechen mit installiertem Leitblech.....	34
Abbildung 9:	Versuchsprotokolle, parallel geführt von 2 Beobachtern.....	37
Abbildung 10:	Grafik des Versuchsaufbaues.....	39
Abbildung 11:	Bachforellen (oben). Barbe, Schneider und Äsche (unten).....	43
Abbildung 12:	Aal (oben), Äsche und Barbe (mitte), Barben (unten).....	44
Abbildung 13:	Alle mit Barben getesteten Konfigurationen der ersten Versuchsreihe.....	45
Abbildung 14:	Rechenpassage einer Barbe.....	47
Abbildung 15:	Alle mit Schneidern getesteten Konfigurationen der ersten Versuchsreihe.....	48
Abbildung 16:	Louver im Vergleich zum Bar Rack.....	50
Abbildung 17:	Vergleich der Stababstände 5 cm und 11 cm.....	51
Abbildung 18:	Vergleich der Fließgeschwindigkeiten 0,3 m/s und 0,6 m/s.....	52
Abbildung 19:	Schneiderschwarm von zehn Fischen am Rechen.....	53
Abbildung 20:	Alle mit Barben getesteten Konfigurationen der zweiten Versuchsreihe.....	55
Abbildung 21:	Alle mit Schneidern getesteten Konfigurationen der zweiten Versuchsreihe.....	56
Abbildung 22:	Alle mit Bachforellen getesteten Konfigurationen der zweiten Versuchsreihe.....	57

Abbildung 23: Alle mit Aalen getesteten Konfigurationen der zweiten Versuchsreihe.....	59
Abbildung 24: Alle mit Äschen getesteten Konfigurationen der zweiten Versuchsreihe.	61
Abbildung 25: Darstellung aller Versuche mit und ohne Leitblech.	63
Abbildung 26: Zusammenfassung aller Versuche nach dem ersten oder zweiten Einsatz im Versuch. ..	64
Abbildung 27: Darstellung ausgewählter Versuche mit 15° und 30° Rechenausrichtung.	65
Abbildung 28: Grössenverteilung der Barben.	69
Abbildung 29: Grössenverteilung der Schneider.....	69
Abbildung 30: Grössenverteilung der Bachforellen.	70
Abbildung 31: Grössenverteilung der Äschen.....	70
Abbildung 32: Grössenverteilung der Aale.	71
Abbildung 33: Beste Konfigurationen für alle Fischarten, ohne Versuche mit Leitblech.	75
Abbildung 34: Konfiguration 30° 45° 5cm 0,6m/s LB für alle Fischarten.	76
Abbildung 35: Interaktion des Versuchsergebnisses Bypass-Einstieg und der Rechenausrichtung.	92
Abbildung 36: Interaktion des Versuchsergebnisses Bypass-Einstieg und der Stabausrichtung.	93
Abbildung 37: Interaktion des Versuchsergebnisses Bypass-Einstieg und des Stababstandes. Nur Barben und Schneider sind dargestellt, nur diese wurden bei zwei Stababständen untersucht.....	93
Abbildung 38: Interaktion des Versuchsergebnisses Bypass-Einstieg und des Einsatzes.....	94
Abbildung 39: Interaktion des Versuchsergebnisses Bypass-Einstieg und der Fliessgeschwindigkeit. ..	94
Abbildung 40: Interaktion des Versuchsergebnisses Bypass-Einstieg und des Bodenbleches.	95
Abbildung 41: Bewegungsgrössen der Louver-Konfiguration mit $\alpha = 15^\circ$	96
Abbildung 42: Bewegungsgrössen der Bar Rack-Konfiguration mit $\alpha = 15^\circ$	97
Abbildung 43: Bewegungsgrössen der Bar Rack-Konfiguration mit $\alpha = 30^\circ$	98
Abbildung 44: Bewegungsgrössen der Kontroll-Konfiguration mit $\alpha = 30^\circ$ und $\beta = 0^\circ$	99
Abbildung 45: Einzeltracks eines Versuches mit drei Barben (links) und einem Schneider (rechts). ...	102
Abbildung 46: Anzahl von Richtungswechseln.	103
Abbildung 47: Statistik zu (links) zurückgelegter Weglänge ΔL in detektierter x-y Ebene.	103
Abbildung 48: Wahrscheinlichkeit P zum Auftreten von x- Richtungswechseln.	104
Abbildung 49: Bachforelle (oben), Barbe (mitte), Äsche (unten).	105
Abbildung 50: Aal (oben), Leitrochen (mitte), Schneider und kleine Barbe (unten).	106

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Werte für die Normalkomponente bei diversen Anströmgeschwindigkeiten.	5
Tabelle 2: Systematisierung von Bypässen (Ebel 2013).	7
Tabelle 3: Die Leistungsmodi im Überblick (Ebel 2013).	12
Tabelle 4: Vertikale Differenzierung des Wanderkorridors für einige Arten (Ebel 2013).....	15
Tabelle 5: Mittelwerte der rückberechneten Jahresendlängen.	25
Tabelle 6: Grössenspektrum und Anzahl der untersuchten Fischarten.	38
Tabelle 7: Versuchsvariablen.	40
Tabelle 8: Deskriptive Beschreibung des Schwimmverhaltens von Barben.	46
Tabelle 9: Deskriptive Beschreibung des Schwimmverhaltens von Schneidern.....	49
Tabelle 10: Deskriptive Beschreibung des Schwimmverhaltens von Bachforellen.....	58
Tabelle 11: Deskriptive Beschreibung des Schwimmverhaltens von Aalen.	60
Tabelle 12: Deskriptive Beschreibung des Schwimmverhaltens von Äschen.....	62
Tabelle 13: Ergebnisse aller Versuche der ersten und zweiten Versuchsreihe	66
Tabelle 14: Ergebnisse der glm-Modelle mit Bypass-Einstieg als abhängige Variable.....	89
Tabelle 15: Ergebnisse der glm-Modelle mit Verweigerung als abhängige Variable.....	90
Tabelle 16: Ergebnisse der glm-Modelle mit Rechenpassage als abhängige Variable.	91
Tabelle 17: Messwerte der Wasserqualität für Kanal und Hälterungsbecken.....	100

1. Einleitung

Europaweit sind vor allem die rheophilen Fische der Äschen- und Barbenregion stark gefährdet (Lelek 1996). Die dort vorkommenden Cypriniden und Salmoniden stellen spezifische Habitatansprüche, die sowohl die Strukturvielfalt der Gewässer, als auch geeignete Strömungsbedingungen sowie die Vernetzung der Gewässer und das Vorhandensein von Überflutungsgebieten umfassen (Schiemer 1988).

Renaturierungsmassnahmen und der Bau von Fischtreppe sollen Lebensräume schaffen und vernetzen. Unter Berücksichtigung des Lebenszyklus von Fischen und dem artspezifischen Migrationsverhalten umfasst der Fischschutz neben Aufstiegshilfen auch die Möglichkeit einer sicheren flussabwärts gerichteten Migration. Hierzu gibt es insbesondere bei grösseren Flusskraftwerken und speziell für potamodrome Fischarten noch erhebliche Kenntnislücken.

Für den Fischabstieg stehen grundsätzlich mehrere Wege zur Verfügung: fischfreundliche Turbinen, Frühwarnsysteme und fischschonende Betriebsweise, Fischabstieg über das Wehr / Umgehungerinne oder technische Einrichtungen zum Fischschutz und Fischabstieg. Die Herausforderung bei letzteren liegt darin, die Tiere möglichst schnell und ermüdungsfrei um eine Barriere flussabwärts zu leiten. Idealerweise sollten Schutzvorrichtungen ausserdem für die gesamte Fischartengemeinschaft eines Gewässers wirksam sein. Hierfür sind Kenntnisse bezüglich Reizwahrnehmung, Präferenzen für Strömungsbedingungen sowie Faktoren, die Meidereaktionen auslösen, von grundlegender Bedeutung. Um erfolgreichen Fischabstieg für das gesamte Artenspektrum zu gewährleisten, kann es sinnvoll sein, mehrere Abstiegshilfen an einem Standort zu installieren.

Fehlendes Wissen über die Populationsentwicklung, Verbreitungsmechanismen und das Verhalten abwandernder Fische schränkt die Entwicklung funktionsfähiger und effektiver Abstiegsvorrichtungen ein. Dies gilt vor allem für die kommerziell unbedeutenden Fischarten, selbst wenn sie innerhalb der Nahrungskette kommerziell wichtiger Arten sowie fischfressender Vögel von Bedeutung sind (Breitenstein & Kirchhofer 2000). Für eine Vielzahl von Arten fehlt somit noch Grundlagenwissen. Solches Grundlagenwissen beinhaltet Kenntnisse bezüglich des Entwicklungszyklus, der Habitatansprüche und Wanderverhalten, der Schwimmleistung, der Nutzung verschiedener Schwimmhorizonte sowie Schwarmverhalten. Aus dem Entwicklungszyklus lassen sich beispielsweise Informationen zur Grösse der wandernden Individuen sowie die Wanderzeiträume ableiten (Kynard 1993). Wichtig ist ausserdem das Verständnis von Reaktionsweisen gegenüber unterschiedlichen Stimuli. Wie wirken sich Geschwindigkeitsgradienten, Lichtverhältnisse und in Bezug auf Schwarmverhalten auch unterschiedliche Dimensionierungen auf die Funktionsfähigkeit von Leitstrukturen und Bypässen aus? Und wie beeinflussen sich diese Faktoren gegenseitig?

Zur Klärung dieser Fragestellungen eignet sich die Anwendung der Ethohydraulik. Sie ist eine Transdisziplin, welche die Ethologie (griech.: vergleichende Verhaltensforschung) und die Hydraulik (griech.: Lehre vom Strömungsverhalten von Flüssigkeiten) verbindet. Die dabei durchgeführten Verhaltensbeobachtungen im Strömungskanal ermöglichen, Fischverhalten unter reproduzierbaren Laborbedingungen, gleichzeitig aber auch unter natürlichen Randbedingungen zu untersuchen, so dass die Tiere ein auf natürliche Verhältnisse übertragbares Verhalten zeigen. Dabei lassen sich Reaktionen gegenüber ganz spezifischen hydraulischen Reizen erforschen und kausale Reiz-Reaktions-Muster bestimmen. Ausserdem erlauben sie die Ableitung von Bemessungsgrundlagen für die Planung und den Bau funktionsfähiger Anlagen (Adam & Lehmann 2011). In diesem Zusammenhang führte die Eawag zusammen mit der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW),

dem Verband der Aare-Rheinwerke (VAR), der Swisselectric Research, dem Bundesamt für Energie (BFE) sowie dem Bundesamt für Umwelt (BAFU) ethohydraulische Modellversuche durch, um das Verhalten einheimischer Fischarten an Fischschutzvorrichtungen zu untersuchen. Bei den untersuchten Schutzvorrichtungen handelt es sich um rechenartige, mechanische Verhaltensbarrieren, sogenannte Louver und Bar Racks, deren Eignung zur Ableitung von Fischen aus dem potentiellen Gefahrenbereich am Turbineneinlauf von Flusskraftwerken festgestellt werden sollte.

1.1 Projekt Fischabstieg: Veranlassung und Zielsetzung

Um dringend notwendiges Wissen über funktionsfähige und effektive Abwanderhilfen, auch bei grösseren Wasserkraftwerken, und das Verhalten abwandernder heimischer Fischarten zu erhalten und um Kraftwerksbetreibern fundierte Ratschläge geben zu können, wurde dieses Projekt ins Leben gerufen. In diesem Gemeinschaftsprojekt ist an der VAW (ETH Höggerberg) ein Strömungskanal gebaut worden, in dem ethohydraulische Versuche durchgeführt und wichtige, grundlegende Daten gesammelt werden können.

Louver und Bar Racks werden vor allem im nordamerikanischen Raum eingesetzt. Forschungsergebnisse liegen für die dort wichtigsten Zielfischarten Lachs, Forelle, Stör und Maifisch vor. Es kann nicht von einer Übertragbarkeit dieser Dimensionierungsgrundlagen auf die Bedürfnisse unserer heimischen potamodromen und katadromen Fischarten ausgegangen werden. Zielarten der Untersuchungen waren daher Barben, Schneider, Bachforellen, Äschen und Aale.

Im Rahmen dieses Projektes wurden verschiedene Konfigurationen der Verhaltensbarrieren in Bezug auf Ihre Effektivität, Fische stromabwärts in einen Bypass zu leiten, untersucht. Die untersuchten, schräg im Kanalquerschnitt angeordneten Strukturen waren bezüglich der Parameter Einbauwinkel, Stababstand, Stabausrichtung variabel. Um die Leitwirkung zu bestimmen, wurde das Fischverhalten gegenüber den unterschiedlichen Konfigurationen bei definierten Fliessgeschwindigkeiten analysiert.

Die Ergebnisse sollen dazu beitragen, eine bestmögliche Konfiguration der getesteten Leiteinrichtungen auf die untersuchten Fischarten zu bestimmen und Abwanderhilfen auch bei grösseren Wasserkraftwerken besser auf die Bedürfnisse der einheimischen Fischarten auszurichten.

1.2 Grundlagen – technischer Teil

1.2.1 Louver und Bar Racks

Louver sind eine Sonderform schräg angeordneter Verhaltensbarrieren, sie sind durch die orthogonale Ausrichtung der Rechenstäbe zur Anströmung charakterisiert. Bar Racks sind Leitrechen mit orthogonaler Stellung der Rechenstäbe zur Rechenachse und beliebigem Rechenwinkel, der Stabwinkel zur Hauptströmung ändert sich mit den Rechenwinkeln. Durch die Ausrichtung der Rechenstäbe verursachen diese Barrieretypen einen hohen Fliesswiderstand und eine starke Veränderung des Strömungsbildes, Louver in stärkerem Masse als Bar Racks.

Das Funktionsprinzip dieser Barrieretypen basiert nicht auf einer physischen Barrierewirkung, sondern auf Vermeidungsreaktionen von Fischen, die durch die veränderten hydraulischen Bedingungen an der Barriere ausgelöst werden. Trotz grosser Stabweiten, die physisch passierbar sind, können somit beachtliche Leitwirkungen erzielt werden (Ebel 2013).

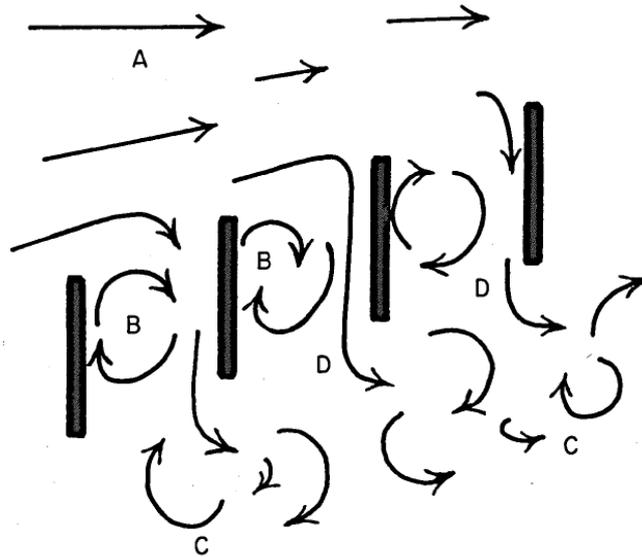


Abbildung 1: Strömungsverhältnisse an einem Louver.

A stellt die zum Bypass gerichtete Strömungskomponente dar, B die Wirbel hinter jedem Stab, C die Turbulenzen hinter dem Louver und D den Strömungsanteil, der direkt zwischen den Stäben passiert (Bainbridge 1975).

Die Anströmgeschwindigkeit ist die querprofilgemittelte Fließgeschwindigkeit oberhalb der Barriere (Ebel 2013):

$$v_{Anström} = \frac{Q}{A}$$

$v_{Anström}$ = Anströmgeschwindigkeit [m/s]

Q = Durchfluss [m^3/s]

A = Durchströmte Fläche des Querprofils [m^2]

Die Normalgeschwindigkeit ist die Fließgeschwindigkeit der senkrecht auf die Barriere auftreffenden Strömungskomponenten. Sie ist abhängig von der Anströmgeschwindigkeit und dem Winkel, der durch Anströmvektor und Barriere eingeschlossen wird.

Sie berechnet sich wie folgt (nach Ebel 2013, modifiziert):

$$v_{Normal} = \sin \alpha \times v_{Anström}$$

v_{Normal} = Normalgeschwindigkeit [m/s]

$v_{Anström}$ = Anströmgeschwindigkeit [m/s]

α = horizontaler Winkel zwischen Anströmvektor und Barriere [°]

Die Fließgeschwindigkeit in der durchströmten Fläche der Barriere hängt vom Verbauungsgrad und der Normalgeschwindigkeit ab. Sie berechnet sich über (Ebel 2013):

$$v_{Barriere} = \frac{v_{Normal}}{1 - P}$$

v_{Barriere} = Fliessgeschwindigkeit in der durchströmten Fläche der Barriere [m/s]

v_{Normal} = Normalgeschwindigkeit [m/s]

P = Verbauungsgrad der Barriere [-] = verbaute Fläche der Barriere [m²]/ Gesamtfläche der Barriere [m²]

Die Tangentialgeschwindigkeit ist die Fliessgeschwindigkeit der parallel zur Barriere ausgebildeten Strömungskomponente. Auch sie ist abhängig von der Anströmgeschwindigkeit und dem Winkel, der durch Anströmvektor und Barriere eingeschlossen wird, und berechnet sich wie folgt (Ebel 2013):

$$v_{\text{Tangential}} = \cos \alpha \times v_{\text{Anström}} = \cos \theta \times v_{\text{Anström}}$$

$v_{\text{Tangential}}$ = Tangentialgeschwindigkeit [m/s]

$v_{\text{Anström}}$ = Anströmgeschwindigkeit [m/s]

α = vertikaler Winkel zwischen Anströmvektor und Barriere [°]

θ = horizontaler Winkel zwischen Anströmvektor und Barriere [°]

Die Normalgeschwindigkeit entspricht der Schwimgeschwindigkeit, die ein Fisch erreichen muss, um die Anströmgeschwindigkeit zu überwinden und einen konstanten Abstand zum Louver einhalten zu können, während er sich entlang des tangentialen Strömungsanteils bewegt (Bates & Vinsonhaler 1957).

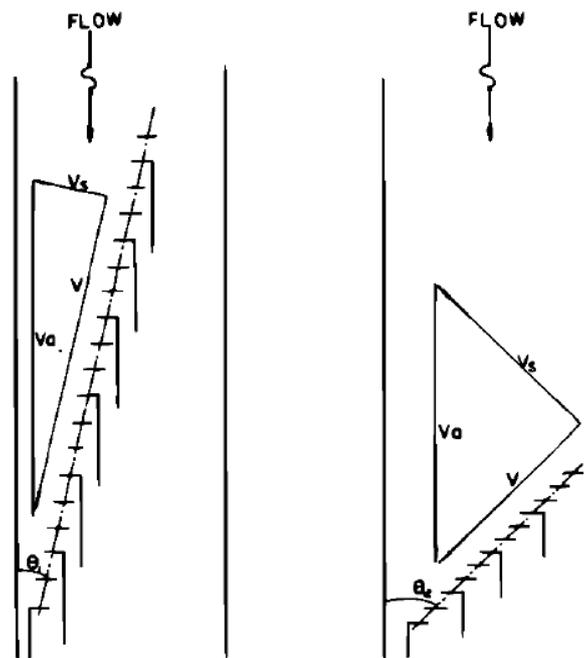


Abbildung 2: Vektordiagramm.

Zeigt die Grössenordnung für die Schwimmleistung, die ein Fisch erbringen muss, um sich entlang des Louvers fortzubewegen; v_a = Anströmgeschwindigkeit, v_s = Normalgeschwindigkeit, v = Tangentialgeschwindigkeit, θ = Einbauwinkel des Louvers (Bates & Vinsonhaler 1957).

Für unterschiedliche Einbauwinkel ergeben sich in Abhängigkeit zur Anströmgeschwindigkeit unterschiedliche Werte für die Normalkomponente:

Tabelle 1: Werte für die Normalkomponente bei diversen Anströmgeschwindigkeiten.

v_a [m/s]	v_s für $\theta = 11,5^\circ$ [m/s]	v_s für $\theta = 45^\circ$ [m/s]
1,5	0,3	1,06
1,2	0,24	0,85
0,9	0,18	0,64
0,6	0,12	0,43
0,3	0,06	0,21

Welche Louver-Länge Fische einer bestimmten Grösse zurücklegen können, hängt somit von der Schwimmggeschwindigkeit ab, die sie erreichen müssen, und davon, wie lange sie diese Schwimmggeschwindigkeit aufrechterhalten können (Ebel 2013).

Die Anströmung des Louvers sollte so gleichförmig und turbulenzfrei wie nur möglich erfolgen, damit die Fische bei Annäherung an den Louver ihre Orientierung behalten und die unterschiedlichen Strömungskomponenten wahrnehmen können (Bates & Vinsonhaler 1957).

Die Position eines Fisches, während er sich entlang eines Louvers bewegt, ist abhängig von der Fischgrösse, dem Einbauwinkel des Louvers sowie der Anströmgeschwindigkeit. Bei Fliessgeschwindigkeiten, die nicht die maximale Schwimtleistung des Fisches erfordern, richtet sich der Fisch normalerweise mit dem Schwanz voran parallel zur Strömung aus und vollführt momentane laterale Bewegungen vom Louver weg aus. Überschreitet die Fliessgeschwindigkeit die Schwimtleistung des Fisches, richtet er sich in einem Winkel bis zu 90° zum Louver aus. Der Winkel der Ausrichtung hängt von der Fliessgeschwindigkeit sowie dem Einbauwinkel des Louvers ab (Bates & Vinsonhaler 1957).

Ein grösserer Teil der Strömung fliesst durch das unterstromige Ende eines Louvers. Daraus folgt, dass die Wahrscheinlichkeit für einen Fisch, den Louver zu passieren, mit zurückgelegtem Weg entlang des Louvers ansteigt. Es erscheint sinnvoll, den Stababstand zum Bypass hin graduell zu reduzieren. Dies würde auch zu Wassereinsparungen beim Bypassbetrieb führen, da weniger Beschleunigung benötigt wird (Ducharme 1972).

Louver stellen Verbauungen dar und verursachen Druckhöhenverluste. Strukturmaterial, Geschwemmsel und Treibgut tragen zusätzlich zu Höhenverlusten bei. Um diese Verluste zu reduzieren können entweder die Stababstände vergrössert werden, oder die Stabausrichtung zu einem Winkel $< 90^\circ$ verändert werden. Bates & Vinsonhaler (1957) testeten unterschiedliche Louver-Konfigurationen, unter anderem auch eine Stabausrichtung von 70° , die keine Auswirkung auf die Leiteffizienz zeigte.

Durch die 90° Ausrichtung der Rechenstäbe wird auch die Strömung entsprechend umgelenkt. Strömunglenkende Elemente hinter dem Louver korrigieren diese Umlenkung und führen zu einer gleichförmigeren Strömungsbildung. Diese Elemente sollen idealerweise die gleiche Dicke und Höhe wie die Rechenstäbe aufweisen (Bates & Vinsonhaler 1957).

Strömunglenker vor dem Louver erhalten die Gleichförmigkeit der Anströmung. Ohne den Einsatz von Strömunglenkern entsteht beim Einbau von Louvern ein Rückstau, der sich ins Oberwasser ausbreitet und dazu führt, dass sich die Fliessgeschwindigkeit vom ober- zum unterstromigen Ende des Louvers fast um das 2,5 Fache erhöht. Durch Strömunglenker wird der Rückstau oberwasserseitig gleichmässig verteilt (Bates & Vinsonhaler 1957).

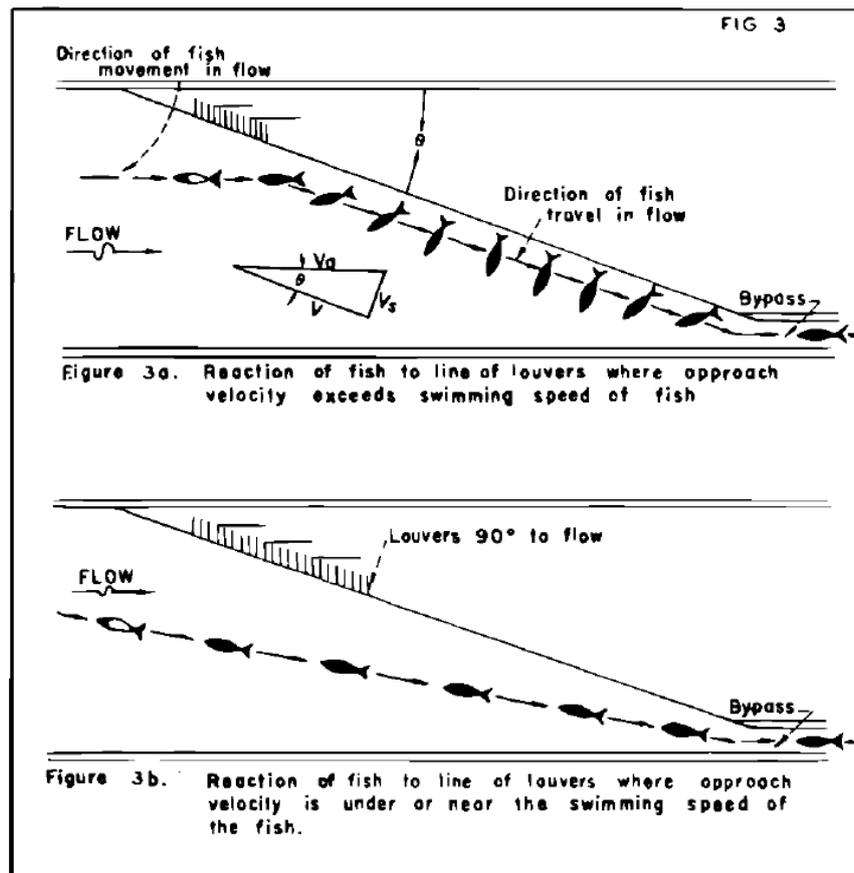


Abbildung 3: Fischverhalten vor einem Louver (Bates & Vinsonhaler 1957).

Eine weitergehende Analyse der Strömungsverhältnisse, der Hydraulik und Recherchen zu dem Hintergrund von Fischleitreechen wurde von Kriewitz (2015) durchgeführt.

1.2.2 Bypass

Bypässe sind Gerinne, die abwandernden Fischen eine gefahrlose Umgehung der Turbinen ermöglichen sollen. Der Funktionsfähigkeit des Bypasses kommt eine ebenso hohe Bedeutung zu, wie der der Leiteinrichtung. Ungeeignete hydraulische Verhältnisse am Bypasseinlauf können Fluchtreaktionen auslösen und die Abwanderung erschweren.

Zwar stellen beispielsweise auch über- oder unterströmte Stauanlagen, Fischaufstiegsanlagen, Schleusen, oder überströmte Wasserkraftanlagen eine Verbindung zwischen Ober- und Unterwasser her, und könnten somit als Abwanderkorridore genutzt werden, doch sind diese in der Regel schlecht auffindbar.

Bypässe lassen sich bezüglich der Querprofilgeometrie, der vertikalen und horizontalen Positionierung des Eintrittsprofils, sowie der vertikalen Positionierung des Austrittsprofils systematisieren.

Rohrartige Querprofile sind verlegungsanfällig, umso mehr, je kleiner der Rohrdurchmesser und eventuelle Krümmungsradien sind. Oberflächen- und Sohlbypässe ermöglichen das Einschwimmen nur auf einem Teil der Gesamthöhe der Wassersäule. Der Deep Channel Bypass hingegen stellt eine Anbindung über die gesamte Höhe der Wassersäule dar.

Ein Eintrittsprofil deckt in der Regel nur einen geringen Teil der Kanalbreite ab und ist im Zuströmkanal meist seitlich angeordnet. Leitstrukturen wie Louver erhöhen die Auffindbarkeit drastisch.

Entscheidend für die verhaltensbiologische Akzeptanz ist die Schaffung geeigneter hydraulischer Verhältnisse am Eintrittsprofil.

Die Auffindbarkeit und die verhaltensbiologische Akzeptanz von Bypässen sind abhängig von

- der Positionierung des Eintrittsprofils
- den hydraulischen Verhältnissen am Eintrittsprofil
- der Dimensionierung des Eintrittsprofils
- der Beaufschlagung des Eintrittsprofils

Tabelle 2: Systematisierung von Bypässen (Ebel 2013).

Kriterium	Ausprägung
Querprofilgeometrie	<ul style="list-style-type: none"> • rohrartig • rinnen- bzw. schachtartig
vertikale Positionierung des Eintrittsprofils	<ul style="list-style-type: none"> • Oberflächenbypass • Sohlbypass • Deep Channel Bypass (Eintrittsprofil erfasst die gesamte Höhe der Wassersäule im Oberwasser)
horizontale Positionierung des Eintrittsprofils	<ul style="list-style-type: none"> • Laterales Eintrittsprofil • mehrere über die Gesamtbreite des Zuströmkanals verteilte Eintrittsprofile (Collection Gallery) • Eintrittsprofil erstreckt sich über die Gesamtbreite des Zuströmkanals (z.B. Spülrinne)
vertikale Positionierung des Austrittsprofils	<ul style="list-style-type: none"> • unter Unterwasserspiegel • über Unterwasserspiegel • Sonderfall: Einbindung in andere Systeme (z.B. Fischaufstiegsanlage, Zwischenbecken)

Positionierung

Die von Leitstrukturen induzierten Verhaltensänderungen sind an charakteristische Bewegungsmuster gekoppelt. Diese beschränken sich auf einen begrenzten Bereich weniger Dezimeter vor der Barriere, weshalb das Eintrittsprofil unmittelbar an der Barriere angeordnet sein sollte.

Vertikale Positionierung

Für eine bestmögliche Auffindbarkeit sollte das Eintrittsprofil im Schwimmhorizont der abwandernden Fische liegen. Die bei der Abwanderung bevorzugten Schwimmhorizonte sind bisher nur für wenige Arten bekannt. Salmonidensmolts wandern vor allem oberflächennah ab, Neunaugen, Störe und Aale sohlnah. Bei Barben, Brassen, Gründlinge, Quappe, Wels, Groppe

und Schmerle wird eine sohnnahe Abwanderung vermutet. Ukelei und Rotaugen scheinen während der Abwanderung indifferent bezüglich des Höhenhorizontes (Ebel 2013).

Ist das Eintrittsprofil eines Bypasses nicht im Schwimmhorizont eines Fisches gelegen, muss er vertikale Suchbewegungen durchführen oder durch eine Leitstruktur zum Profil geführt werden. Suchbewegungen können nur ausgeführt werden, wenn die kritische Schwimmgeschwindigkeit des Fisches nicht überschritten wird. Suchbewegungen erhöhen die Aufenthaltszeit vor der Barriere. Bei physisch permeablen Barrieren oder ungeeigneten Anströmgeschwindigkeiten steigt bei zunehmenden Aufenthaltszeiten auch der Anteil der Tiere, die die Barriere passieren oder angepresst werden.

Horizontale Positionierung

Der Einfluss der horizontalen Positionierung ist von der Ausrichtung der Barriere abhängig. Barrieren mit horizontaler Schräganströmung leiten die Tiere ans unterstromige Ende. Idealerweise ist dort ein Bypass angeordnet. An konventionellen Rechen ohne Leitwirkung kann die Positionierung entweder lateral erfolgen, oder über die Kanalbreite verteilt. Längere Barrieren, vor allem solche, ohne Leitwirkung und mit ungünstigen geometrischen und hydraulischen Eigenschaften, sollten mit mehreren Eintrittsprofilen versehen werden. Odeh und Orvis (1998) empfehlen einen Bypassabstand von 11 bis 15 m. Ist eine Barriere Trennpfeiler in Rechenfelder unterteilt, ist zu beachten, dass horizontale Suchbewegungen durch die Pfeiler unterbrochen werden und daher mindestens ein Bypass pro Rechenfeld vorgesehen werden muss (Ebel 2013, Pavlov 1989, Larinier & Travade 2002, Lecour & Rathcke 2006).

Hydraulische Faktoren

Die hydraulischen Gegebenheiten am Eintrittsprofil sind entscheidend für die verhaltensbiologische Akzeptanz, vor allem bei physisch durchlässigen Barrieren. Die Strömung im Eintrittsprofil sollte möglichst turbulenzarm sein, die Beschleunigung gleichförmig und die Geschwindigkeitsgradienten gering, so dass keine Fluchtreaktion ausgelöst wird (Ebel 2013).

Salmoniden zeigen ein Meideverhalten gegenüber hohen Geschwindigkeitsgradienten, ungleichförmigen Beschleunigungen und intensiven Turbulenzen (Ebel 2013). Verzögerungen während der Abwanderung wegen Meidereaktionen gegenüber hydraulischen Verhältnissen am Bypasseinlauf, wie z.B. plötzliche Beschleunigungen (Haro et al. 1998) können zu hohen Verlusten durch Prädation (Larinier & Travade 2002), Energieverlusten, und einer erhöhten Wahrscheinlichkeit führen, einen alternativen Abwanderweg, z.B. über die Turbinen, zu wählen (Castro-Santos & Haro 2003).

Die Fließgeschwindigkeit im Eintrittsprofil wird als absolute oder relative Grösse angegeben. Die relative Geschwindigkeit entspricht dem Verhältnis zwischen absoluter Geschwindigkeit im Eintrittsprofil und der Anströmgeschwindigkeit.

$$v_{Bypass,rel} = \frac{v_{Bypass}}{v_{Anström}}$$

$v_{Bypass,rel}$ = relative Fließgeschwindigkeit im Bypasseintritt [-]

v_{Bypass} = absolute Fließgeschwindigkeit im Bypasseintritt [m/s]

$v_{Anström}$ = Anströmgeschwindigkeit [m/s]

Für die verhaltensbiologische Akzeptanz von Eintrittsprofilen gilt für juvenile Salmoniden, dass die Eintrittsgeschwindigkeit die Anströmgeschwindigkeit nicht unterschreiten darf. Fällt die Geschwindigkeit vor oder im Bypass unter die Anströmgeschwindigkeit, schwimmen die Tiere zurück ins Oberwasser (Bates & Vinsonhaler 1957).

In der Literatur werden relative Eintrittsgeschwindigkeiten von 1,2 bis 2 empfohlen. (Ebel 2013, Bates & Vinsonhaler 1957, Taft & Mussali 1978, Rainey 1985, Haro et al. 1998, O’Keefee & Turnpenny 2005). Höhere Werte führen nicht zwingend zu einer verringerten Akzeptanz (Ducharme 1972).

Ist die Eintrittsgeschwindigkeit zu hoch, können Meidereaktionen ausgelöst werden. Gemäss Haro et al. (1998) zeigen 20 cm grosse Lachssmolts ab einer absoluten Eintrittsgeschwindigkeit von 2,2 m/s, was im Bereich ihrer Sprintgeschwindigkeit liegt, Meideverhalten. Mindestwerte der Eintrittsgeschwindigkeit sind bisher für keine Art untersucht. Es ist davon auszugehen, dass die rheotaktische Geschwindigkeit nicht unterschritten werden sollte.

Zum Schutz Atlantischer Lachse wurde in einem Zuleitungskanal eines Kraftwerks am East River, Sheet Harbour, Neuschottland, eine Louvervorrichtung installiert. Der Bypass hatte eine Breite von 0,45 m und reichte in eine Tiefe von 1,83 m. Es wurden Experimente mit zweijährigen Smolts aus der Aufzucht (15,2 bis 17,7 cm Körperlänge) durchgeführt.

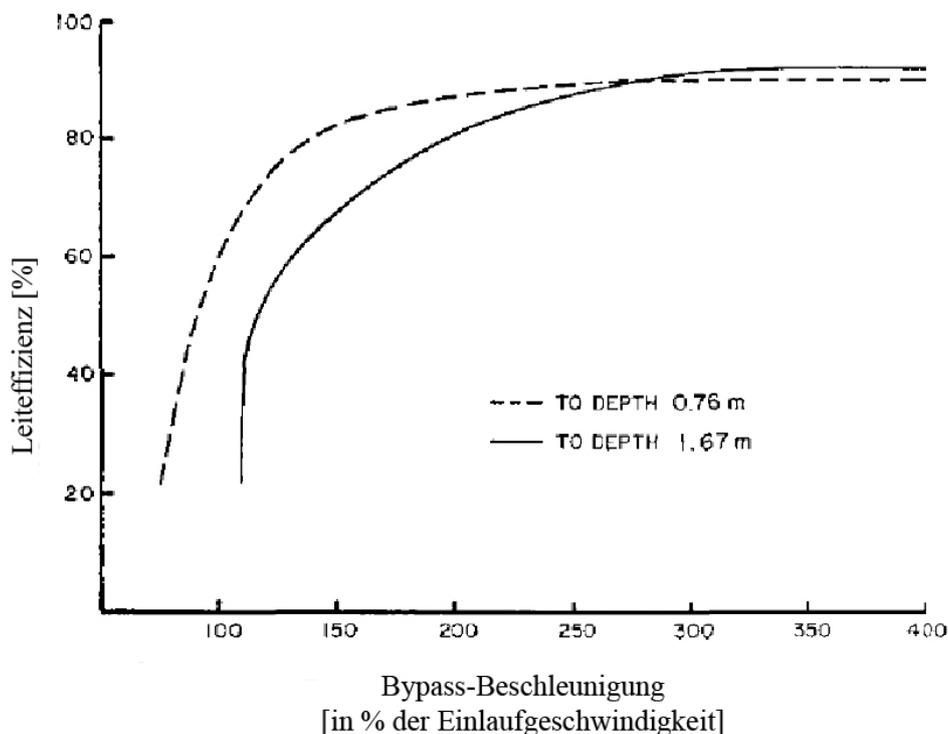


Abbildung 4: Zusammenhang Leitwirkung, Anström- und Bypassgeschwindigkeit. Bypass Beschleunigung und Louver Leitwirkung, Ruth Falls Louver, 1968 (nach Ducharme 1972).

Für diese Dimensionierung ergab sich ein minimales Verhältnis von Anströmgeschwindigkeit zu Bypassgeschwindigkeit von 1,0 : 2,5 um 80% Leiteffizienz zu erzielen. Ein Grossteil der Fische schwamm jedoch innerhalb der oberen 0,76 m der Wassersäule in den Bypass ein. Auf diese Tiefe bezogenen stellt ein minimales Verhältnis von 1,0 : 1,5 eine Voraussetzung für hohe Leiteffizienzen dar (Ducharme 1972). Ruggles & Ryan (1964) sowie Bates & Vinsonhaler (1957) geben zur Leitung juveniler Rot-, Silber- und Königslachse ein minimales Verhältnis von 1,0 : 1,4 an. Abbildung zeigt ausserdem, dass die Leiteffizienz auch bei höheren Verhältnissen nicht eingeschränkt ist. Sollte eine Lenkung der Anströmgeschwindigkeit nicht

möglich sein, muss das Bypass-System derart konzipiert sein, dass eine minimale Bypassbeschleunigung im Rahmen der Grenzwerte der Anströmgeschwindigkeit gewährleistet ist.

Die Fließgeschwindigkeitszunahme sollte zwar im Bypasseinlauf keine Fluchtreaktion auslösen, im Bypass selbst sollte sie jedoch soweit ansteigen, dass ein Verlassen des Bypasses nicht mehr möglich ist (Jamieson et al. 2007).

Geometrische Faktoren

Die Anforderungen an die relativen, auf die Körpergrösse bezogenen Bypassabmessungen steigen mit abnehmender Körpergrösse. Womöglich ist dies auf eine stärker ausgeprägte Tendenz zur Schwarmbildung kleiner Fische zurückzuführen. Der Schwarm bietet neben erhöhtem Schutz vor Fressfeinden auch hydrodynamische Vorteile (Landa 1998). Die Bypassakzeptanz wird vom Schwarmverband bestimmt, der eine Erhaltung der Schwarmassoziation anstrebt.

Untersuchungen zur Anforderung an die Profilhöhe in Bezug auf die verhaltensbiologische Akzeptanz, liegen bisher nur für Salmoniden vor. Larinier & Travade (2002) geben Mindesthöhen von 0,4 bis 0,5 m für europäische Salmonidensmolts an, Blasel (2011) empfiehlt 0,3 bis 0,4 m.

Bei sehr langen Louvrorrichtungen (> 100m) sollten mehrere Bypässe angeordnet werden (Turnpenny & O’Keeffe 2005). Zur Sicherstellung der Funktionsfähigkeit sollte er möglichst verklausungs- und verlegungssicher angeordnet oder leicht zu reinigen sein (DWA 2005; National Marine Fisheries Service 2008). V-förmige Rechen verkürzen die Entfernung, die ein Fisch entlang des Rechens zurücklegen muss, bis er den Bypass erreicht, was einen geringeren Energieaufwand bedeutet und die Leitwirkung potentiell erhöht (Haefner & Bowen 2002).

Die Dotierwassermenge sollte zwischen 2 und 10% der Ausbauwassermenge betragen (VAW 2012). Oberflächennahe Bypässe sollten natürlich beleuchtet sein. Von oberflächennah abwandernden Salmoniden ist bekannt, dass sie den Einstieg in dunkle Öffnungen meiden (Jamieson et al. 2007), ebenso wie Cypriniden (Mallen-Cooper 1997).

Bypasskanäle und –Leitungen sollten kein Schädigungspotential für die abwandernden Fische darstellen. Sie sollten ohne starke Krümmungen konzipiert sein, mit Kurvenradien > 3 m oder grösser als dem 5-fachen Rohrdurchmesser (National Marine Fisheries Service 2008). Weiterhin sollten Wechselsprünge, freier Fall der Wassersäule, hohe Scher- und Druckkräfte sowie Turbulenz-Intensitäten vermieden werden (Clark & Kehler 2011). Um Verletzungen von Fischen auszuschliessen, darf die Fließgeschwindigkeit 12 m/s nicht überschreiten (DWA 2005). Um Verzögerungen während der Abwanderung zu vermeiden, sollte die Fließgeschwindigkeit nicht abnehmen. Gleichzeitig dürfen keine zu hohen Beschleunigungen auftreten. Die Einleitung des Bypassabflusses sollte auf die freie Wasseroberfläche erfolgen, um schädliche Scherkräfte im Wasserkörper auszuschliessen (Taft 1986). Die Fallhöhe in das Unterwasser sollte zwischen 1,8 und 2,4 m betragen, die Aufprallgeschwindigkeit sollte max. 13 m/s betragen (DWA 2005).

Die Arbeit von Kriewitz (2015) liefert weitergehende Analysen zu Bypässen und Fischleiteinrichtungen.

1.3 Grundlagen – fischökologischer Teil

1.3.1 Relevante fischökologische Verhaltensweisen

Strömungswahrnehmung

Grundvoraussetzung für die Reaktion auf Reize ist die Reizwahrnehmung mit Hilfe verschiedener Sinneszellen. Fische sind zur optischen, gustatorischen, olfaktorischen, akustischen sowie vestibulären (Gleichgewicht) Sinneswahrnehmung fähig. Strömungswahrnehmung jedoch ist die entscheidende Grundlage für Fischverhalten, auf hydraulische Gegebenheiten reagieren Fische viel stärker und differenzierter als auf akustische oder optische Reize. (Adam & Lehmann 2011). Strömungswahrnehmung erfolgt durch das sogenannte Seitenlinienorgan, ein hoch entwickeltes Sinnessystem, dessen Rezeptoren aus Gruppen sensibler Zellen, den Neuromasten, bestehen.

Prinzipiell sind solche Neuromasten auf der gesamten Kopf- und Körperoberfläche (Epidermalneuromasten) sowie in unmittelbar unter der Haut verlaufenden, flüssigkeitsgefüllten Kanälen (Kanalneuromasten) angeordnet (Adam & Lehmann 2011). Neuromasten enthalten mehrere tausend Haarsinneszellen. Diese Haarsinneszellen besitzen ein randständiges langes Sinneshärchen, das Kinozilium, und zahlreiche Stereovilli, die zum Kinozilium hin gleichmässig länger werden. Kinozilium und Stereovilli ragen in die sogenannte Cupula hinein, eine umhüllende Struktur aus Gallerte. Die Cupula steht in Kontakt mit dem Umgebungswasser oder mit der Kanalflüssigkeit.

Mit Hilfe des Seitenlinienorgans lassen sich Druckwellen vom Umgebungswasser auf das Innere der mit Gallerte gefüllten Kanäle übertragen, wo sie Sinneshärchen in Bewegung versetzen, die ab einer Auslenkungen von 1 bis 2 Nanometer reagieren. Die über den gesamten Körper verteilten Rezeptoren ermöglichen eine sehr differenzierte Wahrnehmung von Wasserbewegungen und Druckgradienten. Die Reflexion von Druckwellen, die durch eigene Schwimmbewegungen ausgelöst werden, ermöglicht beispielsweise die Wahrnehmung von Hindernissen. Auch die durch Bewegungen anderer Tiere ausgelösten Druckwellen werden wahrgenommen (Adam & Lehmann 2011).

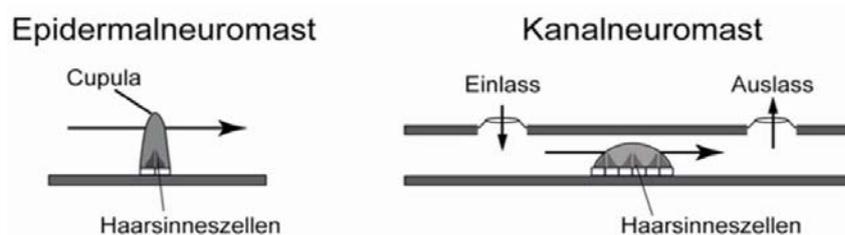


Abbildung 5: Seitenlinienorgan.

Dieses steht über kleine Poren mit dem Umgebungswasser in Verbindung. Bei den meisten Fischen verläuft es beidseitig über die gesamte Flanke. Entlang der Seitenlinie wird jede Schuppe von einer Pore durchbrochen (Adam & Lehmann 2011).

Schwimmverhalten

Ein Grossteil des Verständnisses von Fischbewegungen und Schwimmverhalten basiert auf Untersuchungen in gleichförmigen Strömungen oder gar stehendem Wasser. Unter natürlichen Gegebenheiten ist die Mehrzahl der Fische regelmässig wechselhaften Strömungsverhältnissen ausgesetzt (Liao 2007).

Biotische sowie abiotische Faktoren können eine ansonsten gleichförmige Strömung derart verändern, dass sie die Schwimmbewegungen eines Fisches stören kann.

Strömungen mit chaotischen und grossen Schwankungen der Fliessgeschwindigkeit können Fische abschrecken, Strömungen mit gewissermassen vorhersehbaren Schwankungen können wiederum anziehend wirken (Enders et al. 2003).

Entscheidend für das Schwimmverhalten und mögliche Verhaltensänderungen ist ausserdem die Art und Weise, wie ein Fisch die Strömung wahrnimmt. Fischverhalten in wechselnden Strömungen ändert sich, sowohl bei Blockierung des Seitenlinienorgans, als auch der Sehfähigkeit. Dies bedeutet, dass das Schwimmverhalten über die Reizwahrnehmung verschiedener Sinnesorgane beeinflusst wird.

Schwimtleistung

Grundlage für sowohl die Schwimmgeschwindigkeit als auch für die zurückgelegte Distanz ist der durch Muskelkraft erzeugte Vortrieb. Durch laterale Auslenkungen seines Körpers erzeugt ein Fisch Druck- und Geschwindigkeitsgradienten, woraus der Vortrieb resultiert. Entlang der durchschwommenen Strecke entsteht dabei eine Abfolge von Wirbeln gegenläufiger Strömungsrichtung.

Die meisten Arten schwimmen mit dem sogenannten subcarangiformen Schwimmstil, bei dem sich die lateralen Körperauslenkungen auf den hinteren Rumpfbereich konzentrieren. Lediglich Aale, Neunaugen und wenige andere Gruppen bewegen sich über undulierende Bewegungen des gesamten Körpers fort. Die Geschwindigkeit, mit der sich ein Fisch fortbewegt, hängt von der Frequenz und Amplitude der lateralen Auslenkung sowie der Geometrie der Körperteile ab (Ebel 2013). Die Schwanzschlagfrequenz wird durch die Zeit limitiert, die ein Fisch benötigt, um zwei aufeinanderfolgende Muskelkontraktionen durchzuführen. Die sogenannte Muskelrefraktärzeit ist zum einen temperaturabhängig, zum anderen steigt sie mit der Körperlänge, so dass mit zunehmender Körperlänge die erreichbare Schlagfrequenz abnimmt. Weiterhin wirken sich Faktoren wie der Oberflächenwiderstand zwischen Fisch und Wasserkörper, der proportional zum Quadrat der Schwimmgeschwindigkeit ansteigt (Videler 1993), Wassertemperatur sowie Sauerstoffgehalt, die Leistungsfähigkeit der jeweiligen Art, die sich in der Körperlänge als Ausdruck vorhandener Muskelmasse widerspiegelt, auf die Schwimmgeschwindigkeit aus (Ebel 2013, Adam & Lehmann 2011). Wegen der Abhängigkeit von der Körperlänge wird die Schwimmgeschwindigkeit oft auf die Körperlänge bezogen als relativer Wert angegeben [Körperlänge/s].

Physiologisch lassen sich drei Leistungsmodi unterscheiden (Pavlov 1989):

- Sprintgeschwindigkeit
- gesteigerte Schwimmgeschwindigkeit
- Dauerschwimmgeschwindigkeit

Tabelle 3: Die Leistungsmodi im Überblick (Ebel 2013).

Schwimmlevel	Schwimmdauer	Stoffwechseltyp	Beteiligte Muskulatur
Sprintgeschwindigkeit	≤ 20 s	anaerob	weisse
Gesteigerte Schwimmgeschwindigkeit	20 s – 200 min	aerob und anaerob	rote und weisse
Dauerschwimmgeschwindigkeit	≥ 200 min	aerob	rote

Die Sprintgeschwindigkeit gilt als die höchste erreichbare Schwimmggeschwindigkeit und wird nur in Extremsituationen eingesetzt. Der Fisch nutzt hierfür lediglich die anaerob arbeitende weisse Muskulatur. Per Definition entspricht diesem Leistungsmodus eine Schwimmggeschwindigkeit, die nur für maximal 20 s aufrechterhalten werden kann (Beamish 1978). Per Definition gelten Schwimmggeschwindigkeiten, die über 200 min aufrechterhalten werden, als Dauerschwimmggeschwindigkeit. In diesem Leistungsmodus kann ein Fisch über viele Stunden ermüdungsfrei schwimmen, da hierfür nur die aerob arbeitende rote Muskulatur eingesetzt wird. Schwimmggeschwindigkeiten, die nach 20 s bis 200 min zur Ermüdung führen, werden als gesteigerte Schwimmggeschwindigkeit definiert. Hierbei wird sowohl rote als auch weisse Muskulatur eingesetzt.

Die Dauer während der ein Fisch mit der Sprintgeschwindigkeit schwimmen kann sowie die benötigten Ruhephasen sind entscheidende Faktoren, da Ermüdung einen Einfluss auf das Vermögen eines Fisches hat, Hindernissen auszuweichen bzw. Leitstrukturen zu folgen. Um Fluchtgeschwindigkeiten besser erklären zu können, sind auch die vom Fisch erzeugten Schubkräfte zu quantifizieren, vor allem auch für die kleinen Grössenklassen (Haefner & Bowen 2002). Nach Domenici und Blake (1997) ist die aufgewandte Kraft während schneller Meidereaktionen unabhängig von der Grösse. Doch die Dauer, während der die Sprintgeschwindigkeit aufrechterhalten werden kann, nimmt mit der Grösse des Fisches zu.

Die kritische Schwimmggeschwindigkeit (Brett 1964) entspricht der Fliessgeschwindigkeit, der ein Fisch für eine definierte Zeitspanne standhalten kann, ohne verdriftet zu werden. Zeitangaben in der Literatur liegen zwischen 30 s und 60 min. Sie entspricht der oberen Grenze der gesteigerten Schwimmggeschwindigkeit und dient oftmals als Bemessungsgrundlage für Fischleitsysteme (Beamish 1978, Peake 2004, Ebel 2013).

Die Festlegung von Eignungskriterien erfolgte in der Vergangenheit vor allem auf Grundlage der Schwimtleistung von Fischen, ohne Kenntnis der Verhaltensweisen von Fischen gegenüber wechselnden hydraulischen Bedingungen. Schwimmggeschwindigkeiten werden jedoch experimentell ermittelt, unter für den Fisch extrem künstlichen Bedingungen.

Zur Bestimmung der kritischen Schwimmggeschwindigkeit müssen Fische in einem Respirometer für ein festgesetztes Zeitintervall einer Strömung standhalten. Die Fliessgeschwindigkeit wird solange um einen bestimmten Wert erhöht, bis der Fisch es nicht mehr schafft, über die Zeitdauer des festgesetzten Zeitintervalls der Strömung standzuhalten. Die kritische Schwimmggeschwindigkeit ergibt sich dann aus der Summe der Geschwindigkeit, der der Fisch noch für das gesamte Zeitintervall standhalten konnte sowie einem Anteil der Geschwindigkeitserhöhung, proportional zur Zeit, der ein Fisch ihr standhalten konnte, relativ zum gesamten Zeitintervall (Beamish 1978). Diese unter sehr künstlichen Bedingungen ermittelten Ergebnisse stellen nicht unbedingt die physiologische Leistungsgrenze eines Fisches dar, da die Tiere in Schwimmkammern und Respiometern aufgrund eingeschränkter Bewegungsfreiheit nicht ihre volle Leistungsfähigkeit zeigen können (Tudorache et al. 2008). Stattdessen ergeben sich tendenziell zu geringe Schwimmggeschwindigkeiten. Als Grundlage für Fliessgeschwindigkeitskriterien an Fischpässen können sie daher irreführend sein (Peake 2004, Russon 2011, Kemp et al. 2008).

Laborgerinne hingegen ermöglichen das Beobachten natürlicher Bewegungsabläufe, wie z.B. dem Sprinten und Gleiten, sowie Sprinten und Ansaugen bei Neunaugen, unter kontrollierten Bedingungen und liefern realistischere Einschätzungen der Schwimtleistung von Fischen (Russon 2011, Tudorache et al. 2013).

So hat Peake (2004) die Schwimtleistung, die ein Fisch im Respirometer erbringt, mit der Schwimtleistung verglichen, die ein Fisch erreicht, wenn er frei wählbare

Schwimmbewegungen ausführen kann. Für Schwarzbarsche (*Micropterus dolomieu*) bestimmte er im Respirometer kritische Schwimgeschwindigkeiten von 0,65 bis 0,98 m/s. Anschliessend beobachtete er das Schwimmverhalten von Schwarzbarschen in einem 50 m langen Strömungskanal. Ein hoher Anteil der Probanden konnte den gesamten Kanal bis Fliessgeschwindigkeiten von 1,2 m/s durchschwimmen. Dabei fiel ihm auf, dass die Fische ein charakteristisches, ungleichförmiges Schwimmverhalten zeigen, welches aus sprintartigen Beschleunigungen, gefolgt von passiven Gleitphasen, besteht. Dieses ungleichförmige Bewegungsmuster führt zu einer deutlich höheren mittleren Grundgeschwindigkeit.

Russon (2011) untersuchte die Schwimmleistung von Flussneunaugen und Europäischen Aalen. Sie konnten im Strömungskanal bei Fliessgeschwindigkeiten von 1,75 bis 2,12 m/s gegen die Strömung schwimmen.

Schwimmhorizonte

Für die Entwicklung funktionsfähiger Leitvorrichtungen bedarf es auch Kenntnisse über die von den jeweiligen Arten und Altersstadien genutzten Wanderkorridoren, die sich bezüglich vertikaler und horizontaler Präferenzen unterscheiden. Die bei der Abwanderung bevorzugten Schwimmhorizonte sind bisher nur für wenige Arten bekannt.

Salmonidensmolts wandern oberflächennah ab. Somit erzielen Bypässe, die nur die oberen 30 – 50% der Wassersäule abdecken, noch Schutzwirkungen von 80 – 90%. In Ruth Falls (East River, Kanada, Oberwassertiefe 3,6 m) wurden die Nutzungsfrequenzen der Höhenhorizonte eines schachtartigen Bypasses untersucht. 80% der abwandernden Lachssmolts schwammen in einer Tiefe < 1,35 m in den Bypass ein (Ducharme 1972, Ebel 2013).

Neunaugen haben keine Schwimmblase. Daraus folgt ein relativ hohes spezifisches Eigengewicht. Für die pazifische Art *Lampetra tridentata* ist eine sohlnahe Abwanderung beschrieben. Diese senkt möglicherweise auch das Prädationsrisiko herab.

Auch Störe (*Acipenseridae*) gelten als sohlorientiert. Jedoch gibt es kaum Untersuchungen zur Präferenz von Schwimmhorizonten. Vorhandene Ergebnisse dokumentieren Präferenzen für Sohlhöhe bzw. grosse Wassertiefen für Larven und Juvenile (Ebel 2013, Holcik et al. 1989, Pavlov 1989, Kynard & Horgan 2001, Pavlov et al. 2002, Smith & King 2005). Am Holyoke Damm (Connecticut River, USA) nutzten juvenile Störe jedoch häufig auch andere Höhenhorizonte der Wassersäule (Tomichek & Sisk 2006).

Für den Aal deuten zahlreiche Untersuchungen auf eine überwiegend sohlnahe Abwanderung hin. In der Weser (Deutschland) wurden telemetrische Untersuchungen mit abwandernden Blankaalen durchgeführt. Der genutzte Höhenhorizont reichte von der Sohle bis 1 m über die Sohle, auch, auch bei einer Wassertiefe von 6 m (Ebel 2013, Tesch 1994). Lecour & Rathcke (2006) untersuchten die Nutzung eines Oberflächen- sowie Sohlbypasses an der Wasserkraftanlage Dringenauer Mühle an der Emmer (Deutschland). Der Oberflächenbypass wurde wesentlich häufiger als der Sohlbypass genutzt. Die Autoren vermuten, dass sich Aale bei steigenden Fliessgeschwindigkeiten zunehmend von der Gewässersohle lösen und in oberflächennahe Wasserhorizonte aufsuchen. Ähnliches konnten Adam et al. (2009a,b) (Adam & Lehmann 2011) während ethohydraulischer Untersuchungen beobachten, bei denen sich die Schwimmposition von Fischen aller Gilden bei steigenden Fliessgeschwindigkeiten zunehmend in den freien Wasserkörper verlagerte. Dixon (2006) untersuchte die Bewegungsmuster von Aalen vor einem 6 m hohen Louver am Holyoke Damm (Connecticut River, USA). Dabei beobachtete er vertikale Suchbewegungen. Sie umfassten zwar fast die gesamte Höhe der Wassersäule, konzentrierten sich jedoch deutlich auf den sohlnahen Bereich. Tomichek & Sisk (2006) konnten am gleichen Louver Suchbewegungen von Kurznasenstören beobachten.

Die Wanderkorridore potamodromer Arten sind bisher nur unzureichend untersucht. Es ist davon auszugehen, dass Abwanderungen auf allen Höhenhorizonten erfolgen, wobei die Nutzung der verschiedenen Horizonte art- und altersspezifisch ist.

Kenntnisse zu den Präferenzen bezüglich einer horizontalen Differenzierung des Wanderkorridors liegen bisher nur für Salmoniden und Aale vor, die vor allem im Bereich der stärksten Strömung abwandern. Bei gestreckter Linienführung des Gewässers entspricht dies der Gewässermitte, bei gekrümmter Linienführung entspricht dies dem Prallhang. Die Verteilung abdriftender Jungfische resultiert nicht aus Strömungspräferenzen, sondern wird von hydraulischen Effekten bestimmt. Abdriftende Jungfische akkumulieren in den Bereichen hoher Strömungsenergie, so dass die höchste Individuendichte im Stromstrich anzutreffen ist. In Flusskrümmungen kann die prallhangseitige Individuendichte zehn Mal höher sein, als die gleithangseitige. Am Ausgang der Flusskrümmung ist der horizontale Gradient der Individuendichte am stärksten ausgebildet. Das Maximum ist bei gestreckter Linienführung vergleichsweise schwach ausgebildet. Wasserkraftanlagen nutzen in der Regel einen so grossen Teil des Abflusses, dass der Stromstrich in das Bauwerk führt, weshalb hier mit einem hohen Fischanfall zu rechnen ist.

Tabelle 4: Vertikale Differenzierung des Wanderkorridors für einige Arten (Ebel 2013).

Art / Artengruppe	Vertikale Differenzierung des Wanderkorridors		
	Vorwiegend oberflächennah	Vorwiegend sohlnah	Keine deutliche Präferenz / ungenügende Kenntnisse
Salmonidensmolts	+	-	-
Aale	-	+	-
Neunaugen	-	+	-
Störe	-	+	-
Barbe, Brasse, Gründling, Quappe, Wels, Groppe, Schmerle	-	+	-
Plötze, Ukelei	-	-	+

1.3.2 Reaktionen gegenüber Stimuli

Reize können gerichtete Bewegungen auslösen, die als Taxien bezeichnet werden. Bewegt sich ein Fisch dabei auf die Reizquelle zu, handelt es sich um positive Taxis, entfernt er sich von ihr, handelt es sich um negative Taxis. Rheotaxis bezeichnet die Ausrichtung in der Strömung, ausserdem werden aber noch die Phototaxis (Licht), Galvanotaxis (elektrische Felder), Phonotaxis (Schall), Thermotaxis (Temperaturgradient) sowie die Chemotaxis (Konzentrationsgradient) unterschieden.

Strömung

Strömung kann entweder als direkter Reiz wirken, indem der Fisch sie mit seinem Körper wahrnimmt, oder indirekt über visuelle oder taktile Wahrnehmung, die aus der Verlagerung des Fisches im Raum erfolgt (Arnold 1974). Für das Schwimmverhalten und die Orientierung in Strömungen bildet das Seitenlinienorgan die wichtigste Grundlage. Bereits kleinste Gradienten

der Strömungsbedingungen sind wahrnehmbar (Adam & Lehmann 2011). Gerade während Dunkelheit kann das Seitenlinienorgan den Ausfall der visuellen Reizwahrnehmung kompensieren.

Die Grundreaktion eines Fisches auf Strömung ist Rheotaxis. Sie spielt beispielsweise für Fragen bezüglich der Akzeptanz eines Gewässerabschnittes als Wanderkorridor oder Teillebensraum eine wichtige Rolle in ethohydraulischen Versuchen. Positive Rheotaxis wird erst ab einem bestimmten Grenzwert der Fliessgeschwindigkeit ausgelöst, der sowohl von der Art als auch vom Entwicklungsstadium abhängt (Adam & Lehmann 2011).

Die visuelle Strömungswahrnehmung, wurde erstmals von Rádl (1903) beschrieben. Lyon (1904) zeigte in einer Reihe von Experimenten mit Fischen der Gattung *Fundulus*, dass Rheotaxis auch durch visuelle Reize ausgelöst wird. Ein Experiment bestand darin, eine 1,25 m lange, 0,5 m breite und 0,35 m tiefe Box, deren Boden mit Kies ausgelegt und deren zwei Längsseiten undurchlässig waren und mit Tang versehen wurden. Die Vorder- sowie Rückseite bestanden aus durchlässigem Netzmaterial. Diese Box wurde in eine starke Strömung gegeben und befestigt. Die Fische richteten sich positiv rheotaktisch aus. Anschliessend wurde die Box in der Strömung treiben gelassen. Die Fische gaben augenblicklich ihre rheotaktische Ausrichtung auf. Daraus schloss er, dass der visuelle Reizauslöser eine Verdriftung weg von einem stationären Objekt ist.

Arnold (1969) führte ausserdem Experimente mit Schollen (*Pleuronectes platessa*) durch. Die Tiere richteten sich generell gegen die Strömung aus, sowohl bei Dunkelheit als auch während Helligkeit, auch deutlich unterhalb von Fliessgeschwindigkeiten, ab denen anästhesierte Fische der gleichen Länge verdriftet wurden. Versuche mit feinen Jets zeigten, dass diese, wenn sie auf bestimmte Körperstellen gerichtet sind, eine rheotaktische Ausrichtung auslösen. Die stärkste Reaktion wurde mit einem auf den Schwanz gerichteten Jet ausgelöst.

Turbulenzen

In einer laminaren Strömung bewegen sich alle Flüssigkeitsteilchen längs paralleler Stromfäden. Dies ist umso eher der Fall, je höher die Viskosität des Fluids ist, und je langsamer es fliesst. Turbulenzen treten auf, wenn die dimensionslose Reynoldszahl R_e einen kritischen Wert überschreitet.

$$R_e = \frac{\rho \times v \times L}{\eta}$$

ρ = Dichte des Fluids (Wasser)

v = charakteristische Geschwindigkeit

L = charakteristische Länge

η = dynamische Viskosität des Fluids

Bei Überschreitung einer Grenzgeschwindigkeit entstehen Verwirbelungen (engl. „eddies“) auf allen Grössenskalen. Kinetische Energie wird dabei auf allen Skalen in Wärme umgewandelt und teilt sich aus Skalen grösserer Ausdehnung in hierarchischer Weise in kleinere Elemente auf, man spricht von einer Energiekaskade. Turbulenter Fluss erfordert eine stete Energiezufuhr zur Aufrechterhaltung. Ein Wirbel erhöht die Reibungsflächen und somit die Reibungsverluste.

Turbulente Strömung ist deterministisch chaotisch; d. h. der Strömungszustand unterliegt einer Zufälligkeit, die praktisch nicht vorhersehbar ist, sondern nur statistisch vorhersehbar ist. Eine Hauptströmungsbewegung wird von zeitlich und räumlich ungeordneten, dreidimensionalen Schwankungsbewegungen überlagert. Diese Schwankungsbewegungen werden von Molekülhaufen unterschiedlicher Grösse und Ausdehnung verursacht. In turbulenter Strömung

erfolgt daher eine starke und schnelle Durchmischung. Turbulente Diffusion liegt um Zehnerpotenzen über der molekularen Diffusion.

Wasserströmungen in Flüssen sind i. d. R. turbulent. Rauigkeit sowie ins Wasser ragende Objekte erzeugen Turbulenz. Sie nimmt von der Wasseroberfläche zur Gewässersohle sowie im Gewässerquerschnitt zum Ufer hin zu.

Ob ein Fisch turbulente Strömung meidet oder nicht, hängt von seiner Fähigkeit ab, Stabilität innerhalb der Strömung zu wahren, sei es durch aktive Bewegungen, oder passiv durch Flossen- und Körperhaltung (Webb & Weihs 1994). Fische nutzen verschiedene Flossen, um ihre Körper in turbulenter Strömung zu stabilisieren (Liao 2007). Brustflossen scheinen für die Stabilisierung in ungleichförmigen Strömungen besonders wichtig.

Das Auftreten von Turbulenz kann tägliche Verhaltensmuster sowie die Habitatwahl beeinflussen (Enders et al. 2003, Webb 2002). Laborversuche haben gezeigt, dass manche Arten sich gezielt in wirbelbehafteten Bereichen der Strömung aufhalten.

Russon (2011) führte Verhaltensexperimente mit Aalen im Strömungskanal durch, und stellte fest, dass die Wanderkorridore sich mit zunehmendem Abfluss zur Kanalwand hin verlagerten, wo auch Turbulenzen höchster Intensität ausgebildet waren. Turbulenzen hoher Intensität könnten unter bestimmten Umständen den Energieverbrauch für Schwimmen senken und deshalb für Fische attraktiv wirken, oder aber auch helfen, Strukturen im Gewässer zu lokalisieren. In Feldversuchen wurde vor Rechenanlagen bei Aalen jedoch auch schon Zögern verbunden mit Suchbewegungen beobachtet (Behrmann-Godel & Eckmann 2003, Brown et al. 2009, Jansen et al. 2007).

Laborversuche (Liao et al. 2003) haben gezeigt, dass Forellen (*Oncorhynchus mykiss*) häufig ein bis zwei Fischlängen hinter einem strömungsexponierten Zylinder in dessen Wirbelstrasse schwimmen (Kármán gaiting).

Über Veränderungen des Zylinderdurchmessers und, oder der Fliessgeschwindigkeit lassen sich die Wirbelablösefrequenz sowie der räumliche Abstand der Wirbel beeinflussen. Forellen passen ihre Schwimmkinematik an die Wirbelablösefrequenz an. Dieses Verhalten ist auch bei Dunkelheit zu beobachten, jedoch nicht, wenn das Seitenlinienorgan ausgeschaltet ist. Daraus lässt sich schliessen, dass die Seitenlinie Parameter wirbelhafter Strömungen abbildet.

Geschwindigkeitsgradient

Lyon (1904) war der erste, der zeigen konnte, dass blinde Fische in einem stehenden Gewässer sich zu einem eintretenden Jet ausrichten. Er erklärte dies damit, dass Fische die Strömung über den Strömungsgradient entlang ihres Körpers wahrnehmen. Grenzwerten von Gradienten, ab denen Reaktionen ausgelöst werden, sind vermutlich Art-, Grössen- sowie von den Lichtverhältnissen abhängig.

Von abwandernden Aalen hat man früher angenommen, dass sie passiv mit der Strömung driften. Neuere Ergebnisse von Telemetrie-Studien deuten jedoch darauf hin, dass Aale aktive Suchbewegungen für Bereiche hohen Abflusses durchführen (Brown et al. 2009, Jansen et al. 2007). So haben Russon & Kemp (2011) das Verhalten von Europäischen Aalen (*Anguilla anguilla*) und Forellen (*Salmo trutta*) gegenüber Geschwindigkeitsgradienten untersucht. Diese zwei Arten unterscheiden sich grundsätzlich in Verhaltensweise und Morphologie. Im Gegensatz zu juvenilen Salmoniden, die Meideverhalten gegenüber plötzlichen Beschleunigungen zeigen (Haro et al. 1998, Kemp et al. 2005), zeigen Aale kein Meideverhalten gegenüber sich plötzlich ändernden Strömungsbedingungen bei Annäherung an einen Bar Rack. Deutliche Verhaltensänderungen treten erst nach Kontakt mit der Rechenstruktur auf. Dies hat ein erhöhtes Risiko für Impingement zur Folge (Russon 2011).

Salmoniden zeigen plötzliche Änderungen im Schwimmweg, oftmals verbunden mit einem Wechsel der Rheotaxis, wenn sie auf einen bestimmten Grenzwert des Fließgeschwindigkeitsgradienten stossen. Enders et al. (2009) wiesen einen solchen Grenzwert für Smolts des Pazifischen Lachses, Russon & Kemp (2011) für Bachforellen aus der Aufzucht nach. Die Werte waren jeweils unabhängig vom Abfluss. Auch Russon (2011) untersuchte das Verhalten von Forellen (*Salmo trutta*) gegenüber Geschwindigkeitsgradienten. Sie reagieren während der Abwanderung auf einen spezifischen Geschwindigkeitsgradienten entlang ihrer Körperlänge (bei $0,11 \pm 0,03$ cm s⁻¹ je cm Wechsel zu positiver Rheotaxis, und $0,79 \pm 0,26$ cm s⁻¹ am nächsten Punkt zur Barriere, vor Rückkehr ins Oberwasser).

Lichtintensität

Lichtintensität scheint einen entscheidenden Einfluss auf die Auslösung der Abwanderung von Juvenilen zahlreicher Fischarten zu haben.

Die Abwanderung juveniler Salmoniden wurde vor allem als passiver Vorgang angesehen. Passive Verdriftung während Dunkelheit wurde teilweise darauf zurückgeführt, dass der Fisch sich nicht visuell an Strukturen orientieren kann, um sich in der Strömung auszurichten und seine Stellung zu halten. Thorpe et al. (1988) führten Laborversuche zum Abwanderverhalten von Smolts des Atlantischen Lachses (*Salmo salar*) durch und stellten fest, dass die Abwanderung zur Abenddämmerung zu-, und nach der Morgendämmerung abnahm. Sie führten dies auf die Unfähigkeit der Tiere zurück, sich bei Dunkelheit an visuell an Strukturen auszurichten. Dies würde bedeuten, dass die Tiere sich nicht mit Hilfe ihres Seitenlinienorganes orientieren und ausrichten können oder wollen.

1.4 Die Biologie der Zielarten

1.4.1 Die Barbe – *Barbus barbus*



Bild: David Flügel, Eawag

Die Barbe entstammt der Familie der Karpfenfische (*Cyprinidae*) und ist Namensgeber der Unterfamilie der Barben (*Barbinae*). Sie ist rheophil und lebt in sauerstoffreichen Fließgewässern mit sandigem oder kiesigem Sohlsubstrat am Gewässergrund (Barbenregion). Die Gefällewerte der Barbenregion betragen 0,2 – 3 ‰ (Huet 1954, 1959).

Ihr Körper ist rund, der Bauch abgeflacht, das Maul unterständig. Die Schnauze ist lang und mit 4 Barteln auf der Oberlippe bestückt.

Die Barbenregion ist dem Typ der sommerwarmen Fließgewässer zuzuordnen, mit mittleren sommerlichen Wassertemperaturen um 20 °C. Für sommerliche Wassertemperaturen stellen 15 °C nach Philippart (1989) einen unteren Grenzwert dar, und sind auf thermische Ansprüche des embryonalen Entwicklungsstadiums zurückzuführen (Absil 1989). So wird die Verbreitung flussaufwärts vor allem durch zu geringe sommerliche Wassertemperaturen begrenzt. Als obere Grenze des thermischen Optimalbereiches werden von Philippart (1989) 22 °C angegeben. Dieser Wert wird in vielen Barbengewässern kurzfristig deutlich überschritten. Darauf reagieren Barben mit einem veränderten tageszeitlichen Aktivitätsmuster, einer verkürzten Aktivitätsphase sowie dem Aufsuchen kühlerer Nebengewässer (Baras 1992).

Das somatische Wachstum von Barben ist temperatur- und saisonabhängig. Wachstum ist vor allem auf die Sommermonate beschränkt (Hunt & Jones 1975). Das jährliche Wachstum nimmt mit zunehmendem Alter ab (Prokes et al. 2006).

Natürlicherweise haben Barben nur eine Reproduktionsperiode pro Jahr. Diese erstreckt sich über wenige Tage, an denen mehrere Ablaichvorgänge vollbracht werden. Unter Laborbedingungen konnten bis zu 15 Reproduktionsperioden beobachtet werden.

Im Frühjahr bzw. Frühsommer erfolgt die flussaufwärts gerichtete Wanderung zu den Laichplätzen. Barben sind typische Kieslaicher. Im Spätsommer bzw. Herbst folgt die flussabwärts gerichtete Wanderung. Hauptauslöser der Laichwanderung ist der Anstieg der Wassertemperatur. Verschiedene Studien besagen, dass der Aufstieg erst ab Temperaturen von 12 °C einsetzt, die Aufstiegsaktivität in Temperaturfenster von 13 – 18 °C am grössten ist. Die Laichwanderung findet zwischen April und Juni statt, wobei sie bei männlichen Tieren früher einsetzt. Die grösste Aufstiegsaktivität erfolgt während der Abend- und Morgendämmerung, sowie während der Nachtstunden (Lucas & Frear 1997, Hofbauer 1962).

Der Laichvorgang erfolgt zwischen Mai und Juni, in Ausnahmefällen kann er bereits Ende April einsetzen. Baras (1992, 1995) konnte nach mehrjährigen Untersuchungen in der Ourthe (Belgien) beobachten, dass die Laichaktivität erst einsetzte, wenn das Tagesminimum der Wassertemperatur einen kritischen Wert von 13,5 °C nicht mehr unterschreitet. Ungünstige hydraulische Bedingungen führen zu einer Verzögerung des Laichvorgangs. Die Tageslänge hat keinen Einfluss auf die Auslösung der Laichaktivität. Das Ablaichen erfolgt während der Tagesstunden, bei Temperaturen zwischen 10 und 23 °C (Hancock et al. 1976; Baras 1993, 1994). Bei sehr hohen Wassertemperaturen (> 20 °C) oder einem sehr raschen Temperaturanstieg (Tagestemperaturamplitude > 5,1 °C) wurden Ablaichvorgänge während der Nacht beobachtet (Gougnard et al. 1987, Baras 1995).

Der embryonale Lebensabschnitt verläuft innerhalb der oberflächennahen Schichten des Kieslückensystems. Optimal für die Laichentwicklung sind Temperaturen > 14 °C (Absil 1989). Solange sie nur kurzfristig auftreten, führen geringere Temperaturen nicht zu Verlusten. Sind die Eier länger als 8 Stunden einer Wassertemperatur von 12 °C ausgesetzt, steigt die Mortalitätsrate drastisch an. Barben sind ausserhalb der Laichzeit dämmerungsaktiv. Die verlagerte Aktivitätszeit während der Laichzeit zielt möglicherweise auf eine Optimierung des thermischen Milieus der Embryonen ab.

Die Eleutheroembryonen haben Körperlängen von 0,7 bis 0,9 cm und sind lichtscheu. Im Alter von 12 bis 18 Tagen verlassen sie das Kiesbett. Dabei werden sie von der Strömung erfasst und flussabwärts verdriftet, bis sie in strömungsarmen und ufernahen Flachwasserbereichen wieder aus der Drift ausscheiden.

Zu Beginn des larvalen Entwicklungsstadiums beträgt die Körperlänge 1,2 bis 1,4 cm, zum Ende hin etwa 1,9 cm (Penaz 1973, Philippart 1982, Schmidt 1982, Krupka 1988). In diesem Stadium zeigen sie eine enge Bindung an strömungsarme Flachwasserbereiche.

Das juvenile Entwicklungsstadium ist bei männlichen und weiblichen Barben unterschiedlich lang. Männchen werden im zweiten bis vierten Lebensjahr geschlechtsreif, mit Körperlängen > 13 cm, Weibchen hingegen erst im fünften bis achten Lebensjahr, mit Körperlängen > 30 cm (Penaz 1977, Philippart 1977). In diesem Stadium besiedeln sie zunehmend strömungsintensivere Gewässerbereiche. Auch die Wachstumsgeschwindigkeit ist geschlechtsspezifisch, wobei sich die Unterschiede mit zunehmendem Alter vergrössern. Weibliche Tiere wachsen wesentlich schneller. Auch die erreichbare Endlänge ist bei den männlichen Tieren deutlich kleiner. Es finden sich kaum männliche Tiere > 35 cm, Individuen > 40 cm fehlen gänzlich.

Mehrsömmrige Individuen wechseln zwischen Ruhe- und Nahrungshabitaten. Als Ruhehabitate bevorzugen sie deckungsreiche Gewässerabschnitte mit grösseren Wassertiefen. In der Abenddämmerung verlassen sie die Ruhehabitate und begeben sich in strömungsintensivere Zonen mit geringen bis mittleren Wassertiefen, die eine deutlich höhere Dichte benthischer Invertebraten aufweisen. In der Nacht wird die Fressaktivität eingestellt, in der Morgendämmerung wird sie wieder aufgenommen. Etwa zur Zeit des Sonnenaufgangs erfolgt die Rückkehr zu den Ruhehabitaten. Im Herbst, bei Wassertemperaturen von 8 bis 10 °C, tritt noch ein dritter Aktivitätspeak in den Mittags- oder Nachmittagsstunden auf. Bei weiterem Abfallen der Wassertemperatur verschwindet zunächst der morgendliche und schliesslich auch der abendliche Aktivitätspeak. Bei Wassertemperaturen unter 4 °C beschränkt sich die stark reduzierte Aktivität auf die Nachmittagsstunden. Im Frühjahr nimmt die Aktivität wieder zu, bis im Sommer wieder ein bimodales Aktivitätsmuster ausgebildet ist. Die Entfernungen zwischen Ruhe- und Nachthabitat variieren zwischen 20 und 500 m und sind im Winter grösser als im Sommer.

Die Eizahl pro Reproduktionsperiode und Weibchen variiert zwischen 3000 und 25000 Eiern. Die Eizahl korreliert positiv mit Körperlänge und Körpergewicht. Im Vergleich zu anderen Cypriniden sind die Eizahlen sehr gering.

Die Barbe gehört zu den langlebigsten heimischen Fischarten (25 Jahre gem. Philippart 1977; 35 Jahre gem. Baras 1992). Jedoch differiert auch die Lebenserwartung je nach Geschlecht erheblich.

Bei Untersuchungen zum Geschlechterverhältnis in Barbenpopulationen wurde i.d.R. ein leichtes bis deutliches Überwiegen der männlichen Individuen registriert. Auch bestehen zwischen den jeweiligen Altersklassen deutliche Unterschiede im Geschlechterverhältnis, wobei der Anteil der weiblichen Individuen in den höheren Altersklassen zunimmt.

1.4.2 Die Äsche – *Thymallus thymallus*



Bild: David Flügel, Eawag

Die Äsche gehört zur Familie der Lachsfische (*Salmonidae*). Ihr Vorkommen ist auf die nördliche Hemisphäre beschränkt (Europa, Asien, Nordamerika). In Europa ist sie nur mit einer Art vertreten. Der wissenschaftliche Name bezieht sich auf den Geruch des Fleisches, welches nach Thymian riechen soll. Sie ist Leitfisch der nach ihr benannten Äschenregion.

Als Habitat nutzt die Äsche saubere, kühle Fließgewässer, zum Teil auch Flussmündungen und Seen. Innerhalb des Verbreitungsgebietes finden sich die grösseren Tiere weiter oberstrom. Der Mindestsauerstoffbedarf liegt bei 5 bis 7 ppm. Als optimaler Temperaturbereich werden 4 bis 18 °C angegeben, 0 – 4 °C gelten als untere, 18 – 25 °C als obere kritische Grenzen.

Laichzeit ist von März bis Mai (nach der Schneeschmelze). Hübner (2003) folgerte aus seinen Untersuchungen, dass für Europäische Mittelgebirgsbäche der Anstieg der Wassertemperatur im Frühjahr die Wanderung der laichbereiten Äschen auslöst. Sanken Temperaturen unter 5,7 °C, verliessen bereits an den Laichplätzen eingetroffene Äschen diese wieder und kehrten erst bei einem Wiederanstieg der Temperatur zurück. Ovidio et al. (2004) verweisen auf einen sinkenden Wasserstand als zweiten, zusätzlich benötigten Auslöser des Wanderverhaltens, welcher vermutlich die Irrtumswahrscheinlichkeit senkt. Sie weisen ebenfalls darauf hin, dass die das Wanderverhalten auslösenden Stimuli von Fluss zu Fluss unterschiedlich sein können.

Dabei scheint die Temperatur einen Einfluss auf die Dauer der Wanderung zu haben. Längere Wanderungen treten bei höheren Temperaturen auf. Die Ablaichphase selbst fällt bei höheren Temperaturen kürzer aus (Hübner 2003). Laichgruben werden vom Männchen in flachen, strömenden Gewässerstreifen mit Kiessubstrat angelegt. Diese verteidigt er dann als sein Territorium. Männchen lassen Weibchen nur zum Ablaichen in das Territorium, wobei sie mehrere Weibchen an einem Laichplatz ablaichen lassen. Laichgruben finden sich bevorzugt am oberstromigen Ende von Pools (bei Bachforellen unterstromiges Ende), und sind nicht so

tief wie bei Bachforellen, die aber in größerem Substrat laichen. Die Laichgruben sind daher anfälliger gegenüber Hochwasserereignissen. Es wird darüber spekuliert, ob die Laichgruben grösseren täglichen Schwankungen von Lichtverhältnissen und Temperatur ausgesetzt sind. Zwischen den Laichvorgängen halten sich die Fische in tieferen Ruhezeiten mit reduzierter Strömungsgeschwindigkeit und Deckung in der Nähe der Laichplätze auf (Dyk 1959, Sempeski & Gaudin 1995b, Hübner 2003). Nach Beobachtungen von Kristiansen und Døving (1996) wanderten weibliche Äschen 10 Tage und männliche 15 Tage nach Laichbeginn wieder ab. Nach dem Laichen wandern die Tiere zu Nahrungshabitaten (Sempeski & Gaudin 1995a, Guthruf 1996).

Bereits während des ersten Lebensjahres wechselt die Äsche aufgrund wechselnder ökologischer Ansprüche mehrfach das Habitat. Die unterschiedlichen Entwicklungsstadien benötigen unterschiedliche Futterhabitate, die sich vom larvalen bis zum adulten Entwicklungsstadium hin stark voneinander unterscheiden, vor allem bezüglich Strömungsgeschwindigkeit und Wassertiefe.

Das Schlüpfen erfolgt nach 20 bis 30 Tagen. Die Hauptfaktoren die die Überlebensrate der Eier und Larven beeinflussen sind Feinsediment, Temperatur, Sauerstoff, pH-Wert, endokrin-aktive Substanzen. Der Schlupf und das Leben der Larven findet bis zunächst im Kiesbett statt. Sind die Reserven des Dottersacks aufgebraucht und die Flossen entwickelt, verlassen sie den Kies des Laichhabitats (Emergenz) und unternehmen ihre erste kurze Wanderung in ihr erstes Futterhabitat. Die Emergenz der meisten Jungfische findet während der Morgendämmerung statt (Gaudin & Persat 1985; Bardonnnet & Gaudin 1990), die Abwanderung bzw. Verdriftung flussabwärts erfolgt erst nach Beginn der Abenddämmerung (Bardonnnet & Gaudin 1990). Dieses Verhalten kann als Prädatorenvermeidung (Godin 1982; Gustafson-Marjanen & Dowse 1983) oder als verlängerter Prägungsprozess auf die Umgebung (Bardonnnet & Gaudin 1990) interpretiert werden.

Als erstes Aufwuchshabitat dient der flachgründige Uferbereich mit geringen Fliessgeschwindigkeiten ($<10\text{cm s}^{-1}$) und Stillwasserbereiche, wo die Larven sich an der Wasseroberfläche aufhalten. Innerhalb des ersten Monats wechseln sie mit zunehmender Grösse ($> 20\text{ mm}$) in tiefere Bereiche mit grösserer Fliessgeschwindigkeit. Dieser Zeitraum, fällt mit der Metamorphose zum Juvenilen Stadium zusammen, ebenso mit dem Einsetzen eines agonistischen Verhaltens. Als Juvenile finden sie sich nahe der Hauptströmung. Während der Nacht halten sie sich eher in Ufernähe auf und ruhen dort. Im Sommer finden sich Subadulte und Adulte bevorzugt in Riffles mit schneller Strömung und grobem Substrat (Scott 1985; Sempeski & Gaudin 1995b, Bardonnnet et al. 1991).

Mit 3 bis 4 Jahren werden die Tiere Geschlechtsreif. Ausserhalb der Fortpflanzungszeit neigen sie zu Schwarmbildung, innerhalb derer die Tiere eine feste Position einnehmen, die sie wie ein Territorium verteidigen. Während der Laichzeit verteidigen nur die Männchen ihr Revier.

Adulte wandern im Winter in tiefere und strömungsberuhigte Bereiche. Nach Cunjak (1996) sind die zwei Hauptkriterien für geeignete Winterhabitate der Schutz vor physikalisch-chemischen Gefahren, im Winter v.a. Eisgang, sowie Schutz vor Prädatoren. In tiefen Pools werden diese Bedingungen am besten erfüllt. Die Unterschiedliche Verfügbarkeit und Verteilung solcher geeigneter Überwinterungshabitate bestimmt zumindest teilweise die Länge der Wanderung. (Clapp et al. 1990; West et al. 1992), oder ob sogar das gleiche Habitat genutzt wird wie im Sommer (Young 1998).

Tagsüber nehmen Äschen vor allem in der freien Wassersäule Nahrung zu sich, während der Nacht neigen sie dazu, am Gewässergrund zu ruhen (Sempeski & Gaudin 1995a). Mit zunehmendem Alter suchen sie Nahrung vermehrt am Grund. Die Nahrung setzt sich vor allem aus Wirbellosen, insbesondere Insekten, zusammen. Grössere Tiere fressen auch kleine Fische.

Northcote (1995) betont die Wichtigkeit des ausgeprägten „homing“-Verhaltens der Äschen für ein erfolgreiches und verbessertes Management. Auch Kristiansen und Døving (1996) konnten Homing und distinkte Sub-Populationen (diskrete Bestände) in verschiedenen Zuflüssen des gleichen Gewässersystems in Südnorwegen zeigen.

Äschen zeigen ein vielfältiges Migrationsverhalten. Sie unternehmen Laichwanderungen, vollziehen aber auch Ortswechsel zur Nahrungssuche und Habitatwechsel, je nach Entwicklungsstadium. Die Laichwanderung scheint an Temperatur und Mondphase gekoppelt, bei hohen Temperaturen und Vollmond sind sie am stärksten ausgeprägt.

In zahlreichen Flusssystemen Europas sind die Äschenbestände in den letzten Jahren stark zurückgegangen oder gar gänzlich verschwunden. Dies gilt vor allem für ihren südlichen Verbreitungsraum (Witkowski 1975, Persat 1976, Wiesbauer et al. 1991).

Die Flussregionen, in denen die Äsche ihre natürlichen Habitate findet, sind durch anthropogene Eingriffe stark beeinflusst. Nach Meyer (2001) zählen unpassierbare Bauwerke zu den wesentlichen Hindernissen für die Erhaltung von Äschenpopulationen. Hinzu kommen eine grosse Beliebtheit bei Sportanglern sowie Prädation durch piscivore Wasservögel, die jedoch erst bei Strukturarmut der Gewässer beträchtliche Ausmasse annehmen kann.

1.4.3 Der Schneider – *Alburnoides bipunctatus*



Bild: David Flügel, Eawag

Auch der Schneider entstammt der Familie der Karpfenfische (*Cyprinidae*). Das Verbreitungsgebiet dieses kleinen Cypriniden, der seinen Namen der markanten, dunkel gesäumten Seitenlinie zu verdanken hat, reicht vom Westen Frankreichs bis zum Kaspischen Meer. In der Schweiz ist er in den Gewässern nördlich der Alpen heimisch und gehört zu den als gefährdet eingestuften Fischarten (Breitenstein & Kirchhofer 2000).

Der Schneider lebt in Schwärmen, typischerweise in Gewässern der Äschen- und Barbenregion (Honsig-Erlenburg & Schulz 1989), wobei er auch in Gewässern der unteren Forellenregion vorkommt. Die obere Verbreitungsgrenze wird mit 700 m angegeben, bei Gefällen von 1,5 bis 4‰ (Breitenstein & Kirchhofer 2000). Vereinzelt gibt es auch Vorkommen in Seen, dort vor allem in den Mündungsbereichen der Zuflüsse (Hofer 1911).

Die Gewässer sind durch Hartsubstrate (Kies, Stein) und sauerstoffhaltiges, klares Wasser von mässiger bis stärkerer Strömung charakterisiert. Der Schneider ist empfindlich was den

Sauerstoffgehalt betrifft. Gleichzeitig ist er tolerant gegenüber hohen sommerlichen Wassertemperaturen. Seine Verbreitungsbiote zeichnen sich von Maximaltemperaturen von 24°C und minimale Sauerstoffgehalte von 7 mg/l aus. Der Schneider ist ein guter Indikator für saubere Gewässer. Er dient fischfressenden Vögeln sowie aquatischen Wirbeltieren als Nahrung. Der Schneider nimmt seine Nahrung entweder gegen die Strömung schwimmend auf aus der Oberflächendrift, oder im Substrat wühlend von wirbellosen Bodentieren. Nahrungsgrundlage sind Insektenlarven, Kleinkrebse und -muscheln, wobei er auch Algen und Detritus frisst. Während des Sommerhalbjahres bildet Anflug einen beträchtlichen Anteil der Nahrung.

Oftmals ist der Schneider mit Elritzen, Gründlingen oder Strömern in Schwärmen vergesellschaftet. Häufigste Begleitarten sind Groppe, Barbe, Bachforelle und Alet. Der Schneider gilt als standorttreu.

Schneiderschwärme sind anonyme Verbände ohne erkennbare Struktur (Winfield & Nelson 1991). Die Schwarmgrößen sind variabel und werden in der Literatur mit klein bis mittelgross angegeben (Lelek 1987, Berg et al. 1989). Breitenstein und Kirchhofer (2000) konnten in der Aare eine maximale Schwarmgrösse von 300 Tieren nachweisen. Dabei stellten sie ausserdem fest, dass Schwarmgrößen mit 50 bis 100 Tieren weniger häufig auftraten (25%), und die meisten Schwärme (60%) weniger als 50 Tiere umfassten. Reine 1⁺-Schwärme wurden nur im Sommer, reine 0⁺-Schwärme wurden zu jeder Saison, vor allem aber im Herbst gefangen. Ausserdem konnten sie solitäre Individuen nachweisen.

In der Literatur wird als Zeitraum für die Laichzeit die Monate Mei bis Juni angegeben, Breitenstein und Kirchhofer (2000) kommen aber zu dem Schluss, dass dieser Zeitraum länger andauern muss. Geeignete Wassertemperaturen reichen von 14 bis 24 °C. In Laborexperimenten wurde gezeigt, dass die Tiere bei Temperaturen < 12 °C nicht ablaichen und dass die Laichzeit bis zu 15 Wochen andauern kann. Die Weibchen können innerhalb einer Laichperiode im Abstand mehrerer Wochen mehrmals laichen. Zum Ablaichen suchen die Tiere in kleineren Laichschwärmen flachere, grobsandige und kiesige Abschnitte auf. Die Eiablage erfolgt in die Zwischenräume des Substrates, wobei die Anzahl der Eier pro Weibchen stark alters- und grössenabhängig ist und pro Laichperiode im Mittel zwischen 800 bis 3000 Stück beträgt. Ein Laichschwarm kann sich mehrere Tage am Laichplatz aufhalten. Für eine erfolgreiche Reproduktion sind Schneider auf bewuchsfreie Standorte ohne Algenbelag angewiesen (Lelek & Buhse 1992). Die Eier entwickeln sich in 110 bis 120 Tagesgraden zu Dottersacklarven.

In Europa sind Alter bis zu 9 Jahren bekannt. In der Schweiz war der bisher älteste untersuchte Schneider fünfjährig, 15 cm gelten als maximale Länge. Bezüglich der Wachstumsunterschiede zwischen Männchen und Weibchen gibt es in der Literatur widersprüchliche Angaben. Nach Kabisch (1974) sind die weiblichen Tiere im Mittel grösser und schwerer als gleichaltrige Männchen, Skora (1972) konnte jedoch keinen Unterschied feststellen.

Im Alter von 2 Jahren werden die Schneider geschlechtsreif. Dabei ist das Wachstum im ersten Lebensjahr etwas stärker ausgeprägt. Die Wachstumsrate ist von Süden nach Norden abnehmend, so dass die Tiere je nach Verbreitungsgebiet und Gewässer unterschiedliche Totallängen erreichen. Die nachfolgende Tabelle gibt eine Übersicht.

Tabelle 5: Mittelwerte der rückberechneten Jahresendlängen.

Totallängen ($L_1 - L_7$ [mm]) für verschiedene Gewässer Europas. ^Δ Wert basiert nur auf einem Individuum; * Gabellänge angegeben, in Klammer der auf die Totallänge hochgerechnete Wert (Breitenstein & Kirchhofer 2000).

	Schweiz, Aare (BREITENSTEIN 1997)	Ex-Yugoslawien, Morava (SORIC & ILIC 1985)	Tschechoslowakei, Rokytna (JOHAL 1979)	Rumänien, * Radimna (PAPADAPOL 1980)	Rumänien, * Eliseva (PAPADAPOL 1980)	Bulgarien, Ogosta (JOHAL 1979)
L ₁	29	32	33	29 (35)	37 (44)	42
L ₂	72	46	46	52 (63)	51 (61)	51
L ₃	107	56	58	69 (83)	70 (84)	60
L ₄	120	66	67	81 (98)	79 (95)	
L ₅	132 ^Δ	73	76			
L ₆		78	88			
L ₇		86	97			

Die Habitatansprüche sind abhängig von Jahreszeit und Entwicklungsstadium. Struktureichtum mit Strömungsvielfalt und Tiefenvariabilität ist für alle Entwicklungsstadien bedeutsam. Seichte, strömungsarme Abschnitte der Uferregionen werden von Larven besiedelt, die sich zwischen den Kies- und Gesteinsbrocken aufhalten. Adulte Tiere bevorzugen mässige bis starke Strömungen in zunehmend grösseren Tiefen, nahe über der Gewässersohle. Sie scheinen sich bevorzugt im Übergangsbereich zwischen lentischen und bentischen Stellen aufzuhalten, wo sie wechselnd in Strömung und Strömungsschatten schwimmen. Vor allem in strukturarmen Gewässern halten sie sich an tieferen direkt über der Sohle auf, um die Strömungseinwirkung zu reduzieren. Ältere Individuen schliessen sich zu Schwärmen zusammen, die mehrere Altersklassen umfassen, und die eher tiefere Bereiche mit z. T. starker Strömung bevorzugen (Breitenstein & Kirchhofer 2000). Gerade während der Sommermonate, wenn sie besonders aktiv sind, halten sie sich im Freiwasser auf, während sie im Winter Unterstände im Uferbereich oder tiefere Gewässerstellen aufsuchen (Etessami 1982). Die vertikale Differenzierung der Schwimmhorizonte ist unter anderem vom Gesamtfischbestand abhängig, da dieser sich auf die Konkurrenz um verfügbare Habitate sowie Meideverhalten gegenüber Prädatoren auswirken. Als bevorzugte Wassertiefen werden in der Literatur altersabhängig mittlere und bodennahe Wassertiefen angegeben (Oliva 1953, Hofer 1911). Kainz & Gollmann (1990) geben für einen österreichischen Niederungsbach Maximaltiefen bis 45 cm, mit bevorzugtem Aufenthalt in den mittleren Wassertiefen von 15 bis 25 cm. Tiefere Schichten dieses Gewässers wurden vor allem durch Bachforellen und Alet eingenommen.

Aufwärtswanderungen, die entweder Kompensations-, Ausweich-, oder Expansionsbewegungen darstellen, treten vor allem im Herbst nach dem Heranwachsen der Jungfische auf. Ausgeprägte Wanderungen sind auch während der Laichperiode im Frühsommer zu beobachten. Die grössten Wanderbewegungen setzen bei oder kurz nach einem stärkeren Rückgang des Abflusses ein (Gerster 1998), vor allem in den Zeiträumen Mitte August bis Mitte Oktober sowie Mitte Juni bis Mitte Juli. Im Gegensatz hierzu zeigen Barben bei steigenden Temperaturen und Abflüssen die grösste Wanderaktivität.

In weiten Teilen Europas sind Schneider in ihrem Bestand sinkend oder gar bereits verschwunden, wobei sich die Bestände in einigen Gewässern, in der Schweiz vor allem im Rheineinzugsgebiet, wieder zu erholen scheinen (Breitenstein & Kirchhofer 2000). Der Schneider ist laut Berner Konvention (Anhang III) geschützt. Die Bestände sind sowohl von der Gewässermorphologie, der Wasserqualität, als auch von der Zusammensetzung des Gesamtfischbestandes abhängig, insbesondere vom Bestand räuberischer Arten wie Bachforelle, Aal und Trüsche.

Hauptgefährdungsgründe sind Habitatverlust sowie –veränderung, verminderte Durchgängigkeit, schlechte Wasserqualität und Prädation. Kleinfischbestände können ausgeprägten Populationsschwankungen unterliegen, daher lässt sich nicht mit Sicherheit sagen, ob sich die Bestände nachhaltig erholt haben, oder ob es sich um natürliche Schwankungen handelt.

1.4.4 Die Bachforelle – *Salmo trutta fario*



Bild: David Flügel, Eawag

Die Bachforelle ist durch ihre typische Färbung (unregelmässig verteilte schwarze und rote Punkte) leicht zu erkennen. Ihre Fettflosse ist stets rot umrandet, auch bei adulten Tieren. Sie ist die häufigste Fischart in Schweizer Fliessgewässern und bewohnt die Forellen- und Äschenregion. In der Barbenregion kommt sie nur noch selten vor. Die Laichzeit der Bachforelle ist zwischen September und Dezember/Januar. In dieser Zeit nimmt der Fisch oft flussaufwärts gerichtete Laichwanderungen in Oberläufe oder Seitengewässer vor. Als bevorzugtes Laichsubstrat benutzen die Fische Kies mit einer Grösse von 6-76 mm, Fliessgeschwindigkeiten von 15-45 cm/s und Gewässerareale mit einer Tiefe von 5-35 cm. Die Eier werden in die Kiessohle eingegraben (meist nur 4-6 cm tief, zum Teil jedoch bis 20 cm). Der Sauerstoffbedarf der Eier nimmt mit zunehmender Entwicklungszeit zu, kurz vor dem Schlüpfen bedürfen sie 8-10 mg/l. Die Eier benötigen bis zum Schlüpfen der Fische 400-460 Tagesgrade. Der frische geschlüpfte Dottersackbrütling (Alevin) bleibt vorerst im Kies. Die Dottersackresorption dauert nochmals 5-6 Wochen. Kurz vor Aufzehrung des Dottersacks emergiert die Forellenlarve (Fry) und verlässt das Kiesbett, mit dessen Oberfläche er jedoch weiterhin eng verbunden bleibt. Das Fry-Stadium wird nun zum Parr und dieser verhält sich stark territorial. Nach einigen Wochen zeigt die junge Forelle deutliche Parr-Streifen (9-10 schwarze Streifen auf der Körperseite). Forellen sind extrem strukturgebunden und hängen von gut strukturierten Lebensräumen ab. Die junge Forelle kann nun kurze oder weite Abwanderungen unternehmen und sogar in einen See einwandern. Hier wird sie zur Seeforelle. In grossen Flüssen entwickelt sich die Forelle zur Flussforelle, bei der die typischen roten Punkte oft fehlen. Der Temperaturbereich für das Wachstum liegt zwischen 4-19° C. Die Letaltemperatur – je nach Autor – zwischen 26-29° C. Typische Lebensräume sind schnell fliessende Gewässer der oberen und unteren Forellenregion sowie Bäche mit Grundwasseraufstössen im Mittelland. Infolge Besatzmassnahmen treten Forellen oft auch in für sie weniger geeigneten Lebensräumen auf. Forellen können grössere Wanderungen über Hunderte von Metern bis Kilometern unternehmen.

Die Geschlechtsreife wird in der Regel beim Männchen mit zwei Jahren, beim Weibchen mit drei Jahren erreicht. In alpinen Gewässern benötigen die Fische jedoch deutlich mehr Jahre bis zur Geschlechtsreife. Für die Fortpflanzung wandern die Fische in der Regel zu ihrem

Geburtsort zurück (homing). Die Bachforelle ist in der Schweiz als potenziell gefährdet eingestuft.

1.4.5 Der Aal – *Anguilla anguilla*



Bild: David Flügel, Eawag

Der Aal besitzt eine schlangenförmige Körperform, nur die Brustflossen sind paarig. Es besteht ein durchgehender Flossensaum aus Rücken-, Schwanz- und Afterflossen. Die Schuppen sind klein und eingesenkt, die Haut sehr schleimig. Die Augen sind sehr klein. Der Aal lebt als nachtaktiver Räuber im Rhein, in der Rhone und im Po. Sein Laichgebiet liegt zirka 5'000 km von unseren Flüssen entfernt in der Sargassosee bei Bermuda. Die Larven (Leptocephali) überqueren den Atlantik Mithilfe des Golfstroms. Dann erreichen sie als Glasaale die Flussmündungen. Nun steigen sie die Flüsse aufwärts und nach einer Metamorphose werden sie zum pigmentierten Steigaal (brauner Elver). Auf ihrer Aufwärtswanderung übersteigen sie Stauwehre und Hindernisse durch Klettern. Der Gelbaal lebt 6-12 Jahre im Süßwasser. Aale sind eurytope Fische, haben bezüglich Fliessgeschwindigkeiten keine wirkliche Präferenzen und leben in Flüssen und Seen.

Im Hochrhein ist der Aal recht häufig anzutreffen. Beim geschlechtsreifen Silberaal verfärbt sich der Bauch silbrig weiss (Blankaal oder Silberaal). Im Herbst treten sie nun die Rückwanderung in den Ozean an Richtung Sargassosee. Bei der Rückwanderung und Kraftwerkspassage sind die Aale – je nach Turbinenart und –grösse – einer hohen Mortalität ausgesetzt. Die Aale sind in der EU als eine gefährdete Fischart eingestuft und gemäss dem Europäischen Rat (Verordnung Aal 1100/2007) sind die Silberaale geschützt. In der Schweiz sind sie als gefährdet klassifiziert.

1.4.6 Der Einsatz von Wild- und Zuchtfischen

Bei den in der Literatur beschriebenen Verhaltensexperimenten werden sowohl Zuchtfische als auch Wildfang eingesetzt.

Pedersen et al. (2008) verglichen die Schwimmleistung von Wildfischen und Zuchtfischen. Als Wildfang wurden während der Abwanderung gefangene Seeforellen- (*Salmo trutta*) und Lachssmolts (*Salmo salar*) verwendet. Smolts aus der Aufzucht waren Nachkommen der ersten Generation aus Wildbeständen von Seeforellen und Lachsen. Es wurden Wild- und Zuchtfische gleicher Grösse eingesetzt. Die Schwimmleistung einzelner Individuen wurde jeweils 3mal hintereinander getestet. Forellensmolts behielten die erreichte Sprintgeschwindigkeit in aufeinanderfolgenden Experimenten bei, bei Lachssmolts nahm sie um 20 bis 30% je Durchgang ab. Dies lässt eine unterschiedliche Regenerationsfähigkeit der beiden Arten vermuten. Seeforellen aus der Zucht waren schwerer als ihre Artgenossen gleicher Körperlänge. Die Wildfische beider Arten hatten intaktere Schwanzflossen. Die Brustflossen von Zuchtfischen waren abgenutzt und kleiner. Der Wildfang beider Arten zeigte eine deutlich bessere Schwimmleistung. Die mittlere Sprintgeschwindigkeit von Lachssmolts aus Wildfang war etwa 30% höher als die der Lachssmolts aus der Aufzucht. Bei den Meerforellen war die Sprintgeschwindigkeit des Wildfanges etwa 25% höher, als die der Probanden aus der Aufzucht.

Brauner et al. (1994) hat die kritische Schwimgeschwindigkeit von Smolts des Silberlachs (*Onchorynchus kisutch*) aus Wildfang sowie Aufzucht untersucht, und festgestellt, dass Smolts aus Wildfang eine deutlich bessere Schwimmleistung zeigen.

Da bei Zuchtfischen mit einer verminderten Kondition zu rechnen ist, empfiehlt sich in ethohydraulischen Versuchen der Einsatz von Wildfischen. So werden aus der Aufzucht stammende Probanden ethohydraulischer Versuche beispielsweise gezielt auf Strömungsbedingungen trainiert. Hierfür werden sie für einen bestimmten Zeitraum in ein Gerinne gegeben, in dem die Strömung langsam aber stetig erhöht wird (Adam & Lehmann 2011).

1.4.7 Individual- und Schwarmverhalten

Die Individuen einer Vielzahl an Fischarten verbringen einen Teil ihres Lebens in Gruppen. Allgemein werden in der Literatur zwei Begriffe unterschieden, „School“ und „Shoal“.

Charakteristisch für eine „School“ ist eine nichthierarchische und vollständig dezentralisierte Struktur, in der jeder Fisch sowohl eine führende als auch eine folgende Stellung einnehmen kann (Keenleyside 1955). Die Mitglieder zeigen ein stark koordiniertes Gruppenverhalten, welches auch als polarisiertes Schwimmverhalten bezeichnet wird (Partridge 1980). Polarisierung beschreibt das Mass, in dem die Schwarmmitglieder in die gleiche Richtung schwimmen. Das Schwimmen in einer polarisierten Gruppe bietet womöglich Vorteile für den Schutz vor Prädatoren, die die Vorteile in einer ungeordneten „Shoal“ übersteigen.

Der Schutz vor Prädatoren im Schwarm wird erhöht durch

- Many-eyes effect: Das Signal eines beliebigen Individuums kann den ganzen Schwarm zur Flucht bewegen. Die Wachsamkeit eines Individuums wird durch den Schwarm um ein Vielfaches erhöht, so dass ein maximales Mass an Sicherheit bei minimalem Mass an Ruhelosigkeit erzielt werden kann
- Confusion effect (Miller 1922): In homotypischen Schwärmen fällt es einem Prädatoren schwer, einen einzelnen Fisch auszumachen (Landeau & Terborgh 1986)

- Dilution effect (Brock & Riffenburgh 1960): Dieser Effekt hängt von der Schwarmgrösse ab und beruht darauf, dass bei zunehmender Anzahl an Schwarmmitgliedern das Risiko des Individuums sinkt, von einem angreifenden Prädatoren erbeutet zu werden.

Polarisierte Bewegungen könnten bei schneller Fortbewegung hilfreich oder gar notwendig sein, um die Gruppe zusammenzuhalten. Auch der Informationsfluss durch den Schwarm könnte verbessert werden (Couzin et al. 2005, Day et al. 2001).

Bei „Schools“ kann häufig beobachtet werden, dass die Mehrzahl der Fische der gleichen Art, Grössen- und Altersklasse angehören (Keenleyside 1955). Schwärme mit Individuen gleicher Art, Alters- und Grössenklasse werden als homotypische Schwärme bezeichnet (Landa 1998). Schutzmechanismen sind in homotypischen Schwärmen am stärksten ausgebildet. Dies könnte eine Erklärung dafür sein, dass sich die Tiere in Gemischtarten-Schwärmen in homogenen Untergruppen organisieren.

Der Begriff „Shoal“ ist im Gegensatz zu „School“ allgemeiner und bezeichnet jegliche soziale Zusammenschlüsse von Fischen. Der Shoal-Zusammenhalt ist temporär dynamisch, so dass diese Art von Schwarm aufgegeben und wieder neu gebildet wird. Das Bilden von „Shoals“ ist unter Knochenfischen weit verbreitet. Viele Arten bilden als Brütlinge oder Juvenile soziale Verbände, etwa 25% der Arten setzen dieses Verhalten auch im Adultstadium fort (Shaw 1978). Für das Individuum stellen sie einen Kompromiss zwischen den Vor- und Nachteilen von Schwarmzugehörigkeit dar (Pitcher & Parrish 1993). Im „Shoal“-Verband ist das Prädationsrisiko durch verschiedene Mechanismen wie Wahrnehmung von Prädatoren (Magurran et al. 1985), Verwirrung und Vermeidung von Feinden, minimiert (Neill & Cullen 1974, Landeau & Terborgh 1986, Godin 1986, Pitcher & Parrish 1993). Zunehmende Schwarmgrösse erhöht jedoch die Konkurrenz um das vorhandene Nahrungsangebot.

Selbst wenn Prädatoren vorzugsweise grosse „Shoals“ angreifen, sinkt der Jagderfolg mit zunehmenden „Shoal“-Grössen (Krause & Godin 1995). Elritzen (*Phoxinus phoxinus* L.) beispielsweise erhöhen bei Anwesenheit von Prädatoren die Gruppengrösse (Magurran & Pitcher 1987). Kleine Zusammenschlüsse (10 Fische), lösen sich bei drohender Gefahr eher wieder auf, um Unterschlupf zu suchen, als grössere Zusammenschlüsse (20 bis 50 Fische) (Hager & Helfman 1991). Bei manchen Arten liess sich beobachten, dass Individuen aus Populationen mit geringer Prädatorendichte eine geringere „Shoaling“-Neigung hatten, als solche aus Populationen mit hoher Prädatorendichte (Seghers 1974, Magurran & Pitcher 1987, Brown & Warburton 1997). Bei ausreichendem Futterangebot ist zu beobachten, dass *Theragra chalcogramma* Pallas in Gegenwart eines Prädatoren den Abstand zu ihrem Schwarmnachbarn drastisch verkleinern. Bei Futtermangel ist dieses Verhalten weniger stark ausgeprägt (Sogard & Olla 1997).

Schwarmbildung wirkt sich auf die hydrodynamischen Verhältnisse innerhalb des Schwarmes aus. Schwimmende Fische erzeugen Wirbel im Nachstrom. Innerhalb eines Schwarmes treffen die Individuen auf Verwirbelungen, die ihre Vorgänger und Nachbarn erzeugen. Nehmen die Tiere eine Diamant-Formation ein, kann ein Individuum hinter und zwischen zwei vorangehenden Individuen die reduzierten Fliessgeschwindigkeiten nutzen (Breder 1965, Weihs 1973). Nach Weihs (1973) kann die Nähe zu Nachbarn, wenn die Entfernung kleiner als eine Fischlänge ist, die Schwimmleistung eines Individuums durch Wand- und Tunneleffekte erhöhen (Weihs 1973). Verglichen zu alleinschwimmenden Tieren, zeigen Individuen innerhalb eines Schwarmes eine höhere Schwimmdauer, bei niedrigeren Schwanzschlag- sowie Atemfrequenzen (Svendsen et al. 2003, Liao 2007).

Allgemein gilt, dass die Körpergrösse erheblichen Einfluss auf die Fähigkeit zur Nahrungssuche, das Prädationsrisiko, die Fruchtbarkeit sowie den Energiehaushalt hat. Daher wird vermutet, dass die Kosten-Nutzen-Abwägung bezüglich Schwarmzugehörigkeit

grössenspezifisch ist, und dass Fische unterschiedlicher Grösse unterschiedliches Schwarmverhalten zeigen (Mikheyev 1995).

Gruppierungen können auch aufgrund äusserer Einflussfaktoren entstehen. So kann der Schwarm Ersatz für fehlende Unterschlupf bietende Strukturen darstellen (Hamilton 1971, Pitcher & Wyche 1983). Im Gewässer treffen Fische zahlreiche natürliche sowie anthropogen bedingte Hindernisse an, die den Zusammenhalt von auf- oder abwandernden Vereinigungen gefährden können. Weitere mögliche Folgen sind Verzögerungen der Wanderungen, Stress sowie ein behinderter Zugang zu geeigneten Habitaten. Strukturen, für deren Passage ein Schwarmverband sich auflösen muss, können eine Unterbrechung der Wanderung bewirken (Haro et al. 1998, Scruton et al. 2005). So können aufwandernde Shoals von Maifischen (*Alosa sapidissima*, *Alosa alosa*) durch einen vertikalen Schlitzpass behindert werden. Individuen eines Schwarmes, die ein Hindernis bereits passiert haben, kehren um und schliessen sich dem zurückgebliebenen Schwarm wieder an. Verminderter Schwarmzusammenhalt senkt somit langfristig die Fitness (Kemp et al. 2008).

In ethohydraulischen Versuchen konnte die Neigung von Fischen beobachtet werden, sich zu Gemischtartenschwärmen zusammenzuschliessen. Gemischtartenschwärme bestehen meist aus Mitgliedern ähnlicher Körperlänge. Nach Adam & Lehmann (2011) sind vor allem Cypriniden geneigt, sich in Gemischtartenschwärmen zusammenzuschliessen. Auch Aale scheinen gesellig. Für Störartige, Bach-, Regenbogenforellen sowie juvenile Lachse wurde ein einzelgängerisches Verhalten beobachtet. Flussbarsche, Welse und Hechte sind ebenfalls einzelgängerisch, stellen anderen, v.a. kleineren Fischen, nach. Gründlinge und Schneider bilden bevorzugt Reinartenschwärme (Adam & Lehmann 2011).

Kemp & Williams (2009) untersuchten die Abwanderung von juvenilen Salmoniden durch ein künstliches Gerinne (12 m lang, 1,5 m breit, 0,75 m tief, mittlerer Abfluss 0,05 m³/s) mit überströmten Wehr sowohl bei Helligkeit, als auch bei Dunkelheit. Bei Helligkeit bildeten sich Schwärme, die das Gerinne aktiv erkundeten. Während Dunkelheit bildeten sich keine Schwärme. Stattdessen hielten die Tiere scheinbar wahllos im Kanal verteilt ihre Position. Somit näherten und passierten das Wehr mehr Tiere während Helligkeit. Die Versuche zeigen, dass Smolts bei fehlender visueller Orientierung ein anderes Verhalten zeigen, welches zu Verzögerungen bei der Abwanderung führen kann.

Ein Argument für den Einsatz von Schwärmen ist die Gewährleistung der situativen Ähnlichkeit, die den Probanden im Experiment die gleiche Interaktion untereinander wie im Gewässer ermöglicht (Adam & Lehmann 2011). Allerdings erschwert dies die Analyse des individuellen Verhaltens, vor allem wenn Probanden der gleichen Art und Grösse eingesetzt werden, die sich nicht mehr individuell unterscheiden lassen.

In den in der Literatur beschriebenen Verhaltensexperimenten mit Fischen wurden sowohl einzelne Individuen als auch Schwärme eingesetzt. Versuche mit einzelnen Tieren liefern womöglich Ergebnisse, die nicht einfach auf das Verhalten von Schwärmen übertragbar sind. Es fehlen vergleichende Untersuchungen mit Schwärmen und Individuen, um den Einfluss von Schwarmverhalten zu abschätzen zu können.

1.5 Entwicklung und Anwendung eines automatisierten Fish-Tracking Moduls

Das Fischverhalten im Nahbereich einer Leiteinrichtung zuverlässig zu dokumentieren ist entscheidend für deren Auswertung und der Optimierung dieser Leiteinrichtung. Ein hoher Anteil der Dokumentation des Schwimmverhaltens erfolgte qualitativ und nicht quantitativ.

Gerade bei schnellen Versuchsabläufen war es nur schwer möglich viele verschiedene Beobachtungen zuverlässig quantitativ zu dokumentieren.

Im Rahmen dieses Projektes wurde deshalb von Detert et al. (2014) ein automatisiertes *Fish-Tracking Modul* entwickelt, mit dem das Schwimmverhalten direkt aus den Videoaufnahmen eines ethohydraulischen Labormodelles ausgewertet werden kann. Basis hierfür war die Computer Vision System ToolboxTM der Software MATLAB. Mit diesem Tracking-Modul war es möglich den Schwimmweg eines Einzelfisches oder eines Schwarmmittelpunktes zu detektieren.

Per Objekterkennung sollen, in den Videoaufnahmen, die Fische zunächst am Einzelbild und dann in Relation zur Bildsequenz detektiert werden. Dabei sollen deren Lage in Raum und Zeit, sowie deren Orientierung zur Hauptströmung, bestimmt werden können. Die umfassende automatisierte Auswertung statistisch relevanter Grössen für gesamte Datensätze steht dabei im Mittelpunkt der Entwicklung. Hier wurde die exemplarische Auswertung zweier Fischarten mit dem automatisierten *Fish-Tracking Modul* bereits erfolgreich angewendet (Detert 2014).

2. Material und Methoden

2.1 Versuchsstand

Der Versuchsstand besteht aus einer Rinne, die sowohl über die messtechnische Ausrüstung zur Bestimmung der hydraulischen Parameter verfügt, als auch über die zur Durchführung von Tierversuchen nötigen Einbauten (Abbildung 6). Der Versuchskanal ist ca. 30 m lang, 1,8 m breit und 1,4 m hoch. Dabei ist der Abflussquerschnitt 1,5 m breit und 0,9 m tief. Der Zufluss ist stufenlos von 0 bis 1200 l/s regelbar. Dies entspricht einer resultierenden mittleren Fließgeschwindigkeit bis 0,8 m/s.

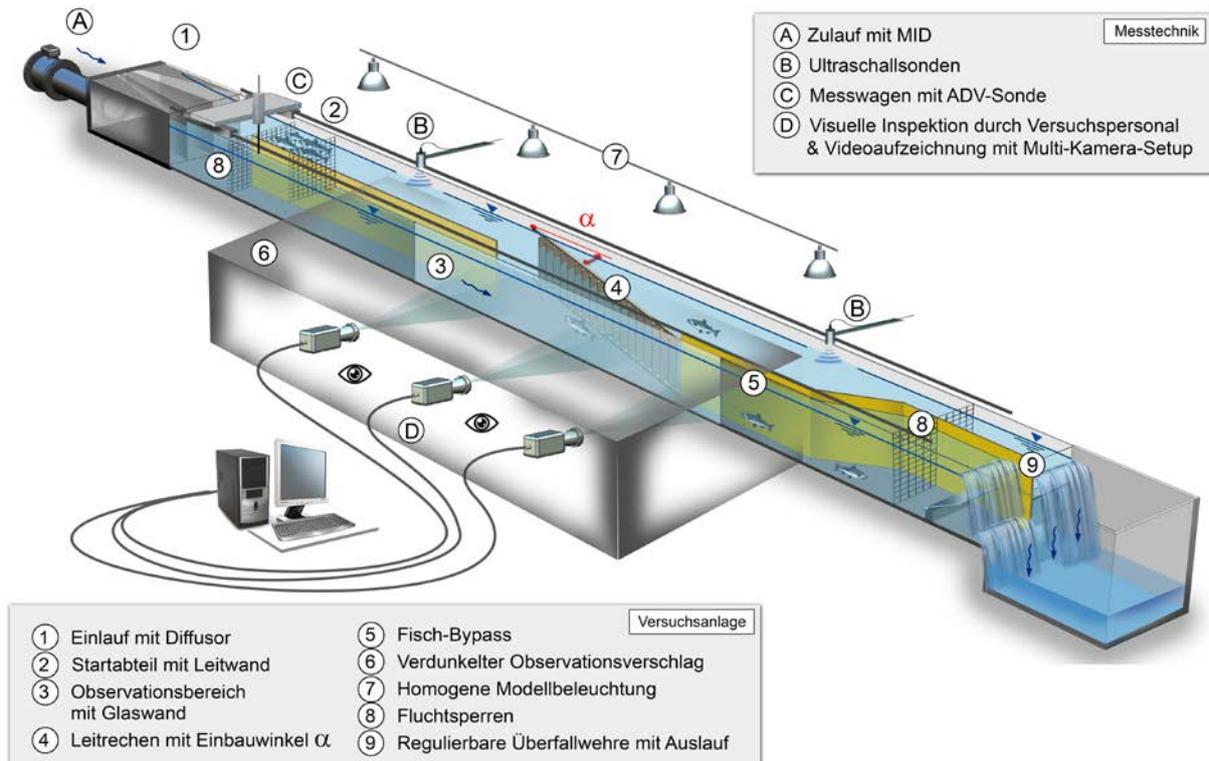


Abbildung 6: Ansicht des Versuchsstandes.

Bild: VAW Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie 2014.

Damit die Fische ein natürliches Schwimmverhalten ausbilden können, wurde der Oberwasserbereich vor dem zu testenden Leitreechen ausreichend lang sowie mit homogener Durchströmung, erreicht durch einen Diffusor, konzipiert.

Oberstrom des Leitreechens ist ein 0,5 m breites und 1 m langes Startabteil angeordnet. Die Probanden werden jeweils 10 Minuten vor Versuchsbeginn in das Abteil gegeben, um ihnen eine Adaption an die Strömungsverhältnisse der jeweiligen Versuchskonfiguration zu ermöglichen. Das Startabteil befindet sich 1 m unterhalb des Diffusors und wird über das Ziehen eines Gitters geöffnet. Daran schliesst sich eine Leitwand an, die die Fische entlang der dem Bypass abgewandten Gerinneseite bis kurz vor (1,5 m) den Leitreechen führt. Dadurch soll eine Interaktion mit der Rechenstruktur gewährleistet werden.

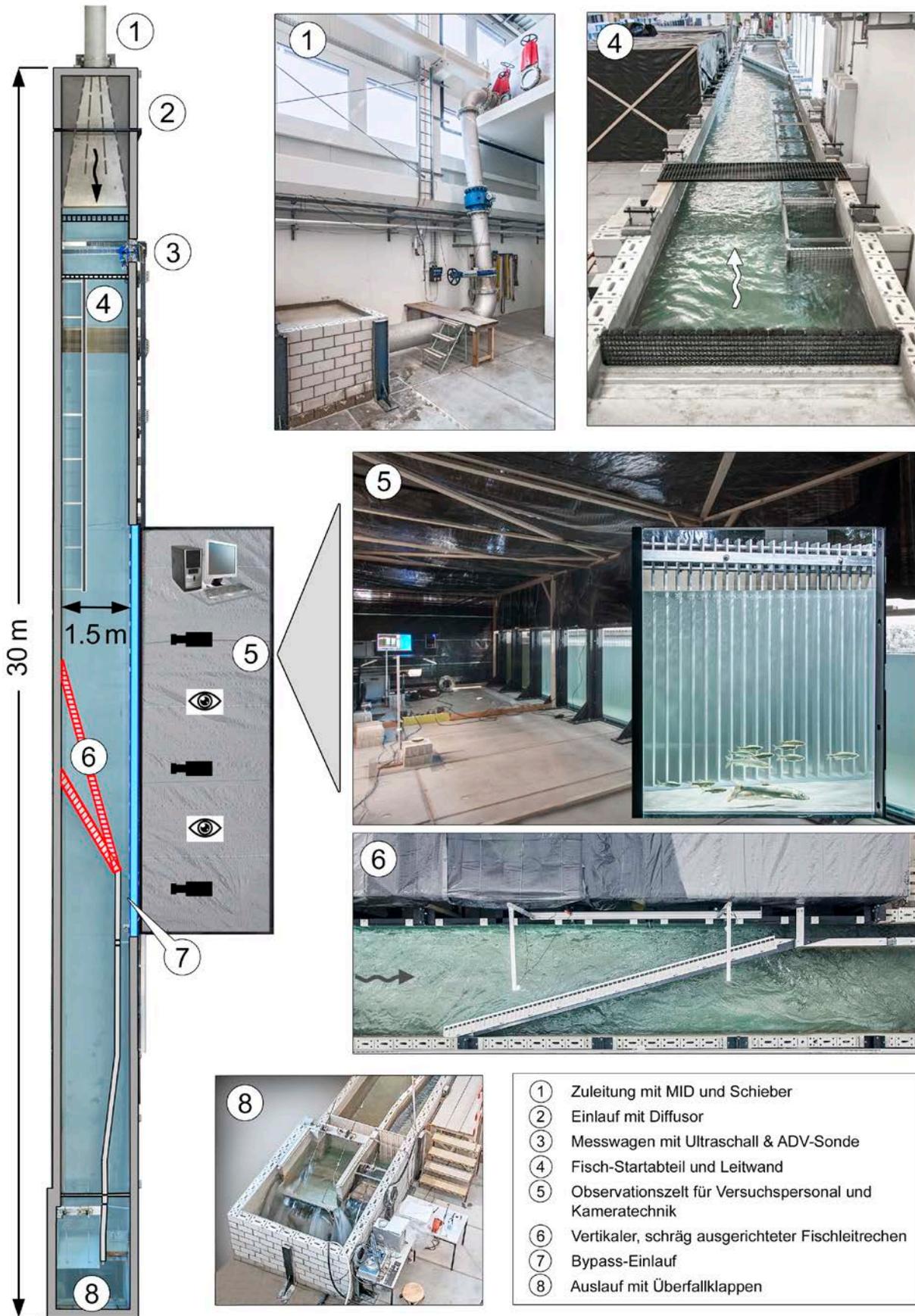


Abbildung 7: Ansichten des Versuchsstandes (VAW 2014).

Bild: VAW Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie 2014.

Der Leitrechen besteht aus 1 cm breiten, 10 cm tiefen und 115 cm hohen Aluminiumflachprofilen (Abbildung 8). Um die Verletzungsgefahr bei einer möglichen Rechenpassage zu minimieren, sind die Kanten der Rechenstäbe abgerundet.



Abbildung 8: Leitrechen mit installiertem Leitblech.
Gesamtwinkel des Rechens $\alpha=30^\circ$, Stabausrichtung $\beta=45^\circ$, Stababstand $b=5\text{cm}$ (VAW 2014).

Über eine Länge von 9 m wird die Modell-Aussenmauer von einer gläsernen Aussenwand unterbrochen, die die Beobachtung der Tiere sowohl Oberstrom, als auch entlang des Rechens, sowie im Bypass-Einstieg erlaubt. Dieser Observationsbereich ist ausserhalb des Modells mit einer verdunkelten Observationskammer umbaut, die mögliche störende Einflüsse auf das Fischverhalten minimieren soll. Innerhalb der Observationskammer befinden sich drei Videokameras zur Aufnahme der Versuche. Von dort wird das Fischverhalten ausserdem über Schriftprotokolle dokumentiert. Unmittelbar an das Ende des Leitrechens schliesst der 20 cm breite Bypass an. Am Modellauslauf ist er mit einer stufenlos regulierbaren Überfallklappe ausgestattet. Zusammen mit einer weiteren Überfallklappe am Auslauf des Hauptgerinnes lassen sich unterschiedliche Abfluss- und Geschwindigkeitsverhältnisse in den beiden Teilgerinnen einstellen (Abbildung 7).

Im Modell werden diverse fest installierte und mobile Schutzgitter eingesetzt. An Ein- und Auslauf verhindern sie, dass die Probanden in den Wasserkreislauf gelangen. Nach Versuchsabschluss erleichtern sie ein zügiges Abfangen der Probanden durch das Absperren von Teilbereichen. 1000 W Strahler leuchten den Kanal gleichbleibend gleichmässig über die gesamte Kanallänge aus. Derart wurden vergleichbare Versuchsverhältnisse für alle Testzeiträume realisiert und unerwünschte, tageszeitabhängige Schattenbildung verhindert.

Am Boden kann an den Leitrechen ein Leitblech angebracht werden. Dieses ist 10 cm hoch und wird direkt am Boden vor dem Rechen über die gesamte Länge angebracht (Abbildung 8).

Weitere Erläuterungen zu dem Aufbau der Versuchsrinne können der Arbeit von Kriewitz (2015) entnommen werden.

2.2 Versuchsfische

Mittels Elektrobefischung wurden die Versuchsfische in umfangreichen Abfischungskampagnen aus der Suhre (LU), der Thur (TG), der Birs (BE) und dem Mühlitalbach (LU) entnommen. Nach den Befischungen wurde den Tieren eine dreitägige Ruhephase und Adaptionszeit an die Hälterungsbedingungen gewährt.

Über einen sukzessiven Wasseraustausch über mehrere Stunden erfolgte die Adaption an die Wassertemperatur in der Hälterung. Die Hälterung bestand aus drei je 2000 l Rundstrombecken mit Teilverdunklung, die im Durchfluss mit dem Wasser aus dem Versuchsstand beschickt wurden, um einen Temperaturunterschied zwischen Hälterungs- und Modellwasser zu vermeiden. Die Becken waren, für Notfälle und für eine Kühlung, zusätzlich mit einem Anschluss an die Frischwasserversorgung ausgestattet. Ausserdem wurden sie belüftet und mit Filterpumpen ausgerüstet. Um Verunreinigungen im Wasserkreislauf zu verhindern, wurde auf das Füttern der Tiere verzichtet. Alle Probanden wurden wieder in ihre jeweiligen Flüsse ausgesetzt, wobei auch hier auf eine mehrstündige Adaptionszeit geachtet wurde. Eine Kontrolle der Hälterungseinrichtung sowie der Wasserparameter (Temperatur, pH-Wert, Sauerstoffgehalt) erfolgte täglich.

2.3 Videodokumentation und Fish-Tracking Modul

Drei Kameras wurden eingesetzt um den gesamten Bereich des Versuchsablaufes, von Startabteil über den gesamten Leitreechen bis zum Bypass hin, möglichst Verzerrungsarm aufzunehmen. Dafür wurden eine Canon Legria HFR406 und zwei Canon XA10, mit einer Auflösung von 1920 x 1080 px (Full-HD), eingesetzt. Für alle Kameras wurde der Sportmodus gewählt, der eine geringere Belichtungszeit je Einzelbild wählt und eine geringere Bewegungsunschärfe ermöglicht, als gängiger Weise für Videoaufnahmen üblich. Im Modus 50i, d.h. mit einer Aufnahmezeit von 50 Hz im Zeilensprungverfahren, wurden die Kameras quasi-synchron gestartet. Eine exakte Synchronisation war mit diesem Kameraaufbau nicht möglich, jede Kamera musste manuell mit per Knopfdruck gestartet werden, dementsprechend ergab sich ein zeitlicher Versatz von 2 - 4 s. Für das Fish-Tracking-Modul wurde händisch, in der Nachbearbeitung, der Synchronisierungsfehler bis auf einen Zeitversatz von ± 3 s und eine Entzerrung der Videoaufnahmen vorgenommen.

2.4 Vorversuche

Im Rahmen von Vorversuchen wurde die Abwanderbereitschaft von Barben sowie Schneidern in Einzel- sowie Schulversuchen getestet und eine geeignete Methodik der Versuchsdurchführung festgelegt. Es wurden sowohl Reinartenschwärme als auch Gemischtartenschwärme eingesetzt. Schneider zeigten in beiden Fällen eine gut ausgeprägte Abwanderbereitschaft, meist innerhalb weniger Minuten. Barben zeigten ein stark differenziertes Verhalten.

Im Einzelversuch suchten Barben Schutz in Schattenbereichen sowie strömungsberuhigten Zonen und verweilten dort über die gesamte Versuchsdauer. Vor dem Hintergrund dieser Problematik wurden verschiedene Versuchsparameter variiert. So wurden die Tiere beispielsweise ausschliesslich in der Morgen- oder Abenddämmerung getestet. Am Kanal wurden weitere gleichmässig verteilte, 1000 W Lichtquellen angebracht, wodurch eine bestmöglich gleichmässige Ausleuchtung, ohne Schattenbereiche erreicht wurde. Beim Einsatz der Barben in Schulversuchen konnte ein grundlegend abweichendes Verhalten, selbst bei Schulen mit einer geringen Individuenzahl von nur drei Tieren, beobachtet werden. Die

Abstiegsbereitschaft verbesserte sich drastisch und auch die Passagedauer nahm ab. Durch das vorhandene Grössenspektrum der Versuchsfische war die individuelle Analyse auch in Schulversuchen möglich.

Bereits während dieser Vorversuche zeigten Barben eine starke Tendenz, entlang der Leitstruktur abzuwandern und mit der Schwanzflosse und zum Teil auch mit dem gesamten Körper, Kontakt mit der Struktur zu halten. Bei höheren Fliessgeschwindigkeiten kam es dadurch, gerade bei grösseren Tieren, zum Verkeilen der Schwanzflosse zwischen den Stäben des Rechens, so dass diese bei höheren Fliessgeschwindigkeiten durch den Louver gezogen wurden.

Schneider zeigten in Individual- und Schwarmversuchen keine grundlegenden Unterschiede bezüglich Aktivität und Einschwimmverhalten. Es zeigte sich, dass das individuelle Fischverhalten in Einzelversuchen leichter analysierbar ist. In Schwärmen mit Tieren gleicher Art und vor allem gleicher Grösse liessen sich die Versuchsfische kaum individuell unterscheiden, vor allem nicht bei steigender Schwarmgrösse.

Schliesslich wurden auch Gemischtartenschwärme von Barben und Schneidern eingesetzt. Diese bestanden aus drei oder fünf Barben sowie fünf oder zehn Schneidern. Dabei zeigte sich, dass sich sehr kleine Barben zum Teil Schneider-Gruppen anschlossen statt mit den sehr viel grösseren Barben eine Gruppe zu bilden. Sie legten dabei sogar ihr typisches Verhalten ab (sich zusammen mit anderen Barben nebeneinander auf den Boden zu legen), schwammen etwas erhöht vom Boden mit den Schneidern wechselten genauso wie diese den Höhenhorizont.

Die Äschen zeigten im Versuchsstand eine sehr geringe Aktivität. Sie wurden einzeln und in Gruppen von drei und fünf Tieren eingesetzt sowie zu unterschiedlichen Tageszeiten eingesetzt. Bei einer Erhöhung der Versuchsdauer auf 45 min konnte eine erfolgreiche Abwanderung für drei Äschen gemeinsam erreicht werden.

Bachforellen zeigten ein ähnliches Verhalten wie Barben und wurden deshalb auch in Gruppen zu je drei Tieren eingesetzt.

Aale zeigten eine hohe Abwanderbereitschaft und wurden in Gruppen zu je zwei Tieren eingesetzt.

2.5 Verhaltensbeobachtung und Dokumentation

Die durchgeführten Experimente wurden mit Hilfe von Schriftprotokollen, graphischen Aufzeichnungen sowie Videoaufnahmen dokumentiert. Mit Hilfe einer Stoppuhr erfassten Beobachter alle auftretenden Verhaltensweisen chronologisch. In graphischen Aufzeichnungen wurden grossräumige Schwimmwege skizziert, was das Zuordnen des Auftretens bestimmter Verhaltensweisen an bestimmte Bereiche des Versuchsstandes erleichtert. Die Videoaufnahmen erlangen vor allem in Hinblick der Zuhilfenahme bei schwierigen Versuchsabläufen und bei einer zu einem späteren Zeitpunkt potentiell möglichen, rechnergestützten Auswertung mittels Objekterkennung an Bedeutung.

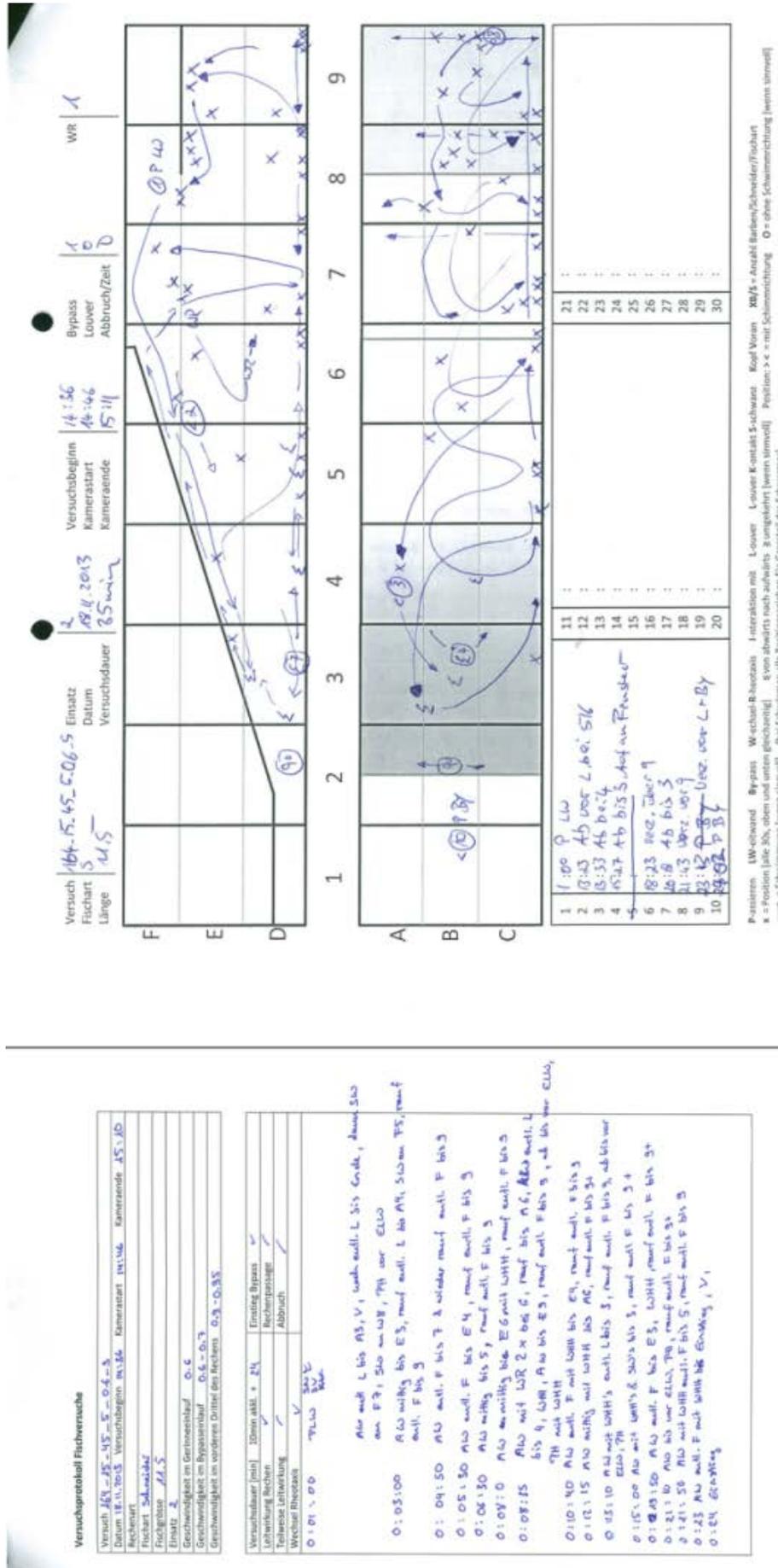


Abbildung 9: Versuchsprotokolle, parallel geführt von 2 Beobachtern.

2.6 Grössenspektrum und Anzahl untersuchter Fische

Tabelle 6: Grössenspektrum und Anzahl der untersuchten Fischarten.

Art	Anzahl	Länge min. [cm]	Länge max. [cm]	Länge Durchs. [cm]
Barben	174	10,5	51,0	21,2
Schneider	126	8,5	15,0	11,4
Aale	34	42,0	88,0	67,6
Bachforellen	51	15,0	28,0	19,5
Äschen	22	29	37,0	32,7
Gesamt	407			

2.7 Versuchsdurchführung

Alle Fische wurden vor dem Start eines Versuches für zehn Minuten in das Startabteil gegeben (Abbildung 6), welches durch ein Gitter vom Kanal getrennt wurde. Nach zehn Minuten wurde das Gitter gezogen und die Fische waren frei, um das Versuchsgerinne zu durchschwimmen.

Schneider wurden als Einzelfische getestet. Je Konfiguration wurden 20 Einzelversuche durchgeführt. Um mögliche Lerneffekte zu erfassen, wurden je zehn Probanden eingesetzt, die das erste Mal in das Versuchsgerinne eingesetzt wurden. Weitere zehn Probanden wurden eingesetzt, die bereits einmal im Versuch waren, seit dem ersten Einsatz jedoch mindestens einen Ruhetag hatten.

Barben wurden in Dreiergruppen getestet. Je Konfiguration wurden acht Einzelversuche durchgeführt. Je vier Versuche erfolgten mit Fischen, die das erste Mal eingesetzt wurden, in je vier Versuchen kamen Tiere zum Einsatz, die bereits einmal im Versuch waren, seither jedoch mindestens einen Ruhetag hatten.

Äschen wurden in Dreiergruppen getestet. Je Konfiguration wurden acht Einzelversuche durchgeführt. Je vier Versuche erfolgten mit Fischen, die das erste Mal eingesetzt wurden. In je vier Versuchen kamen Tiere zum Einsatz, die bereits einmal im Versuch waren, seither jedoch mindestens einen Ruhetag hatten.

Bachforellen wurden ebenso in Dreiergruppen getestet. Je Konfiguration wurden acht Einzelversuche durchgeführt. Je vier Versuche erfolgten mit Fischen, die das erste Mal eingesetzt wurden. In je vier Versuchen kamen Tiere zum Einsatz, die bereits einmal im Versuch waren, seither jedoch mindestens einen Ruhetag hatten.

Für die Aale musste bei 0,6 m/s in das Startabteil eine solide Plastikplatte gegen das Gitter gegeben werden, um die Strömungsgeschwindigkeit vor der Platte zu verringern. In Testversuchen wurden einige Aale gegen das Gitter gedrückt und konnten sich aus eigener Kraft nicht mehr von diesem lösen. Die Plastikplatte wurde zusammen mit dem Gitter bei Versuchsbeginn aus dem Wasser gehoben. Aale wurden in Zweiergruppen getestet. Je Konfiguration wurden zehn Einzelversuche durchgeführt. Je fünf Versuche erfolgten mit Fischen, die das erste Mal eingesetzt wurden. In je fünf weiteren Versuchen kamen Tiere zum Einsatz, die bereits einmal im Versuch waren, seither jedoch mindestens einen Ruhetag hatten.

Mit der Durchführung der Versuche wurde am Morgen begonnen, stets nach der gleichen Prozedur. Am Kanal wurde der entsprechende Durchfluss eingestellt (400 l/s, 800 l/s, 1000 l/s) und über die Überfallklappen am Auslauf eine Fliesstiefe von 0,9 m eingestellt. Für den

resultierenden stationären Strömungszustand wurden die Fließgeschwindigkeiten im Einlauf, dem Bypasseinstieg sowie im vorderen Drittel des Leitrechens gemessen. Die Wassertemperatur, der pH-Wert und die elektrische Leitfähigkeit wurden während der gesamten Versuchsdauer im Kanal und in allen Hälterungsbecken bestimmt.

2.8 Versuchszeitraum

Die Versuche wurden in zwei Versuchsreihen durchgeführt. Die erste Versuchsreihe fand von Oktober 2013 bis Dezember 2013 statt. Die zweite Versuchsreihe wurde von Mai 2014 bis Juli 2014 durchgeführt. In der ersten Versuchsreihe wurden Versuche mit Barben und Schneidern aus der Suhre durchgeführt. Aufgrund der Ergebnisse der ersten Versuchsreihe wurden in der zweiten, die besten Konfigurationen weiter getestet und mit einem Leitblech durchgeführt. Zudem wurden Bachforellen, Aale und Äschen mit diesen Konfigurationen getestet und ein Kontrollversuch mit Barben und Schneidern durchgeführt, bei dem die Stabausrichtung 0° betrug.

2.9 Versuchsvariablen

Die Ausführung der Rechen erfolgte variabel bezüglich der Rechenausrichtung α (15° , 30°), der Stabausrichtung β (90° , 45°) sowie der Stababstände b (5 cm, 11 cm). Die entsprechenden Konfigurationen wurden bei drei Fließgeschwindigkeiten V_0 (0,3 m/s, 0,6 m/s, 0,8 m/s) bzw. drei Abflüssen (400 l/s, 800 l/s, 1000 l/s) getestet. Die nachfolgende Abbildung gibt einen Überblick über die Versuchsparameter.

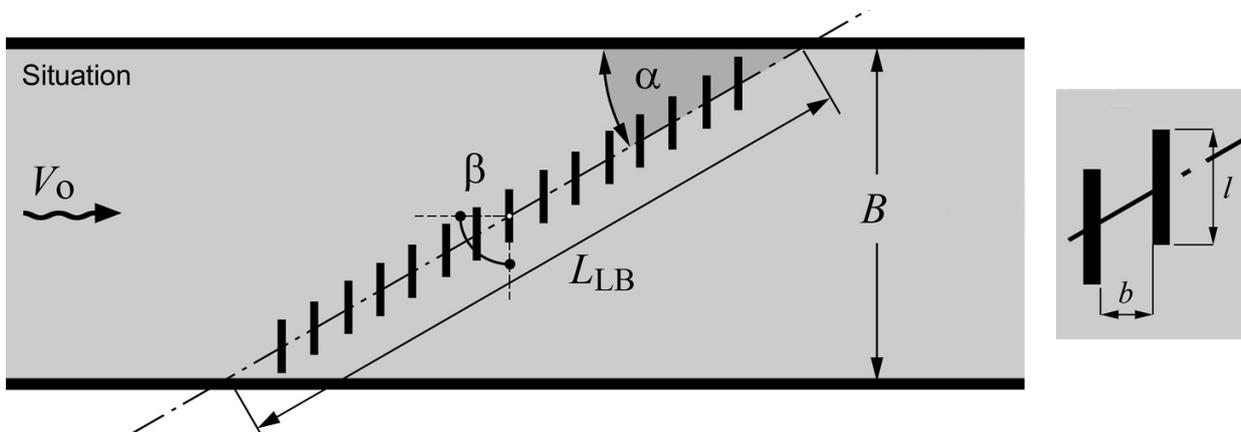


Abbildung 10: Grafik des Versuchsaufbaues.

α = Rechenausrichtung, β = Stabausrichtung, b = Stababstand, V_0 = Fließgeschwindigkeit am Einlauf, L_{LB} = Länge des Leitbleches, B = Breite des Kanales, l = Länge der Rechenstäbe. Bild: VAW Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie 2014.

Abbildung 10 fasst die Versuchskonfigurationen sowie die entsprechenden Fließgeschwindigkeiten im Modell zusammen. Dabei stellt V_0 die tiefengemittelte Geschwindigkeit im Gerinneeinlauf dar. Gemessen wurde ausserdem die Geschwindigkeit im Bypasseinlauf sowie im vorderen Rechendrittel.

Detailliertere Angaben zu Fließgeschwindigkeiten und weiteren technischen Parametern können in der Arbeit von Kriewitz (2015) nachgeschlagen werden.

Tabelle 7: Versuchsvariablen.

Diese Parameter wurden in den Versuchen verändert und ergeben zusammen die Bezeichnung der Konfiguration.

Konfiguration	Rechen- ausrichtung α [°]	Stab- ausrichtung β [°]	Stab- abstand b [cm]	Fließ- geschwindigkeit v_0 [m/s]	Leitblech (LB)
15° 90° 5cm 0,3m/s	15	90 (Louver)	5	0,3	
15° 90° 5cm 0,6m/s	15	90 (Louver)	5	0,6	
15° 90° 11cm 0,3m/s	15	90 (Louver)	11	0,3	
15° 90° 11cm 0,6m/s	15	90 (Louver)	11	0,6	
15° 45° 5cm 0,3m/s	15	45 (Bar Rack)	5	0,3	
15° 45° 5cm 0,6m/s	15	45 (Bar Rack)	5	0,6	
15° 45° 11cm 0,3m/s	15	45 (Bar Rack)	11	0,3	
15° 45° 11cm 0,6m/s	15	45 (Bar Rack)	11	0,6	
15° 45° 5cm 0,8m/s	15	45 (Bar Rack)	5	0,8	
15° 45° 5cm 0,6m/s LB	15	45 (Bar Rack)	5	0,6	LB
30° 45° 5cm 0,3m/s	30	45 (Bar Rack)	5	0,3	
30° 45° 5cm 0,6m/s	30	45 (Bar Rack)	5	0,6	
30° 45° 5cm 0,6m/s LB	30	45 (Bar Rack)	5	0,6	LB
30° 0° 5cm 0,6m/s	30	0 (Kontrolle)	5	0,6	

Im Folgenden werden Konfigurationen wie in Tabelle 7 (in linker Spalte) angegeben.

2.10 Datenanalyse

Für jeden Versuch existieren drei Ergebnisszenarien: (1) Das Einschwimmen in den Bypass, (2) das Passieren des Rechens oder (3) das Verweigern. Als Verweigerung wurde ein Versuchsergebnis dann gewertet, wenn ein Fisch innerhalb von 30 min nicht in den Bypass (1) oder durch den Rechen (2) schwamm, dabei aber das Startabteil verliess und sich dem Rechen somit mindestens bis auf 1,5 m näherte (ausser bei den Äschen, hier wurde 45 min pro Fisch beobachtet).

Für einen Versuch ergeben sich somit diese drei Ergebnismöglichkeiten:

$$(1) \text{ Bypass [\%]} = \frac{N_{by}}{N_{by} + N_r + N_v}$$

$$(2) \text{ Rechenpassage [\%]} = \frac{N_r}{N_{by} + N_r + N_v}$$

$$(3) \text{ Verweigerung [\%]} = \frac{N_v}{N_{by} + N_r + N_v}$$

mit N_{by} als der Anzahl Fische, die in den Bypass einschwammen, N_r als der Anzahl Fische, die den Rechen passierten und N_v als der Anzahl Fische, die innerhalb von 30 min (45 min für Äschen) nicht in den Bypass oder durch den Rechen schwammen.

$$\text{Leiteffizienz [\%]} = \frac{N_{by}}{N_{by} + N_r}$$

Einzelne Versuche wurden der Auswertung entnommen, wenn Fische das Startabteil gar nicht verliessen oder die Videoauswertung, die Dokumentation unzureichend durchgeführt wurde.

2.10.1 Statistische Analysen

Chi-Quadrat-Test

Die statistischen Analysen wurden mit einem Chi-Quadrat-Test und einer multivariaten Regression durchgeführt. **Der Chi-Quadrat-Test wurde verwendet um einen Zusammenhang der Konfiguration und der Testergebnisse zu prüfen.** Als Null-Hypothese (H_0) wurde angenommen, dass kein Zusammenhang zwischen der verwendeten Konfiguration und dem Testergebnis bestand. Als Alternativ-Hypothese (H_A) wurde formuliert, dass zwischen den beiden Variablen ein signifikanter Zusammenhang besteht. Zur Berechnung der Prüfgröße, der sogenannten χ^2 -Werts wurden dann die erwarteten und die tatsächlich aufgetretenen Häufigkeiten für die drei Ausgänge (Bypass, Verweigerung, Rechenpassage) genutzt. Unter H_0 wurde davon ausgegangen, dass $\chi^2 = 0$ gilt. Für die H_A galt entsprechend $\chi^2 > 0$. Nach der Berechnung des χ^2 -Werts wurde eine Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha = 0,05$ für den Ablehnungsbereich formuliert. Damit konnte der kritische χ^2 -Wert berechnet werden, für den (mit der oben genannten Irrtumswahrscheinlichkeit) davon ausgegangen werden konnte, dass H_0 abgelehnt werden musste. Problematisch war hierbei, dass einige Zeilen der Kreuztabelle eine Häufigkeit von 0 hatten. Dies kann zu Problemen bei der Berechnung des Chi-Quadrat-Werts führen und ist somit mit Vorsicht zu betrachten. Um hier auf der sicheren Seite zu sein,

wurde für kritische Verteilungsmuster, zusätzlich der als exakter Chi-Quadrat (oder exakter Test nach Fischer) bekannter Signifikanztest, genutzt. Meistens zeigten sowohl Chi-Quadrat-Test wie auch der Fisher Test dieselben Ergebnisse, wenn es darum ging Hypothesen zu bestätigen oder abzulehnen. Der exakte Test diente zur Bestätigung der Ergebnisse (Robustheitscheck).

Multivariate Regression (GLM)

Der Chi-Quadrat-Test prüft einen Zusammenhang zwischen Versuchsergebnis und der Konfiguration. Er kann zum Beispiel eine Aussage darüber treffen, ob das Ergebnis allgemein von der getesteten Konfiguration abhängig ist, jedoch nicht welche Parameter ausschlaggebend sind. Deshalb wurde anhand einer **multivariaten Regression untersucht in wie weit verschiedene Faktoren die Wahrscheinlichkeit für den Bypass-Einstieg, die Rechenpassage oder die Verweigerung beeinflussten**. Da es sich bei der abhängigen Variable (Bypass ja/nein, Rechenpassage ja/nein, Verweigerung ja/nein) um eine jeweils dichotome Variable handelt, wurde ein generalisiertes lineares Modell (glm, logistische logit-Regression) verwendet. Dieses Modell ist in der Lage die Verteilung (0/1) der abhängigen Variable adäquat abzubilden.

Für jede der drei abhängigen Variablen – Bypass, Rechenpassage, Verweigerung – wurde eine Reihe von separaten Modellen geschätzt, um herauszufinden welche Faktoren jeweils einen Einfluss auf die drei Testergebnisse hatten. Dabei wurden für alle drei abhängigen Variablen jeweils die gleichen vier Modellspezifikationen verwendet:

Modell 1: Hier wurde zunächst der Einfluss der Rechenausrichtung, der Stabausrichtung sowie des Stababstandes geschätzt. Alle drei Variablen sind als kategoriale Variablen eingeführt worden. Für die Rechenausrichtung diente 15° als Referenzkategorie. Der Effekt der Rechenausrichtung von 30° wurde in Relation zum Winkel 15° interpretiert. Für die Stabausrichtung diente 90° als Referenz. 45° und 0° wurden jeweils in Bezug dazu interpretiert. Für den Stababstand diente die Kategorie 5 cm als Referenz und die Kategorie 11 cm wurde in Bezug dazu interpretiert.

Modell 2: Zusätzlich zu den drei Variablen aus Modell 1, wurde noch jeweils eine Dummy-Variable für die fünf Fischarten eingeführt. Hierdurch wurde es möglich Unterschiede zwischen den Fischarten aufzudecken. Wichtig ist, dass in der Regressionstabelle jeweils nur vier Fischarten dargestellt wurden. Dies liegt daran, dass bei Dummy-Variablen jeweils eine Kategorie (in diesem Fall Schneider) als Referenzkategorie verwendet wurde. Die geschätzten Koeffizienten wurden somit immer in Bezug auf die Referenzkategorie interpretiert.

Modell 3: Als weitere erklärende Variable wurde in Modell 3 der Einsatz (Anzahl der Verwendung eines Fisches im Versuch = 1 oder 2) verwendet.

Modell 4: Abschließend wurde in Modell 4 untersucht, ob die Fließgeschwindigkeit und das Leitblech einen Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit für die drei Ergebnismöglichkeiten hatten.

Die Ergebnisse der drei Regressionen befinden sich jeweils in

Tabelle 14 (S. 89), Tabelle 15 (S. 90) und Tabelle 16 (S. 91). Zusätzlich zu den geschätzten Koeffizienten, Standardfehlern (in Klammern) und p-Werten wurden für jedes Modell die Anzahl der Fälle, die Log-Likelihood-Funktion (LL) und das Akaike Informationskriterium (AIC) angegeben.

Die LL gibt an wie gut das geschätzte Modell die vorhandenen Daten wiedergibt. Das AIC lässt sich ähnlich interpretieren, wenn auch mit einem wichtigen Unterschied. Im Gegensatz zur LL, gibt das AIC nicht nur Auskunft über den Informationsgehalt des Modells, sondern gleichzeitig auch über dessen Komplexität.

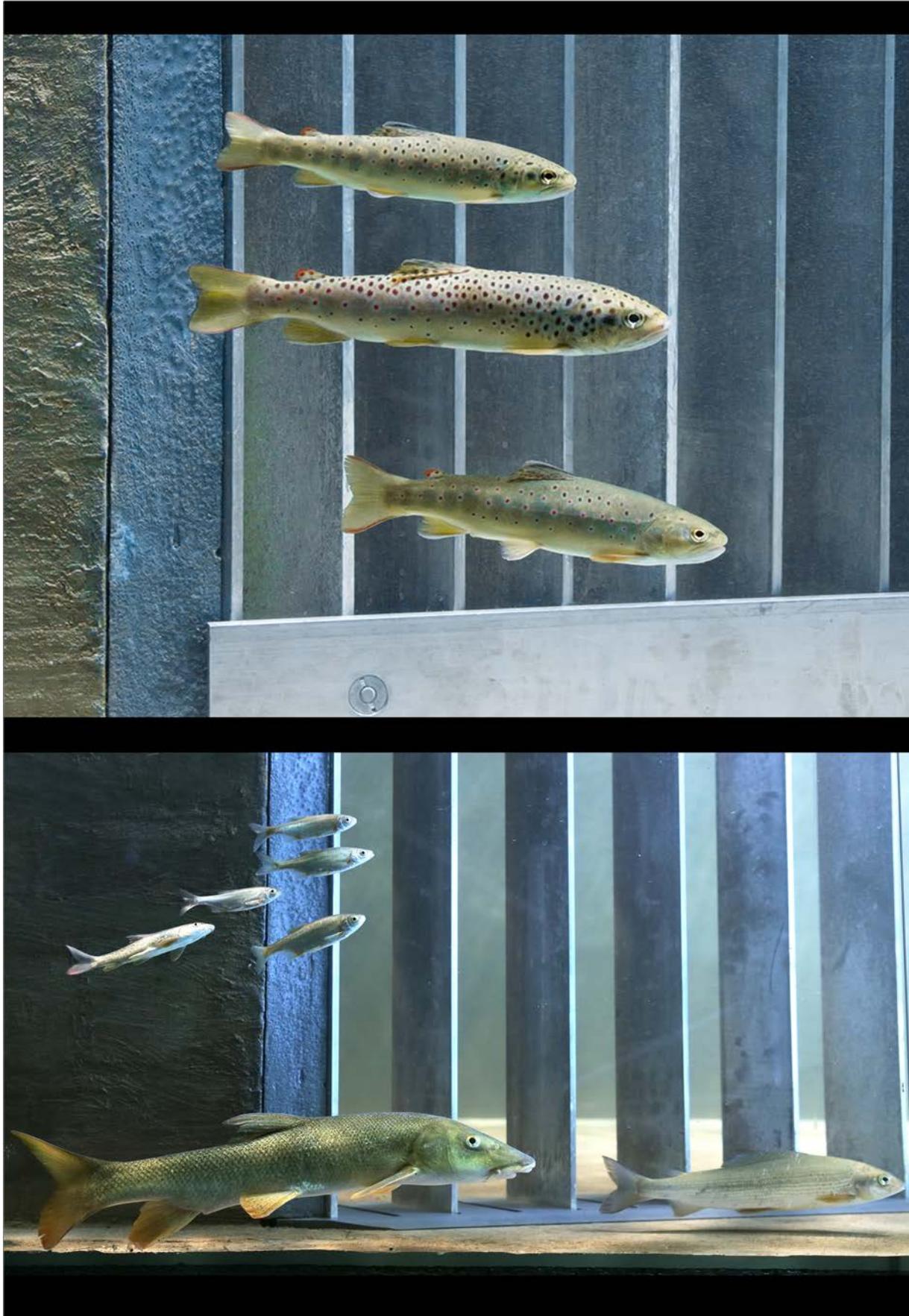


Abbildung 11: Bachforellen (oben). Barbe, Schneider und Äsche (unten).
Konfiguration oben: 30° 45° 5cm 0,3m/s LB. Konfiguration unten: 15° 45° 11cm 0,3m/s. Bild: David Flügel, Eawag.

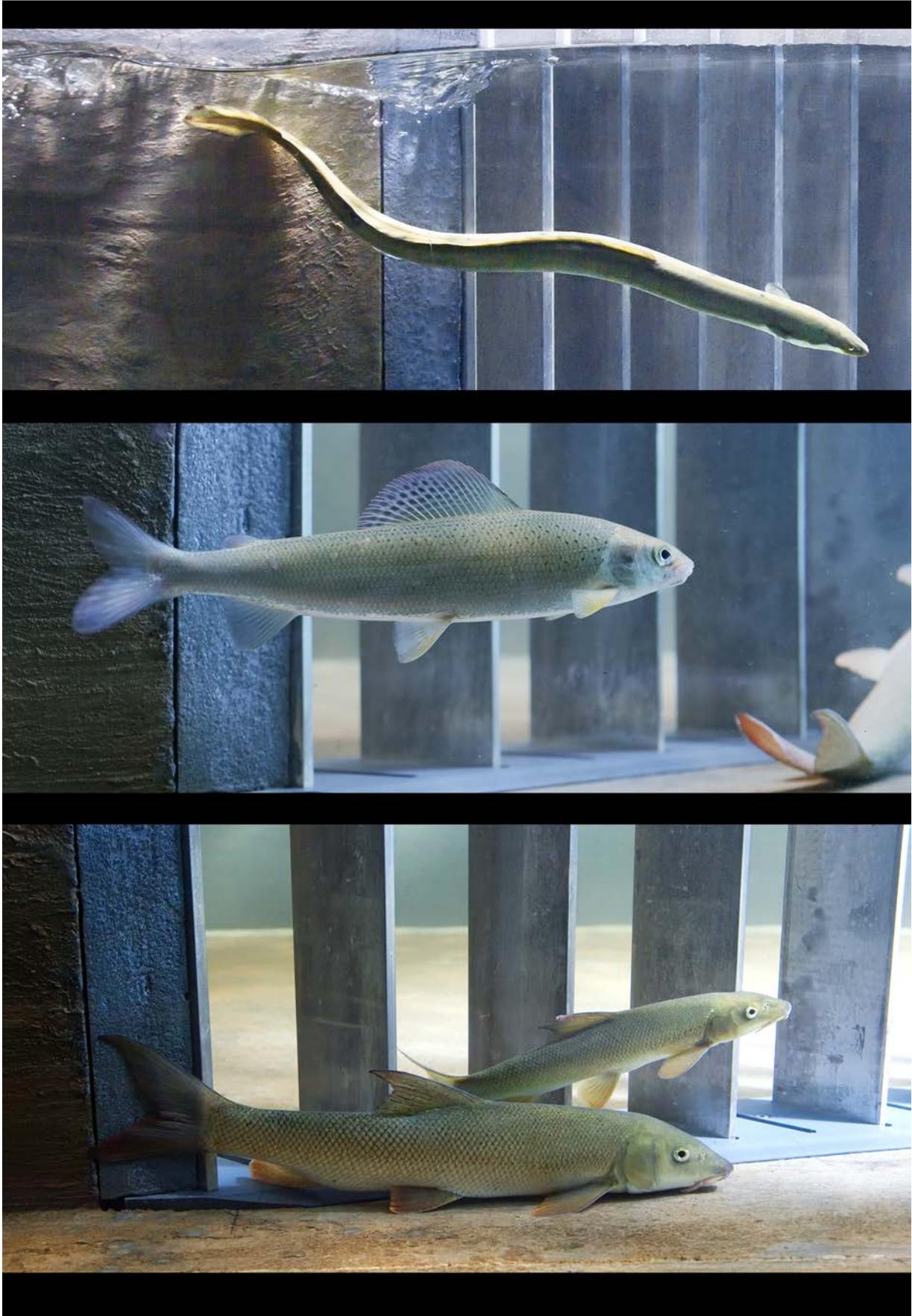


Abbildung 12: Aal (oben), Äsche und Barbe (mitte), Barben (unten).
Konfiguration oben: 30° 45° 5cm 0,6m/s. Konfiguration mitte: 15° 45° 11cm 0,6m/s. Konfiguration unten: 15° 45° 11cm 0,3m/s. Bild: David Flügel & Tamara Bös, Eawag.

3. Ergebnis - Versuchsreihe 1

3.1 Barben

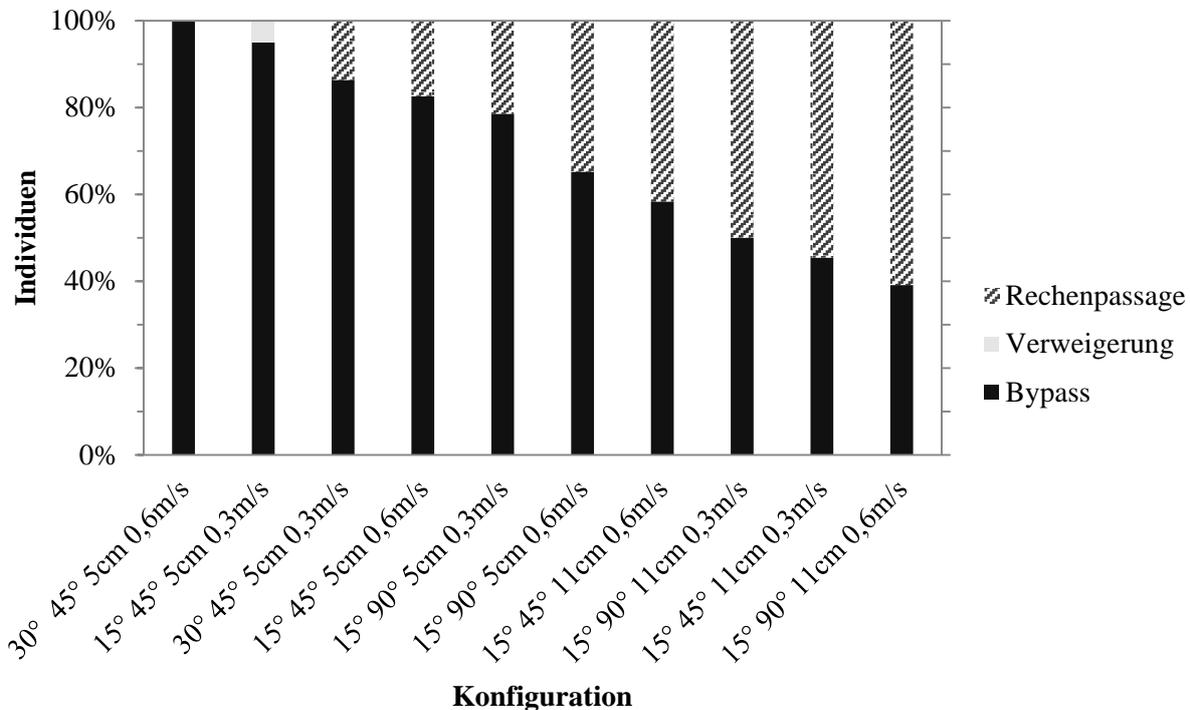


Abbildung 13: Alle mit Barben getesteten Konfigurationen der ersten Versuchsreihe. Verweigerung nach 30 min ohne Bypass-Einstieg oder Rechenpassage. Dargestellt sind Konfigurationen mit den Parametern Rechenausrichtung 15° und 30°, Stabausrichtung 90° (Louver) und 45° (Bar Rack), Stababstand 5 cm und 11 cm und Fließgeschwindigkeiten von 0,3 m/s und 0,6 m/s.

Barben liessen sich, mit der Schwanzflosse voran, solnah und mit direktem Kontakt zum Boden, stromabwärts treiben und suchten dabei direkten Kontakt zu Strukturen. Das Schwimmverhalten der Barben war von passiven Momenten gekennzeichnet. Sie lagen häufig am Boden und lösten sich durch kurze Bewegungen wieder um ohne ständige Schwimmbewegungen abwärts zu treiben. Die Barben wanderten häufig an der Scheibe, wie auch am Rechen entlang stromabwärts. Sie suchten sehr häufig Kontakt zu einer Struktur und liessen sich dementsprechend selten in der Mitte des Kanals abwärts treiben. Wanderten sie am Fenster entlang, war der Einstieg in den Bypass deutlich erleichtert. Wanderten sie jedoch am Rechen entlang ab, hatten sie immer wieder mit der Schwanzflosse Kontakt zu den einzelnen Rechenstäben. Dabei konnte die Schwanzflosse zwischen zwei Rechenstäben gelangen, was die Abwanderung der Barben deutlich erschwerte. Wenn sie mit der Schwanzflosse zwischen zwei Rechenstäben gerieten mussten sie sich erst wieder frei schwimmen bevor sie sich weiter stromabwärts treiben lassen konnten. Auch Rheotaxiswechsel (Ausrichtungsänderung zur Fließrichtung) und direktes Durchschwimmen des Kanals, mit dem Kopf voran, sind beobachtet worden, waren jedoch selten.

Deutlich mehr Rechenpassagen und weniger Bypass-Einschwimmer gab es bei den Konfigurationen mit 11 cm Stababstand und 90° Stabausrichtung. Die besten Ergebnisse ergab bei den Barben das Bar Rack (45° Stabausrichtung), bei einem Stababstand von 5 cm sowohl mit 30° Rechenausrichtung wie auch mit 15° Rechenausrichtung. Sowohl bei 0,3 m/s wie auch bei 0,6 m/s lagen die Bypass-Passagen bei über 80%.

Bei 90° Stabausrichtung (Louver) waren die Geschwindigkeitsänderungen und Turbulenzen am Rechen höher als bei 45° (Bar Rack). Dies ist den Geschwindigkeitsmessungen (Abbildung 41, S. 96, Abbildung 42, S. 97, Abbildung 43, S. 98 zu entnehmen und es ist anzunehmen, dass diese zu einer verminderten Leitwirkung führten.

Detailliertere Erläuterungen zu Geschwindigkeitsmessungen und Hydraulik können der Arbeit von Kriewitz (2015) entnommen werden.

Anhand eines Chi-Quadrat-Test (S. 41) wurde überprüft, ob die Ergebnisse von der Konfiguration abhängig sind oder auf den Zufall zurückzuführen sind. Bei diesem Test ergab sich, dass die Testergebnisse (Bypass, Verweigerung, Rechenpassage) der Versuche mit Barben abhängig von der verwendeten Konfiguration sind ($\chi^2 = 57,2455$ mit $p = 5,6e^{-6}$, exakter χ^2 nach Fischer mit $p = 0,0004998$, signifikant nach gängiger Konvention, 5% Irrtumswahrscheinlichkeit). Im Folgenden wurde jede Darstellung der Ergebnisse dem Chi-Quadrat-Test unterzogen.

Tabelle 8: Deskriptive Beschreibung des Schwimmverhaltens von Barben.

Beobachtete Verhaltensweisen wurden nur teilweise quantitativ dokumentiert (Schwanz voran, Kopf voran, solnah) und sind demnach in den folgenden fünf Kategorien angegeben: Nie - Selten - Gelegentlich- Häufig- Immer.

Verhalten	Beschreibung	Beobachtete Häufigkeit
Abwanderung	Schwanz voran	Häufig
	Kopf voran	Selten
	In der Mitte des Querschnittes	Selten
	Am Fenster	Häufig
	Am Rechen	Häufig
Höhenhorizont	Solnah	Häufig
	Wechsel des Höhenhorizontes	Sehr selten
Direkter Kontakt	Zum Boden	Häufig
	Zum Rechen	Häufig
	Zum Fenster	Häufig
Rheotaxis	Ohne Wechsel	Häufig
	Mit Wechsel	Selten
Aktivität	Ständige Bewegung	Selten
	Geringere Bewegung in Strömungsberuhigten Zonen	Häufig
	Geringe Aktivität, Ablegen, Anlehnen	Häufig

Eine weitere kritische Stelle, in Bezug auf die Abwanderung in den Bypass, war der Bereich direkt vor dem Bypass. Hier wurde beobachtet, dass Barben diesen Bereich direkt durchschwammen oder dass sie kurz davor wieder kehrt machten und an Fenster oder Rechen wieder stromaufwärts schwammen. Auch ein mehrmaliges auf und abschwimmen bis zu diesem kritischen Bereich wurde beobachtet und dass beim Aufschwimmen der Rechen durchschwommen wurde. Zudem wurde bei dem Louver, in diesem Bereich, ein Kontrollverlust, sogar ein "Flippen" des ganzen Körpers um die Achse und ein hindurchsaugen durch den Rechen beobachtet.

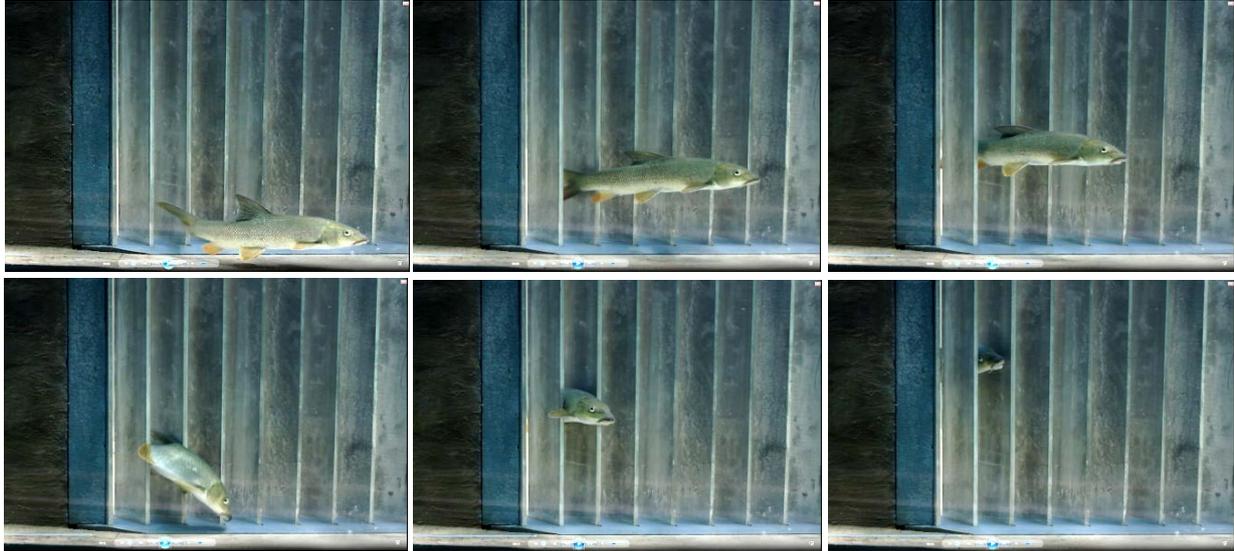


Abbildung 14: Rechenpassage einer Barbe.

Nach mehrmaligem Berühren des Rechens mit des Schwanzflosse gelangt sie zwischen die Stäbe und wird rückwärts durch den Rechen hindurch gezogen.

3.2 Schneider

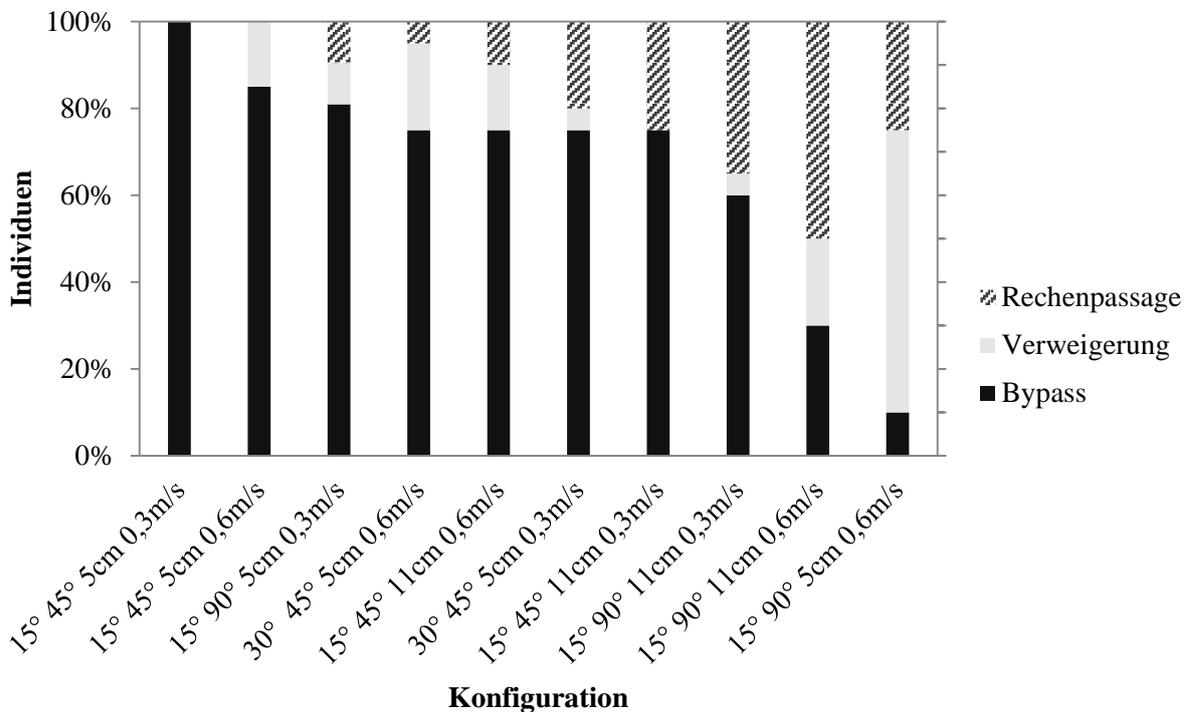


Abbildung 15: Alle mit Schneidern getesteten Konfigurationen der ersten Versuchsreihe. Verweigerung nach 30 min ohne Bypass-Einstieg oder Rechenpassage. Dargestellt sind Konfigurationen mit den Parametern Rechenausrichtung 15° und 30°, Stabausrichtung 90° (Louver) und 45° (Bar Rack), Stababstand 5 cm und 11 cm und Fließgeschwindigkeiten von 0,3 m/s und 0,6 m/s.

Schneider hielten sich durch aktive Schwimmbewegungen, solnah, mit der Schwanzflosse gegen die Strömung. Sie hatten dabei keinen direkten Kontakt zu Strukturen und legten sich nicht auf den Boden. Bei den Schneidern sind selten Wechsel des Höhenhorizontes und häufig Rheotaxiswechsel beobachtet worden. Strömungsberuhigte Bereiche vor dem Rechen, direkt an der Wand und hinter der Leitwand wurden von den Fischen häufig genutzt. Die Schneider waren immer in Bewegung und schienen immer soweit Abstand zu Strukturen zu halten, dass sie ihre Bewegung aufrechterhalten konnten.

Eine kritische Stelle, in Bezug auf die Abwanderung in den Bypass, war bei den Schneidern, genauso wie bei den Barben, der Bereich direkt vor dem Bypass. Hier wurde beobachtet, dass Schneider diesen Bereich direkt durchschwammen oder dass sie kurz davor wieder kehrten und wieder stromaufwärts schwammen. Es wurde beobachtet, dass Schneider mehrmals bis zu diesem kritischen Bereich ab und wieder aufschwammen. Zudem wurde bei einigen Schneidern, die diesen Bereich passierten, ein Kontrollverlust und ein hindurchsaugen durch den Rechen beobachtet.

Für Konfigurationen mit 11 cm Stababstand ist eine deutlich höhere Zahl an Fischen eruiert worden, die den Rechen passierten als mit 5 cm. Auch die Stabausrichtung von 90° bewirkte bei den Schneidern eine Zunahme der Rechenpassagen. Die besten Ergebnisse erreichte das Bar Rack (45° Stabausrichtung) mit 15° Rechenausrichtung und 5cm Stababstand. Sowohl bei 0,3 m/s wie auch bei 0,6m/s lagen die Bypass-Passagen bei über 80%, wobei keine Fische den Rechen passierten. Diese Konfiguration hatte auch noch bei einer Rechenausrichtung von 30°

und einer Fließgeschwindigkeit von 0,6 m/s eine sehr gute Leitwirkung, bei nur 5% Rechenpassagen.

Anhand eines Chi-Quadrat-Test (S. 41) wurde auch hier überprüft, ob ein Zusammenhang zwischen den Ergebnissen und der Konfiguration besteht oder ob das Ergebnis auf den Zufall zurückzuführen ist. Auch diese Testergebnisse (Bypass, Verweigerung, Rechenpassage) der Versuche mit Schneidern sind abhängig von der verwendeten Konfiguration ($\chi^2 = 87,97$ mit $p = 3,3e^{-11}$, exakter χ^2 nach Fischer mit $p = 0,00049$, signifikant nach gängiger Konvention, 5% Irrtumswahrscheinlichkeit).

Tabelle 9: Deskriptive Beschreibung des Schwimmverhaltens von Schneidern.

Beobachtete Verhaltensweisen wurden nur teilweise quantitativ dokumentiert (Schwanz voran, Kopf voran, solnah) und sind demnach in den folgenden fünf Kategorien angegeben: Nie - Selten - Gelegentlich - Häufig - Immer.

Verhalten	Beschreibung	Beobachtete Häufigkeit
Abwanderung	Schwanz voran	Häufig
	Kopf voran	Selten
	In der Mitte des Querschnittes	Häufig
	Am Fenster	Häufig
	Am Rechen	Gelegentlich
Höhenhorizont	Solnah	Häufig
	Wechsel des Höhenhorizontes	Selten
Direkter Kontakt	Zum Boden	Nie
	Zum Rechen	Nie
	Zum Fenster	Nie
Rheotaxis	Ohne Wechsel	Häufig
	Mit Wechsel	Häufig
Aktivität	Ständige Bewegung	Immer
	Geringere Bewegung in Strömungsberuhigten Zonen	Häufig
	Geringe Aktivität, Ablegen, Anlehnen	Nie

3.3 Stabausrichtung

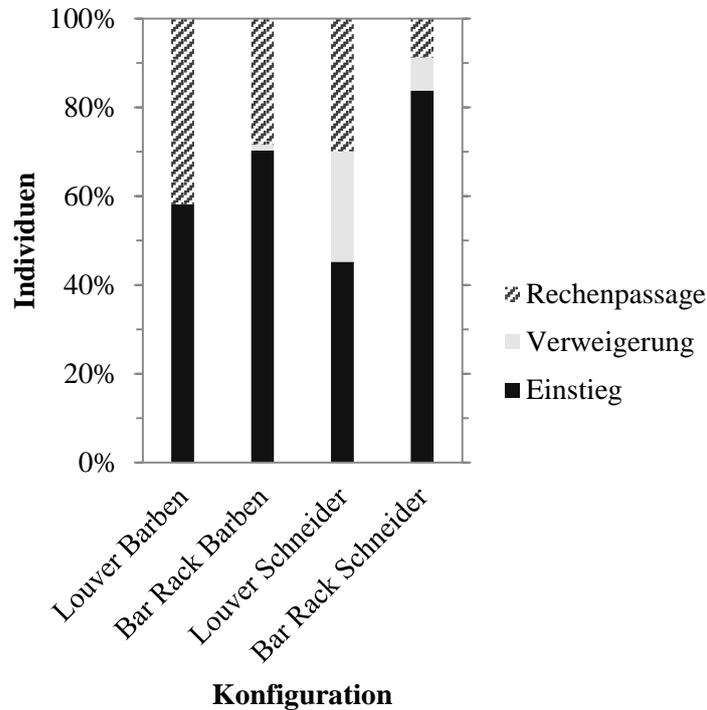


Abbildung 16: Louver im Vergleich zum Bar Rack.

Nur Barben und Schneider. Verweigerung nach 30 min ohne Bypass-Einstieg oder Rechenpassage. Zusammengefasst sind Konfigurationen mit den Parametern Rechenausrichtung 15° und 30° , Stababstand 5 cm und 11 cm und Fliessgeschwindigkeiten von 0,3 m/s und 0,6 m/s.

Der Louver erzeugte durch die stärkere Umlenkung der Strömungsrichtung, höhere Geschwindigkeitsänderungen und Turbulenzen vor dem Rechen. Besonders im letzten Drittel des Rechens, direkt vor dem Bypass, waren diese Geschwindigkeitsänderungen besonders stark (Abbildung 41, S.96). Eine grosse Komponente der Strömung ging hier nicht in Richtung Bypass, sondern in Richtung „durch den Rechen hindurch“. Zudem stieg die Geschwindigkeit bis kurz vor dem Bypass stark an und war im Bypass wieder deutlich niedriger. Dies machte sich vor allem bei den Schneidern bemerkbar, sie mieden diesen Bereich stärker, drehten oft kurz vor diesem Bereich um und schwammen wieder stromaufwärts. Viele Schneider hielten sich nach mehrmaligem Umdrehen und wieder Aufwärtsschwimmen, bis zum Ende der 30 Minuten nur noch stromaufwärts des Rechens auf. Dies ist an dem höheren Anteil an Verweigerern zu erkennen. Mit dem Louver war bei einzelnen Schneidern und Barben in diesem Bereich höherer Änderungen der Fliessgeschwindigkeit, ein Kontrollverlust zu beobachten. Ein um die Achse Drehen, Rotieren und einzelne Fische, die rückwärts durch den Louver gezogen wurden, wurden beobachtet.

Bei dem Bar Rack war das Verhalten der Fische in diesem Bereich deutlich ruhiger und kontrollierter. Vor allem Schneider passierten das letzte Drittel vor dem Bypass schneller und drehten seltener um. Die Geschwindigkeitsmessungen (Abbildung 41, S. 96, Abbildung 42, S. 97, Abbildung 43, S. 98) veranschaulichen, dass am letzten Drittel des Louvers höhere Geschwindigkeitsänderungen auftraten. Bei dem Bar Rack war der Geschwindigkeitsanstieg entlang des Rechens weniger steil und homogener bis in den Bypass hinein.

Eine weitergehende Analyse der Strömungsverhältnisse wurde von Kriewitz (2015) durchgeführt.

Wie auch in den einzelnen Versuchen von Schneidern und Barben zu sehen, ergaben sich für die Zusammenfassung der Versuche nach Louver und Bar Rack (Stabausrichtung) mehr Bypass-Einstiege und weniger Rechenpassagen für das Bar Rack als für den Louver. Zudem ergaben die Versuche mit Schneidern mehr Verweigerer mit dem Louver.

Die Testergebnisse (Bypass, Verweigerung, Rechenpassage) aller Versuche mit Barben und Schneidern, für 45° oder 90° Stabausrichtung zusammengefasst, sind nach einem Chi-Quadrat-Test abhängig von der untersuchten Stabausrichtung (Schneider: $\chi^2 = 29,9251$ mit $p = 1,42e^{-6}$; Barben: $\chi^2 = 10,7001$ mit $p = 0,004748$, exakter χ^2 nach Fischer mit $p = 0,002148$, signifikant nach gängiger Konvention, 5% Irrtumswahrscheinlichkeit).

3.4 Stababstand

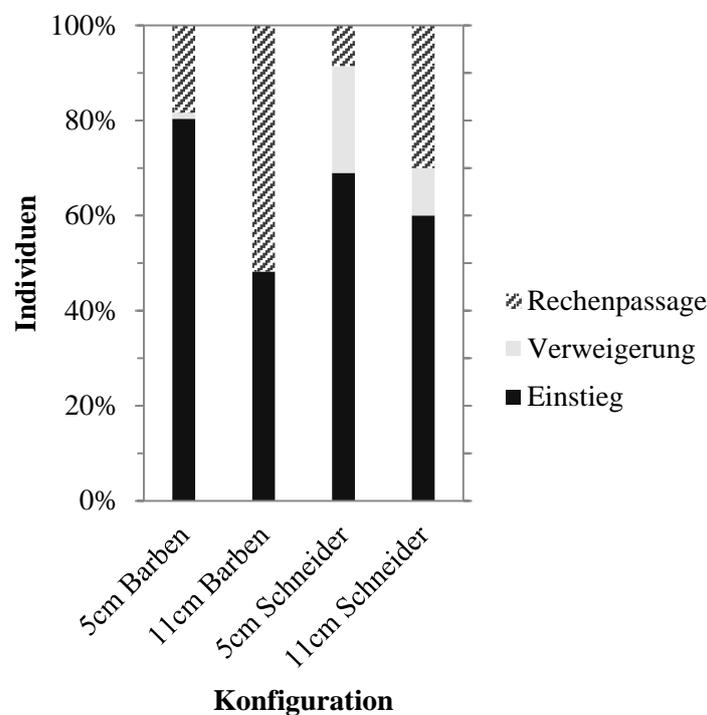


Abbildung 17: Vergleich der Stababstände 5 cm und 11 cm.

Nur Barben und Schneider. Verweigerung nach 30 min ohne Bypass-Einstieg oder Rechenpassage. Zusammengefasst sind Konfigurationen mit den Parametern Rechenausrichtung 15° und 30°, Stabausrichtung 90° (Louver) und 45° (Bar Rack), Fließgeschwindigkeiten von 0,3 m/s und 0,6 m/s.

Eine Vergrößerung des Stababstandes von 5 cm auf 11 cm hatte bei Barben und Schneidern mehr Rechenpassagen und weniger Bypass-Einschwimmer zur Folge.

Für Barben hatte eine Erhöhung des Stababstandes eine grössere Auswirkung als für Schneider. Bei 15° 45° 5cm 0,3m/s (Abbildung 13) hatte die Erhöhung des Stababstandes auf 15° 45° 11cm 0,3m/s beispielsweise eine Verminderung der Bypass-Einstiege von 95% auf 45,5% zur Folge.

Die Testergebnisse (Bypass, Verweigerung, Rechenpassage) aller Versuche mit Barben und Schneidern, für 5 cm oder 11 cm Stababstand zusammengefasst, sind nach einem Chi-

Quadrat-Test abhängig von dem untersuchten Stababstand (Schneider: $\chi^2 = 14,2645$ mit $p = 0,00079$; Barben: $\chi^2 = 36,2529$ mit $p = 1,3e^{-8}$, exakter χ^2 nach Fischer mit $p = 4,5e^{-9}$, signifikant nach gängiger Konvention, 5% Irrtumswahrscheinlichkeit).

3.5 Fliessgeschwindigkeit

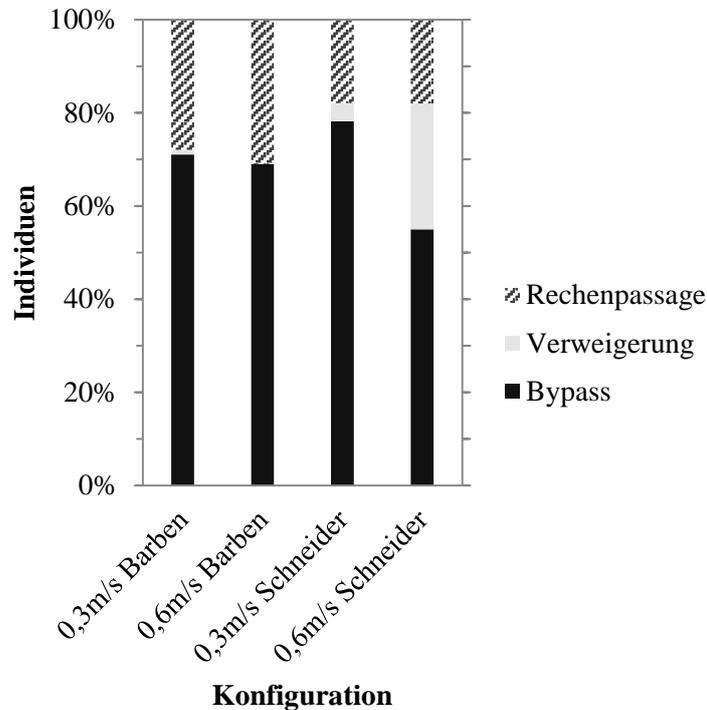


Abbildung 18: Vergleich der Fliessgeschwindigkeiten 0,3 m/s und 0,6 m/s.

Nur Barben und Schneider. Verweigerung nach 30 min ohne Bypass-Einstieg oder Rechenpassage. Zusammengefasst sind Konfigurationen mit den Parametern Rechenausrichtung 15° und 30° , Stabausrichtung 90° (Louver) und 45° (Bar Rack), Stababstand 5 cm und 11 cm.

Die statistische Auswertung der Versuche mit Barben und Schneidern, für 0,3 m/s und 0,6 m/s Fliessgeschwindigkeit zusammengenommen, ergeben ein differenziertes Bild für die jeweilige Fischart. Während bei Barben kein Unterschied festgestellt wurde, reagierten Schneider auf die erhöhten Geschwindigkeitsänderungen und Turbulenzen. Bei höherer Fliessgeschwindigkeit mieden sie vermehrt den Bereich des letzten Rechendrittels, direkt vor dem Bypass. Bis zu dieser Stelle wurde ein häufiges auf- und abschwimmen beobachtet. Durch ihre kleine Grösse wurden sie deutlich stärker durch Geschwindigkeitsänderungen und Turbulenzen beeinflusst. Die statistische Auswertung durch einen Chi-Quadrat-Test ergab, dass bei Barben die Testergebnisse (Bypass, Verweigerung, Rechenpassage) unabhängig von der untersuchten Fliessgeschwindigkeit sind. Die leicht unterschiedlichen Anzahlen von Bypass, Verweigerung und Rechenpassage sind demnach bei Barben nicht auf die Fliessgeschwindigkeit zurückzuführen ($\chi^2 = 1,1814$ mit $p = 0,5539$, exakter χ^2 nach Fischer mit $p = 0,7209$ nicht signifikant nach gängiger Konvention, 5% Irrtumswahrscheinlichkeit).

Für Schneider jedoch sind die Testergebnisse abhängig von der untersuchten Fliessgeschwindigkeit ($\chi^2 = 21,5386$ mit $p = 2,3e^{-5}$, signifikant nach gängiger Konvention, 5% Irrtumswahrscheinlichkeit).

Bei genauerer Untersuchung ergibt sich jedoch für die Schneider ein Zusammenhang zwischen dem Testergebnis "Verweigerung" und der Fliessgeschwindigkeit, jedoch kein Zusammenhang zwischen dem Testergebnis "Rechenpassage" und Fliessgeschwindigkeit (Verweigerung: $\chi^2 = 20,3745$ mit p (simuliert) = 0,00049, signifikant nach gängiger Konvention, 5% Irrtumswahrscheinlichkeit; Rechenpassage: $\chi^2 = 1,545$ mit p (simuliert) = 0,5332, nicht signifikant nach gängiger Konvention, 5% Irrtumswahrscheinlichkeit).

Daraus lässt sich folgern, dass die höhere Fliessgeschwindigkeit von 0,6 m/s bei Schneidern zu einer höheren Anzahl an Verweigerern, jedoch nicht zu einer höheren Anzahl an Rechenpassagen führte.

3.6 Schneider-Schwärme

Im Schwarm wurden die Schneider zu je zehn Fischen, bei der Konfiguration 30° 45° 5cm 0,6m/s untersucht. Es wurden zehn Versuche, mit je zehn Fischen durchgeführt, in welchen die Schneider das erste Mal in den Kanal eingesetzt wurden und zehn Versuche in denen die Fische das zweite Mal eingesetzt wurden. Sie zeigten dabei eine genauso hohe Bereitschaft in den Bypass einzuschwimmen, wie einzelne Schneider. Sie erschienen als Schwarm noch mutiger und bereitwilliger in den Bypass einzuschwimmen.

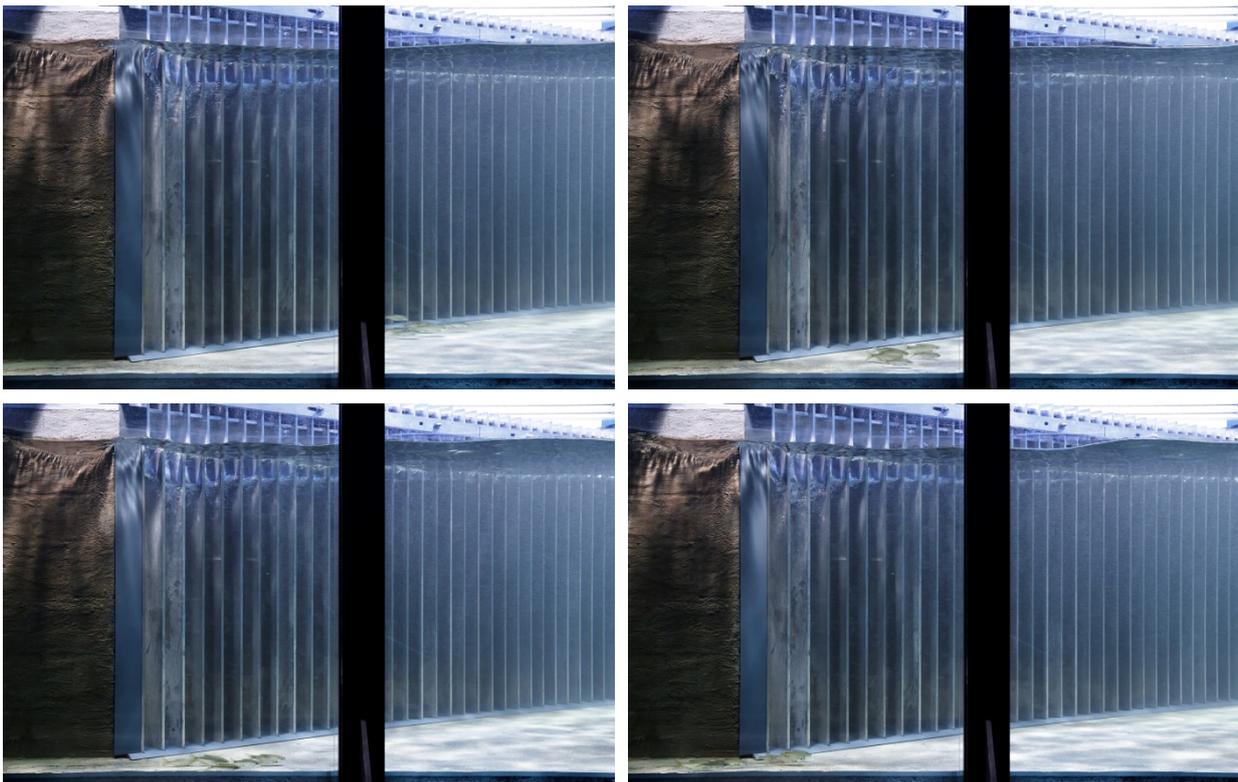


Abbildung 19: Schneiderschwarm von zehn Fischen am Rechen.
Das Verhalten des Schwarmes entspricht dem Verhalten eines einzelnen Fisches.

Die Schwärme waren dabei nicht konstant, sie trennten sich auf, bildeten sich neu, einzelne Fische spalteten sich ab und verbanden sich wieder mit einem Schwarm. Zum Teil ergaben sich zwei oder mehr Schwärme zu mehreren Fischen, die getrennt einschwammen. Dies machte eine quantitative Erfassung und einen Vergleich mit den Einzelfischen unmöglich. Zudem war es nicht möglich einzelne Fische zu verfolgen und später den gemessenen Grössen zuzuordnen.

Die Dimensionierung des Bypasses (in der Breite) erwies sich für Schneider im Schwarm als gross genug, genauso wie für die Einzelfische. Auch die Reaktion auf den Bereich direkt vor dem Bypass, an welchem die Fische dem Rechen besonders nah kamen, war vergleichbar zu den Einzelfischen (Abbildung 19, S. 53).

3.7 Fazit und Schlussfolgerungen

Die Abwanderung von Barben entlang des Rechens wurde durch das Entlangtasten mit der Schwanzflosse an den Rechenstäben behindert. Die Barben gelangten dabei zwischen die Rechenstäbe und mussten wieder kurzzeitig stromaufwärts schwimmen um weiter abwandern zu können.

Hier lag die Schlussfolgerung nahe, dass ein Leitblech, mit geringer Höhe, den Barben das Abwandern erheblich erleichtern würde. Die Barben haben sich immer auf dem Boden befunden, wodurch das Leitblech nicht sehr hoch sein musste, in diesem Falle wurde entschieden in der nächsten Versuchsreihe ein Leitblech mit einer Höhe von 10 cm zu testen (Abbildung 8, S.34).

Das Bar Rack und ein Stababstand von 5 cm hatten in dieser ersten Versuchsreihe eine höhere Leiteffizienz als der Louver und ein Stababstand von 11 cm. Weitere Versuche, mit anderen Fischarten, sollten deshalb mit dem Bar Rack, bei 5cm Stababstand getestet werden.

Ein Kontrollversuch sollte zeigen, ob die Leitwirkung der Rechens durch die entstehenden Turbulenzen erzeugt wurde oder durch eine reine Barrierewirkung. Deshalb wurde in der zweiten Versuchsreihe eine Konfiguration mit 0° Stabausrichtung getestet.

4. Ergebnis - Versuchsreihe 2

4.1 Barben

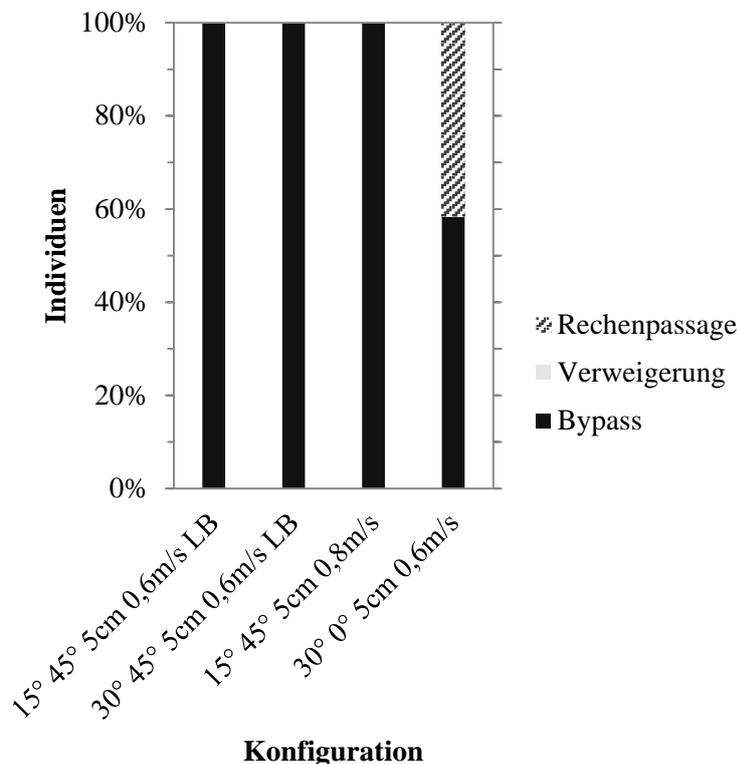


Abbildung 20: Alle mit Barben getesteten Konfigurationen der zweiten Versuchsreihe.

Verweigerung nach 30 min ohne Bypass-Einstieg oder Rechenpassage. Konfigurationen mit den Parametern Rechenausrichtung 30°, Stabausrichtung 45° (Bar Rack) und 0° (Kontrolle), Stababstand 5 cm, Fliessgeschwindigkeit 0,6 m/s und 0,8 m/s, mit und ohne Leitblech (LB).

Durch die Installation eines Leitbleches schwammen 100% der Barben in den Bypass ein. Nicht den Grafiken zu entnehmen ist, dass alle Barben, die am Rechen und nicht am Fenster entlang abgewanderten, direkten Kontakt mit dem Leitblech hatten und flüssig durch die Längsströmung daran entlang in den Bypass geleitet wurden. Sie kamen nicht mehr mit dem Rechen in Kontakt, ein Anstossen der Schwanzflossen an die Rechenstäbe kam nicht mehr vor. Einige Barben liessen sich am Leitblech entlang etwas nach oben treiben, gelangten dort kurzzeitig in eine Querströmung, in Richtung „durch den Rechen hindurch“. Alle Barben reagierten darauf, in dem sie sofort wieder zum Boden abtauchten, hin zum Leitblech und zur Strömung, die an diesem entlang in Richtung Bypass führte. In den Geschwindigkeitsmessungen von Kriewitz (2015) ist zu erkennen, dass entlang des Leitbleches eine Längsströmung in den Bypass hinein führte. Zudem entstand am Boden ein konstanterer Geschwindigkeitsanstieg bis in den Bypass hinein (Abbildung 42, S. 97, Abbildung 43, S. 98).

Geschwindigkeitsmessungen, weitergehende Untersuchungen zur Hydraulik und dem Aufbau des Kanals sowie des Rechens sind von Kriewitz (2015) durchgeführt worden.

Prozentual gab es keinen Unterschied zwischen der Konfiguration 30° 45° 5cm 0,6m/s, die in der ersten Versuchsreihe getestet wurde und derselben mit Leitblech. In beiden wurden 100% der Barben in den Bypass eingeleitet. Jedoch gelangten die Barben mit Leitblech sehr viel störungsfreier, flüssiger, ohne ein Anstossen der Schwanzflossen an die Rechenstäbe, in den Bypass.

Der Versuch die Konfiguration 15° 45° 5cm mit noch höherer Fliessgeschwindigkeit (0,8 m/s, ohne Leitblech) zu testen, ergab für die Barben 100% Einschwimmen in den Bypass.

Die Kontrollversuche mit den Barben und einer Stabausrichtung von 0° ergaben, dass 41,7% der Barben den Rechen durchschwammen.

Anhand eines Chi-Quadrat-Test (S. 41) wurde überprüft, ob die Ergebnisse von der Konfiguration abhängig sind oder auf den Zufall zurückzuführen sind. Die Testergebnisse (Bypass, Verweigerung, Rechenpassage) der Versuche mit Barben, der zweiten Versuchsreihe wurden mit den Ergebnissen der ersten Versuchsreihe zusammengenommen. So untersucht, sind die Testergebnisse abhängig von der verwendeten Konfiguration ($\chi^2 = 96,967$ mit $p = 4,07 \cdot 10^{-10}$, signifikant nach gängiger Konvention, 5% Irrtumswahrscheinlichkeit).

4.2 Schneider

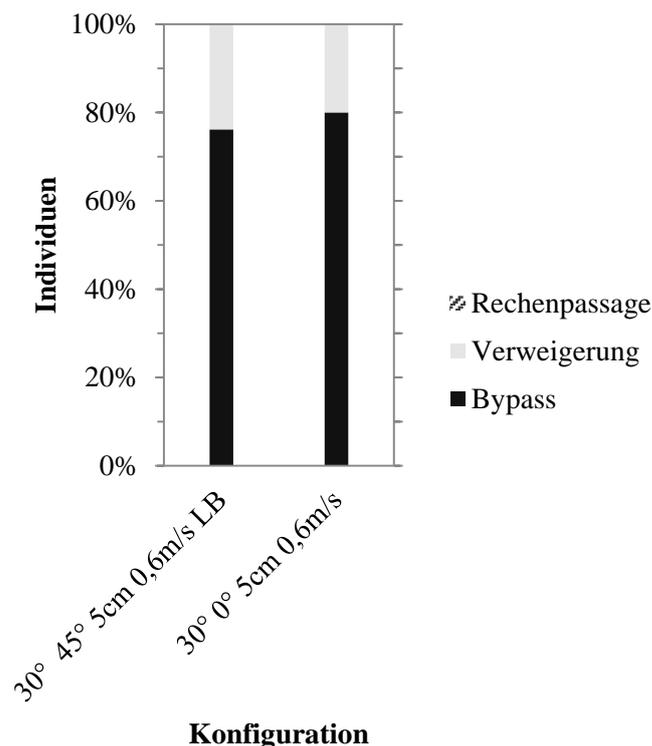


Abbildung 21: Alle mit Schneidern getesteten Konfigurationen der zweiten Versuchsreihe.

Verweigerung nach 30 min ohne Bypass-Einstieg oder Rechenpassage. Konfigurationen mit den Parametern Rechenausrichtung 30°, Stabausrichtung 45° (Bar Rack) und 0° (Kontrolle), Stababstand 5 cm und Fliessgeschwindigkeit 0,6 m/s.

Auch Schneider wanderten fast immer solnah ab, deshalb hatte das Leitblech auf sie die gleiche Wirkung wie auf die Barben. Die ausgeprägte Längsströmung entlang des Leitbleches bis in den Bypass hinein, erleichterte auch den Schneidern die Abwanderung erheblich. Direkt vor

dem Leitblech gab es keine Querströmung mehr und dort wanderten auch die Schneider in fast allen Versuchen ab. In diesem Versuch mit Leitblech gab es keine Schneider, die den Rechen passierten, jedoch noch immer Schneider, die innerhalb von 30 Minuten weder den Bypass noch den Rechen passierten.

Der Kontrollversuch, mit 0° Stabausrichtung, hatte auf die Schneider eine deutlich andere Auswirkung als auf Barben. Kein Schneider passierte den Rechen, es wurden 4% mehr Fische in den Bypass eingeleitet wie mit Leitblech, denn die Verweigerer-Rate ist etwas geringer.

Die Testergebnisse (Bypass, Verweigerung, Rechenpassage) der Versuche mit Schneidern, der ersten und zweiten Versuchsreihe zusammengenommen, sind abhängig von der verwendeten Konfiguration ($\chi^2 = 100,4696$ mit $p = 2,47e^{-11}$, signifikant nach gängiger Konvention, 5% Irrtumswahrscheinlichkeit).

4.3 Bachforellen

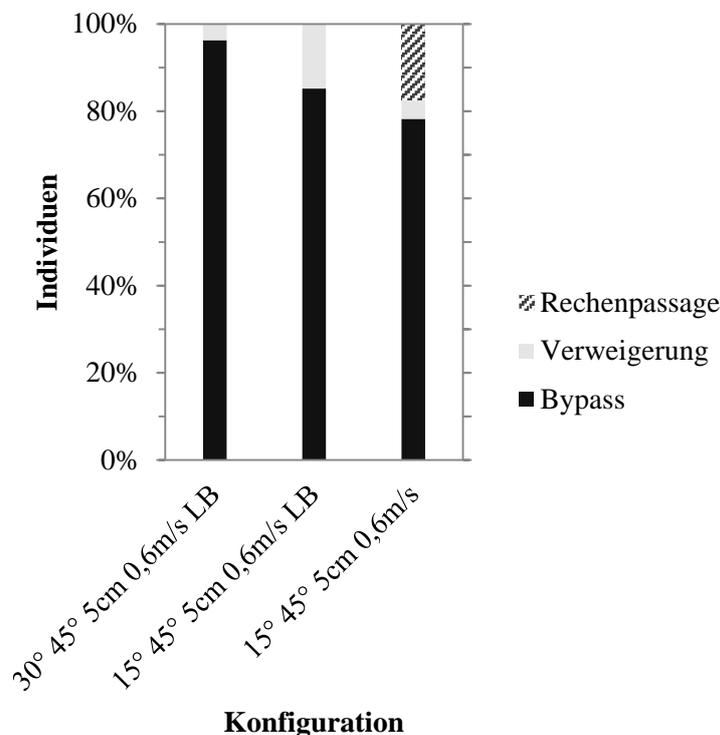


Abbildung 22: Alle mit Bachforellen getesteten Konfigurationen der zweiten Versuchsreihe. Verweigerung nach 30 min ohne Bypass-Einstieg oder Rechenpassage. Konfigurationen mit den Parametern Rechenausrichtung 30° und 15°, Stabausrichtung 45° (Bar Rack), Stababstand 5 cm und Fließgeschwindigkeit 0,6 m/s.

Bachforellen wurden zunächst mit der Konfiguration 15° 45° 5cm 0,6m/s getestet. Bei dieser Konfiguration passierten 17,4% der Bachforellen der Rechen. Auch die Bachforellen wanderten fast immer solnah ab und hatten direkten Kontakt mit dem Boden, dem Rechen oder dem Fenster. Sie nutzten dabei ihre Brustflossen um sich, fast ohne Aktivität, auf dem Boden niederzulassen. In diesem Verhalten gleichen sie sehr den Barben, deshalb lag die Vermutung nahe, dass auch bei Bachforellen ein Leitblech den Kontakt zum Rechen verhindern würde.

Mit dem Leitblech passierten keine Bachforellen den Rechen. Sie hatten schnell direkten Kontakt zum Leitblech und glitten an diesem entlang in den Bypass. Die gleiche Konfiguration mit 30° Rechenausrichtung hatte mit den Bachforellen annähernd dasselbe Ergebnis. Keine Rechenpassagen und etwas weniger Verweigerer.

Für die Testergebnisse (Bypass, Verweigerung, Rechenpassage) der Versuche mit Bachforellen, ist kein Zusammenhang zu der verwendeten Konfiguration ermittelt worden ($\chi^2 = 0,8816$ mit $p = 0,3475$, nicht signifikant nach gängiger Konvention, 5% Irrtumswahrscheinlichkeit). Aufgrund der geringen Fallzahlen ist es nicht möglich die unterschiedlichen Anzahlen von Bypass, Verweigerung und Rechenpassage auf die Konfiguration zurückzuführen.

Tabelle 10: Deskriptive Beschreibung des Schwimmverhaltens von Bachforellen.

Beobachtete Verhaltensweisen wurden nur teilweise quantitativ dokumentiert (Schwanz voran, Kopfvoran, solnah) und sind demnach in den folgenden fünf Kategorien angegeben: Nie - Selten - Gelegentlich - Häufig - Immer.

Verhalten	Beschreibung	Beobachtete Häufigkeit
Abwanderung	Schwanz voran	Häufig
	Kopf voran	Selten
	In der Mitte des Querschnittes	Häufig
	Am Fenster	Häufig
	Am Rechen	Häufig
Höhenhorizont	Solnah	Häufig
	Wechsel des Höhenhorizontes	Selten
Direkter Kontakt	Zum Boden	Häufig
	Zum Rechen	Häufig
	Zum Fenster	Häufig
Rheotaxis	Ohne Wechsel	Häufig
	Mit Wechsel	Selten
Aktivität	Ständige Bewegung	Selten
	Geringere Bewegung in Strömungsberuhigten Zonen	Häufig
	Geringe Aktivität, Ablegen, Anlehnen	Häufig

4.4 Aale

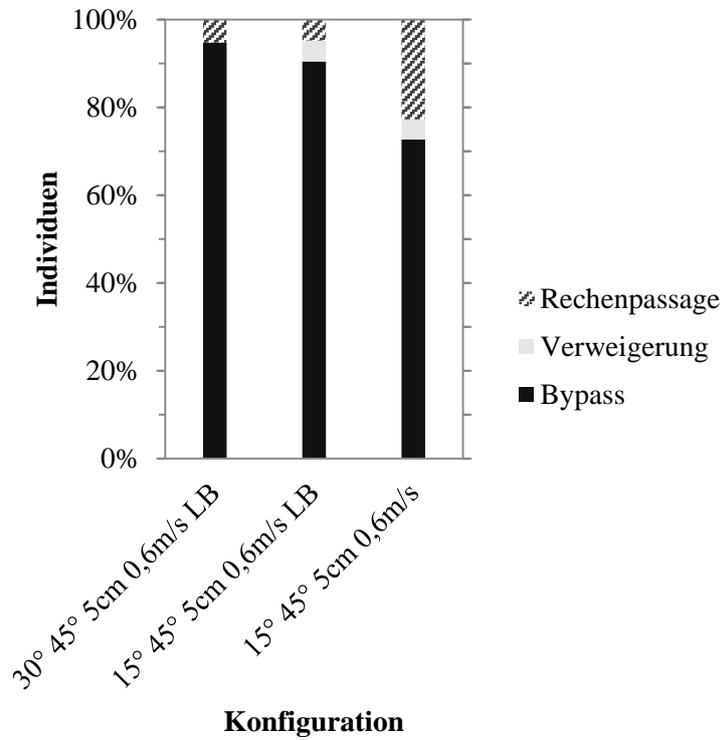


Abbildung 23: Alle mit Aalen getesteten Konfigurationen der zweiten Versuchsreihe.

Verweigerung nach 30 min ohne Bypass-Einstieg oder Rechenpassage. Konfigurationen mit den Parametern Rechenausrichtung 30° und 15°, Stabausrichtung 45° (Bar Rack), Stababstand 5 cm, Fließgeschwindigkeit 0,6 m/s, mit und ohne Leitblech (LB).

Ohne Leitblech, mit 15° Rechenausrichtung, 45° Stabausrichtung, 5 cm Stababstand und 0,6 m/s, passierten 23% der Aale den Rechen. Auch die Aale befanden sich fast immer solnah und liessen sich dabei zumeist ohne Aktivität abtreiben. Teils mit dem Schwanz voran, oft auch zu einem Kreis geschlungen, dabei also mit dem Schwanz und dem Kopf voran. Bei Kontakt mit dem Rechen, reagierten die Aale oft schlagartig, fluchtartig, mit schnellem Stromauswärtsschwimmen oder mit einer Passage der Rechen. Aale zeigten häufiger Wechsel des Höhenhorizontes und trafen vor allem öfter weiter oben auf den Rechen als die anderen hier untersuchten Fischarten. Doch auch bei den Aalen wurde ein solches Verhalten nur gelegentlich beobachtet. Der Grossteil der Aale wanderte solnah ab.

Da der Grossteil der Aale direkt über dem Grund abtrieb erleichtert auch hier das Leitblech die Abwanderung. Kamen die Aale mit dem Leitblech anstatt dem Rechen in Kontakt, liessen sich sich daran entlang in den Bypass treiben. Die Rechenpassagen sanken so auf 5%, bei beiden Rechenausrichtungen. Diese 5% trieben nicht solnah ab, kamen über dem Leitblech mit dem Rechen in Kontakt und zeigten das gleiche Verhalten wie ohne Leitblech. Es ist dementsprechend ausschlaggebend wie viele Aale solnah abwandern und durch ein Leitblech effektiv vom Rechen ferngehalten werden. Wie viele Aale unter natürlichen Bedingungen solnah abwandern würden, wenn sie auf einen solchen Rechen treffen würden, ist eine Frage die im Folgenden untersucht werden sollte, auch für die anderen Fischarten.

Für die Testergebnisse (Bypass, Verweigerung, Rechenpassage) der Versuche mit Aalen, ist mit einem Chi-Quadrat-Test keine Abhängigkeit von der verwendeten Konfiguration ermittelt worden ($\chi^2 = 0,9294$ mit $p = 0,6283$, nicht signifikant nach gängiger Konvention, 5% Irrtumswahrscheinlichkeit). Aufgrund der geringen Fallzahlen ist es nicht möglich die unterschiedlichen Anzahlen von Bypass, Verweigerung und Rechenpassage auf die Konfiguration zurückzuführen.

Tabelle 11: Deskriptive Beschreibung des Schwimmverhaltens von Aalen.

Beobachtete Verhaltensweisen wurden nur teilweise quantitativ dokumentiert (Schwanz voran, Kopfvoran, solnah) und sind demnach in den folgenden fünf Kategorien angegeben: Nie - Selten - Gelegentlich - Häufig - Immer.

Verhalten	Beschreibung	Beobachtete Häufigkeit
Abwanderung	Schwanz voran	Häufig
	Kopf voran	Häufig
	In der Mitte des Querschnittes	Häufig
	Am Fenster	Häufig
	Am Rechen	Häufig
Höhenhorizont	Solnah	Häufig
	Wechsel des Höhenhorizontes	Gelegentlich
Direkter Kontakt	Zum Boden	Häufig
	Zum Rechen	Häufig
	Zum Fenster	Häufig
Rheotaxis	Ohne Wechsel	Selten
	Mit Wechsel	Häufig
Aktivität	Ständige Bewegung	Selten
	Geringere Bewegung in Strömungsberuhigten Zonen	Gelegentlich
	Geringe Aktivität, Ablegen, Anlehnen	Häufig

4.5 Äschen

Die Äschen wurden nur bei einer Konfiguration, mit und ohne Leitblech getestet. Sowohl mit, wie auch ohne Leitblech sind keine Rechenpassagen ermittelt worden. Jedoch hielten sich viele Äschen ohne Leitblech direkt vor dem Bypass und dort direkt vor den letzten Rechenstäben, mit geringer Aktivität im Bereich der stärksten Strömung und zeigten kein Interesse in den Bypass ein oder durch den Rechen hindurch zu schwimmen. Die Äschen hielten sich hauptsächlich solnah, ohne sich dabei auf dem Boden abzusetzen. Sie hielten immer eine Schwimmbewegung bei und vermieden den direkten Kontakt mit Strukturen. Mit Leitblech entstand eine Strömung am Boden, entlang des Leitbleches und in den Bypass hinein (Abbildung 43, S. 98). Dies zeigt wie wichtig eine optimale Anströmung des Bypasses in Kombination mit dem verwendeten Rechen ist. Durch Veränderungen im Bypassdesign könnte die Anströmung des Bypasses weiter optimiert werden und sollte in folgenden Untersuchungen im Focus stehen.

Für die Testergebnisse (Bypass, Verweigerung, Rechenpassage) der Versuche mit Äschen, ist keine Abhängigkeit von der verwendeten Konfiguration ermittelt worden ($\chi^2 = -$ mit $p = -$, Test nicht möglich). Auch hier ist es, aufgrund der geringen Fallzahlen, nicht möglich die unterschiedlichen Anzahlen von Bypass, Verweigerung und Rechenpassage auf die Konfiguration zurückzuführen.

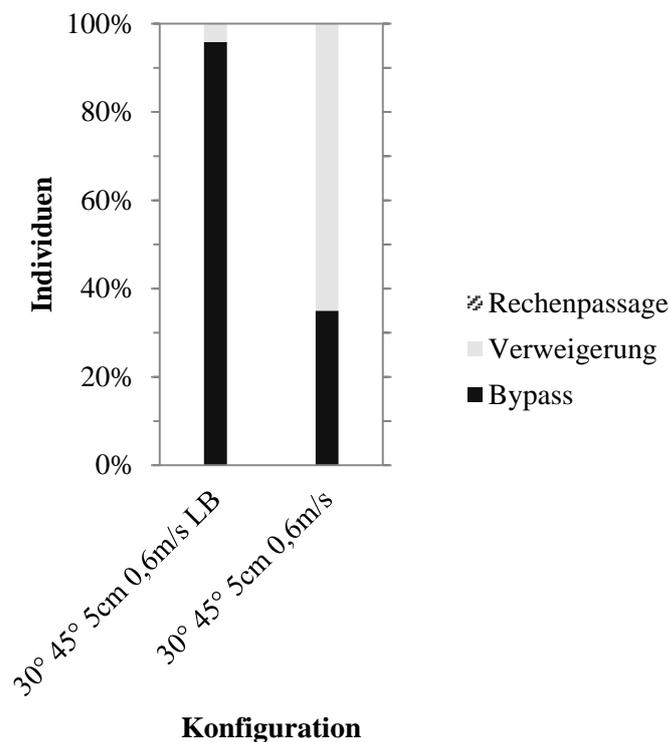


Abbildung 24: Alle mit Äschen getesteten Konfigurationen der zweiten Versuchsreihe.

Verweigerung nach 30 min ohne Bypass-Einstieg oder Rechenpassage. Konfigurationen mit den Parametern Rechenausrichtung 30°, Stabausrichtung 45° (Bar Rack), Stababstand 5cm und Fließgeschwindigkeit 0,6 m/s, mit und ohne Leitblech.

Tabelle 12: Deskriptive Beschreibung des Schwimmverhaltens von Äschen.

Beobachtete Verhaltensweisen wurden nur teilweise quantitativ dokumentiert (Schwanz voran, Kopfvoran, solnah) und sind demnach in den folgenden fünf Kategorien angegeben: Nie - Selten - Gelegentlich - Häufig - Immer.

Verhalten	Beschreibung	Beobachtete Häufigkeit
Abwanderung	Schwanz voran	Häufig
	Kopf voran	Selten
	In der Mitte des Querschnittes	Häufig
	Am Fenster	Häufig
	Am Rechen	Häufig
Höhenhorizont	Solnah	Häufig
	Wechsel des Höhenhorizontes	Selten
Direkter Kontakt	Zum Boden	Selten
	Zum Rechen	Selten
	Zum Fenster	Selten
Rheotaxis	Ohne Wechsel	Häufig
	Mit Wechsel	Selten
Aktivität	Ständige Bewegung	Immer
	Geringere Bewegung in Strömungsberuhigten Zonen	Häufig
	Geringe Aktivität, Ablegen, Anlehnen	Nie

4.6 Leitblech

Für alle getesteten Fischarten ergaben sich weniger Rechenpassagen und mehr Bypass-Einstiege wenn ein Leitblech installiert wurde. Da alle Fischarten fast immer solnah abwanderten kamen sie nur mit dem Leitblech und nicht mehr mit den Rechenstäben in Kontakt. Nur Aale liessen sich auch in höheren Wasserschichten abtreiben und hatten dann oberhalb des Leitbleches mit dem Rechen Kontakt. Entlang des Leitbleches entstand eine Längsströmung, die bis in den Bypass hinein führte und allen Fischen so die Abwanderung erheblich erleichterte. Dies ist deutlich anhand der Geschwindigkeitsmessungen von Kriewitz (2015) zu erkennen (Abbildung 42 c+d, S.97; Abbildung 43 c+d, S.98).

Die Wirkung des Leitbleches ist davon abhängig auf welcher Wassertiefe die Fische abwandern. In diesen Versuchen wanderte der Grossteil aller Fische solnah ab. Ob dies auch unter natürlichen Bedingungen gegeben ist bleibt fraglich und sollte in weiteren Untersuchungen geklärt werden.

Nach einem Chi-Quadrat-Test sind bei Barben, Forellen und Äschen die Testergebnisse (Bypass, Verweigerung, Rechenpassage) abhängig von der Installation eines Leitbleches (Barben: $\chi^2 = 18,4747$ mit $p = 0,0005$, Cramer's $V = 0,2387$, Effektstärke = schwach; Forellen: $\chi^2 = 10,1793$ mit $p = 0,0064$, Cramer's $V = 0,3635$, Effektstärke = mittel; Äschen: $\chi^2 = 15,9107$ mit $p = 6,64e^{-5}$, Cramer's $V = 0,6503$, Effektstärke = mittel; signifikant nach gängiger

Konvention, 5% Irrtums-wahrscheinlichkeit). Für Schneider und Aale ist für die Testergebnisse kein Zusammenhang zum Einsatz eines Leitbleches ermittelt worden (Schneider: $\chi^2 = 4,3407$ mit $p = 0,1214$, Cramer's $V = 0,1333$, Effektstärke = schwach; Aale: $\chi^2 = 14,7839$ mit $p = 0,1044$, Cramer's $V = 0,2777$, Effektstärke = schwach; nicht signifikant nach gängiger Konvention, 5% Irrtumswahrscheinlichkeit).

Für alle Fischarten zusammen sind, wiederum mit einem Chi-Quadrat-Test analysiert, die Testergebnisse (Bypass, Verweigerung, Rechenpassage) abhängig von der Installation eines Leitbleches (: $\chi^2 = 48,1747$ mit $p = 3,459e^{-11}$, signifikant nach gängiger Konvention, 5% Irrtumswahrscheinlichkeit).

Dies entspricht auch den Analysen der multivariaten Regression. Sie ermittelt einen signifikanten Einfluss des Leitbleches auf den Bypass-Einstieg (Multivariate Regression - glm, S. 67).

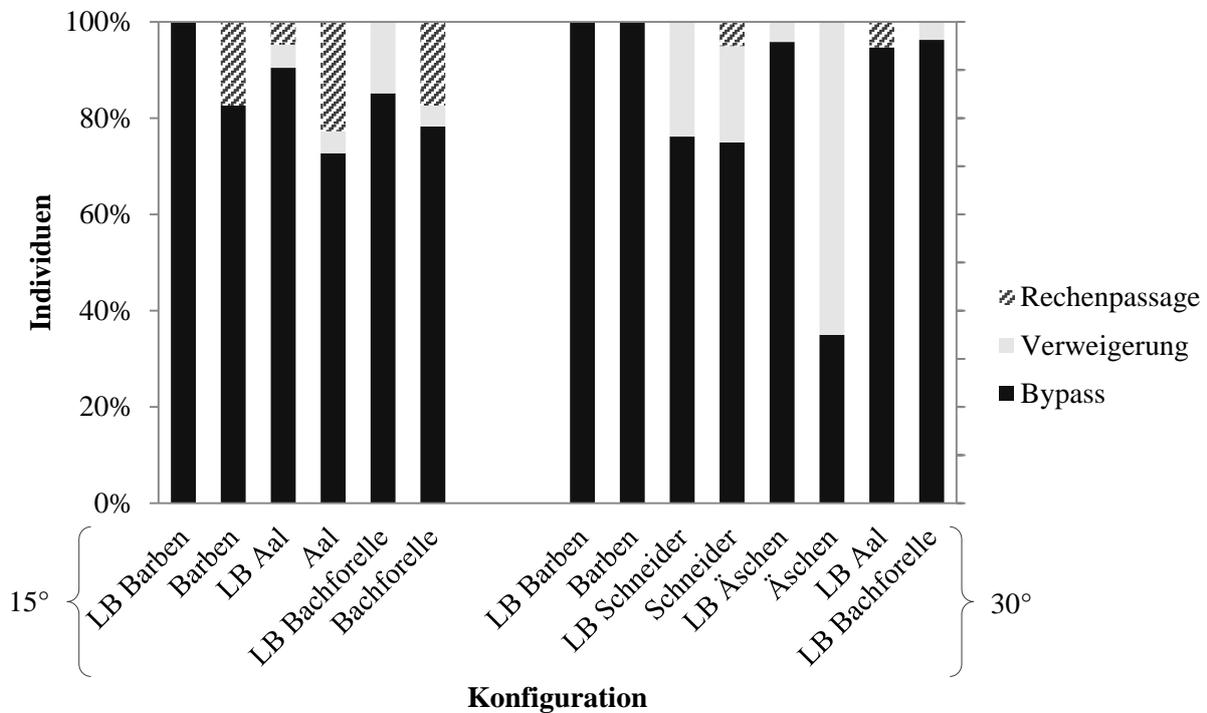


Abbildung 25: Darstellung aller Versuche mit und ohne Leitblech.

Alle Konfigurationen bei 45° Stabausrichtung, 5 cm Stababstand und 0,6 m/s Fliessgeschwindigkeit. Im linken Block alle Konfigurationen mit 15° Rechenausrichtung, im rechten alle mit 30°. Aal und Bachforelle wurde bei 30° Rechenausrichtung nicht ohne Leitblech getestet.

4.7 Erster oder zweiter Einsatz im Versuch

Jeder Fisch wurde zwei Mal, bei exakt gleichen Bedingungen, in den Versuch eingesetzt. Zum einen um die Zahl an untersuchten Fischen gering zu halten und zum anderen um zu ermitteln ob ein Lerneffekt bei verschiedenen Fischarten festzustellen ist.

Die Testergebnisse (Bypass, Verweigerung, Rechenpassage) aller Versuche zu Einsatz 1 und Einsatz 2 zusammengefasst, ergeben ein differenziertes Bild für jede Fischart.

Bei Barben und Bachforellen sind die Testergebnisse, nach einem Chi-Quadrat-Test, abhängig vom Einsatz. Aufgrund der geringen Effektstärke kann jedoch nur vermutet werden, dass die unterschiedlichen Anzahlen von Bypass, Verweigerung und Rechenpassage bei Barben darauf zurückzuführen sind, ob sie einmal oder zweimal im Versuch waren. (Barben: $\chi^2 = 6,2855$ mit $p = 0,02249$, Cramer's $V = 0,13928$, Effektstärke = schwach; Bachforellen: $\chi^2 = 6,9334$ mit $p = 0,02149$, Cramer's $V = 0,30007$, Effektstärke = mittel; signifikant nach gängiger Konvention, 5% Irrtumswahrscheinlichkeit).

Für Schneider, Äschen und Aale ist für die Testergebnisse kein Zusammenhang zum Einsatz ermittelt worden (Schneider: $\chi^2 = 1,6698$ mit $p = 0,4339$, Cramer's $V = 0,08272$, Effektstärke = schwach; Äschen: $\chi^2 = 0$ mit $p = 1$, Cramer's $V = 0$, Effektstärke = schwach; Aale: $\chi^2 = 3,7574$ mit $p = 0,1704$, Cramer's $V = 0,24617$, Effektstärke = schwach; nicht signifikant nach gängiger Konvention, 5% Irrtumswahrscheinlichkeit).

Nach der Berechnung einer multivariaten Regression sind die Testergebnisse jedoch signifikant abhängig von erstem oder zweitem Einsatz im Versuch (Multivariate Regression - glm, S. 67).

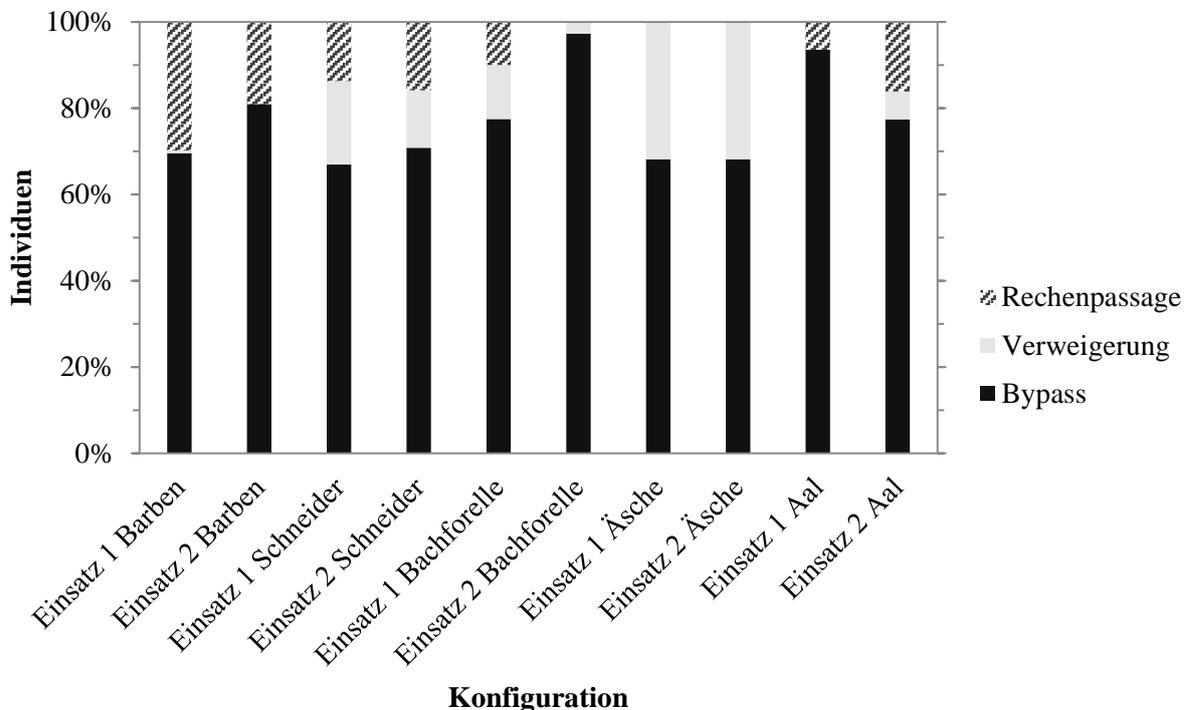


Abbildung 26: Zusammenfassung aller Versuche nach dem ersten oder zweiten Einsatz im Versuch. Jeder Fisch wurde zwei Mal in den Kanal eingesetzt. Einsatz 1 bezeichnet die Fische die zum ersten Mal in den Versuchskanal eingesetzt wurden und Einsatz 2 diejenigen, die zum zweiten Mal in den Versuchskanal eingesetzt wurden.

4.8 Rechenausrichtung

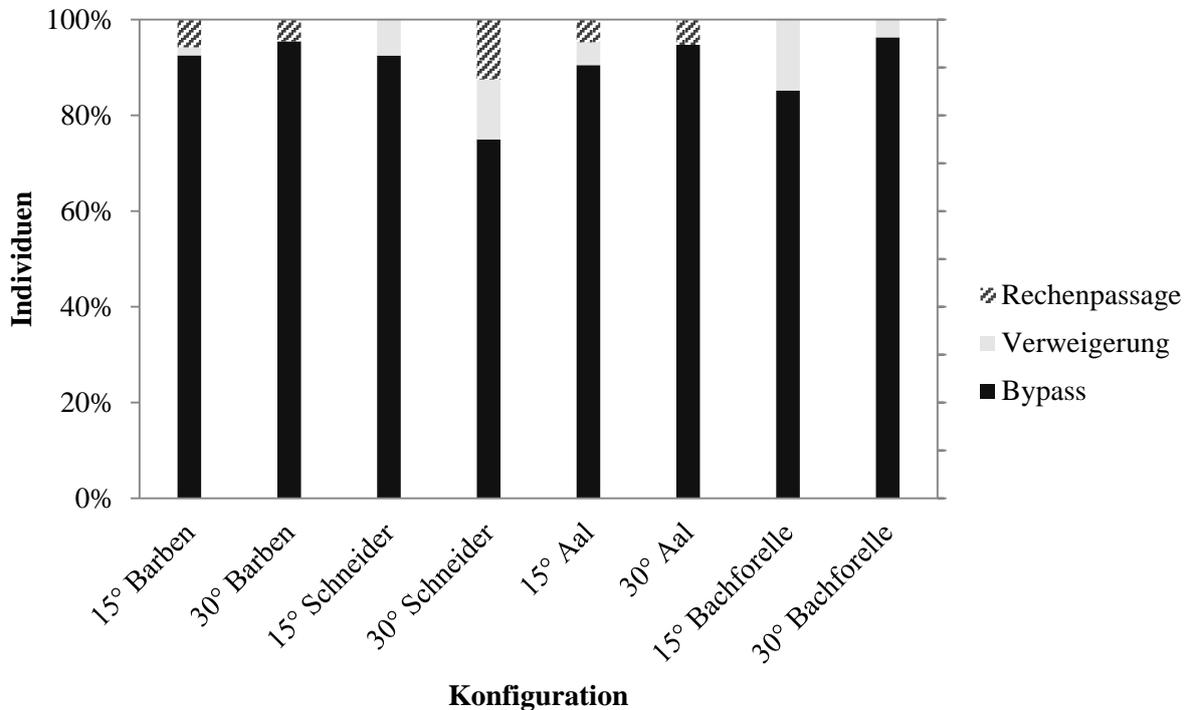


Abbildung 27: Darstellung ausgewählter Versuche mit 15° und 30° Rechenausrichtung.

Für Barben und Schneider wurden die Konfigurationen 15°/30° 45° 5cm 0,3m/s, 15°/30° 45° 5cm 0,6m/s und zudem nur für Barben 15°/30° 45° 5cm 0,6m/s LB zusammengefasst. Für Aale und Bachforellen sind hier nur die Konfigurationen 15°/30° 45° 5cm 0,6m/s LB gegenübergestellt.

Die Rechenausrichtung führte für alle Fischarten, ausser Schneider, zu mehr Bypass-Einstiegen. Bei Schneidern führte, im Vergleich dieser Konfigurationen, eine Rechenausrichtung von 30° zu weniger Bypass-Einstiegen.

Nach der Berechnung des Chi-Quadrat-Tests sind für Barben und Schneider die Testergebnisse (Bypass, Verweigerung, Rechenpassage) abhängig von der Rechenausrichtung (Barben: $\chi^2 = 8,1814$ mit $p = 0,01199$, Cramer's $V = 0,1589$, Effektstärke = schwach; Schneider: $\chi^2 = 7,152$ mit $p = 0,03398$, Cramer's $V = 0,1712$, Effektstärke = schwach; signifikant nach gängiger Konvention, 5% Irrtumswahrscheinlichkeit).

Für Aale, Forellen und Äschen ist für die Testergebnisse kein Zusammenhang zur Rechenausrichtung ermittelt worden (Aale: $\chi^2 = 2,0396$ mit $p = 0,3603$, Cramer's $V = 0,1813$, Effektstärke = schwach; Forellen: $\chi^2 = 3,4638$ mit $p = 0,2219$, Cramer's $V = 0,2120$, Effektstärke = schwach; Äschen: $\chi^2 = -$ mit $p = -$, Cramer's $V = -$, Effektstärke = -; nicht signifikant nach gängiger Konvention, 5% Irrtumswahrscheinlichkeit). Äschen wurden nur bei 30° Rechenausrichtung untersucht. Für Aale und Forellen sind die Fallzahlen sehr gering.

4.9 Tabellarische Darstellung aller Ergebnisse

Tabelle 13: Ergebnisse aller Versuche der ersten und zweiten Versuchsreihe

Konfiguration	Fischart	Bypass	Rechenpassage	Verweigerung	Versuchsreihe
15° 45° 5cm 0,3m/s	Barben	95,0%	0,0%	5,0%	1
15° 45° 5cm 0,6m/s	Barben	82,6%	17,4%	0,0%	1
15° 45° 11cm 0,3m/s	Barben	45,5%	54,5%	0,0%	1
15° 45° 11cm 0,6m/s	Barben	58,3%	41,7%	0,0%	1
15° 90° 5cm 0,3m/s	Barben	78,6%	21,4%	0,0%	1
15° 90° 5cm 0,6m/s	Barben	65,2%	34,8%	0,0%	1
15° 90° 11cm 0,3m/s	Barben	50,0%	50,0%	0,0%	1
15° 90° 11cm 0,6m/s	Barben	39,1%	60,9%	0,0%	1
30° 45° 5cm 0,3m/s	Barben	86,4%	13,6%	0,0%	1
30° 45° 5cm 0,6m/s	Barben	100,0%	0,0%	0,0%	1
15° 45° 5cm 0,8m/s	Barben	100,0%	0,0%	0,0%	2
15° 45° 5cm 0,6m/s LB	Barben	100,0%	0,0%	0,0%	2
30° 45°m/s 5cm 0,6m/s LB	Barben	100,0%	0,0%	0,0%	2
30° 0° 5cm 0,6m/s	Barben	58,3%	41,7%	0,0%	2
15° 45° 5cm 0,3m/s	Schneider	100,0%	0,0%	0,0%	1
15° 45° 5cm 0,6m/s	Schneider	85,0%	0,0%	15,0%	1
15° 45° 11cm 0,3m/s	Schneider	75,0%	25,0%	0,0%	1
15° 45° 11cm 0,6m/s	Schneider	75,0%	10,0%	15,0%	1
15° 90° 5cm 0,3m/s	Schneider	81,0%	9,5%	9,5%	1
15° 90° 5cm 0,6m/s	Schneider	10,0%	25,0%	65,0%	1
15° 90° 11cm 0,3m/s	Schneider	60,0%	35,0%	5,0%	1
15° 90° 11cm 0,6m/s	Schneider	30,0%	50,0%	20,0%	1
30° 45° 5cm 0,3m/s	Schneider	75,0%	20,0%	5,0%	1
30° 45° 5cm 0,6m/s	Schneider	75,0%	5,0%	20,0%	1
30° 45° 5cm 0,6m/s LB	Schneider	76,2%	0,0%	23,8%	2
30° 0° 5cm 0,6m/s	Schneider	80,0%	0,0%	20,0%	2
15° 45° 5cm 0,6m/s LB	Bachforellen	85,2%	0,0%	14,8%	2
15° 45° 5cm 0,6m/s	Bachforellen	78,3%	17,4%	4,3%	2
30° 45° 5cm 0,6m/s LB	Bachforellen	96,3%	0,0%	3,7%	2
15° 45° 5cm 0,6m/s	Aale	72,7%	22,7%	4,5%	2
15° 45° 5cm 0,6m/s LB	Aale	90,5%	4,8%	4,8%	2
30° 45° 5cm 0,6m/s LB	Aale	94,7%	5,3%	0,0%	2
30° 45° 5cm 0,6m/s	Äschen	35,0%	0,0%	65,0%	2
30° 45° 5cm 0,6m/s LB	Äschen	95,8%	0,0%	4,2%	2

4.10 Multivariate Regression - glm

Regression mit Bypass-Einstieg als abhängige Variable

Die Berechnungen des glm in diesen Modellen bezieht sich auf alle Fischarten gemeinsam und vergleicht alle untersuchten Konfigurationen. Die Ergebnisse sind im Detail in Tabelle 14 (S. 89) dargestellt.

- Die **Rechenausrichtung** hat (Modell 1-4) **keinen Einfluss** auf den Bypass-Einstieg. (Nach der Berechnung des Chi-Quadrat-Tests ist der Effekt der Rechenausrichtung für Schneider und Barben abhängig von den ausgewählten Konfigurationen. Während der Chi-Quadrat-Test nur "allgemein" die dort verglichenen Konfigurationen analysiert, untersucht das glm alle Variablen. Deshalb ist trotz der Ergebnisse der Chi-Quadrat-Tests und der Darstellung der Interaktionen (Abbildung 35, S. 92), davon auszugehen, dass die Rechenausrichtung keinen signifikanten Effekt auf den Bypass-Einstieg hat.)
- Für eine **Stabausrichtung** von **45°** ist die **Wahrscheinlichkeit** für den Einstieg in den Bypass **höher als für 90°** (Modell 1-4, $p < 0,01$). Ein Winkel von **0°** hat **keinen Einfluss**, die Wahrscheinlichkeit für den Einstieg in den Bypass ist nicht geringer als für 90°. Bei näherer Betrachtung der Kontrollversuche wird deutlich, dass dies auf das Ergebnis der Schneider zurückzuführen ist (Schneider: 45° = 75% Bypass, 0° = 80% Bypass; Barben: 45° = 100% Bypass, 0° = 58% Bypass; Abbildung 21, S.56). Dieses Ergebnis entspricht dem Ergebnis des Chi-Quadrat-Tests (Abbildung 16, S. 50) und wird auch anhand des Interaktionsplots deutlich (Abbildung 36, S. 93).
- Für einen **Stababstand** von **11 cm** ist die **Wahrscheinlichkeit** für den Einstieg in den Bypass **geringer als für 5 cm** (Modell 1-4, $p < 0,01$). Auch dieses Ergebnis entspricht dem Ergebnis des Chi-Quadrat-Tests (Abbildung 17, S. 51) und ist wird anhand des Interaktionsplots verdeutlicht (Abbildung 37, S. 93).
- Für die **Fischarten** ist **nur für die Äsche** eine **geringere Wahrscheinlichkeit** in den Bypass einzuschwimmen ermittelt worden (Modell 2-4, $p < 0,05$). Bei näherer Betrachtung der Ergebnisse zeigt sich, dass dies an der hohen Rate an Verweigerern liegt, die ohne Leitblech nicht in den Bypass eingewandert sind (Abbildung 24, S. 61).
- Für Fische, die das **zweite Mal (Einsatz)** in einem Versuch verwendet wurden ist die **Wahrscheinlichkeit** für den Einstieg in den Bypass **höher als** für Fische, die **das erste Mal** in das Versuchsgerinne eingesetzt wurden (Modell 3-4, $p < 0,05$). Vergleicht man diese Berechnung mit der Darstellung in Abbildung 26 (S.64) und dem Interaktionsplot (Abbildung 38, S.94), wird ersichtlich, dass dies auf alle Fischarten bis auf den Aal zutrifft. Der Unterschied ist bei dem Aal jedoch auf nur 3 Fische zurückzuführen.
- Steigt die **Fliessgeschwindigkeit** an, so **sinkt** die **Wahrscheinlichkeit** für den Bypass-Einstieg (Modell 4, $p < 0,05$). Dieses Ergebnis ist auf das **Verhalten der Schneider** zurückzuführen. Bypass-Einstiege verringern sich bei höherer Fliessgeschwindigkeit für Schneider signifikant, weil die Rate an **Verweigerern** signifikant zunimmt (Abbildung 18, S.52 und Abbildung 39, S.94).
- Die Installation eines **Leitbleches** führt zu einer **höheren Wahrscheinlichkeit** für den Bypass-Einstieg (Modell 4, $p < 0,01$). Dieses Ergebnis entspricht dem Ergebnis des Chi-Quadrat-Tests (Abbildung 25, S. 63) und wird auch anhand des Interaktionsplots deutlich (Abbildung 40, S. 95).
- Die Wahrscheinlichkeit für den Bypass-Einstieg ist **unabhängig** von der **Fischlänge** (Modell 4).

Regression mit Verweigerung als abhängige Variable

- Die Rechenausrichtung hat keinen Einfluss auf die Verweigerung. Der Effekt ist zwar in Modell 1 signifikant ($p < 0,01$), in späteren Modellen, unter Kontrolle zusätzlicher Faktoren, jedoch nicht. Es muss daher davon ausgegangen werden, dass es sich um eine Scheinkorrelation in Modell 1 handelt und die Rechenausrichtung keinen Einfluss auf die Verweigerung hat.
- Für eine Stabausrichtung von 45° (Bar Rack) ist die Wahrscheinlichkeit für die Verweigerung niedriger (Modell 1-4, $p < 0,01$) als für 90° (Louver). Ein Winkel von 0° führt ebenso zu einer geringeren Wahrscheinlichkeit für die Verweigerung (Modell 1+4, $p < 0,05$).
- Für einen Stababstand von 11 cm ist die Wahrscheinlichkeit für die Verweigerung geringer als für 5 cm (Modell 1-4, $p < 0,05$).
- Bei einem Vergleich der Fischarten zeigen nur die Barbe in allen Modellen eine niedrigere Wahrscheinlichkeit für die Verweigerung als Schneider (Modell 1-4, $p < 0,01$).
- Für Anzahl des Einsatzes von Fischen in das Versuchsgerinne wird kein Einfluss auf die Verweigerung ermittelt
- Mit zunehmender Fließgeschwindigkeit steigt die Wahrscheinlichkeit für eine Verweigerung signifikant an. Dies bestätigt die Ergebnisse mit Bypass als abhängiger Variable. Vergleicht man dieses Ergebnis erneut mit den Berechnungen des Chi-Quadrat-Tests (Abbildung 18, S.52) und den Interaktionsplots (Abbildung 39, S.94), wird ersichtlich, dass diese Schätzung auf das Verhalten der Schneider zurückzuführen ist.
- Die Installation eines Leitbleches führt zu einer geringeren Wahrscheinlichkeit für die Verweigerung (Modell 4, $p < 0,05$).
- Die Wahrscheinlichkeit für die Verweigerung ist unabhängig von der Fischlänge (Modell 4).

Regression mit Rechenpassage als abhängige Variable

- Die **Rechenausrichtung** hat **keinen Einfluss** auf die Rechenpassage (Modell 2-4).
- Für eine **Stabausrichtung** von 45° (Bar Rack) ist die Wahrscheinlichkeit für die Rechenpassage **niedriger** (Modell 1-4, $p < 0,01$) als für 90° (Louver). Ein Winkel von 0° hat keinen Einfluss (Modell 1-4).
- Für einen **Stababstand** von 11 cm ist die Wahrscheinlichkeit für die Rechenpassage **höher** als für 5 cm (Modell 1-4, $p < 0,01$).
- Bei einem Vergleich der **Fischarten** zeigen alle Arten bis auf die Äschen eine höhere Wahrscheinlichkeit für die Rechenpassage als Schneider (Modell 2-4, $p < 0,05$ - , $p < 0,01$).
- Für Fische, die das **zweite Mal (Einsatz)** in einem Versuch verwendet wurden ist die Wahrscheinlichkeit für Rechenpassage **geringer** als für Fische, die das erste Mal in das Versuchsgerinne eingesetzt wurden (Modell 3-4, $p < 0,1$).
- Die **Fließgeschwindigkeit** hat **keinen Einfluss** auf die Rechenpassage (Modell 4).
- Die Installation eines **Leitbleches** führt zu einer **geringeren Wahrscheinlichkeit** für die Rechenpassage (Modell 4, $p < 0,01$).
- Die Wahrscheinlichkeit für die Rechenpassage ist unabhängig von der **Fischlänge** (Modell 4).

4.11 Grössenverteilungen

4.11.1 Barben

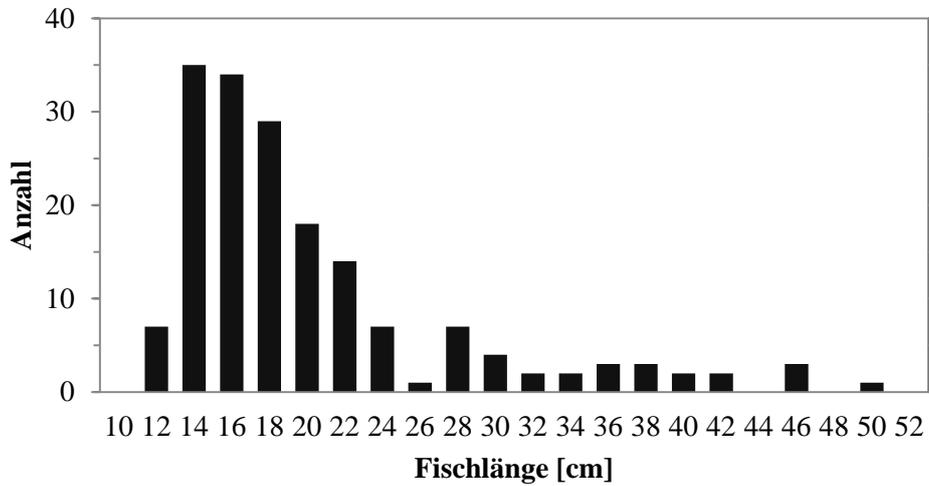


Abbildung 28: Grössenverteilung der Barben.
Gemessene Grössen zu Grössenklassen von 2cm zusammengefasst.

4.11.2 Schneider

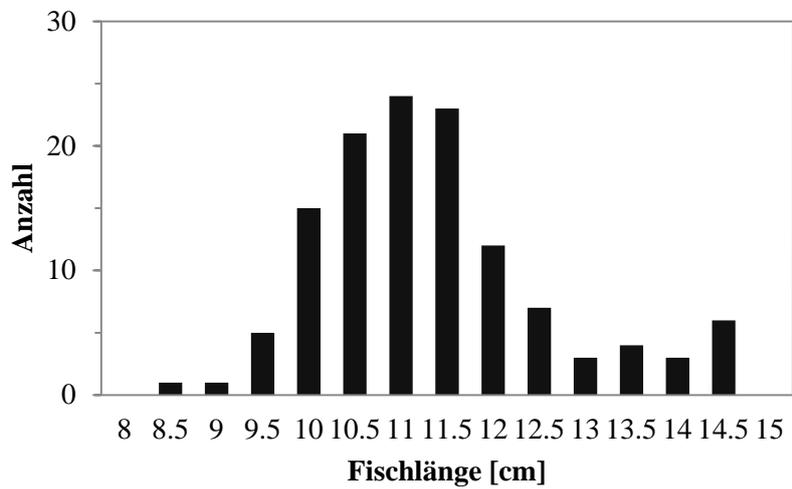


Abbildung 29: Grössenverteilung der Schneider.
Gemessene Grössen zu Grössenklassen von 0,5 cm zusammengefasst.

4.11.3 Bachforellen

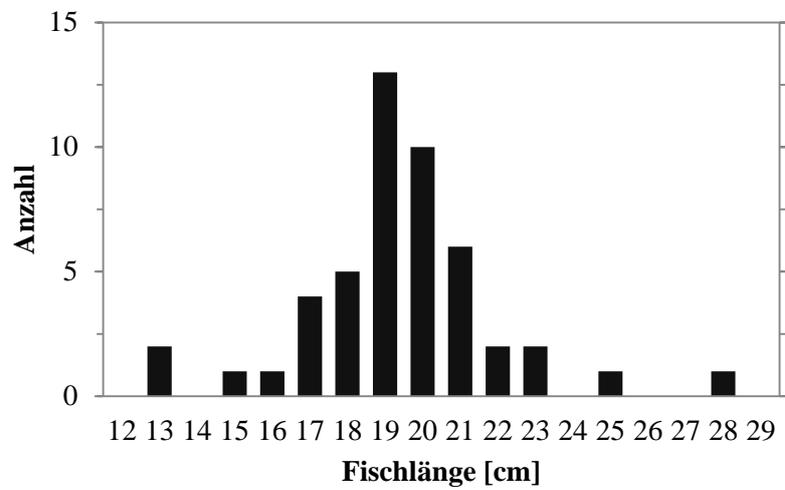


Abbildung 30: Größenverteilung der Bachforellen.
Gemessene Größen zu Größenklassen von 1 cm zusammengefasst.

4.11.4 Äschen

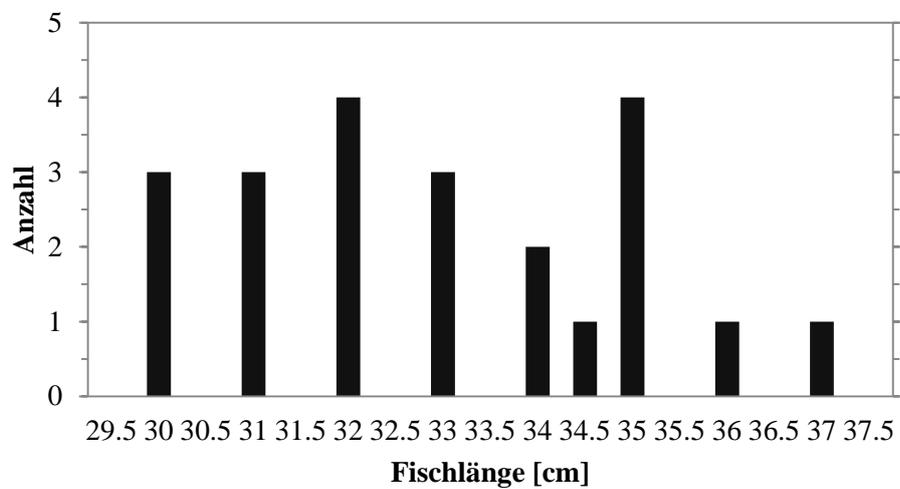


Abbildung 31: Größenverteilung der Äschen.
Gemessene Größen zu Größenklassen von 0,5 cm zusammengefasst.

4.11.5 Aale

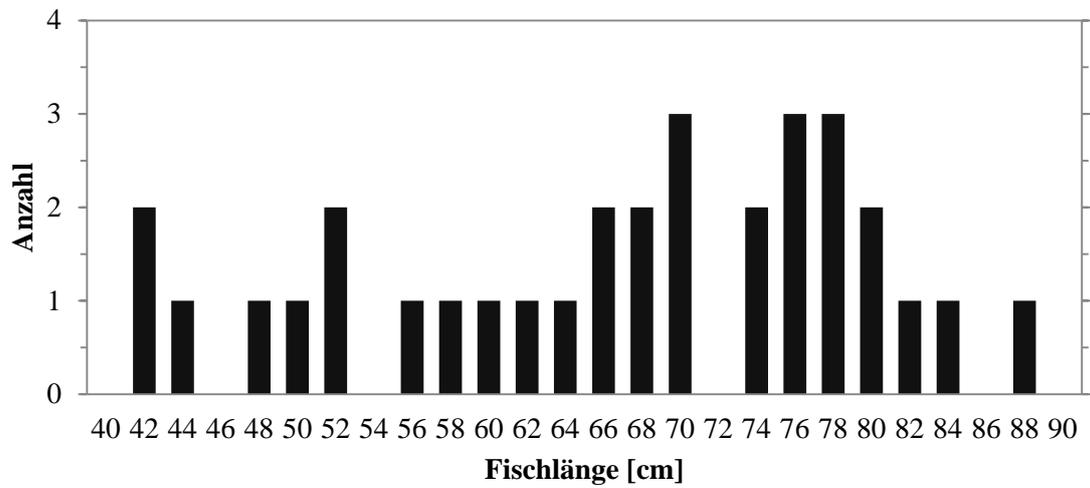


Abbildung 32: Grössenverteilung der Aale.
Gemessene Grössen zu Grössenklassen von 2cm zusammengefasst.

5. Diskussion

Diese Evaluation von Bar Racks und Louvern stellt wertvolle Informationen zur Leistungsfähigkeit zur Verfügung, Fische in einen Bypass einzuleiten und sie am Passieren eines Rechens zu hindern. Wichtige Versuchsparameter, die diese Leistungsfähigkeit beeinflussten, waren die Stabausrichtung, der Stababstand, die Verwendung eines Leitbleches, die Fischart und die Fliessgeschwindigkeit. Die statistische Auswertung der Daten unterstützt folgende Aussagen:

- Die Leiteffizienz für Barben und Schneider war höher bei 5 cm Stababstand als bei 11 cm.
- Die Leiteffizienz für Barben und Schneider war höher für das Bar Rack (45° Stabausrichtung) als für den Louver (90° Stabausrichtung).
- Bei den Schneidern hatte eine Erhöhung der Fliessgeschwindigkeit eine höhere Verweigerungs-Rate zur Folge. Eine Erhöhung der Fliessgeschwindigkeit stand für Barben in keinem Zusammenhang zum Versuchsergebnis.
- Der Leitrochen hatte auf Schneider eine Scheuchwirkung (Verweigerungs-Rate), die durch eine höhere Fliessgeschwindigkeit und eine Erhöhung der Stabausrichtung von 45° (Bar Rack) auf 90° (Louver) anstieg.
- Die Rechenausrichtung hatte keinen Effekt auf das Versuchsergebnis.
- Die Verwendung eines Leitbleches führte zu mehr Bypass-Einstiegen, weniger Verweigerern und weniger Rechenpassagen.
- Die Versuche mit 15° bzw. 30° Rechenausrichtung, 45° Stabausrichtung, 5 cm Stababstand und 0,6 m/s Fliessgeschwindigkeit hatten bei allen weiteren getesteten Fischarten (Bachforellen, Aale, Äschen) eine sehr hohe Leitwirkung. In Kombination mit dem Leitblech lagen die Bypass-Passagen dabei bei allen Fischarten, ausser dem Schneider, über 94%. Bei den Schneidern lagen dabei noch 24% Verweigerer, jedoch keine Rechenpassagen vor (Abbildung 34, S.76).
- Schneider wurden, bei einer Stabausrichtung von 0° als Kontrolle, mit 4% höherer Effizienz in den Bypass geleitet beziehungsweise an einer Rechenpassage gehindert, als bei einer Ausrichtung von 45°. Bei Barben sank die Leiteffizienz von 100% auf unter 50%.

Rechenausrichtung

Unsere Analyse verschiedener Parameter für Leitstrukturen demonstriert, dass das Bar Rack mit 15° beziehungsweise 30° Rechenausrichtung, die besten und vergleichbare Ergebnisse für alle untersuchten Fischarten ergab. Mit Leitblech wurde die Leitwirkung weiter erhöht. Auch andere Untersuchungen konnten hohe Leiteffizienzen für Rechenausrichtungen zwischen 15° und 30° eruieren (Ducharme 1972, Stira & Robinson 1997, Normandeau Associates 1999, Kynard & Horgan 2001). Für eine noch stärker geneigte Rechenausrichtung von 45° hatte Amaral (2001) jedoch eine schlechtere Leiteffizienz gegenüber 15° Rechenausrichtungen festgestellt.

In dieser Untersuchung wurde im Vergleich aller Konfigurationen, eine bessere Leitwirkung für 30° Rechenausrichtung (Abbildung 35, S.92) ermittelt. Die Berechnung der multivariaten Regression schätzt dabei für alle Fischarten zusammen keinen signifikanten Einfluss der Rechenausrichtung auf das Versuchsergebnis. Im Vergleich ausgewählter Konfigurationen, wie in Abbildung 27 (S.65) dargestellt, ergab sich bei 30° Rechenausrichtung, eine geringere

Leitwirkung für Schneider und eine bessere für alle anderen Fischarten. Während aber der Chi-Quadrat-Test nur allgemein die dort verglichenen Konfigurationen analysiert, untersucht das glm alle Variablen gleichzeitig. Deshalb ist trotz der Ergebnisse der Chi-Quadrat-Tests und der Darstellung der Interaktionen (Abbildung 35, S.92), davon auszugehen, dass die Rechenausrichtung keinen signifikanten Effekt auf den Bypass-Einstieg hat.

In der Praxis ist bei einem Leitrechen mit 15° Rechenausrichtung mit höheren Kosten beim Bau und mit höheren Verlusten bei der Energiegewinnung zu rechnen als bei einem Leitrechen mit 30° Rechenausrichtung. Da nach diesen Ergebnissen der Leitrechen mit 30° Rechenausrichtung keine schlechtere Leitwirkung erzielte, hat er für die Zukunft ein höheres Anwendungspotenzial.

Stabausrichtung

Während Amaral (2001) keinen Unterschied zwischen Louver und Bar Rack feststellen konnte, war in dieser Untersuchung die Stabausrichtung ein ausschlaggebender Faktor, der zu einer geringeren Leiteffizienz (Louver) führte. Bei Vergleichen von Bar Racks muss jedoch umsichtig vorgegangen werden, denn ein Bar Rack wie es hier verwendet wurde, ist bisher noch nicht untersucht worden. Meist bezeichnet man einen Louver (45° Rechenausrichtung, 90° Stabausrichtung) welcher mit geringerer Rechenausrichtung eingebaut wird, als Bar Rack. So ergeben sich beispielsweise Stabausrichtungen von 75°. In diesem Versuch waren diese Parameter jedoch unabhängig voneinander veränderbar. Ein Bar Rack, wie in dieser Untersuchung verwendet wurde, mit 30° oder 15° Rechenausrichtung und 45° Stabausrichtung ist neuartig und nicht direkt mit Bar Racks aus anderen Untersuchungen vergleichbar. Bei Louver und Bar Rack nahm die Geschwindigkeit entlang des Rechens zu und nahm am Anfang des Bypasses wieder ab. Die Geschwindigkeitsmessungen von Kriewitz (2015) zeigen, dass Geschwindigkeitsänderungen entlang des Louvers stärker ausgeprägt waren als bei dem Bar Rack. Auch die Geschwindigkeit in Querrichtung der Fließrichtung, an den letzten Rechenstäben, in Richtung "durch den Rechen hindurch" war bei dem Louver stärker ausgeprägt als bei dem Bar Rack. Bei dem Louver floss ein grösserer Anteil des Wassers durch die letzten Rechenstäbe und ein geringerer durch den Teil in Richtung Oberstrom (Abbildung 41, S. 96, Abbildung 42, S. 97, Abbildung 43, S. 98).

Geschwindigkeitsmessungen, weitergehende Untersuchungen zur Hydraulik und dem Aufbau des Kanals sowie des Rechens sind von Kriewitz (2015) durchgeführt worden.

Stababstand

Eine Erhöhung des Stababstandes hatte, sowohl bei Barben, wie auch bei Schneidern, eine geringere Leiteffizienz zur Folge. Andere Untersuchungen zeigten, dass grössere Stababstände als die hier untersuchten (bis zu 30 cm), für einige Fischarten akzeptabel sein können (Ducharme 1972), jedoch nicht für die hier untersuchten Fischarten.

Kontrolle

Es wurden Kontrollversuche mit 0° Stabausrichtung durchgeführt um zu ermitteln, ob die Umleitung der Strömungsrichtung durch die Stabausrichtung ausschlaggebend für die Leitwirkung war (30° 0° 5cm 0,6m/s). Barben hatten, wenn sie entlang des Rechens abwanderten, sofort Kontakt mit den Rechenstäben und liessen sich schnell hindurch gleiten. Die Leitwirkung für Barben war durch eine Stabausrichtung von 0° deutlich herabgesetzt.

Schneider hielten sich auch bei 0° Stabausrichtung von den Rechenstäben fern, dabei wanderten 4% mehr Schneider in den Bypass ein als bei der gleichen Konfiguration mit 45° Stabausrichtung. Für die Schneider schienen die Rechenstäbe eine ausgeprägte Barriere darzustellen. Sie mieden jeglichen Kontakt mit Strukturen, trotz 5 cm Stababstand, der für

Schneider mehr als ausreichend war um hindurch zu schwimmen. Für die Schneider schienen schon geringe Turbulenzen bereits fernhaltende Wirkung zu erzeugen, stärkere Turbulenzen dann bereits ein weiträumiges Meiden dieser Bereiche (Abbildung 42, S. 97, Abbildung 43, S. 98, Abbildung 44, S. 99).

Dies könnte auf die Art und Weise zurückzuführen sein wie Schneider sich im Wasser bewegen. Sie waren ständig aktiv, hatten nie Kontakt zu Strukturen, legten sich nie auf den Boden. Für sie könnte die Enge zwischen zwei Rechenstäben und die dort auftretenden Turbulenzen, selbst bei einer Ausrichtung von 0° , sehr abschreckend gewirkt haben, da sie dort ihre Bewegungsfreiheit verloren hätten.

Für Barben, Bachforellen oder Aale scheint der umgekehrte Fall zu stimmen. Sie suchten den Kontakt, legten sich auf den Boden oder lehnten sich gegen die Rechenstäbe und liessen sich von der Strömung dagegen drücken.

Leitblech

Die Wirkung des Leitbleches ist zum einen auf eine reine Barrierewirkung zurückzuführen, die Fische kamen so gar nicht mehr mit dem Rechen in Kontakt und wurden am Leitblech entlang in den Bypass geführt. Zum anderen entstand direkt vor dem Leitblech, über dem Boden eine Strömung, die entlang des Leitbleches bis direkt in den Bypass führte (Abbildung 42 c+d, S.97; Abbildung 43 c+d, S.98). Eine geringere seitliche Strömung, gefolgt von vermindertem Abbremsen am Bypass-Einstieg ermöglichte eine deutlich erleichterte, flüssigere Einwanderung in den Bypass. Sehr deutlich war dies bei den Versuchen mit Äschen zu sehen. Die Konfiguration 30° 45° 5cm 0,6m/s wurde hier mit und ohne Leitblech untersucht. Mit Leitblech wanderten die Äschen direkt über dem Boden schnell in den Bypass ein. Ohne Leitblech verharren sie, 45 Minuten lang, bis der Versuch abgebrochen wurde, direkt vor dem Bypass beziehungsweise den letzten Rechenstäben, passierten den Rechen dabei jedoch nie.

Die Ergebnisse der Versuche mit Leitblech sollten mit grosser Vorsicht interpretiert werden. In diesem Versuchsaufbau erreichte das Leitblech eine sehr gute Leitwirkung, da alle Fischarten fast immer solnah abwanderten. Dies könnte jedoch ein Effekt des Versuchsaufbaues sein. Die geringe Wassertiefe und die stetige Beleuchtung könnten einige Fische dazu veranlasst haben, solnah abzuwandern, während sie dies möglicherweise unter natürlichen Bedingungen nicht getan hätten. Hier sind Untersuchungen unter natürlichen Bedingungen notwendig, um diese Frage zu klären.

Bypassdesign

Weitere Untersuchungen zur Optimierung der Strömungsverhältnisse vor dem Bypass sollten künftig durchgeführt werden, um den Einstieg in diesen zu erleichtern, die Scheuchwirkung vor allem auf Schneider, zu reduzieren und somit den Anteil an Verweigerern zu vermindern.

Durch die Neigung des Rechens steigt die Strömungsgeschwindigkeit an diesem entlang. Idealerweise sollte die Strömung konstant bis in den Bypass hinein zunehmen. In diesen Untersuchungen wurde die höchste Geschwindigkeit ca. 30 cm vor dem Bypass erreicht, während sie direkt am Bypass-Anfang dann wieder stark abnahm (Abbildung 41, S.96; Abbildung 42, S.97; Abbildung 43, S.98). Es konnte bei allen Fischarten ein, mehr oder weniger stark ausgeprägtes, Abbremsen direkt vor dem Bypass beobachtet werden. An dieser Stelle fanden dann auch vermehrt Wechsel des Höhenhorizontes statt und die Fische waren an dieser Stelle besonders stark der Querströmung „durch den Rechen hindurch“ ausgesetzt (die an dieser Stelle, der letzten Rechenstäbe, am stärksten ist).

Das Verhältnis zwischen seitlicher Strömungskomponente und der Strömungskomponente direkt in den Bypass hinein, scheint ein ausschlaggebende Faktor zu sein (Abbildung 43, S.98). Eine Veränderung des Bypasses wurde in diesem Projekt nicht untersucht. Es ist jedoch

anzunehmen, dass schon geringe Veränderungen am Bypassdesign ausschlaggebend sein können, unabhängig der alleinigen Leitwirkung des Rechens. Ducharme (1972) zeigte für Smolts (atlantischer Lachs), dass das Verhältnis von Anströmgeschwindigkeit zur Geschwindigkeit im Einlauf des Bypasses ausschlaggebend sein kann. Bei gleicher Louver-Konfiguration wurden erheblich schlechtere Leitwirkungen ermittelt, wenn das genannte Verhältnis nicht optimal eingestellt war. Durch Umbauten am Bypass stieg, die Leiteffizienz von 57% (1967) auf über 80% (1971). Eine weitergehende Analyse der Strömungsverhältnisse wurde von Kriewitz (2015) durchgeführt.

Beste Konfigurationen

Eine Rechenausrichtung von 15° oder 30° bei einer Stabausrichtung von 45° und einem Stababstand von 5 cm erreichte in diesen Untersuchungen bei allen Fließgeschwindigkeiten die beste Leitwirkung.

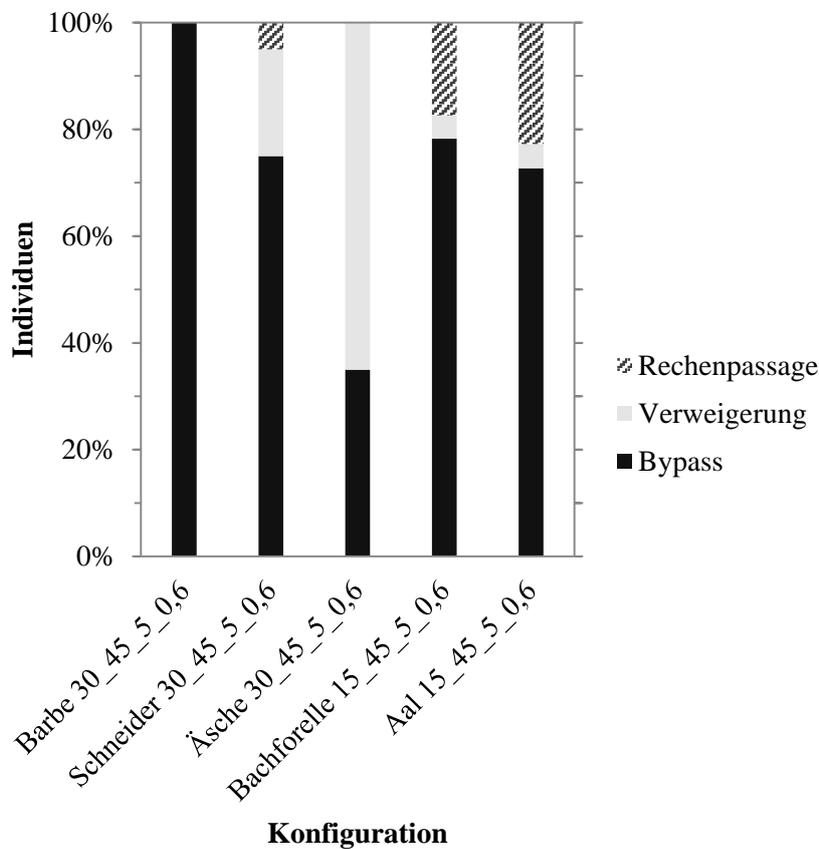


Abbildung 33: Beste Konfigurationen für alle Fischarten, ohne Versuche mit Leitblech. Bachforellen und Äschen wurden nur mit 15° Rechenausrichtung untersucht. Alle anderen sind bei 30° Rechenausrichtung dargestellt. Verweigerung bedeutet: Abstiegsverweigerung nach 30 min ohne Bypass-Einstieg oder Rechenpassage.

Zudem bewirkte die zusätzliche Installation eines Leitbleches eine Erhöhung der Leiteffizienz. Wie zuvor genannt, sollte die Wirkung des Leitbleches mit Vorsicht interpretiert und kann nicht ohne Weiteres auf eine reale Situation an einem Kraftwerk übertragen werden.

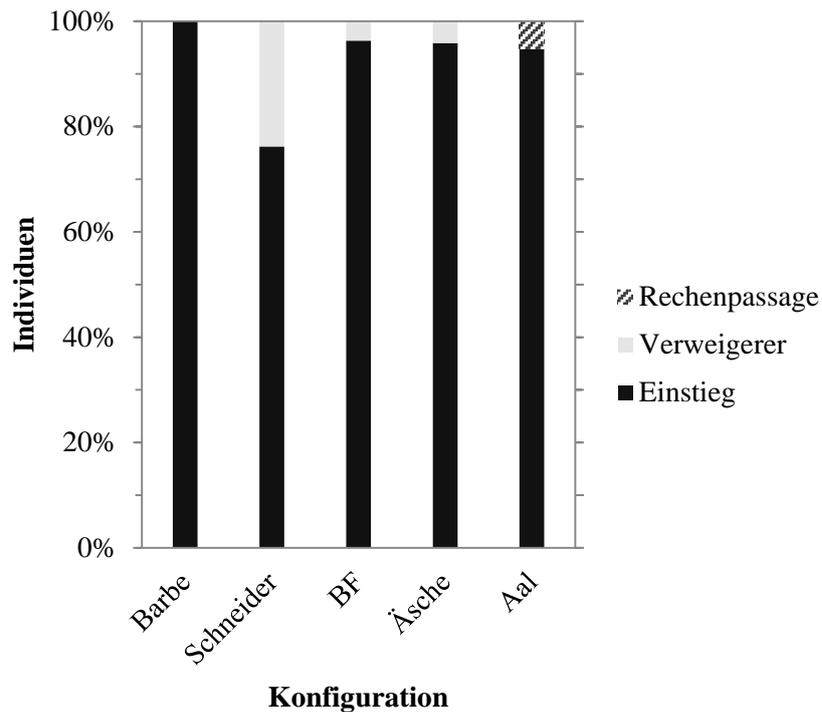


Abbildung 34: Konfiguration 30° 45° 5cm 0,6m/s LB für alle Fischarten. Verweigerung nach 30 min ohne Bypass-Einstieg oder Rechenpassage.

Fliessgeschwindigkeit

Eine Erhöhung der Fliessgeschwindigkeit führte, im Gegensatz zu den Untersuchungen von Amaral (2001), bei Barben nicht zu einer Abnahme der Leiteffizienz. Eine Erhöhung der Fliessgeschwindigkeit auf 0,8 m/s führte bei Barben auch zu 100% Bypass-Einschwimmern. Für Schneider hatte eine Erhöhung der Fliessgeschwindigkeit von 0,3 m/s auf 0,6 m/s eine Erhöhung der Rate an Verweigerern zur Folge.

Erster oder zweiter Einsatz im Versuch

Jeder Fisch wurde zwei Mal, bei exakt gleichen Bedingungen, in den Versuch eingesetzt. Die statistischen Analysen der multivariaten Regression zeigen, dass alle Fischarten (bis auf den Aal, hier sind die Fallzahlen zu gering für eine Aussage) beim zweiten Einsatz in einen Versuch eine höhere Wahrscheinlichkeit aufweisen in den Bypass einzuschwimmen. Dies könnte auf einen Lerneffekt zurückzuführen sein oder aber auch auf verminderte Kraftressourcen.

Aale

Wie in dieser Untersuchung ermittelte auch Amaral (2001) für amerikanische Aale eine sehr hohe Leitwirkung (FGE > 90%). Mit Louver und Bar Racks bei 45° und 15° Rechenausrichtung und mit installiertem Leitblech. Im Gegensatz dazu wurde in einer Untersuchung von Adams und Schwevers (1997) mit europäischen Aalen, keine Leitwirkung bei 90° und 15° Bar Racks (20 mm Stababstand) und 15° Louvern (10 cm Stababstand) ermittelt. Adams und Schwevers (1997) führen an, dass Aale sich schon ab 0,5 m/s nicht mehr von Leitstrukturen lösen konnten. In dieser Untersuchung, bei 0,6 m/s, konnten sich Aale ohne weiteres wieder von den untersuchten Leitreehen lösen. Wurde ein Aal jedoch mit seinem ganzen Körper gegen das engmaschige Gitter im Startabteil gepresst, war die Angriffsfläche so gross, dass er sich nicht mehr lösen konnte.

5.2 Ausblick

Beleuchtung

Die Versuche wurden hier alle bei Tag von morgens 8:00 bis abends 19:00 durchgeführt. Dabei wurde, um gleichbleibende Laborbedingungen herzustellen, auf eine gleichmässige und gleichbleibend helle Ausleuchtung des Kanals geachtet.

Es ist anzunehmen, dass sich die Fische bei Dunkelheit oder trübem Wasser anders verhalten könnten (Kemp & Williams 2009, Vowles & Kemp 2012). Der Erfolg des hier eingesetzten Leitbleches hängt stark davon ab auf welcher Wassertiefe die Fische abwandern. Denkbar wäre, dass sich viele Fischarten bei Dunkelheit oder in trübem Wasser weiter oben in der Wassersäule befinden, wodurch der Effekt des Leitbleches vermindert wäre. Es ist auch denkbar, dass sich die Leiteffizienz des Rechens verändern würde, wenn es dunkler oder das Wasser trüber wäre. Die Fische könnten sich dann weniger auf die visuelle Wahrnehmung verlassen und müssten sich vermehrt auf andere Wahrnehmungsformen verlassen. Keynard und Horgan (2001) haben festgestellt, dass Störe vermehrten Kontakt zu Rechenstrukturen bei geringerer Lichtintensität hatten.

Anzahl Fische pro Versuch

Der Vorteil unserer Versuchsdurchführung mit 1-3 Fischen war die gute Beobachtbarkeit des Verhaltens jedes einzelnen Fisches und die minimale Beeinflussung dieser durch Betäubung und Markierung. Testet man mit mehr als 3 Fischen lassen sich einzelne Fische nicht mehr unterscheiden. In den Versuchen mit Schwärmen hat sich gezeigt, dass diese nicht zusammenblieben, sondern dass sich einzelne Fische oder Gruppen abspalteten, in den Bypass einwanderten, aus diesem wieder heraus schwammen und sich wieder der Gruppe anschlossen. Deshalb liessen sich in diesem Versuchsaufbau keine grösseren Fischgruppen auswerten.

Für künftige Untersuchungen wird empfohlen, neben Einzelfischen vermehrt Fischschwärme zu verwenden. Für eine sichere Erkennung müssen die Individuen dann allerdings markiert werden (z.B. PIT tagging). Zusätzlich sind für diese Anwendungen entsprechende Veränderungen am Kanal nötig.

Fliessgeschwindigkeit und Tiefen

Weitere Versuche mit Strömungsgeschwindigkeiten von 0,9m/s bis 1,5m/s sind sinnvoll, da derartige Geschwindigkeiten typischerweise auch vor grösseren Kraftwerken auftreten können. Ebenfalls wäre es wünschenswert, mit deutlich höheren Wassertiefen zu arbeiten. Eine grössere Wassertiefe bedingt jedoch eine Abnahme bei den Fliessgeschwindigkeiten.

Versuchszeitraum

Die Aussagekraft der durchgeführten Versuche ist von der Motivation und Aktivität der Probanden abhängig. Die Aktivität von Fischen unterliegt Jahres- und tageszeitlichen Schwankungen. Während Wanderzeiträumen (beispielsweise für die Reproduktion, Nahrungssuche, Aufsuchen von Winterhabitaten) ist eine höhere Aktivität zu erwarten. Bei niedrigen Wassertemperaturen $< 5^{\circ}\text{C}$ ist mit geringerer Aktivität zu rechnen. Künftige Untersuchungen könnten noch gezielter in den Monaten mit erhöhter Wanderungsaktivität durchgeführt werden.

Veränderungen am Versuchsaufbau

Um mehr Fische auf einmal oder Versuche bei schlechter Sicht durchführen zu können, müsste der Versuchsaufbau erweitert werden. Denkbar wäre alle Fische zu markieren (PIT Tags) und

den Kanal am Bypass bzw. hinter dem Rechen mit entsprechenden Antennen auszurüsten. Dabei muss eine Betäubung der Fische in Kauf genommen werden.

Eine andere Möglichkeit wäre, hinter dem Rechen bzw. dem Bypass eine Fangeinrichtung (Reuse) zu installieren, so dass die Fische nicht wieder aufwärts wandern können, nachdem sie diese Strukturen passiert haben. Dabei ist jedoch zu beachten, dass alle Installationen im Bypass oder hinter dem Rechen die Strömungssituation und das Verhalten des Fisches beeinflussen können.

Für künftige Untersuchungen wird empfohlen, unterschiedliche Bypass Konstruktionen zu evaluieren. Denn durch Änderungen im Design des Bypasses kann die Abwanderung noch deutlich erleichtert und die Leiteffizienz weiter optimiert werden (Ducharme 1972).

Notwendigkeit weiterer Versuche

Es hat sich gezeigt, dass die Versuche mit den Bar Racks zu einer hohen Leiteffizienz für Fische führen können. Allerdings sind vor einem realen Einsatz an einem Kraftwerk noch diverse weitere Schritte nötig. Zum einen betrifft es die technischen Rahmenbedingungen am Kraftwerk selber (Kriewitz 2015), sowie die Probleme, dass die Lockströmung von der Trennpfeilerumströmung stark überlagert wird. Im Weiteren sind Lösungen beim Schwemmholzmanagement zu entwickeln.

Künftige Untersuchungen mit Rechenkonfigurationen mit weiter reduzierten Stabwinkeln sind nicht nur fischbiologisch, sondern ganz speziell aus der Sicht einer verbesserten Kraftwerkanströmung von Interesse. Zudem sind die Strömungsverhältnisse am Bypass äusserst wichtig und weitere Bypass-Konfigurationen sind zu untersuchen.

Die Untersuchungen an den fünf ausgewählten Fischarten sind auf weitere wichtige einheimische Fischarten auszudehnen, so dass sich das Verhalten der einheimischen Fische umfassender beurteilen lässt. Wichtige Grundlagen sind nun bereits erarbeitet und zusätzliche Untersuchungen sollten das Verhalten der Fische bei Nacht einschliessen.

Neben den künftigen Laborstudien ist jedoch daran zu arbeiten, möglichst rasch und in paralleler Weise Erfahrungen mit Bar Racks an einem Pilotkraftwerk zu sammeln.

6. Literatur

Absil, P. 1989. Biologie des stades précoce du barbeau fluviatile, *Barbus barbus* (L.) - Effets de la température sur le développement et la mortalité. Cahiers d'Éthologie Appliquée **9**: 561-562.

Adams, N.S. & Schwevers, D.U. 1997. Behavioral surveys of eels (*Anguilla anguilla*) migrating downstream under laboratory conditions. Institute of Applied Ecology, Neustader Weg 25, 36320 Kirtorf-Wahlen, Deutschland.

Adam, B., Kampke, W., Engler, O. & Lindemann, C. 2009a. Ethohydraulische Tests zur Rauigkeitspräferenz kleiner Fischarten und Individuen. In: Adam, B. & Lehmann, B. 2011. Ethohydraulik: Grundlagen, Methoden und Erkenntnisse. 1. Auflage, Springer Verlag, Berlin/Heidelberg.

Adam, B., Lindemann, C., Kampke, W. & Lehmann, B. 2009b. Ethohydraulische Tests zur Passierbarkeit von Schlitzten. In: Adam, B. & Lehmann, B. 2011. Ethohydraulik: Grundlagen, Methoden und Erkenntnisse. 1. Auflage, Springer Verlag, Berlin/Heidelberg.

Adam, B. & Lehmann, B. 2011. Ethohydraulik: Grundlagen, Methoden und Erkenntnisse. 1. Auflage, Springer Verlag, Berlin/Heidelberg.

Amaral, S., Cain, S., Black, J. & McMahon, B. 2001. Evaluation of Angled Bar Racks and Louvers for Guiding Fish at Water Intakes, *EPRI, PaloAlto, and Dominion Millstone Laboratories, Waterford, CT: 2001. 1005193.*

Arnold, G. 1969. The reactions of the plaice (*Pleuronectes platessa* L.) to water currents. Journal of Experimental Biology **51**: 681-697.

Arnold, G. 1974. Rheotropism in fishes. Biological Reviews **49**: 515-576.

Baras, E. 1992. Etude des stratégies d'occupation du temps et de l'espace chez le barbeau fluviatile, *Barbus barbus* (L.). Cahiers d'Éthologie Appliquée **12**: 125-442.

Baras, E. 1995. Thermal related variations of seasonal and daily spawning periodicity in *Barbus barbus*. Journal of Fish Biology **46**: 915-917.

Bardonnet, A. & Gaudin, P. 1990. Diel pattern of first downstream post-emergence displacement in grayling, *Thymallus thymallus* (L. 1758). Journal of Fish Biology **37**: 623-627.

Bardonnet, A., Gaudin, P. & Persat H. 1991. Microhabitats and diel downstream migration of young grayling (*Thymallus thymallus* L.). Freshwater Biology **26**: 365-376.

Bates, D.W. & Vinsonhaler, R. 1957. Use of Louvers for Guiding Fish. Transactions of the American Fisheries Society **86**: 38-57.

Bainbridge, R. 1975. The response of fish to shearing surfaces in the water. Swimming and flying in nature **2**: 529-540.

- Beamish, F.W.H. 1978. Swimming capacity. Academic Press, New York.
- Behrmann-Godel, J. & Eckmann, R. 2003. A preliminary telemetry study of the migration of silver European eel (*Anguilla anguilla* L.) in the River Mosel, Germany. *Ecology of Freshwater Fish* **12**: 196-202.
- Berg, R., Blank, S. & Strubelt, T. 1989. Fische in Baden-Württemberg. Ergebnisse einer landesweiten Fischkartierung und Bestandsuntersuchung. Ministerium für Ländlichen Raum, Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Stuttgart, 158 S.
- Blasel, K. 2011. Informationen zur Bypassakzeptanz durch Salmonidensmolts. In: Ebel, G. 2013. Fischschutz und Fischabstieg an Wasserkraftanlagen - Handbuch Rechen- und Bypasssysteme. Ingenieurbiologische Grundlagen, Modellierung und Prognose, Bemessung und Gestaltung. Mitteilungen aus dem Büro für Gewässerökologie und Fischereibiologie, Band **4**, Halle (Saale): 483 S.
- Brauner, C.J., Iwama, G.K. & Randall, D.J. 1994. The effects of short-duration seawater exposure on the swimming performance of wild and hatchery reared juvenile coho salmon (*Oncorhynchus kisutch*) during smoltification. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **51**: 2188-2194.
- Breder, C.M. 1965. Vortices and fish schools. *Zoologica* **50**: 97-114.
- Brett, J.R. 1964. The respiratory metabolism and swimming performance of young Sockeye salmon. *Journal of Fisheries Research Board Canada* **21**: 1183-1226.
- Breitenstein, M. & Kirchhofer, A. 2000. Growth, age structure and species association of the cyprinid *Alburnoides bipunctatus* in the River Aare, Switzerland. *Folia Zoologica Praha* **49**: 59-68.
- Brock, V.E. & Riffenburgh, R.H. 1960. Fish schooling: a possible factor in reducing predation. *Journal du Conseil Permanent International pour l'Exploration de la Mer* **25**: 307-317.
- Brown, C. & Warburton, K. 1997. Predator recognition and anti-predator responses in the rainbowfish *Melanotaenia eachamensis*. *Behavioural Ecology and Sociobiology* **41**: 61-68.
- Brown, L., Haro, A. & Castro-Santos, T. 2009. Three-dimensional movement of silver-phase American eels in the forebay of a small hydroelectric facility. In: Casselman, J.M. & Cairns D.K. (Eds.). Eels at the edge: science, status and conservation concerns. American Fisheries Society, Symposium 58, Bethesda, Maryland: 277-291.
- Castro-Santos, T. & Haro, A. 2003. Quantifying migratory delay: a new application of survival analysis methods. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **60**: 986-996.
- Clark, S.P. & Kehler, N. 2011. Turbulent flow characteristics in circular corrugated culverts at mild slopes. *Journal of Hydraulic Research* **49**: 676-684.
- Clapp, D.F., Clark, R.D. & Diana, J.S. 1990. Range, activity, and habitat of large, free-ranging brown trout in a Michigan stream. *Transactions of the American Fisheries Society* **119**: 1022-1034.

- Couzin, I.D., Krause, J., Franks, N.R. & Levin, S.A. 2005. Effective leadership and decision-making in animal groups on the move. *Nature* **433**: 513-516.
- Cunjak, R.A. 1996. Winter habitat of selected stream fishes and potential impacts from land-use activity. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **53**: 267-282.
- Day, R.L., Macdonald, T., Brown, C., Laland, K.N. & Reader, S.M. 2001. Interactions between shoal size and conformity in guppy social foraging. *Animal Behaviour* **62**: 917-925.
- Detert, M., Kriewitz-Byun, C.R., Albayrak, I. & Boes, R. 2014. Entwicklung und Anwendung eines automatisierten Fish-Tracking Moduls. Schlussbericht 30.09.2014, Auftraggeber: Bundesamt für Energie (www.bfe.admin.ch), eingereicht.
- Domenici, P. & Blake, R. 1997. The kinematics and performance of fish fast-start swimming. *Journal of Experimental Biology* **200**: 1165-1178.
- Ducharme, L.J.A. 1972. An application of louver deflectors for guiding Atlantic salmon (*Salmo salar*) smolts from power turbines. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada* **29**: 1397-1404.
- DWA 2005. Fischschutz- und Fischabstiegsanlagen - Bemessung, Gestaltung, Funktionskontrolle. 2. korrigierte Auflage - Juli 2005. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef: 256 S.
- Dyk, V. 1959. Zur Biologie und Physiologie der Äschenvermehrung. *Zeitschrift für Fischerei* **VIII** (4-6): 447-470.
- Ebel, G. 2013. Fischschutz und Fischabstieg an Wasserkraftanlagen - Handbuch Rechen- und Bypasssysteme. Ingenieurbiologische Grundlagen, Modellierung und Prognose, Bemessung und Gestaltung. Mitteilungen aus dem Büro für Gewässerökologie und Fischereibiologie, Dr. Ebel, Band 4, Halle (Saale): 483 S.
- Enders, E.C., Boisclair, D. & Roy, A.G. 2003. The effect of turbulence on the cost of swimming for juvenile Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **60**: 1149-1160.
- Enders, E.C., Gessel, M.H. & Williams, J.G. 2009. Development of successful fish passage structures at dams for downstream migrants requires knowledge of their behavioural response to accelerating flow. *The Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **66**: 2109-2117.
- Etessami, S. 1982. L'histologie des gonades chez deux cyprinidés *Alburnoides bipunctatus eichwaldi* (Filippi 1863) et *Barbus mursa miliaris* (Karman 1971) avec la description d'un cas d'hermaphrodisme chez ce dernier. *Cybium* (3^e série) **6** (2): 5-13.
- Gaudin, P. & Persat, H. 1985. Rythmes d'émergence et de dévalaison des alevins d'ombre commun (*Thymallus thymallus*). *Compte rendu hebdomadaire des Séances de l'Académie des Sciences* **301**: 843-846.
- Gerster, S. 1998. Hochrhein: Aufstiegskontrollen 1995/96; Vergleich mit früheren Erhebungen. Mitteilungen Zur Fischerei Nr. **60**. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern: 137 S.

- Godin, J.G.J. 1982. Migration of salmonid fishes during early life-history phases: daily and diurnal timing. In: Brannon, E.L. & Salo, E.O. (Eds.). Salmon and trout migratory behaviour symposium. University of Washington Press, Seattle, WA: 22-51.
- Godin, J.G.J. 1986. Anti-predator function of shoaling in teleost fishes: a selective review. *Naturalist Canadien* **113**: 241-250.
- Gougnard, I., Poncin, P., Ruwet, J.C. & Philippart, J.C. 1987. Description et analyse du comportement de reproduction du barbeau *Barbus barbus* (L.) en aquarium. *Cahiers d'Éthologie Appliquée* **7**: 293-302.
- Gustafson-Marjanen, K.I. & Dowse, H.B. 1983. Seasonal and diel patterns of emergence from the redd of Atlantic salmon (*Salmo salar*) fry. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **40**: 813-817.
- Guthruf, J. 1996. Populationsdynamik und Habitatwahl der Äsche *Thymallus thymallus* (L.) in drei verschiedenen Gewässern des schweizerischen Mittellandes. Dissertation an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich.
- Haefner, J.W. & Bowen, M.D. 2002. Physical-based model of fish movement in fish extraction facilities. *Ecological Modelling* **152**: 227-245.
- Hager, M.C. & Helfman, G.S. 1991. Safety in numbers: shoal size choice by minnows under predatory threat. *Behavioural Ecology and Sociobiology* **29**: 271-276.
- Haro, A., Odeh, M., Noreika, J. & Castro-Santos, T. 1998. Effect of Water Acceleration on Downstream Migratory Behavior and Passage of Atlantic Salmon Smolts and Juvenile American Shad at Surface Bypasses. *Transactions of the American Fisheries Society* **127**:118-127.
- Hofbauer, J. 1962. Aufstieg der Fische in den Fischpässen des mehrfach gestauten Mains. *Archiv für Fischereiwissenschaft* **13**: 92-125.
- Hofer, J. 1911. Wenig beachtete Fische unserer Gewässer. II. *Alburnus bipunctatus*. *Schweizerische Fischerei*: 30-33.
- Holcik, J., Kinzelbach, R., Sokolov, L.I. & Vasil'ev, V.P. 1989. *Acipenser sturio* LINNAEUS, 1758. In: Holcik, J. (Hrsg.). The freshwater fishes of Europe. Vol. 1, Part II: General introduction to fishes, Acipenseriformes. Wiesbaden (Aula): 367-394.
- Honsig-Erlenburg, W. & Schulz, N. 1989. Die Fische Kärntens. Eigenverlag des Naturwissenschaftlichen Vereins für Kärnten, Klagenfurt: 112 S.
- Hübner, D. 2003. The spawning and intragravel period of grayling (*Thymallus thymallus* L.) - Basics and effects of anthropogenic treatments. Dissertation an der Philipps-Universität Marburg.
- Huet, M. 1954. Biologie, profils en long et travers des eaux courantes. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture* **175**: 41-53.

- Huet, M. 1959. Profiles and Biology of Western European Streams as Related to Fish Management. Transactions of the American Fisheries Society **88**: 155-163.
- Hunt, P.C. & Jones, J.W. 1975. A population study of *Barbus barbus* L. in the River Severn, England – III. Growth. Journal of Fish Biology **7**: 361-376.
- Jansen, H.M., Winter, H.V., Brujjs, M.C.M. & Polman J.G. 2007. Just go with the flow? Route selection and mortality during downstream migration of silver eels in relation to river discharge. ICES Journal of Marine Science **64**: 1437-1443.
- Jamieson, D., Bonnet, M., Jellyman, D. & Unwin, M. 2007. Fish screening good practice guidelines for Canterbury, NIWA Client Report CHC2007-092.
- Kabisch, K. 1974. Zur Systematik von *Alburnoides bipunctatus*. Vestník Československé Společnosti Zoologické **38**: 243-250.
- Kainz, E. & Gollmann, H.P. 1990. Beiträge zur Verbreitung einiger Kleinfischarten in österreichischen Fließgewässern. Teil 4: Schneider (*Alburnoides bipunctatus*). Österreichs Fischerei **8/9**: 187-192.
- Keenleyside, M.H.A. 1955. Some Aspects of the Schooling Behaviour of Fish. Behaviour **8**: 183-248.
- Kemp, P.S. & Williams, J.G. 2009. Illumination influences the ability of migrating juvenile salmonids to pass a submerged experimental weir. Ecology of Freshwater Fish **18**: 297-304.
- Kemp, P.S., Gessel, M.H. & Williams, J.G. 2005. Fine-scale behavioral responses of Pacific salmonid smolts as they encounter divergence and acceleration of flow. Transactions of the American Fisheries Society **134**: 390-398.
- Kemp, P.S., Gessel M.H. & Williams, J.G. 2008. Response of downstream migrant juvenile Pacific salmonids to accelerating flow and overhead cover. Hydrobiologia **609**: 205-217.
- Kriewitz, C. R. (2015) Leitrechen an Fischabstiegsanlagen - Hydraulik und fischbiologische Effizienz, Mitteilung 230, R. M. Boes, ed., VAW, ETH Zürich, Schweiz.
- Kristiansen, H. & Doving, K.B. 1996. The migration of spawning stocks of grayling, *Thymallus thymallus*, in Lake Mjøsa, Norway. Environmental Biology of Fishes **47**: 43-50.
- Krupka, I. 1988. Early development of the barbel [*Barbus barbus* (Linnaeus 1758)]. Práce Ústavu Rybnářství a Hydrobiologie **6**: 115-138.
- Krause, J. & Godin, J.G.J. 1995. Predator preferences for attacking particular prey group sizes: consequences for predator hunting success and prey predation risk. Animal Behaviour **50**: 465-473.
- Kynard, B. 1993. Fish behavior important for fish passage. In: Bates, K. compiler. Fish passage policy and technology. American Fisheries Society, Bioengineering Section, Bethesda, Maryland.

- Kynard, B. & Horgan, M. 2001. Guidance of yearling shortnose and pallid sturgeon using vertical bar rack and louver arrays. *North American Journal of Fisheries Management* **21**: 561-570.
- Landa, J.T. 1998. Bioeconomics of schooling fishes: selfish fish, quasi-free riders, and other fishy tales. *Environmental Biology of Fishes* **53**: 353-364.
- Landeau, L. & Terborgh, J. 1986. Oddity and the 'confusion effect' in predation. *Animal Behaviour* **34**: 1372-1380.
- Larinier, M. & Travade, F. 2002. Downstream migration: problems and facilities. *BFPF- Connaissance et Gestion du Patrimoine Aquatique* **364**: 181-207.
- Lecour, C. & Rathcke, P.C. 2006. Abwanderung von Fischen im Bereich von Wasserkraftanlagen - Untersuchungen an den Wasserkraftanlagen Müden/Dieckhorst, Dringenauer Mühle/Bad Pyrmont und Hannover-Herrenhausen. Niedersächsisches Landesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit, Institut für Fischkunde Cuxhaven – Binnenfischerei in Niedersachsen **8**: 51 S.
- Lelek, A. 1987. *The freshwater fishes of Europe*. 9. Auflage, Aula, Wiesbaden: 147-49.
- Lelek, A. & Buhse, G. 1992. *Fische des Rheins - früher und heute*. Springer, Heidelberg: 142-200 S.
- Lelek, A. 1996. General considerations regarding the decline of species. In: Kirchhofer, A. & Hefti, D. (Ed.). *Conservation of Endangered Freshwater Fish in Europe*. Birkhäuser, Basel: 1-7.
- Liao, J.C., Beal, D.N., Lauder, G.V. & Triantafyllou, M.S. 2003. Fish exploiting vortices decrease muscle activity. *Science* **302**: 1566-1569.
- Liao, J.C. 2007. A review of fish swimming mechanics and behaviour in altered flows. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B. Biological Sciences* **362**: 1973-1993.
- Lucas, M. & Frear, P. 1997. Effects of a flow gauging weir on the migratory behaviour of adult barbel, a riverine cyprinid. *Journal of Fish Biology* **50**: 382-396.
- Lyon, E.P. 1904. On rheotropism. Rheotropism in fishes. In: Arnold, G. (Ed.). *Rheotropism in fishes*. *Biological reviews* **49**: 515-576.
- Magurran, A.E., Oulton, W. & Pitcher, T.J. 1985. Vigilant behaviour and shoal size in minnows. *Zeitschr. Tierpsychol.* **67**: 167-178.
- Magurran, A.E. & Pitcher, T.J. 1987. Foraging, timidity and shoal size in minnows and goldfish. *Behavioural Ecology and Sociobiology* **12**: 142-152.
- Mallen-Cooper, M. 1997. Developing fishways for non-salmonid fishes: A case study from the Murray River in Australia. In: Odeh, M. & Bethesda, M.D.. *Innovations in Fish Passage Technology*. American Fisheries Society: 173-195.

- Mikheyev, V.N. 1995. Body size and behavior of juvenile fish in territorial and schooling interactions. *Journal of Ichthyology* **35**: 99-110.
- Miller, R.C. 1922. The significance of the gregarious habit. *Ecology* **3**: 122-126.
- National Marine Fisheries Service 1997. Fish Screening Criteria for Anadromous Salmonids, Long Beach, CA.
- Neill, S.R. & Cullen, J.M. 1974. Experiments on whether schooling by their prey affects the hunting behaviour of cephalopods and fish predators. *Journal of Zoology* **172**: 549-569.
- Normandeau Associates, 1999. Evaluation of Downstream Passage Facilities for Atlantic Salmon (*Salmo salar*) Smolts at the Gardners Falls Hydroelectric Project, Deerfield River, Buckland, Massachusetts. Angefertigt für: Northeast Utilities Service Company. R-18178.000.
- Northcote, T.G. 1995. Comparative biology and management of Arctic and European grayling (*Salmonidae*, *Thymallus*). *Reviews in Fish Biology and Fisheries* **5**: 141-194.
- Oliva, O. 1953. Bemerkungen zum Vorkommen von *Alburnoides bipunctatus* und *Leucaspius delineatus* in Mitteleuropa. *Zoologischer Anzeiger* **150**: 201-202.
- Ovidio, M., Parkinson, D., Sonny, D. & Philippart, J.-C. 2004. Spawning movements of European grayling *Thymallus thymallus* in the River Aisne (Belgium). *Folia Zoologica* **53**: 87-98.
- Partridge, B.L. 1980. The effect of school size on the structure and dynamics of minnow schools. *Animal Behaviour* **28**: 68-77.
- Pavlov, D.S. 1989. Structures assisting the migrations of non-salmonid fish. USSR.-FAO Fisheries Technical Paper **8**: 1-97.
- Pavlov, D.S., Lupandin, A.I. & Kostin, V.V. 2002. Downstream migration of fish through dams of hydroelectric power plants. Moskau, Oak Ridge / Tennessee (Severtsov Research Institute of Ecology and Evolution, U.S. Department of Energy): 249 S.
- Peake, S. 2004. An evaluation of the Use of Critical Swimming Speed for Determination of Culvert Water Velocity Criteria for Smallmouth Bass. *Transactions of the American Fisheries Society* **133**: 1472-1479.
- Pedersen, L.F., Koed, V. & Malte, H. 2008. Swimming performance of wild and F1 hatchery reared Atlantic salmon (*Salmo salar*) and brown trout (*Salmo trutta*) smolts. *Ecology of Freshwater Fish* **17**: 425-431.
- Penaz, M. 1973. Embryonic development of the barb, *Barbus barbatus* (Linnaeus, 1758). *Zool. Listy* **22**: 363-375.
- Penaz, M. 1977. Population analysis of the barb *Barbus barbatus* from some Moravian rivers (Czechoslovakia). *Acta Scientiarum Naturalium, Brno* **11**: 1-30.
- Persat, H. 1976. Principaux aspects de l'écologie de l'Ombre commun. Thèse de Doctorat de 3ème cycle de Sciences Biologiques, Université Claude Bernard, Lyon I: 69 S.

- Philippart, J.C. 1977. Contribution à l'hydrobiologie de l'Ourthe. Dynamique des populations et productions de quatre espèces de poissons Cyprinidae: *Barbus barbus* (L.), *Leuciscus cephalus* (L.), *Chondrostoma nasus* (L.) et *Leuciscus leuciscus* (L.). Thèse de doctorat en Sciences zoologiques, Université de Liège: 225 S.
- Philippart, J.C. 1982. Mise au point de l'alevinage contrôlé du barbeau *Barbus barbus* (L.) en Belgique - perspectives pour le repoissonnement des rivières. Cahiers d'Éthologie Appliquée **2**: 173-202.
- Philippart, J.C. 1989. Ecologie des populations de poissons et caractéristiques physiques et chimiques des rivières dans le bassin de la Meuse belge. Bulletin de la Société de Géographie de Liège **25**: 175-198.
- Pitcher, T.J. & Parrish, J.K. 1993. Functions of shoaling behaviour in teleosts. In: Pitcher, T.J. (Ed.). Behaviour of Teleost Fishes. Chapman & Hall, London: 363-439.
- Pitcher, T.J. & Wyche, C.J. 1983. Predator avoidance behaviour of sand-eel schools: why do schools seldom split? In: Noakes, D.L.G., Lindquist, B.G., Helfman G.S. & Ward, J.A. (Ed.). Predators and Prey in Fishes. Springer Netherlands. **2**: 193-204.
- Prokes, M., Sovcik, P., Penaz, M., Barus, V., Spurny, P. & Vilizzi, L. 2006. Growth of barbel, *Barbus barbus*, in the River Jihlava following major habitat alteration and estimated by two methods. Folia Zoologica **55**: 86-96.
- Rádl, E.M. 1903. Untersuchungen über den Phototropismus der Tiere. Zitiert in: Arnold, G. 1974. Rheotropism in fishes. Biological reviews **49**: 515-576.
- Ruggles, C. & Ryan, P. 1964. An investigation of louvers as a method of guiding juvenile Pacific salmon. Fish Culture Development Branch, Department of Fisheries of Canada, Vancouver, B.C.
- Russon, I.J. 2011. The Response of Eel, Lamprey and Brown Trout to Conditions Associated with Barriers to Up- and Downstream Movement Under Experimental Conditions in a Flume. Dissertation an der University of Southampton, School of Civil Engineering and the Environment: 235 S.
- Russon, I.J. & Kemp, P.S. 2011. Advancing provision of multi-species fish passage: Behaviour of adult European eel (*Anguilla anguilla*) and brown trout (*Salmo trutta*) in response to accelerating flow. Ecological Engineering **37**: 2018-2024.
- Schiemer, F. 1988. Gefährdete Cypriniden - Indikatoren für die ökologische Intaktheit von Flusssystemen. Natur und Landschaft **63**: 370-373.
- Scott, A. 1985. Distribution, growth and feeding of post-emergent grayling (*Thymallus thymallus*) in an English river. Transactions of the American Fisheries Society **114**: 525-531.
- Scruton, D.A., Pennell, C.J., Robertson, M.J., Clarke, K.D., Eddy, W. & McKinley, R.S. 2005. Telemetry studies of the passage route and entrainment of downstream migrating wild Atlantic salmon (*Salmo salar*) smolts at two hydroelectric installations on the Exploits River, Newfoundland, Canada. In: Spedicato, M.T., Lembo, G. & Marmulla, G. (Ed.). Aquatic

Telemetry: Advances and Applications. Proceedings of the fifth conference on fish telemetry held in Europe. Ustica, Italy, 9-13 June 2003. Rome, FAO/COISPA, 91-101.

Schmidt, G.W. 1982. Barben (*Barbus barbus* L.) künstlich vermehrt. *Fischwirt* **32**: 66-68.

Seghers, B.H. 1974. Schooling behaviour in the guppy (*Peocilia reticulata*): an evolutionary response to predation. *Evolution* **28**: 486-489.

Sempeski, P. & Gaudin, P. 1995a. Habitat selection by grayling I. Spawning habitats. *Journal of Fish Biology* **47**: 256-265.

Sempeski, P. & Gaudin, P. 1995b. Habitat selection by grayling II. Preliminary results on larval and juvenile daytime habitats. *Journal of Fish Biology* **47**: 345-349.

Shaw, E. 1978. Schooling fishes. *American Scientist* **66**: 166 - 175.

Skora, S. 1972. The cyprinid *Alburnoides bipunctatus* from the basins of the rivers Upper San and Dunajec. *Acta Hydrobiologica* **14**: 173-204.

Smith, K.M., King, D.K. 2005. Dynamics and extent of larval lake sturgeon *Acipenser fluvescens* drift in the Upper Black River, Michigan. *Journal of Applied Ichthyology* **21**: 161-168.

Sogard, S.M. & Olla, B.L. 1997. The influence of hunger and predation risk on group cohesion in a pelagic fish, walleye pollock *Theragra chalcogramma*. *Environmental Biology of Fishes* **50**: 405-413.

Stira, R.J. & Robinson, D.A. 1997. Effectiveness of a louver bypass system for downstream passage of Atlantic Salmon smolts and juvenile clupeids in the Holyoke Canal, Connecticut River, Holyoke, Massachusetts. Fish Passage Workshop. Milwaukee, Wisconsin.

Svendsen, J.C., Skov, J., Bildsoe, M. & Steffensen, J.F. 2003. Intra-school positional preference and reduced tailbeat frequency on trailing positions in schooling roach under experimental conditions. *Journal of Fish Biology* **62**: 834-846.

Taft, E.P. 1986. Assessment of downstream migrant fish protection technologies for hydroelectric application. EPRI research project 2694-1. Boston.

Taft, E.P. & Mussalli Y.G. 1978. Fish Diversion and Transportation System for Power Plant Application. *Fisheries* **3**: 3, 2-5

Tesch, F.W. 1994. Verfolgung von Blankaalen in Weser und Elbe. *Fischökologie* **7**: 47-59.

Tomichek, C. & Sisk, T. 2006. Evaluation of an angled louver facility for guiding Sturgeon to a downstream bypass. Report angefertigt für Electric Power Research Institute (No. 1011786), 100 S., Palo Alto / California (Kleinschmidt Associates).

Tudorache, C., Viaene, P., Blust, R., Vereecken, H. & De Boeck, G. 2008. A comparison of swimming capacity and energy use in seven European freshwater fish species. *Ecology of Freshwater Fish* **17**: 284-291.

- Tudorache, C., De Boeck, G. & Claireaux, G. 2013. Forced and Preferred Swimming Speeds of Fish: A Methodological Approach. In *Swimming Physiology of Fish*. Springer Verlag: 81-108.
- Turnpenny, A.W.H. & O'Keeffe, N. 2005. Screening for Intake and Outfalls: a best practice guide. Bristol Environment Agency UK: 154 S.
- Videler, J.J. 1993. *Fish Swimming*. Chapman & Hall, Fish and Fisheries Series 10, London, 260 S.
- Vowles, A.S. & Kemp, P.S. 2012. Effects of light on the behaviour of brown trout (*Salmo trutta*) encountering accelerating flow: Application to downstream fish passage. *Southampton. Ecological Engineering* **47**: 247– 253.
- Webb, P.W. & Weihs, D. 1994. Hydrostatic stability of fish with swim bladders: not all fish are unstable. *Canadian Journal of Zoology* **72**: 1149-1154.
- Webb, P.W. 2002. Control of posture, depth, and swimming trajectories of fishes. *Integrative and comparative biology* **42**: 94-101.
- Weihs, D. 1973. The mechanism of rapid starting of slender fish. *Biorheology* **10**: 343-350.
- West, R.L., Smith, M.W., Barber, W.E., Reynolds, J.B. & Haakon, H.O.P. 1992. Autumn migration and overwintering of Arctic grayling in coastal streams of the Arctic National Wildlife Refuge, Alaska. *Transactions of the American Fisheries Society* **121**: 709-715.
- Wiesbauer, H., Bauer, T., Jagsch, A., Jungwirth, M. & Uiblein, F. 1991. *Fischökologische Studie mittlere Salzach*. Abteilung Hydrobiologie, Fischereiwirtschaft und Aquakultur. Institut für Wasserversorgung, Gewässergüte und Fischereiwirtschaft. Universität für Bodenkultur, Wien. Bundesanstalt für Fischereiwirtschaft, Scharfling: 170 S.
- Winfield, J.I. & Nelson, J. 1991. *Cyprinid fishes. Systematics, biology and exploitation*. Chapman and Hall, London: 667 S.
- Witkowski, A. 1975. The grayling (*Thymallus thymallus* (L.)) from the rivers of lower Silesia. *Acta Hydrobiologica* **17**: 355-370.
- Young, M.K. 1998. Absence of autumnal changes in habitat use and location of adult Colorado River cutthroat trout in a small stream. *Transactions of the American Fisheries Society* **127**: 147–151.

7. Anhang

7.1 Statistische Analysen

7.1.1 Multivariate Regression - glm - Tabellen

Tabelle 14: Ergebnisse der glm-Modelle mit Bypass-Einstieg als abhängige Variable.

	Modelle			
	1	2	3	4
Rechenausrichtung 30°	-0,166 (0,256)	0,199 (0,297)	0,190 (0,298)	-0,295 (0,326)
Stabausrichtung 45°	1,201*** (0,217)	1,221*** (0,229)	1,230*** (0,230)	1,281*** (0,241)
Stabausrichtung 0°	0,263 (0,432)	-0,105 (0,457)	-0,103 (0,459)	0,626 (0,489)
Stababstand 11 cm	-1,097*** (0,217)	-1,111*** (0,229)	-1,133*** (0,230)	-1,164*** (0,238)
Aal		-0,024 (0,416)	-0,029 (0,418)	-1,186 -1,048
Äsche		-1,175*** (0,423)	-1,183*** (0,424)	-1,531** (0,595)
Bachforelle		0,097 (0,397)	0,101 (0,398)	-0,606 (0,464)
Barbe		0,283 (0,205)	0,282 (0,206)	0,163 (0,259)
Einsatz			0,432** (0,183)	0,446** (0,186)
Fliessgeschwindigkeit				-1,618** (0,707)
Mit Leitblech				1,633*** (0,369)
Länge				0,011 (0,017)
Constant	0,665*** (0,190)	0,517** (0,225)	-0,115 (0,349)	0,492 (0,524)
Observations	751	751	751	751
Log Likelihood	-380,671	-374,726	-371,908	-358,630
Akaike Inf. Crit.	771,342	767,452	763,816	743,261
<i>Note:</i>	* $p < 0,1$; ** $p < 0,05$; *** $p < 0,01$			

Tabelle 15: Ergebnisse der glm-Modelle mit Verweigerung als abhängige Variable.

	Modelle			
	1	2	3	4
Rechenausrichtung 30°	0,807** (0,352)	-0,092 (0,441)	-0,083 (0,443)	0,260 (0,499)
Stabausrichtung 45°	-1,143*** (0,372)	-1,081** (0,429)	-1,092** (0,431)	-1,442*** (0,477)
Stabausrichtung 0°	-1,391** (0,677)	-0,642 (0,755)	-0,651 (0,757)	-1,817** (0,824)
Stababstand 11 cm	-0,882** (0,428)	-1,114** (0,454)	-1,113** (0,455)	-1,183** (0,486)
Aal		-1,614** (0,774)	-1,611** (0,775)	-0,896 (2,773)
Äsche		1,090** (0,470)	1,098** (0,472)	1,065 (1,163)
Bachforelle		-0,680 (0,510)	-0,683 (0,511)	-0,549 (0,706)
Barbe		-4,214*** (1,019)	-4,221*** (1,019)	-4,374*** (1,103)
Einsatz			-0,406 (0,288)	-0,416 (0,299)
Fliessgeschwindigkeit				6,525** (1,582)
Mit Leitblech				-0,971** (0,445)
Länge				-0,013 (0,049)
Constant	-1,719*** (0,276)	-0,679** (0,308)	-0,083 (0,519)	-3,020*** (1,138)
Observations	751	751	751	751
Log Likelihood	-208,545	-166,569	-165,562	-152,915
Akaike Inf. Crit.	427,089	351,139	351,124	331,829
<i>Note:</i>	* $p < 0,1$; ** $p < 0,05$; *** $p < 0,01$			

Tabelle 16: Ergebnisse der glm-Modelle mit Rechenpassage als abhängige Variable.

	Modelle			
	1	2	3	4
Rechenausrichtung 30°	-0,698* (0,402)	-0,388 (0,405)	-0,379 (0,406)	0,258 (0,454)
Stabausrichtung 45°	-1,005*** (0,240)	-1,109*** (0,258)	-1,112*** (0,259)	-1,067*** (0,272)
Stabausrichtung 0°	0,925* (0,550)	0,672 (0,560)	0,673 (0,561)	0,034 (0,598)
Stababstand 11 cm	1,591*** (0,242)	1,739*** (0,265)	1,761*** (0,266)	1,734*** (0,279)
Aal		1,193** (0,499)	1,205** (0,500)	3,149** (1,157)
Äsche		-14,030 (596,417)	-14,023 (594,458)	-13,405 (545,001)
Bachforelle		0,365 (0,592)	0,365 (0,593)	1,526** (0,662)
Barbe		0,878*** (0,248)	0,887*** (0,249)	1,078*** (0,297)
Einsatz			-0,395* (0,221)	-0,403* (0,224)
Fliessgeschwindigkeit				-0,183 (0,797)
Mit Leitblech				-2,884*** (0,801)
Länge				-0,017 (0,018)
Constant	-1,451*** (0,222)	-2,039*** (0,290)	-1,472*** (0,425)	-1,198** (0,610)
Observations	751	751	751	751
Log Likelihood	-279,549	-269,885	-268,273	-256,796
Akaike Inf. Crit.	569,098	557,770	556,545	539,592
<i>Note:</i>	* $p < 0,1$; ** $p < 0,05$; *** $p < 0,01$			

7.1.2 Interaktionen

Für alle folgenden Interaktionsplots wurden alle Konfigurationen zusammen genommen, deshalb ergeben sich andere Werte als in den Grafiken der Ergebnisse. In den Grafiken der Ergebnisse wurden gleiche Konfigurationen mit derselben Anzahl verglichen. Hier jedoch wurden alle Konfigurationen verglichen, wie in der Multivariaten Regression (glm). Dies ermöglicht eine differenziertere Interpretation. Nur die Konfiguration mit 0,8 m/s (Barben) wurde hier nicht verwendet, da sie nur mit einer Fischart getestet wurde.

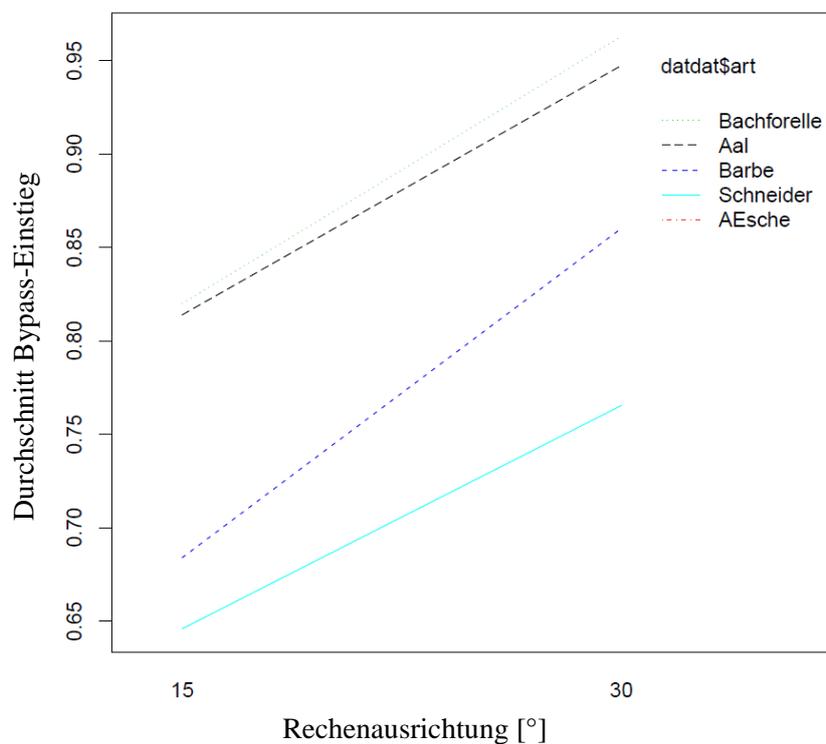


Abbildung 35: Interaktion des Versuchsergebnisses Bypass-Einstieg und der Rechenausrichtung. Die Äsche wurde nur bei 30° Rechenausrichtung untersucht und ist deshalb nicht dargestellt.

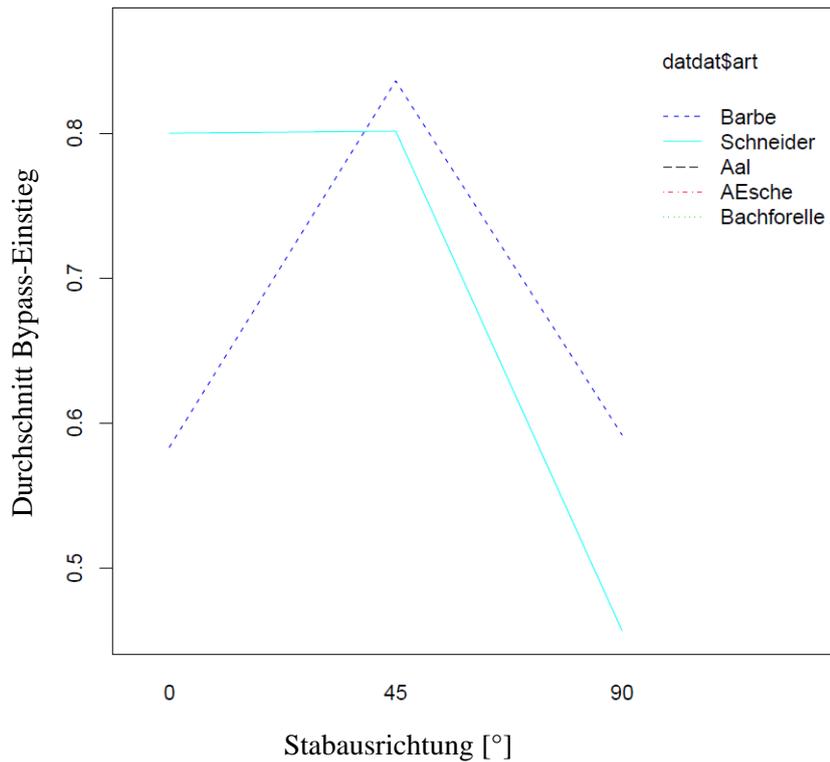


Abbildung 36: Interaktion des Versuchsergebnisses Bypass-Einstieg und der Stabausrichtung. Nur Barben und Schneider sind dargestellt, nur diese wurden bei drei Stabausrichtungen untersucht.

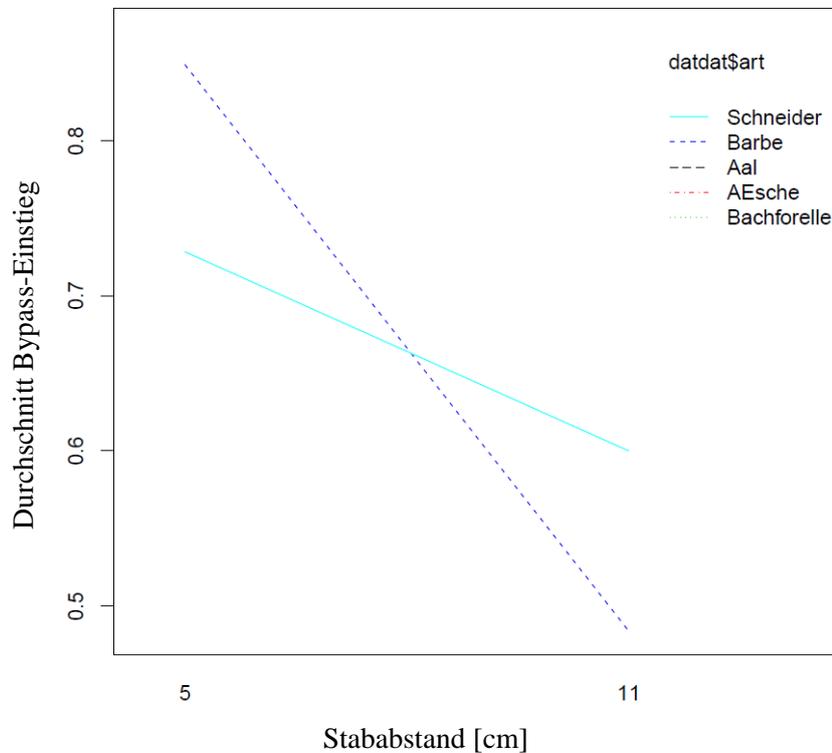


Abbildung 37: Interaktion des Versuchsergebnisses Bypass-Einstieg und des Stababstandes. Nur Barben und Schneider sind dargestellt, nur diese wurden bei zwei Stababständen untersucht.

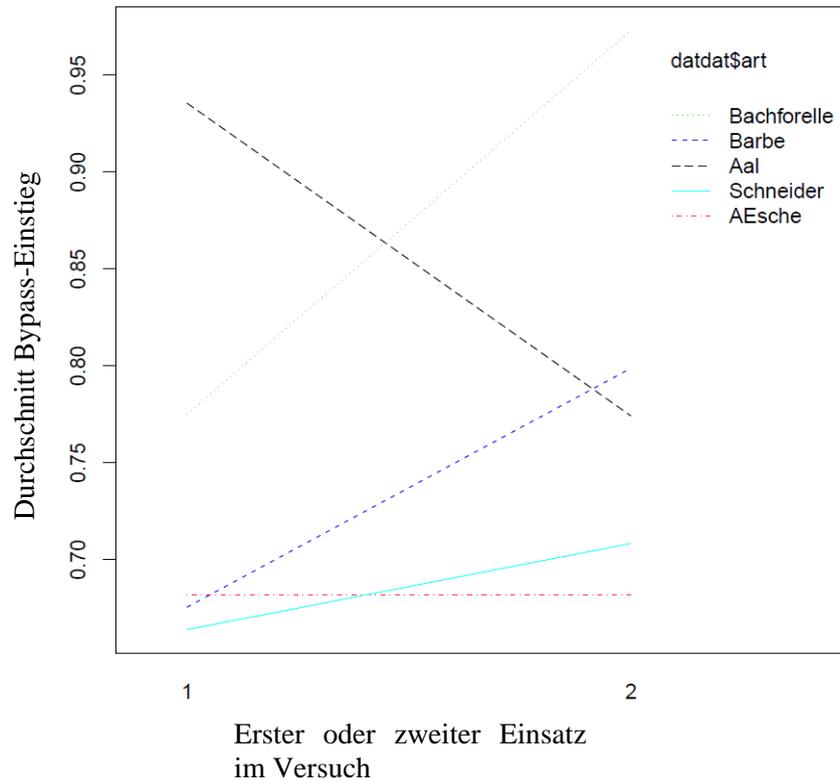


Abbildung 38: Interaktion des Versuchsergebnisses Bypass-Einstieg und des Einsatzes.

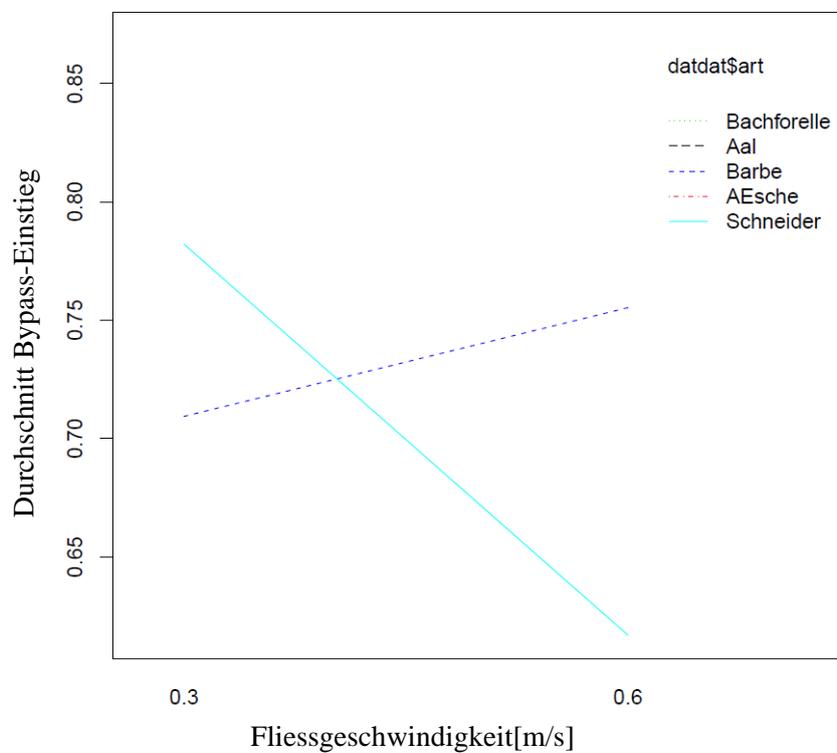


Abbildung 39: Interaktion des Versuchsergebnisses Bypass-Einstieg und der Fließgeschwindigkeit. Nur Barben und Schneider sind dargestellt, nur diese wurden bei zwei Fließgeschwindigkeiten untersucht.

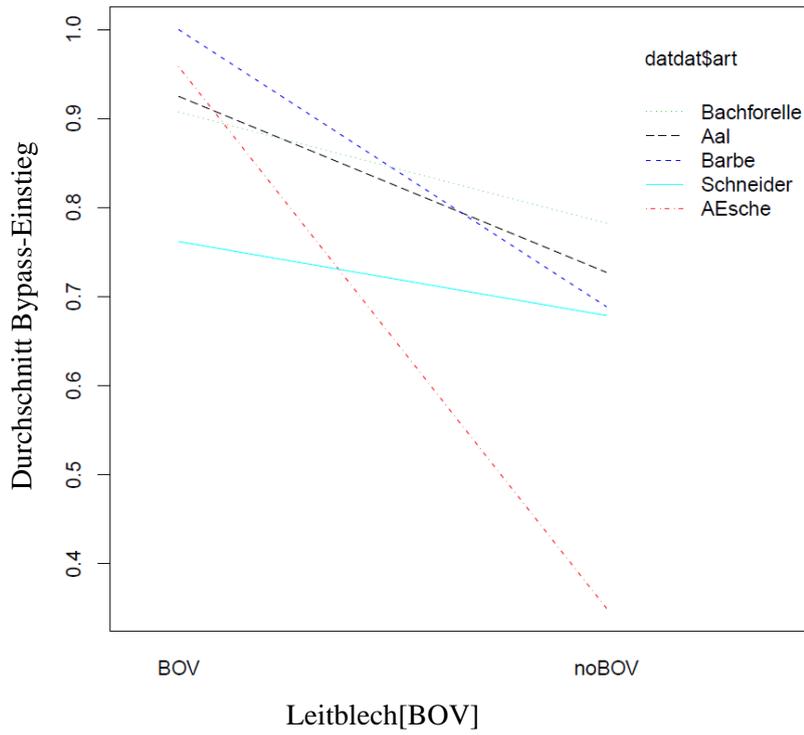


Abbildung 40: Interaktion des Versuchsergebnisses Bypass-Einstieg und des Bodenbleches.

7.2 Messungen der Fließgeschwindigkeit

7.2.1 Louver-Konfiguration mit $\alpha = 15^\circ$

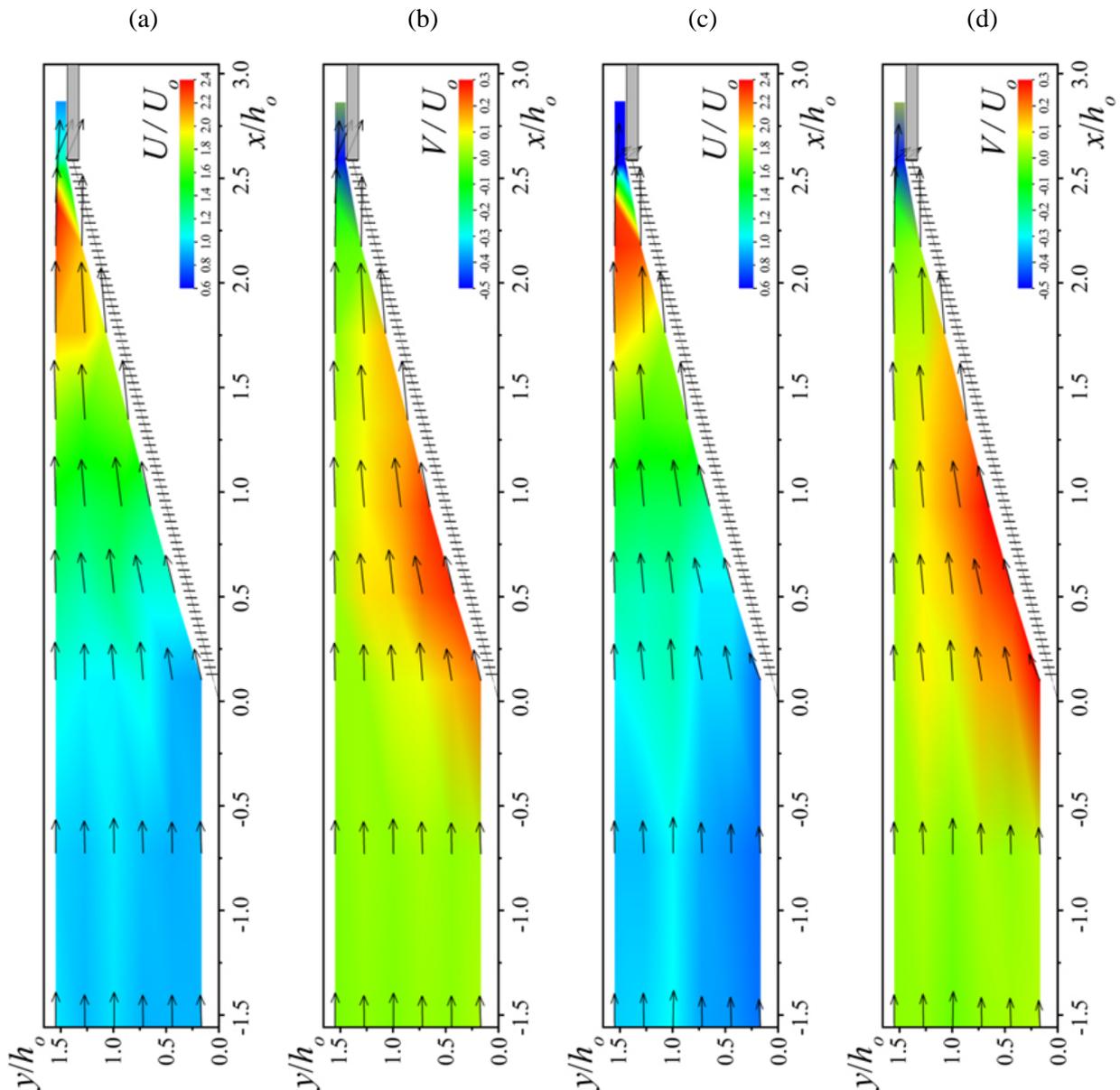
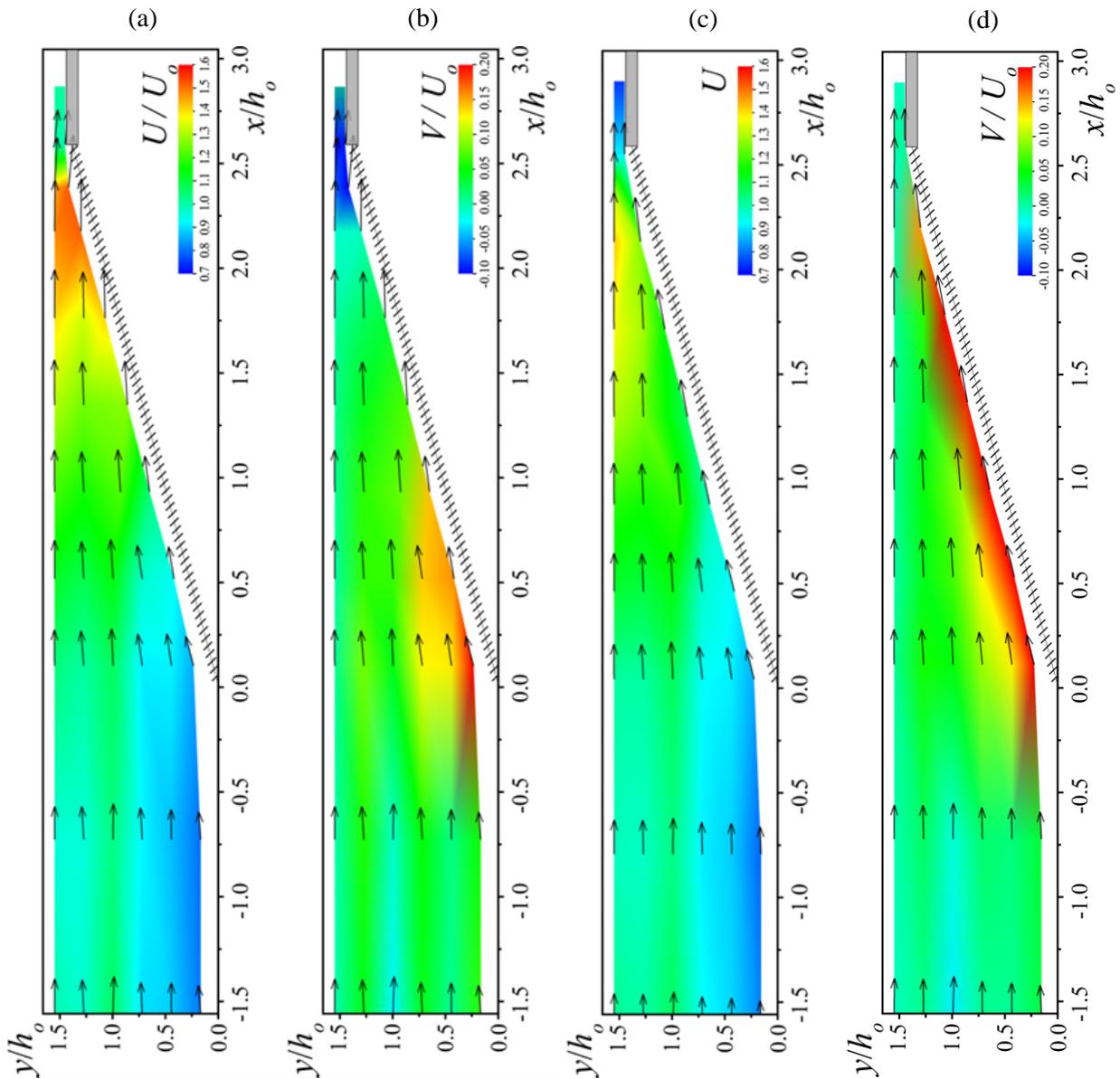
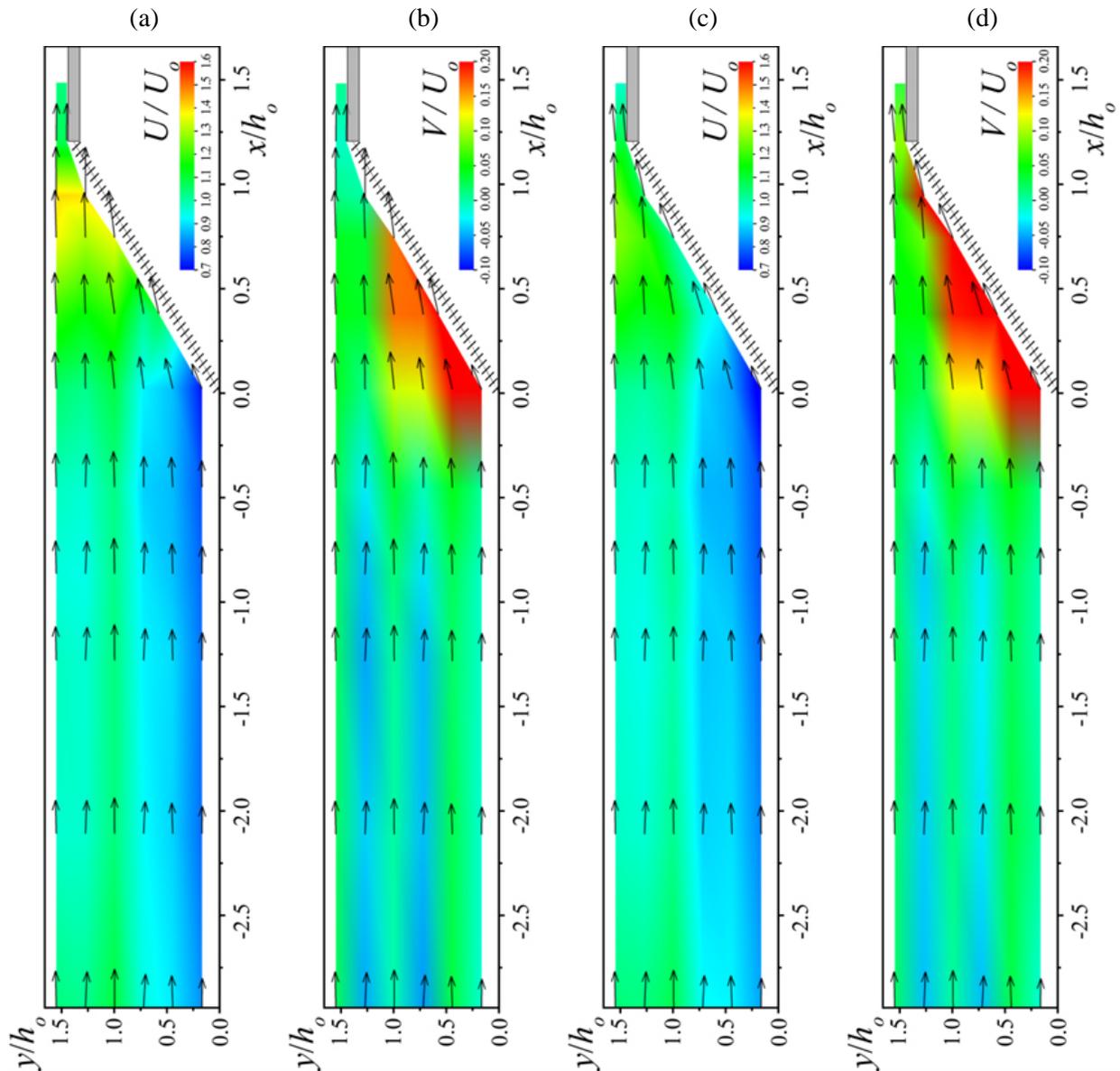


Abbildung 41: Bewegungsgrößen der Louver-Konfiguration mit $\alpha = 15^\circ$.

In der Mitte des Abflusshorizontes, bei $z/h_0 = 0,5$: (a) U , (b) V und in Sohlennähe bei $z/h_0 = 0,06$: (c) U , (d) V . Mit U = Fließgeschwindigkeit in Längsrichtung des Kanals, U_0 = Fließgeschwindigkeit am Einlauf, V = Fließgeschwindigkeit in Querrichtung (von rechts nach links) des Kanals, y/h_0 = Position in der Breite des Kanals, x/h_0 = Position in der Länge des Kanals, z/h_0 = Position in der Höhe des Kanals (Kriewitz 2015).

7.2.2 Bar Rack-Konfiguration mit $\alpha = 15^\circ$ Abbildung 42: Bewegungsgrößen der Bar Rack-Konfiguration mit $\alpha = 15^\circ$.

Bei $z/h_0 = 0,06$, ohne Bodenleitblech: (a) U , (b) V und analog mit Bodenblech: (c) U , (d) V . Mit U = Fließgeschwindigkeit in Längsrichtung des Kanals, U_0 = Fließgeschwindigkeit am Einlauf, V = Fließgeschwindigkeit in Querrichtung (von rechts nach links) des Kanals, y/h_0 = Position in der Breite des Kanals, x/h_0 = Position in der Länge des Kanals, z/h_0 = Position in der Höhe des Kanals (Kriewitz 2015).

7.2.3 Bar Rack-Konfiguration mit $\alpha = 30^\circ$ Abbildung 43: Bewegungsgrößen der Bar Rack-Konfiguration mit $\alpha = 30^\circ$.

Bei $z/h_0 = 0,06$, ohne Bodenleitblech: (a) U , (b) V und analog mit Bodenblech: (c) U , (d) V . Mit U = Fließgeschwindigkeit in Längsrichtung des Kanals, U_0 = Fließgeschwindigkeit am Einlauf, V = Fließgeschwindigkeit in Querrichtung (von rechts nach links) des Kanals, y/h_0 = Position in der Breite des Kanals, x/h_0 = Position in der Länge des Kanals, z/h_0 = Position in der Höhe des Kanals (Kriewitz 2015).

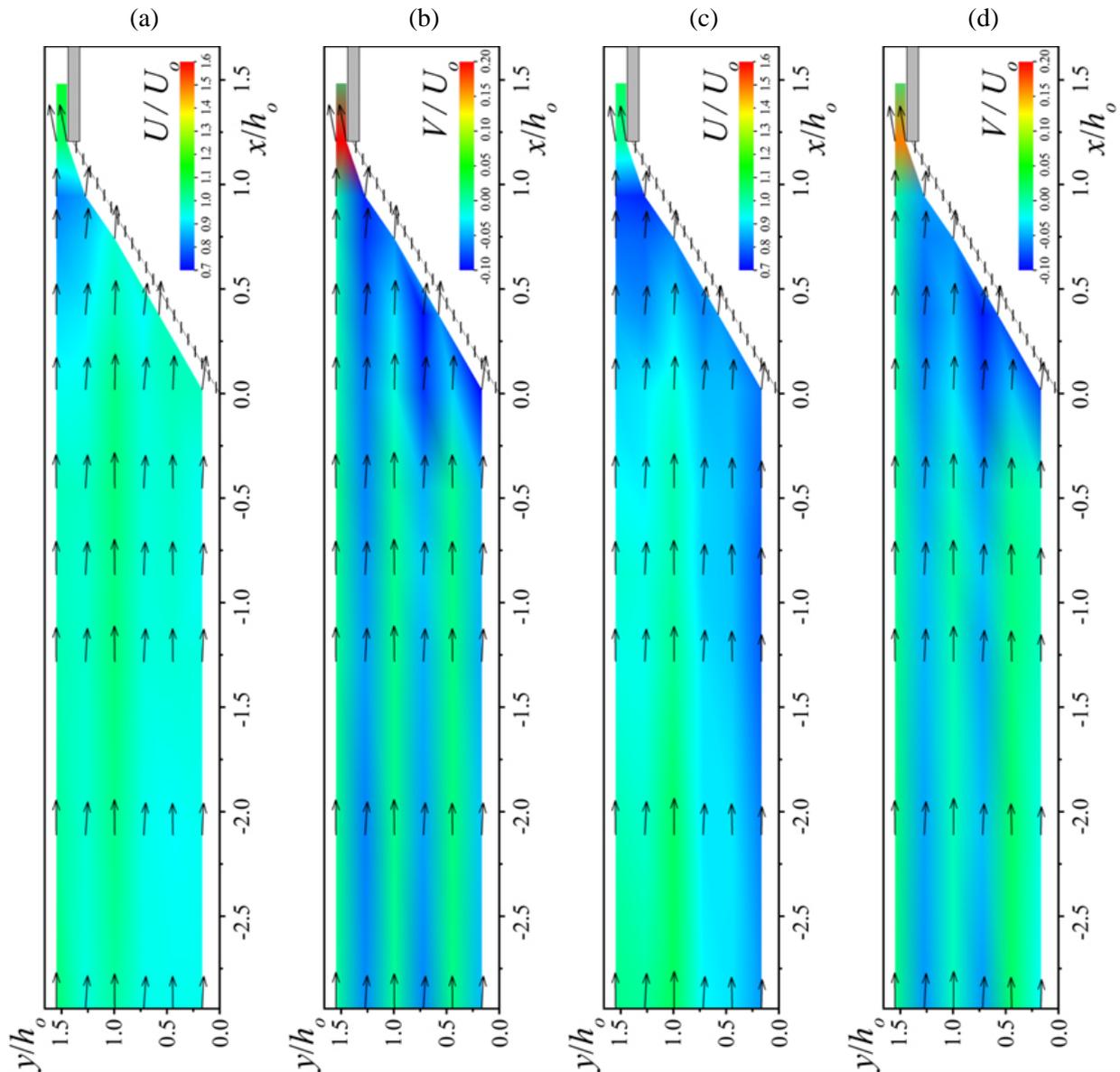
7.2.4 Kontroll-Konfiguration mit $\alpha = 30^\circ$ 

Abbildung 44: Bewegungsgrößen der Kontroll-Konfiguration mit $\alpha = 30^\circ$ und $\beta = 0^\circ$.

In der Mitte des Abflusshorizontes bei $z/h_0 = 0,5$: (a) U , (b) V und in Sohlennähe bei $z/h_0 = 0,06$: (c) U , (d) V . Mit U = Fließgeschwindigkeit in Längsrichtung des Kanals, U_0 = Fließgeschwindigkeit am Einlauf, V = Fließgeschwindigkeit in Querrichtung (von rechts nach links) des Kanals, y/h_0 = Position in der Breite des Kanals, x/h_0 = Position in der Länge des Kanals, z/h_0 = Position in der Höhe des Kanals (Kriewitz 2015).

7.3 Messdaten der Wasserqualität

Tabelle 17: Messwerte der Wasserqualität für Kanal und Hälterungsbecken.

Von 01.11.2014 bis Beginn der zweiten Versuchsreihe ist die O²-Sonde defekt gewesen. Von 10.06.2014-23.06.2014 war die pH-Sonde defekt, in diesem Zeitraum konnten mit diesem Messgerät keine pH-Werte aufgenommen werden.

Datum	Temperatur Hälterung [C°]	pH Hälterung	o ² Hälterung [mg/l]	Temperatur Kanal [C°]	pH Kanal	o ² Kanal [mg/l]
15.10.2013	18,6	8,5	8,11	18,6	8,6	9,1
16.10.2013	19	8,4	8,11	18,8	8,6	9,01
18.10.2013	19,7	8,7	8,4	19,4	8,7	8,78
21.10.2013	18,9	8,6	8,55	18,5	8,6	8,95
22.10.2013	19,1	8,5	8,32	18,8	8,6	8,89
23.10.2013	19,9	8,5	8,17	19,8	8,6	8,7
24.10.2013	20,4	8,5	8,17	20,5	8,6	8,6
28.10.2013	20,1	8,2	NA	19	8,5	NA
30.10.2013	19,4	8,6	NA	19,3	8,6	NA
31.10.2013	20,1	8,57	8,25	20,1	8,64	8,76
01.11.2013	20,3	8,6	NA	20,1	8,6	NA
04.11.2013	19,8	8,6	NA	19,5	8,6	NA
05.11.2013	21,1	8,63	NA	21	8,66	NA
06.11.2013	22	8,54	NA	21,9	8,58	NA
11.11.2013	20,1	8,02	NA	19,3	8,35	NA
12.11.2013	19,6	8,56	NA	19,6	8,6	NA
13.11.2013	19,9	8,55	NA	20	8,65	NA
15.11.2013	18,4	8,19	NA	19,5	8,61	NA
18.11.2013	19,7	8,52	NA	19,5	8,62	NA
19.11.2013	20,7	8,56	NA	20,6	8,61	NA
20.11.2013	21,3	8,35	NA	21,1	8,63	NA
21.11.2013	19,7	8,55	NA	19,6	8,65	NA
22.11.2013	20,7	8,59	NA	20,4	8,63	NA
25.11.2013	19,9	8,14	NA	19,7	8,61	NA
27.11.2013	19,9	8,6	NA	19,4	8,65	NA
28.11.2013	21,2	8,54	NA	21	8,67	NA
29.11.2013	21	8,58	NA	21	8,67	NA
09.12.2013	18,2	8,53	NA	17,9	8,56	NA
10.12.2013	18,3	8,51	NA	18,1	8,57	NA
11.12.2013	18,7	8,55	NA	18,7	8,49	NA
12.12.2013	19,2	8,54	NA	19,1	8,54	NA
13.12.2013	19,7	8,54	NA	19,4	8,59	NA
16.12.2013	19	8,5	NA	18,8	8,52	NA
17.12.2013	20,3	8,5	NA	20,4	8,57	NA
21.05.2014	14,1	8,5	9,8	13,6	8,5	9,9
22.05.2014	17,2	8,66	9,1	17	8,7	9,21
02.06.2014	17,6	8,61	9	17,3	8,62	9,45
10.06.2014	16,6	NA	9,22	16,4	NA	9,13
11.06.2014	17,2	NA	9,19	16,5	NA	9,22
12.06.2014	17,6	NA	9,1	17,5	NA	9,25
16.06.2014	17,5	NA	8,99	17,3	NA	9,04

17.06.2014	18,6	NA	8,83	18,5	NA	9
18.06.2014	18,3	NA	8,81	18,4	NA	9
19.06.2014	18,1	NA	8,89	17,9	NA	8,79
23.06.2014	18,3	NA	8,84	18,1	NA	8,87
25.06.2014	18,5	8,5	8,75	18,4	8,5	8,78
26.06.2014	18,2	8,48	8,88	17,8	8,5	8,93
27.06.2014	19,2	8,53	8,71	19,2	8,53	8,71
30.06.2014	19,1	8,49	8,68	19,2	8,6	8,93
02.07.2014	18,4	8,47	8,85	18,3	8,5	8,8
03.07.2014	18,9	8,47	8,8	18,8	8,5	8,8
07.07.2014	18,4	8,5	8,78	18,4	8,48	9,03
08.07.2014	19,4	8,53	8,6	19,2	8,58	8,66
09.07.2014	19,4	8,51	8,51	19,8	8,64	8,75
10.07.2014	17,9	8,42	8,87	17,9	8,41	8,88
16.07.2014	16,9	8,37	8,96	16,6	8,38	9,2
17.07.2014	19,2	8,52	8,71	19,2	8,56	9,08

7.4 Ergebnisse Fish Tracking

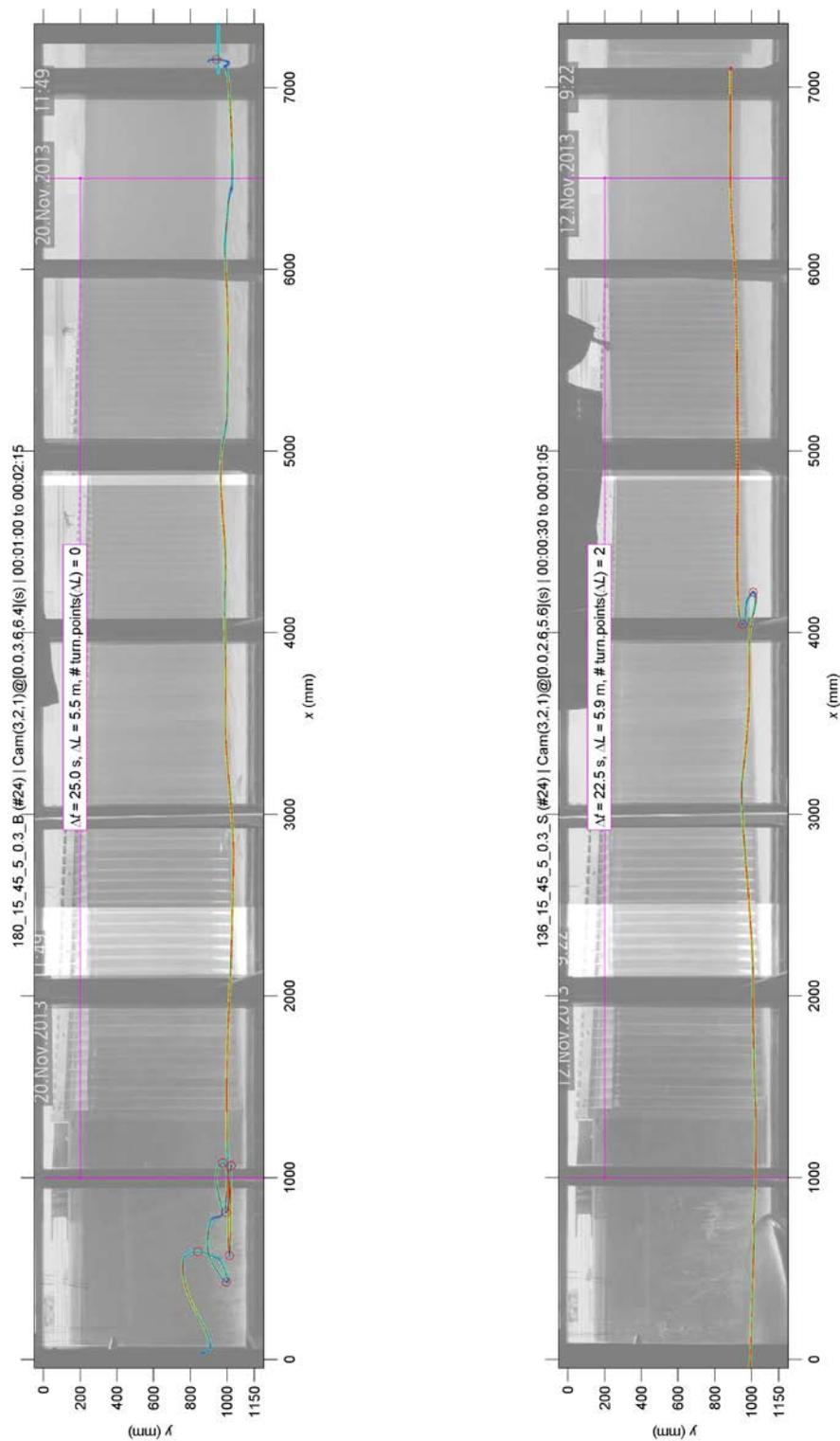


Abbildung 45: Einzeltracks eines Versuches mit drei Barben (links) und einem Schneider (rechts). Beide Tracks sind bei der Konfiguration $15^\circ 45^\circ 5\text{cm } 0,3\text{m/s}$ generiert worden. Die Geschwindigkeit ist farbkodiert von 0-2 m/s als blau-gelb-rot. Wendepunkte sind durch einen roten Kreis markiert (Detert et al. 2014).

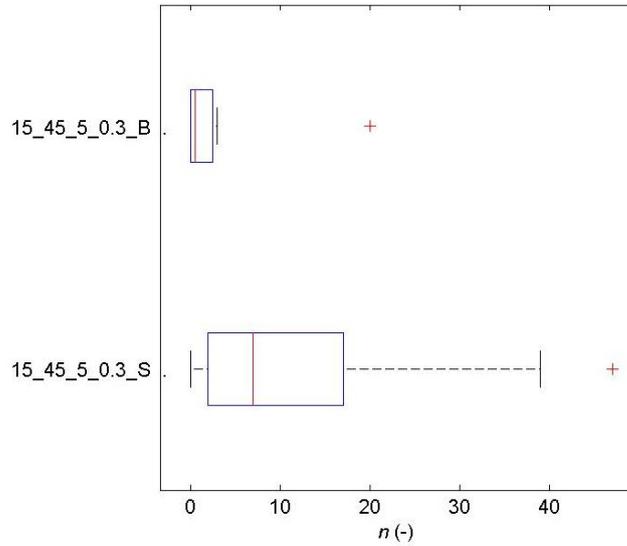


Abbildung 46: Anzahl von Richtungswechseln.

Oben Schneider (20 Versuche), unten Barben (11 Versuche), beide für die Konfiguration $15^\circ 45^\circ 5\text{cm } 0,3\text{m/s}$. In jedem Kasten (Box Plot) gibt die zentrale, rote Markierung den Median und das Rechteck das untere und obere Quartil an. Die Whiskers gehen bis zu den berücksichtigten Extremwerten, Ausreisser sind individuell gekennzeichnet. Untersucht wurden nur Zeiträume bei erfolgreicher Passage (Detert et al. 2014).

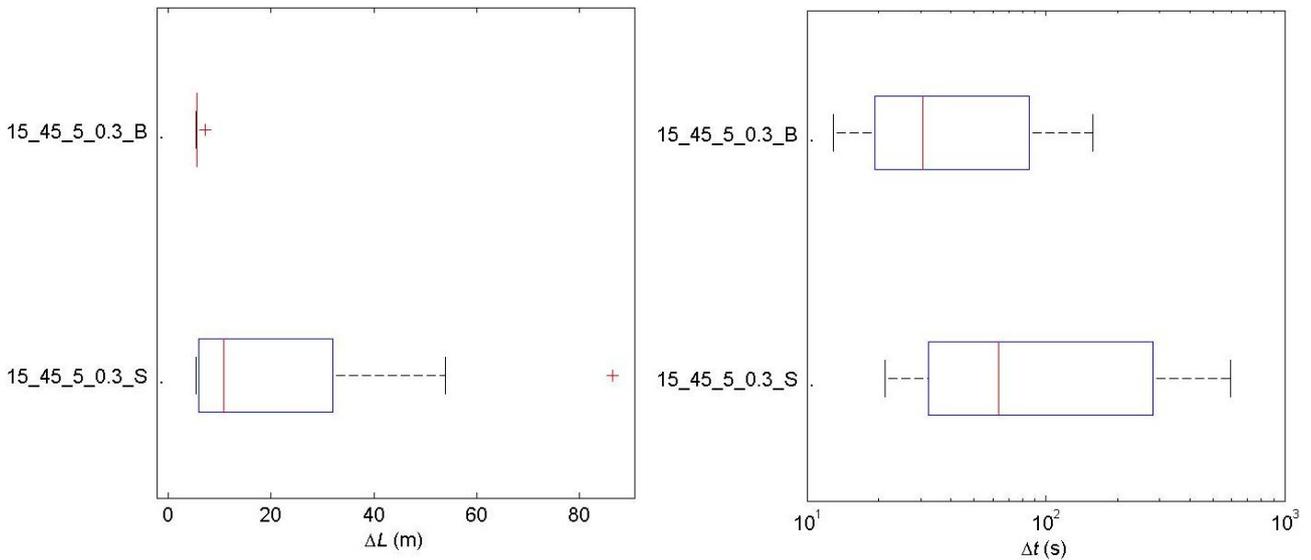


Abbildung 47: Statistik zu (links) zurückgelegter Weglänge ΔL in detektierter x-y Ebene.

Dauer (rechts) bis zu Bypass-Einschwimmen oder Rechenpassage von (oben) Barben (11 Versuche) und (unten) Schneidern (20 Versuche). Alle Auswertungen bei Konfiguration $15^\circ 45^\circ 5\text{cm } 0,3\text{m/s}$ (Detert et al. 2014).

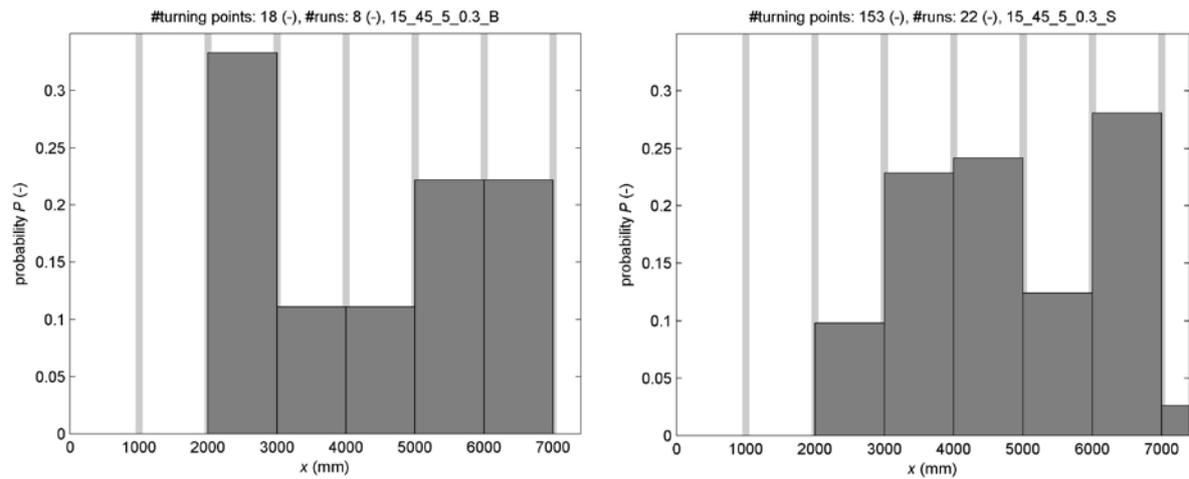


Abbildung 48: Wahrscheinlichkeit P zum Auftreten von x- Richtungswechseln. (Links) Barben (11 Versuche), (rechts) Schneider (20 Versuche). Untersucht wurden nur Zeiträume bei erfolgreicher Passage (Detert et al. 2014).



Abbildung 49: Bachforelle (oben), Barbe (mitte), Äsche (unten).
Konfiguration oben: 30° 45° 5cm 0,6m/s LB. Konfiguration mitte: 15° 45° 11cm 0,3m/s. Konfiguration unten: 30° 45° 5cm 0,6m/s. Bild: David Flügel, Eawag.

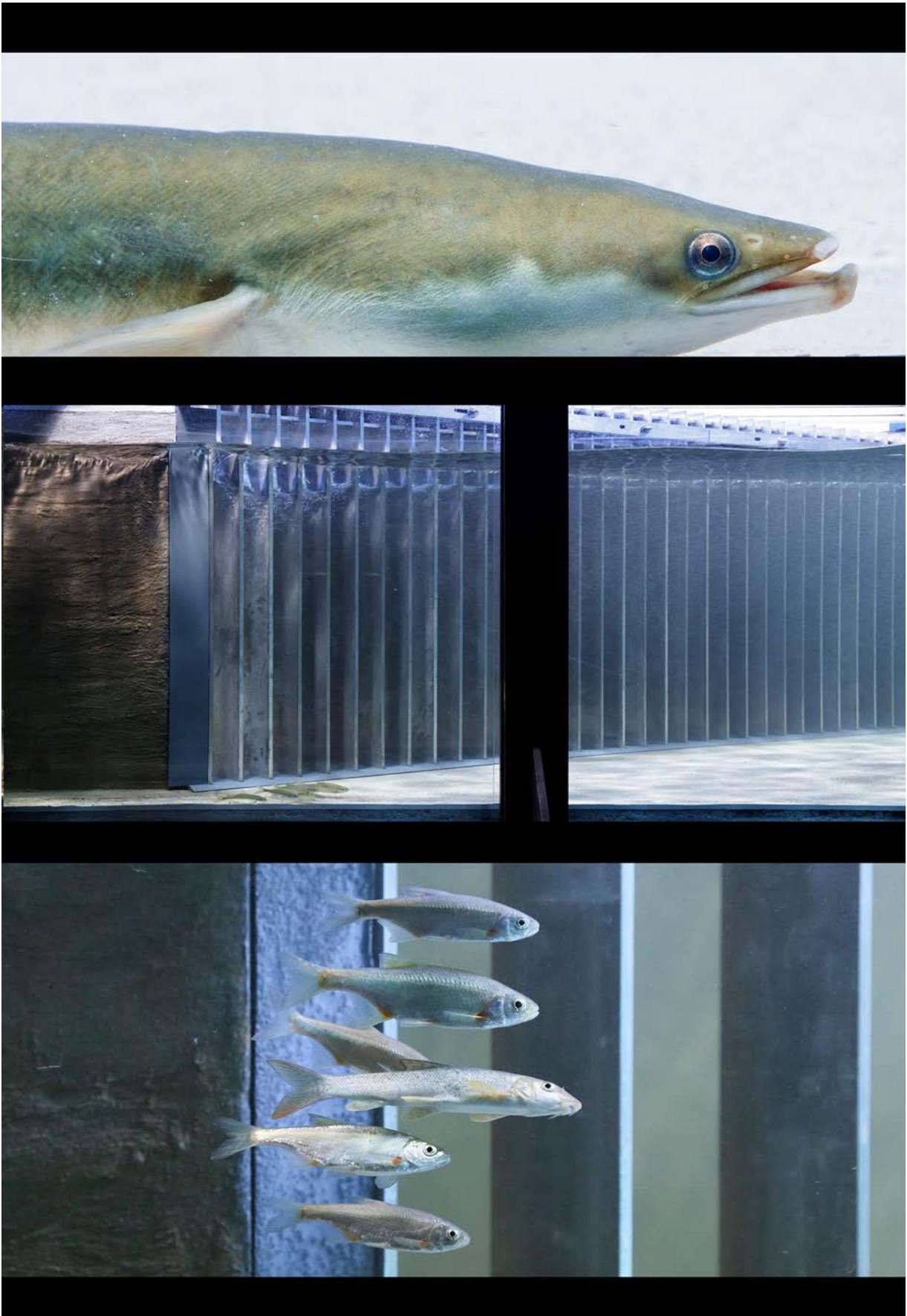


Abbildung 50: Aal (oben), Leitrechen (mitte), Schneider und kleine Barbe (unten).
Konfiguration mitte: 15° 45° 11cm 0,3m/s. Konfiguration unten: 15° 45° 11cm 0,3m/s. Bild: David Flügel, Eawag.