

Sensormessungen der Wehrpassage in Über- und Unterströmung sowie der Turbinenpassage am Wasserkraftwerk Bannwil, September 2021

Schlussbericht

Mai 2023

Jeffrey A. Tuhtan* und Gert Toming

Fakultät für Computersysteme, Technische Universität Tallinn

Die in dieser Arbeit vorgestellten Forschungsergebnisse wurden gemäss dem Auftrag
„Auftrag_Sensorfisch_TALTECH“ der BKW vom 07.09.2021 durchgeführt.

Zentrum für Umweltbeobachtungstechnologien

Technische Universität Tallinn

Akadeemia tee 15A-111

12618 Tallinn

Estland

*Der gesamte Schriftverkehr zu diesem Bericht und seinem Inhalt ist zu richten an Assoc. Prof. Jeffrey A. Tuhtan: E-Mail: jeffrey.tuhtan@taltech.ee

Dieser Bericht ist eine Übersetzung aus dem Englische des Berichts «Overshot and Undershot Weir and Turbine Passage Sensor measurements at the Bannwil Hydropower Station, September 2021» Final Report May 2023

Zusammenfassung

Für Fische besteht ein erhöhtes Verletzungs- und Mortalitätsrisiko, wenn sie flussabwärts durch Turbinen und über Wehre von Wasserkraftwerken wandern. Zur Abschätzung der schnellen Dekompressions- und Schlagereignisse, welchen die Fische ausgesetzt sind, wurden 210 Sensoren zur Erkennung von Barotrauma (Barotrauma Detection System, BDS) eingesetzt. Diese wurden bei niedrigem Unterwasserstand durch die Turbinen, durch das Drucksegmentschütz (Unterströmung des Wehrs) sowie über die Wehrklappe geleitet. Es wurden zwei Betriebszustände der Turbinen untersucht: bei 95 % des Volllastbetriebs und im Teillastbetrieb (66 % der Ausbauwassermenge). Die BDS-Sensoren wurden auf zwei Eintauchtiefen in die Turbine gelassen. Einerseits bei einer mittleren Tiefe (ca. 12 m) und in niedriger Tiefe (ca. 14 m). In der vorliegenden Studie wurden vier physikalische Parameter bewertet, die bekanntermassen das Verletzungs- und Mortalitätsrisiko für endemische Fische erhöhen. Auf der Grundlage dieser vier Parameter wurde das Risiko der Fischmortalität anhand einer Mortalitätsrate mit einem Schwellenwert von 10 % abgeschätzt. Die wichtigsten Ergebnisse dieser Studie sind:

1. Das geschätzte Risiko der Fischmortalität am Wehr liegt sowohl bei Unter- als auch bei Überströmung aufgrund des Nadir-Drucks (Tiefstwert) unter 10 %, wobei der untere Schwellenwert für den Nadir-Druck bei 50 kPa liegt. Aufgrund der geringen Tiefe des Segmentschützes lag der mittlere Nadir-Druck mit 95.0 kPa deutlich oberhalb des Schwellenwertes (Annahme: $P_{\text{atm}} = 100.0$ kPa). Der mittlere Nadir-Druck bei Überströmung des Wehrs hatte einen ähnlichen Wert von 98.2 kPa.
2. Die Messungen der Druckänderungsrate («pressure rate of change», PROC) am Wehr zeigen, dass die Mortalitätsrate sowohl bei Unter- als auch bei Überströmung des Drucksegmentschützes kleiner als 10 % ist. Diese Abschätzung basiert auf einem oberen Grenzwert von 550 kPa/s. Die mittleren PROC-Werte betragen 330.9 kPa/s für die Überströmung bzw. 239.9 kPa/s für die Unterströmung, womit sie deutlich unter dem Schwellenwert von 550 kPa/s liegen.
3. Basierend auf der Bewertung der logarithmischen Druckänderung (log ratio pressure change, LRP) am Wehr liegt das geschätzte Risiko der Fischmortalität sowohl bei Unter- als auch Überströmung bei niedrigem Unterwasser unter 10 % bei einem oberen Schwellenwert von 0.5. Die LRP in dieser Studie geht von einer maximalen Akklimatisierungstiefe der Fische von 4 m aus, und zwar sowohl bei Unterströmung (LRP = 0.35; angenommen: 4 m) als auch bei Überströmung (LRP = 0.35, angenommen: 4 m). Die Annahme von 4 m für die LRP-Analyse basiert auf den beobachteten Schwimmtiefen von markierten Barben oberstrom des Turbineneinlaufs, welche eine grosse

Ungenauigkeit aufweisen. Daher sind auch die LRP-Ergebnisse in dieser Studie mit grosser Unsicherheit behaftet.

4. Bei niedrigem Unterwasser wurden im Bereich des Wehrs und Tosbeckens keine Kollisionen mit Anlageteilen an den BDS-Sensoren beobachtet, während es an den Turbinen nur zu drei Schlagereignissen kam. Aufgrund dieser Ergebnisse liegt das geschätzte Risiko der Fischmortalität für Unter- und Überströmungsbedingungen unter Berücksichtigung von Schlagereignissen für das untersuchte Niedrigwasserszenario unter 10 %. Es ist wichtig zu beachten, dass diese Ergebnisse nur für die physikalischen Bedingungen gelten die während den Versuchen vorherrschten.

Akronyme und Abkürzungen

BDS	System zur Erkennung von Barotrauma
°C	Grad Celsius
ρ	Wasserdichte bei 10 °C, angenommen als 1000 kg/m ³
g	durchschnittliche Schwerebeschleunigung auf der Erde, angenommen als 9,81 m/s ²
hr	Stunde
Hz	Hertz, Zeitfrequenz 1/s
kg	Kilogramm
kPa	Kilopascal
LRP	Natürlicher Logarithmus des Druckänderungsverhältnisses
min	Minute
mm	Millimeter
MW	Megawatt
OSR	Überabtastungsverhältnis
P_{atm}	Luftdruck, angenommen als 100,0 kPa
POM	Polyoxymethylen
P2P	Peak-zu-Peak
QMW	Quadratischer Mittelwert
s	Sekunde
SD	Standardabweichung
TalTech	Technische Universität Tallinn
TMR	Triple Modular Redundancy
1/min	Umdrehungen pro Minute

Inhalt

Abbildungen.....	vi
Tabellen	viii
1. Einführung und Hintergrund	1
1.1. Motivation und Zielsetzung der Studie.....	1
1.2. System zur Erkennung von Barotrauma (Barotrauma Detection System, BDS).....	2
1.3. Standortbeschreibung und Einsatz der Sensoren.....	5
2. Studiendesign	6
2.1. Klassifizierung der Empfindlichkeit von Fischarten	6
2.2. Ereignisidentifizierung anhand von Drucksensor-Zeitreihen.....	7
2.3. Schwellenwert des Nadir-Drucks	9
2.4. Schwellenwert für die Druckänderungsrate.....	9
2.5. Schwellenwert für die logarithmische Druckänderung	10
2.6. Analyse von Schlag- und Beschleunigungssensordaten.....	11
3. Ergebnisse und Diskussion.....	16
3.1. Mortalitätsrisiko durch schnelle Dekompression	16
3.2. Mortalitätsrisiko aufgrund von Aufprallereignissen.....	19
3.3. Vergleich von lebenden Fischen mit dem BDS.....	20
4. Schlussfolgerungen	21
5. Danksagung.....	23
6. Referenzen.....	24

Abbildungen

Abbildung 1: Schematische Darstellung und Abmessungen des BDS mit den Positionen der drei Druckmessumformer und der Trägheitsmesseinheit (IMU). Links: Seitenansicht eines Sensors. Rechts: Draufsicht auf die Kappe mit den linken (L), mittleren (M) und rechten (R) Anschlüssen für Druckmessumformer.....	2
Abbildung 2: Links: Aufbau des Drucktests im Labor. In der Druckkammer können maximal 20 BDS-Sensoren gleichzeitig bei bis zu 500 kPa (50 m H ₂ O) druckgeprüft werden. Der HOBO-Drucksensor wurde zur Validierung verwendet. Rechts: Beispiel eines Prüfdatensatzes, der die Auf- und Abwärtsbewegung bei der statischen Druckprüfung sowie mehrere schnelle Ereignisse bei der dynamischen Druckprüfung zeigt.	3
Abbildung 3: A) Einsatzorte am Wehr (W) und an der Turbine (T) in Bannwil. B) Die Sensoren wurden sowohl für das Über- als auch das Unterströmungsszenario eingesetzt, indem die BDS-Sensoren stromaufwärts des Wehrs in die Mitte des Wehrsegments WF2 geworfen wurden. C) Nach zwei bis drei Minuten bliesen sich die Ballons auf und wurden mit einem Boot geborgen.....	5
Abbildung 4: Beispiele für die Zeitreihen des mittleren Drucks und die identifizierten Ereignisse: A) Überströmung des Wehrs WF2, B) Unterströmung des Wehrs WF2 und C) die Turbine T1 bei 95 % (Volllast) und tieferer Eintauchtiefe. Die Ereignisse Eintauchen (I), Nadir-Druck (N) und Eintritt in das Unterwasser (TW) sind als rote Pfeile für jede der Zeitreihen hervorgehoben.	8
Abbildung 5: A) Zeitreihe des BDS-Drucksensors während einer typischen Turbinendurchquerung. B) Die drei druckbezogenen physikalischen Parameter, die zur Bewertung des Fischmortalitätsrisikos durch rasche Dekompression verwendet werden, sind der Nadir-Druck (1), die Druckänderungsrate (2) und die logarithmische Druckänderung (3).	12
Abbildung 6: Beispielhafte Darstellung der Zeitreihen der Beschleunigungsmagnitudo (g) der A) Wehrüberströmung, B) Wehrunterströmung und C) der Turbine T1 bei 95 % Volllast und tieferer Eintauchtiefe. Die Zeitpunkte für das Eintauchen des BDS-Sensors (I), den Nadir-Druck (N) und den Eintritt in das Unterwasser (TW) sind in jeder Zeitreihe durch blaue Pfeile hervorgehoben. Die Zeitreihen der Beschleunigungsmagnitudo stammen von denselben Einsätzen, die in Abbildung 4 dargestellt werden.	15
<i>Abbildung 7: Boxplots der Nadir-Drucke für das Wehr WF2 in Bannwil in Versuchen in Überströmung und Unterströmung sowie für die Turbine T1 in Bannwil in Versuchen mit Volllast und Teillast in höherer und tieferer Tiefe. Die Boxen stellen den Interquartilsabstand (IQR) über die 25. bis 75. Perzentile dar, die Mittellinie entspricht dem Median, der schwarze Kreis ist der Mittelwert, die Fehlerbalken erstrecken</i>	

sich vom IQR bis zu einem Faktor von 1,5 und Ausreisser sind als schwarze X-Kreuze dargestellt. Die rote Linie bei 50 kPA ist der Nadir-Schwellenwert, Werte darunter können zu einem Mortalitätsrisiko von > 10 % führen. 17

Abbildung 8: Boxplots der Druckänderungsrate (ROC) für das Wehr WF2 in Bannwil bei Versuchen in Über- und Unterströmung sowie für die Turbine T1 in Bannwil bei Versuchen mit Voll- und Teillast in höherer und tieferer Tiefe. Die rote Linie bei 550 kPA ist der ROC-Schwellenwert, Werte darüber können zu einem Mortalitätsrisiko von > 10 % führen. 18

Abbildung 9: Säulendiagramm der logarithmischen Druckänderung (LRP) für das Wehr WF2 in Bannwil in Versuchen in Überströmung und Unterströmung sowie für die Turbine T1 in Bannwil in Versuchen mit Volllast und Teillast in höherer und tieferer Tiefe. Die rote Linie bei 0,50 ist der LRP-Schwellenwert, Werte darüber können zu einem Mortalitätsrisiko von > 10 % führen. Die Schwellenwerte für ausgewählte endemische Fischarten sind als Referenz angegeben. 19

Abbildung 10: Säulendiagramme der Anzahl der Schläge, der Nicht-Schläge und der verlorenen Sensoren während aller Versuche am Bannwiler Wehr WF2 in Über- und Unterströmung sowie an der Bannwiler Turbine T1 bei Voll- und Teillast in höherer und tieferer Tiefe. 20

Tabellen

Tabelle 1: Technische Daten der in dieser Studie eingesetzten BDS-Sensoren.....	4
Tabelle 2: Übersicht über das Datenformat der BDS-Textdatei. Jede der 27 Spalten entspricht einer anderen Variablen, die während der stromabwärts gerichteten Passage bei 100 Hz (Magnetometer 20 Hz) gespeichert wurde; die Einheiten sind in Klammern angegeben.	4
Tabelle 3: Zusammenfassung der Bemessungswasserstände und -abflüsse für das Wehr und die Turbine in Bannwil.....	6
Tabelle 4: Einsatzszenarien der BDS-Sensoren für die Turbine T1 in Bannwil (12.–14.06.2019) und das Wehr in Bannwil (09.09.2021).	6
Tabelle 5: Zusammenfassung der endemischen Familien und ausgewählten Fischarten in Bannwil, mit Angabe der Verfügbarkeit von veröffentlichten physikalischen Schwellenwerten aus früheren Studien, und ihre biologische Empfindlichkeit gegenüber der Mortalität. Wenn Schwellenwertdaten verfügbar sind, werden die spezifischen Parameter und ihre Werte in die Zusammenfassung der druckbezogenen physikalischen Parameter in Tabelle 6 aufgenommen. Die biologischen Empfindlichkeitsklassen und die Punktzahlen stammen von [13].....	13
Tabelle 6: Zusammenfassung der in dieser Studie verwendeten druckbezogenen physikalischen Parameter und der entsprechenden Schwellenwerte. Die Schwellenwerte wurden zur Abschätzung des Fischmortalitätsrisikos bei Überschreitung von 10 % während der Passage des über- und unterströmten Wehrs bei niedrigem Unterwasserstand am Wehr Bannwil WF2 verwendet.....	14
Tabelle 7: Mittelwerte der druckbasierten physikalischen Parameter, \pm ihre Standardabweichungen von den Versuchen des Wehrs in Bannwil. Die Ergebnisse der Turbine T1 in Bannwil sind zum Vergleich beigelegt. Aufgrund der grossen Unsicherheit bei der Schätzung der Akklimatisierungstiefe (4 m) sind nur die mittleren LRP-Werte angegeben.	16

1. Einführung und Hintergrund

1.1. Motivation und Zielsetzung der Studie

Stromabwärts wandernde Fische können beim Passieren von Turbinen und Wasserbauten aufgrund von Kavitation, Druckabfall, Schaufelschlägen und hydraulischer Scherung nachteilige Auswirkungen erfahren [1–3]. Um spezifische hydraulischen Bedingungen zu quantifizieren, die zu Verletzungen und Mortalität führen können, können wasserdichte autonome Sensoren eingesetzt werden. Diese erfassen Daten über die Druck- und Trägheitsänderungen denen die Fische ausgesetzt sind [4]. Durch wiederholte Messungen mit mehreren identischen Sensoren können Druck- und Beschleunigungszeitreihen gemittelt und damit die erwarteten physikalischen Bedingungen, welche Fische während der Abwärtswanderung erfahren, dargestellt werden.[5]. In dieser Studie wurden BDS (Barotrauma Detection System)-Sensoren am Wehr Bannwil bei niedrigem Unterwasserstand in Über- und Unterströmungsszenarien eingesetzt. Die Daten der BDS-Sensoren wurden gemittelt und vier physikalische Parameter, die bekanntermassen zu einem erhöhten Verletzungs- oder Mortalitätsrisiko führen, ausgewertet: der Nadir-Druck (Tiefstwert) [4,6], die Druckänderungsrate (ROC) [7], die logarithmische Druckänderung (LRP) [8] und die Anzahl der Schlagereignisse [9,10]. Die Sensordaten wurden mit Schwellenwerten der einzelnen Parameter (basierend auf der Fachliteratur) verglichen wodurch ein Fischmortalitätsrisiko von mehr als 10 % abgeschätzt wurde [11].

Die vorliegende Studie verfolgte vier Ziele:

- 1) Einsatz von Sensoren zur Messung physikalischer Bedingungen während einer Wehrpassage (Über- und Unterströmung) zur Erkennung von Barotrauma bei niedrigem Unterwasserstand.
- 2) Einsatz des BDS in der Turbine des WKW Bannwil bei 95 % (Volllast) und 66 % (Teillast) der Ausbauwassermenge in 12 m und 14 m Tiefe um die physikalischen Bedingungen während der Wanderung stromabwärts zu ermitteln.
- 3) Vergleich der BDS-Daten mit Studien über stromabwärts wandernde Fische, bei welchen Versuche mit lebenden Fischen und passiven Sensoren durchgeführt wurden.
- 4) Beurteilung, ob das Fischmortalitätsrisiko während der Flussabwärts passage durch das Wehr bei Unter- und Überströmung und durch die Turbine bei niedrigem Unterwasserstand die 10 % übersteigt. Dieses Kriterium stützt sich auf das Schutzziel der interkantonalen Aareplanung [11].

1.2. System zur Erkennung von Barotrauma (Barotrauma Detection System, BDS)

Das Gehäuse der BDS-Sensoren besteht aus zwei POM-Kunststoff-Endkappen und einem Rohr aus Polycarbonat-Kunststoff mit einem Aussendurchmesser von 4 cm. Es hat eine Gesamtlänge von 14 cm und eine Masse von 143 g (Abbildung 1). Der neutrale Auftrieb des BDS wird erreicht, indem die flache Endkappe nach innen oder aussen geschraubt wird um das Gesamtvolumen des Sensors zu verändern. Jede halbkugelförmige Endkappe enthält drei digitale Gesamtdruckmessumformer (MS5837-2BA, TE Connectivity, Schweiz) mit einer Empfindlichkeit von 0,0021 kPa (0,21 mm Wassersäule), die linear für 25 m Wassertiefe ausgelegt sind (Tabelle 1). Die Sensoren können jedoch bis zu einer Wassertiefe von 45 m eingesetzt werden, wobei eine nichtlineare Korrektur auf der Grundlage einer Laborkalibrierung verwendet wird. Jeder Druckmessumformer ist mit einem eigenen On-Chip-Temperatursensor ausgestattet und die Druckmesswerte enthalten eine Echtzeit-Temperaturkorrektur mit einem Algorithmus 2. Grades. Alle Sensoren wurden gegen einen HOBO-Referenzdrucksensor unter statischen und dynamischen Bedingungen in einer Labor-Druckkammer von 100 kPa bis 500 kPa getestet (Abbildung 2).

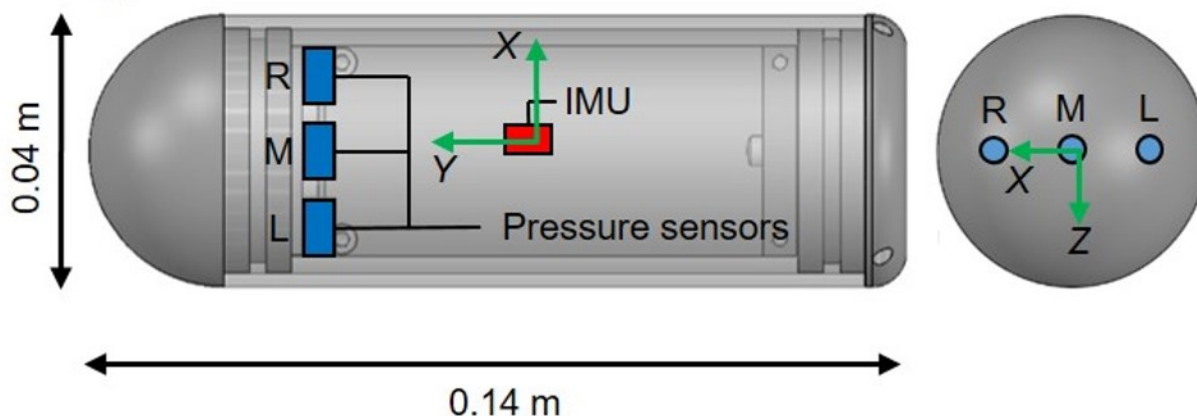


Abbildung 1: Schematische Darstellung und Abmessungen des BDS mit den Positionen der drei Druckmessumformer und der Trägheitsmesseinheit (IMU). Links: Seitenansicht eines Sensors. Rechts: Draufsicht auf die Kappe mit den linken (L), mittleren (M) und rechten (R) Anschlüssen für Druckmessumformer.

Die BDS-Sensoren sind mit einem Algorithmus zur Kalibrierung des Luftdrucks ausgestattet. Nachdem die Geräte mit einem Magnetschalter aktiviert wurden, werden die Daten von jedem Druckmessumformer 15 Sekunden lang aufgezeichnet. Der Luftdruck, einschliesslich der sensorspezifischen Offsets, wird intern aufgezeichnet. Anschliessend werden alle drei Druckmessumformer bei örtlichem Luftdruck auf einen Standardwert von $P_{\text{atm}} = 100,0$ kPa eingestellt. Dadurch werden alle Sensoren automatisch auf lokale Änderungen des Luftdrucks, die im Laufe des Tages auftreten, kalibriert. Mit dieser Funktion entfällt die Notwendigkeit, die Messwerte des Drucksensors nach dem Einsatz manuell zu korrigieren.

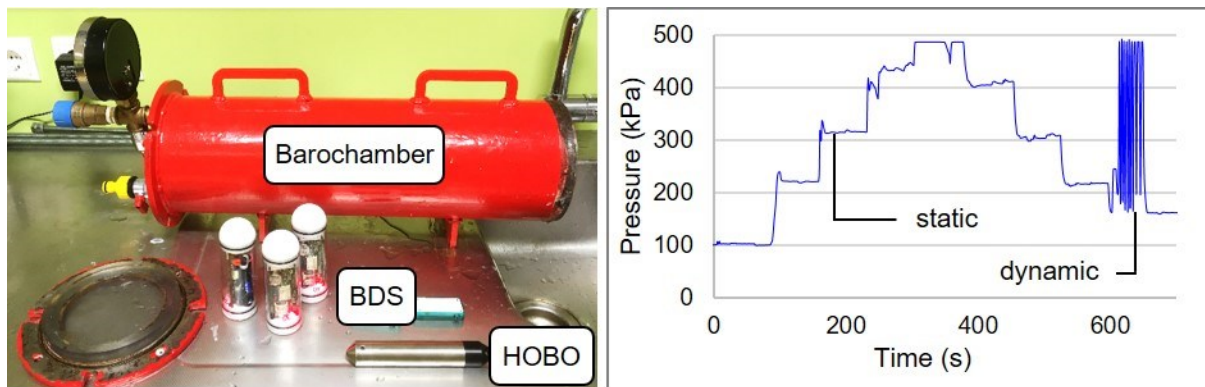


Abbildung 2: Links: Aufbau des Drucktests im Labor. In der Druckkammer können maximal 20 BDS-Sensoren gleichzeitig bei bis zu 500 kPa (50 m H₂O) druckgeprüft werden. Der HOBO-Drucksensor wurde zur Validierung verwendet. Rechts: Beispiel eines Prüfdatensatzes, der die Auf- und Abwärtsbewegung bei der statischen Druckprüfung sowie mehrere schnelle Ereignisse bei der dynamischen Druckprüfung zeigt.

Nach der Prüfung der Elektronik und der mechanischen Montage wurden alle Druckmessumformer mit einem handelsüblichen Wasserstandslogger (U20-001-02, HOBO) bei Luftdruckbedingungen > 450 kPa (ca. 45 m Wassersäule) kalibriert. Das Druckreferenzgerät von HOBO wurde ausgewählt, da es sich um ein kalibriertes, im Handel erhältliches Gerät handelt, das mit dem vom PNNL verwendeten „Sensor Fish“-Gerät zur Druckkalibrierung identisch ist [4]. Die Genauigkeit aller Druckmessumformer lag bei einer relativen Grenzabweichung von < 2 %. Die Druckkammer, die für alle Druckexperimente verwendet wird, ist ein speziell angefertigtes Gerät, das für Meeresforschung bis zu einer Tiefe von 50 m eingesetzt wird. Sie besteht aus einem 0,5 m langen geschweissten Stahlrohr mit einem äusseren Durchmesser von 0,158 m und einer Wanddicke von 0,005 m. Ein Ende des Geräts kann abgenommen und über einen O-Ring abgedichtet werden und verfügt über ein Sichtfenster aus Glas. Vor der Druckprüfung wurde die Kammer auf eines der Enden gekippt, woraufhin 30 Sekunden lang Wasser durch das System gespült wurde um die mitgeführte Luft zu entfernen.

Tabelle 1: Technische Daten der in dieser Studie eingesetzten BDS-Sensoren.

Physikalische und Sensorspezifikationen	Werte
Physikalische Abmessungen	122 +1,25 × 40 mm (einstellbar)
Dichte	1,0 mg / mm ³ (einstellbar)
Überschüssige Masse (Nassgewicht)	±1,15 g
Abtastrate des Sensors	400 kHz (digital), gespeichert bei 100 Hz
Maximale Abtastzeit	240 min
3D-Beschleunigungsbereich	±16 g
3D-Rotationsgeschwindigkeitsbereich	±2067 °/s
Druckbereich	±2941 kPa (3 Sensoren)
Temperatursensor	-20 °C – 85 °C (Temperaturkorrektur für jeden Drucksensor)

Neben den drei Druckmessumformern enthält der BDS-Sensor auch eine digitale Trägheitsmesseinheit (IMU) mit 9 Freiheitsgraden, Modell BNO055 (Bosch Sensortec, Deutschland), die lineare Beschleunigungs-, Gyro- und Magnetometersensoren integriert. Eine ausführliche Beschreibung der Funktionen, Einstellungen und Spezifikationen der Trägheitsmesseinheit (IMU) ist auf dem Datenblatt auf der Webseite des Herstellers zu finden [12]. Im Sensorfusionsmodus werden alle Variablen bei 100 Hz gespeichert, mit Ausnahme des Magnetometers, das mit einer maximalen Rate von 20 Hz exportiert wird. Alle Daten der BDS-Sensoren werden als lesbare ASCII-Textdatei mit 27 Spalten exportiert (Tabelle 2).

Tabelle 2: Übersicht über das Datenformat der BDS-Textdatei. Jede der 27 Spalten entspricht einer anderen Variabel, die während der stromabwärts gerichteten Passage bei 100 Hz (Magnetometer 20 Hz) gespeichert wurde; die Einheiten sind in Klammern angegeben.

Sp. 1	Sp. 2	Sp. 3	Sp. 4	Sp. 5	Sp. 6	Sp. 7	Sp. 8	Sp. 9
Zeitstempel (ms)	Druck links (hPa)	Temp. links (°C)	Druck mittig (hPa)	Temp. mittig (°C)	Druck rechts (hPa)	Temp. rechts (°C)	Eul. Winkel X (Grad)	Eul. Winkel Y (Grad)
Sp. 10	Sp. 11	Sp. 12	Sp. 13	Sp. 14	Sp. 15	Sp. 16	Sp. 17	Sp. 18
Eul. Winkel Z (Grad)	Quat. X (-)	Quat. Y (-)	Quat. Z (-)	Quat. W (-)	Magnet. X (µT)	Magnet. Y (µT)	Magnet. Z (µT)	Dyn. lin. Beschl. X (m/s ²)
Sp. 19	Sp. 20	Sp. 21	Sp. 22	Sp. 23	Sp. 24	Sp. 25	Sp. 26	Sp. 27

Dyn. lin. Beschl. Y (m/s ²)	Dyn. lin. Beschl. Z (m/s ²)	Rate Gyro X (rad/s)	Rate Gyro Y (rad/s)	Rate Gyro Z (rad/s)	Kalib.-Status Magnet. (0–3)	Kalib.-Status Beschl. (0–3)	Kalib.-Status Gyro. (0–3)	Summe Kalib.-Status (0–9)
---	---	---------------------	---------------------	---------------------	-----------------------------	-----------------------------	---------------------------	---------------------------

1.3. Standortbeschreibung und Einsatz der Sensoren

Das Wasserkraftwerk Bannwil befindet sich an der Aare, 46 km flussabwärts des Bielersees. Das 5.5 km flussabwärts liegende WKW Wynau verursacht aufgrund seiner Betriebsbedingungen einen festen Unterwasserstand von 408.1 m ü. M. Insgesamt gibt es an der Aare zwischen dem Bielersee und der Mündung in den Rhein 10 Wasserkraftwerke. Der tiefste und der höchste Punkt der Aare in diesem Flussabschnitt liegen bei 312 m ü. M. und 429 m ü. M. in einem Gesamteinzugsgebiet von 17'687 km², dessen höchster Punkt 4130 m ü. M. beträgt. Der mittlere Jahresabfluss der Aare bei Bannwil beträgt 286 m³/s und der Bemessungsabfluss der drei Kaplan-Rohrturbinen (je 9.5 MW) liegt bei 450 m³/s – bei einer Nennleistung von 28.5 MW und einem Gefälle von 5.5 m bis 8.5 m. Die Feldarbeit in Bannwil wurde in zwei Kampagnen durchgeführt (Abbildung 3). Die erste Kampagne fand vom 12. bis 14. Juni 2019 statt. Die Auswirkungen eines Turbinendurchgangs der Turbine 1 für die beiden Eingabetiefen von 12 und 14 m wurde bei 95 % und 66 % der Volllast im Rahmen des Projekts H2020 FITHydro untersucht. Das Wehr Bannwil wurde während der zweiten Kampagne am 9. September 2021 untersucht (Tabelle 3).

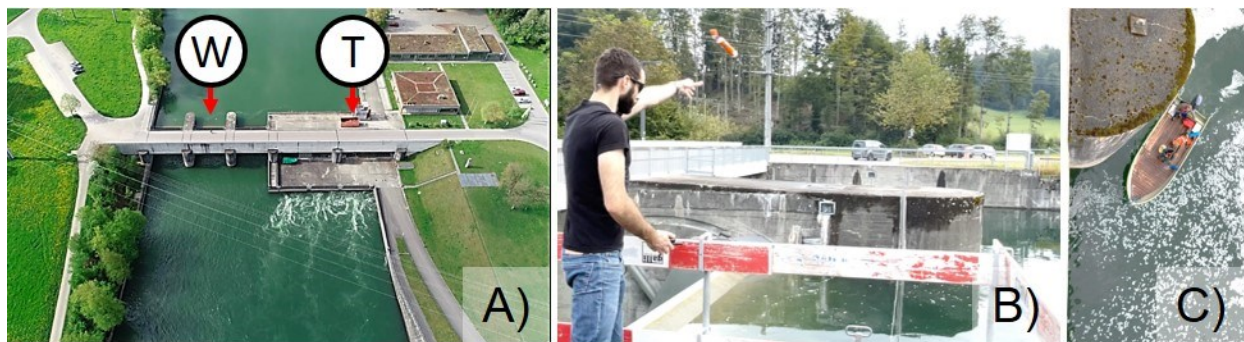


Abbildung 3: A) Einsatzorte am Wehr (W) und an der Turbine (T) in Bannwil. B) Die Sensoren wurden sowohl für das Über- als auch das Unterströmungsszenario eingesetzt, indem die BDS-Sensoren stromaufwärts des Wehrs in die Mitte des Wehrsegments WF2 geworfen wurden. C) Nach zwei bis drei Minuten bliesen sich die Ballons auf und wurden mit einem Boot geborgen.

Bei der Turbine wurden die Sensoren jeweils in vierer, sechser oder zehner Gruppen eingesetzt, wobei der Durchfluss der Turbine bei Voll- oder Teillast konstant gehalten wurde. Alle Einsätze am Wehr erfolgten bei einem konstanten Abfluss von 25 m³/s, was vom Kraftwerksbetreiber vor Beginn des Einsatzes bestätigt wurde (Tabelle 3). Jeder BDS-Sensor wurde mit zwei Ballonanhängern ausgestattet, in welche unmittelbar vor dem Einsatz jeweils 3 ml einer 30%igen Essigsäurelösung injiziert wurden. Nach dem Aufblasen der Ballonanhänger wurden die BDS-Sensoren optisch geortet und von einer zweier Bootsmannschaft

geborgen. Die Zeit zwischen dem Einsatz der Sensoren und ihrer Bergung variierte je nach Einsatzszenario zwischen ca. 2 und 60 Minuten.

Tabelle 3: Zusammenfassung der Bemessungswasserstände und -abflüsse für das Wehr und die Turbine in Bannwil.

Bemessungswasserstand flussaufwärts (m ü. M.)	Bemessungswasserstand flussabwärts (m)
417.30 (Stauziel)	410.86 (Q = 850 m³/s) 409.17 (Q = 350 m³/s) 408.11 (Rückstau Wynau)

Tabelle 4: Einsatzszenarien der BDS-Sensoren für die Turbine T1 in Bannwil (12.–14.06.2019) und das Wehr in Bannwil (09.09.2021).

Datum [Mittlerer Tagesabfluss der Aare] (m³/s)	Wasserstand flussaufwärts Wasserstand flussabwärts (m)	Einsatzort	Untersuchte Abflüsse	Tiefe des eingetauchten Systems unter der Wasseroberfläche (m)	BDS-Datensätze (Schlagereignisse)	BDS-Nutzungsgrad (%)
12.06.2019 [565]	416.807 409.818	Horizontale Kaplan-Turbine, T1	95 % (Volllast) 66 % (Teillast)	ca. 12 höher ca. 14 tiefer	116 (3)	89
13.06.2019 [571]	416.791 409.838					
14.06.2019 [498]	416.912 409.953					
09.09.2021 [154]	417.260 408.337	Wehr, WF2 Überströmung	25 m³/s	ca. 1.2 m oder weniger	59 (0)	98
		Wehr, WF2 Unterströmung	25 m³/s	ca. 7.1 m alle Sensoren	35 (0)	100

2. Studiendesign

2.1. Klassifizierung der Empfindlichkeit von Fischarten

Flusssysteme sind natürlichen Störungen durch Überschwemmungen und Dürren ausgesetzt, weshalb typische Flussfischarten Life-History-Merkmale entwickelt haben, welche sie widerstandsfähig gegen diese Störungen machen. Im Jahr 2020 veröffentlichten van Treeck et al. eine umfassende Analyse der natürlichen Empfindlichkeit gegenüber Mortalität für 168 europäische Süßwasserfische [13]. In der Studie wurde die Widerstandsfähigkeit europäischer Fischarten anhand von 15 Life-History-Merkmalen analysiert, darunter die maximale Länge, die Art der Wanderung, die Mortalität, die Fruchtbarkeit, das Alter der Geschlechtsreife und die Generationsdauer. Allgemein wurde bei adulten Fischen grosswüchsiger,

diadromer, rheophiler und lithophiler Arten wie Stör, Meerforelle und Atlantischer Lachs eine hohe Empfindlichkeit gegenüber Mortalität festgestellt. Kleinwüchsige, limnophile und phytophile Arten mit schnellen Generationszyklen sind wenig empfindlich. Tabelle 5 gibt eine Übersicht über die familien- und artenbezogene biologische Empfindlichkeit gegenüber der Mortalität wird für endemische Arten am Standort Bannwil. Darüber hinaus wird für jede aufgelistete Art angegeben, ob physikalische Schwellenwerte zur Bewertung der spezifischen Verletzungs- und Mortalitätsrisiken verfügbar sind. Dementsprechend werden diese Schwellenwerte in Tabelle 6 näher erläutert und in diesem Bericht zur Bewertung des Risikos einer Überschreitung des 10%igen Mortalitätsrisikos herangezogen.

2.2. Ereignisidentifizierung anhand von Drucksensor-Zeitreihen

Nach dem Export der Daten wurde der Mittelwert der drei Drucksensormesswerte zu jedem Zeitpunkt berechnet, um eine gemittelte Druckzeitreihe zu erstellen (Abbildung 4). Die Zeitreihen wurden in MATLAB 2022a visualisiert und die Zeitstempel für das Eintauchen (I), den Nadir-Druck (N) und das Unterwasser (TW) identifiziert. Die Eintauchzeit für das Turbinenszenario wurde anhand des ersten Drucksensormesswerts bestimmt, der grösser als der Referenzluftdruck von $P_{\text{atm}} = 100.0$ kPa war. Für die Datensätze der Unter- und Überströmung am Wehr wurde die Eintauchzeit als der Zeitpunkt definiert, an dem die BDS-Sensoren die Wasseroberfläche berührten. Bei Kontakt mit einem Anlagenteil kommt es zu einem plötzlichen Druckanstieg über $P_{\text{atm}} = 100.0$ kPa. Der Nadir-Zeitstempel für das Turbinen- und Wehrszenario wurde als der niedrigste Druckwert nach dem Eintauchen angenommen. Der Zeitstempel beim Eintritt ins Unterwasser wurde für alle Einsätze als Zeitpunkt nach dem Aufblasen der Ballone angenommen. Zu diesem Zeitpunkt liegt der mittlere Druck der BDS-Sensoren nahezu bei P_{atm} , da sich der Sensorkopf 2 cm bis 4 cm unter der Wasseroberfläche befindet. Anhand der Druckdaten wurde das Mortalitätsrisiko bei einer schnellen Dekompression mit einem Mortalitätsrisiko von 10 % auf der Grundlage von Schwellenwerten aus der Fachliteratur bewertet. Der Schwellenwert wurde mit den gemittelten Daten der BDS-Sensoren verglichen, die bei niedrigem Unterwasserstand während der Über- und Unterströmung am Wehr ermittelt wurden.

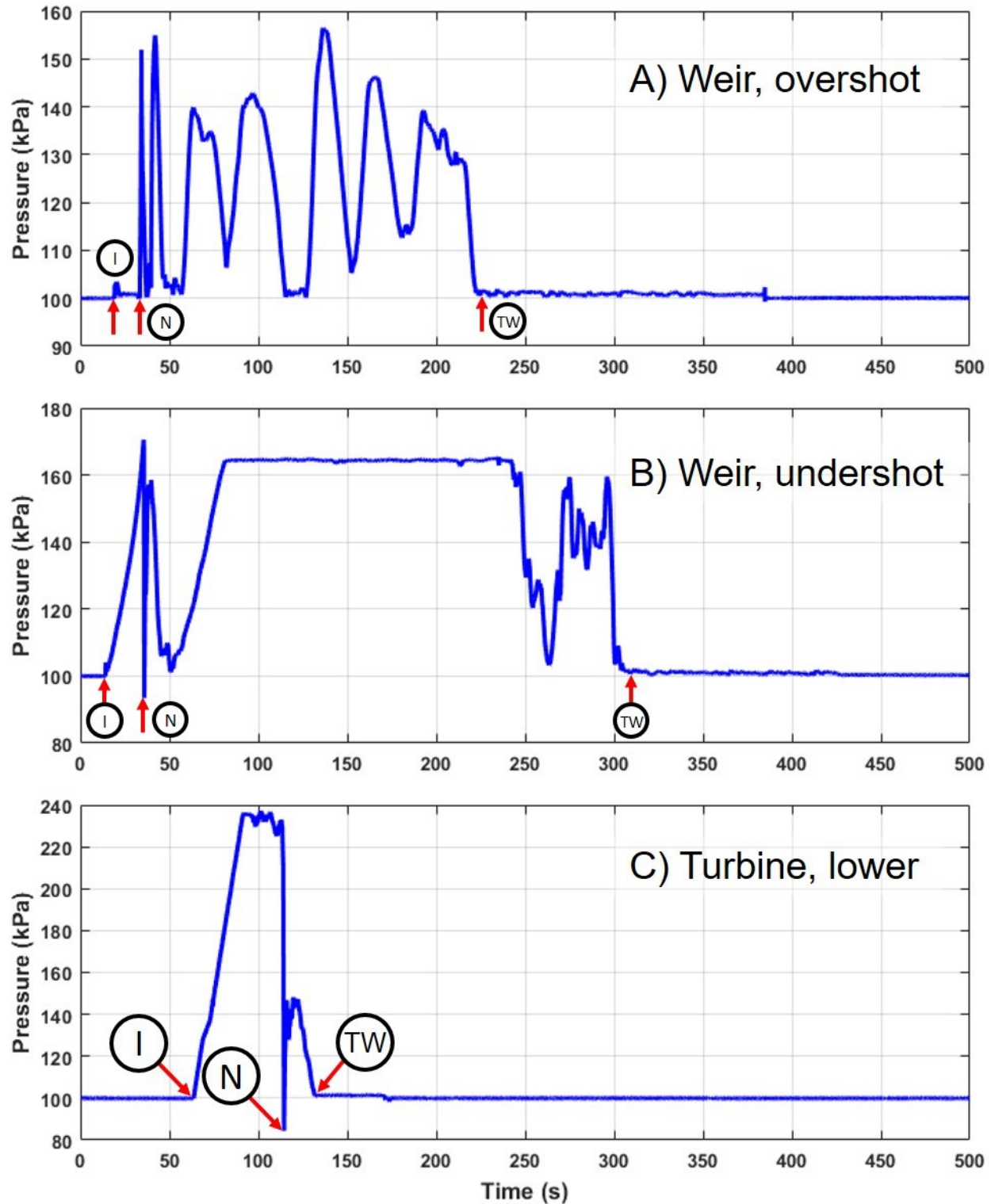


Abbildung 4: Beispiele für die Zeitreihen des mittleren Drucks und die identifizierten Ereignisse: A) Überströmung des Wehrs WF2, B) Unterströmung des Wehrs WF2 und C) die Turbine T1 bei 95 % (Volllast) und tieferer Eintauchtiefe. Die Ereignisse Eintauchen (I), Nadir-Druck (N) und Eintritt in das Unterwasser (TW) sind als rote Pfeile für jede der Zeitreihen hervorgehoben.

2.3. Schwellenwert des Nadir-Drucks

Im Rahmen einer österreichischen Studie zur Untersuchung des Verletzungs- und Mortalitätsrisikos von Fischen, die durch Kaplan-Turbinen abwandern, wurde eine Barotrauma-Kammer gebaut und Fische im Larvenstadium (L1, L1/L2) sowie im Juvenilstadium (L6/J1 und 0+) Druckänderungen ausgesetzt [5]. Bei den untersuchten Arten handelte es sich um Äschen, Flussbarsche, Nasen und Rotaugen. Die Versuche wurden aufgrund des österreichischen Tierversuchsgesetzes unter Narkose (MS222) durchgeführt. Die Schwellenwerte für den Nadir-Druck sind in Tabelle 6 zusammengefasst.

Die Experimente wurden mit Nadir-Drucken von 60, 40, 30 und 15 kPa mit betäubten, oberflächenakklimatisierten Fischen (Äsche L1 und 0+, Flussbarsch L1, L6/J1 und 0+, Nase L1/L2 und 0+ und Rotauge L6/J1 und 0+) durchgeführt. Jedes Experiment umfasste Gruppen von 10 Individuen und wurde drei Mal wiederholt. Die Ergebnisse wurden mit Kontrollexperimenten ohne Druckänderung verglichen [14]. Bei L1- und 0+-Nasen und L6/J1-Rotaugen trat die Mortalität bei Nadir-Werten ab 50 kPa und bei 0+-Barschen bei 40 kPa auf. Signifikante Verletzungen traten im Nadir-Bereich von 25 bis 20 kPa für L6/J1-Barsche und 0+-Rotaugen auf. L1/L2-Äschen und L1-Barsche wurden von niedrigem Druck weniger beeinträchtigt, wobei Verletzungen erstmals bei Nadir-Werten von weniger als 15 kPa beobachtet wurden.

Das U.S. Army Corps of Engineers (Corps), welches seine Turbinen im Allgemeinen mit einem minimalen Nadir-Druck von 50 kPa betreibt, um das Risiko von Kavitationsschäden an den Turbinen zu verringern, hat festgestellt, dass diese Betriebsbeschränkung im Allgemeinen die Dekompressionseffekte auf Fische minimiert [15]. Zusätzlich zu den Erfahrungen und Empfehlungen des Corps empfahlen die österreichischen Felduntersuchungen ebenfalls einen minimalen Nadir-Druck von 50.0 kPa während der stromabwärts gerichteten Wanderung [14]. Dementsprechend wurde für diese Studie ein Nadir-Wert von 50.0 kPa als Schwellenwert für die Bewertung des Risikos einer mehr als 10%-igen Mortalität aufgrund einer schnellen Dekompression gewählt.

2.4. Schwellenwert für die Druckänderungsrate

Zusammen mit der Zeitreihe für den Druck wurde die Druckänderungsrate (ROC) basierend auf der schnellsten Druckabnahme unmittelbar vor dem Auftreten des Nadir-Drucks berechnet. Diese Rate wurde auf der Grundlage des in früheren Studien verwendeten Ansatzes berechnet [16]. Sie wird ermittelt, indem der Nadir-Druck vom höchsten Druck subtrahiert wird, welcher während des 1.0-sekündigen Intervalls unmittelbar vor dem Nadir-Ereignis gemessen wurde. Die ROC steht für die maximale zeitliche Änderungsrate während der Dekompression, mit der physikalischen Einheit kPa/s. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass dieser physikalische Parameter an Wasserkraftwerken nach wie vor kaum untersucht ist,

da es schwierig ist, Messungen mit lebenden Fischen, die mit Drucksensoren ausgestattet sind, vor Ort durchzuführen. Die österreichische Studie zu grossen Kaplan-Turbinen hat noch keine konkreten Daten zur Druckänderungsrate veröffentlicht [14]. Es gibt jedoch veröffentlichte Leitfäden für dekompressionsbedingte Verletzungs- und Mortalitätsrisiken [17]. In Anlehnung an den für „fischfreundliche“ Turbinen entwickelten Leitfaden wurde der Schwellenwert für die ROC auf 550.0 kPa/s festgelegt.

2.5. Schwellenwert für die logarithmische Druckänderung

In der österreichischen Druckkammerstudie mit oberflächenakklimatisierten Fischen wiesen Nasen (L1 und 0+), Rotaugen (L6/J1) und Barsche (0+) bei $LRP \approx 1$ druckbedingte Verletzungen auf, während bei Flussbarschen (L6/J1) und Rotaugen (0+) erst bei höheren Werten von $LRP \approx 1.5$ Verletzungen beobachtet wurden. Die Äsche (L1/L2) und der Flussbarsch (L1) waren weniger stark betroffen, was möglicherweise darauf zurückzuführen ist, dass ihre Schwimmblasen noch nicht voll entwickelt sind. Bei ihnen wurden Verletzungen bei $LRP \approx 2$ oder mehr beobachtet. Oberflächenakklimatisierte Äschen (0+) wiesen keine LRP-bedingten Verletzungen oder Mortalitätsraten auf, an die Tiefe (15 m) angepasste Äschen (0+) hatten jedoch eine Mortalitätsrate von 47 % bei $LRP \approx 1.8$ und 94 % bei $LRP \approx 1.8$. Bei den 0+-Stadien von Flussbarsch, Nase und Rotauge gab es hingegen keine wesentlichen Unterschiede in den Verletzungsraten im Vergleich zu den Druckkammertests mit ihren oberflächenakklimatisierten Artgenossen des gleichen Lebensstadiums. Dies zeigt, dass der LRP-Wert für einige empfindliche Arten und Lebensstadien wie die Äsche im Stadium 0+ in Verbindung mit der Akklimatisierungstiefe berücksichtigt werden sollte.

Im Vergleich zu anderen Süßwasserfischarten ist bekannt, dass der junge amerikanische Maifisch eine geringe physiologische Toleranz gegenüber schneller Dekompression und Flüssigkeitsscherung aufweist [18]. Neuere Studien haben ergeben, dass Maifische bei einer LRP von 0.64 eine Mortalität von 10 % aufgrund einer schnellen Dekompression aufweisen. Dieser Wert ist deutlich niedriger als der von juvenilem Lachs (0.92), Glasaugenbarsch (0.94) und Tigerhecht (0.82). Der Amerikanische Aal in der Silberphase wies bei einer LRP von 2.23 keine Mortalität, aber eine Verletzungsrate von 13.3 % auf [19].

Auf der Grundlage dieser Studien mit lebenden Fischen wurde ein konservativer LRP-Schwellenwert von 0,5 für ein Mortalitätsrisiko $> 10\%$, bedingt durch schnelle Dekompression, gewählt. Diese Entscheidung wird zudem durch eine systematische Auswertung der Fachliteratur [1] über die durch Wasserkraftwerke verursachten Verletzungen und Mortalitätsraten von Fischen gestützt, in der für fünf Turbinenstudien, die in die Auswertung aufgenommen wurden, Überlebensraten von 100 % bei $LRP < 1,0$ angegeben wurden.

2.6. Analyse von Schlag- und Beschleunigungssensordaten

Zusätzlich zu den druckbasierten physikalischen Parametern wurden in dieser Studie auch Schleif- und Schlagereignisse berücksichtigt. Die BDS-Sensoren wurden mit einer Kunststoff-„Haut“ (ORALITE 5180, #035, RA2, B, 210 Mikron) versehen. Diese Kunststoffschicht wurde auf Kratzer, Beulen und Risse untersucht, die durch Schleif- oder Schlagereignisse verursacht wurden. Nach jedem Einsatz wurden die Daten der einzelnen Sensoren ausgewertet, wobei grosse Beschleunigungen auf ein Schlagereignis hindeuten. Zusätzlich wurden sie äusserlich inspiziert, bevor sie erneut eingesetzt wurden (Abbildung 6). Bei Schlagereignissen unter 50 m/s ohne äussere Schäden wurde davon ausgegangen, dass kein wesentliches Risiko einer kollisionsbedingten Verletzung oder Mortalität besteht. Der Schwellenwert wurde anhand von Labortests festgelegt, in denen die maximale Beschleunigung der BDS-Sensoren in einer Schaufelschlagvorrichtung mit Relativgeschwindigkeiten von 1 bis 5 m/s getestet wurde. Es wurde festgestellt, dass Relativgeschwindigkeiten von 2 m/s in der Lage sind, Beschleunigungen von 50 m/s² zu erzeugen. Auf der Grundlage früherer Studien über Schaufelschläge auf lebende Fische wurde festgestellt, dass die Mortalität von Maifischen (*Dorosoma cepedianum*, mittlere Gesamtlänge 19,3 cm), Barschen (*Morone saxatilis*, mittlere Gesamtlänge 17,1 cm) oder Regenbogenforellen (*Oncorhynchus mykiss*, mittlere Gesamtlänge 17,3 cm) bei Schlaggeschwindigkeiten von weniger als 5 m/s geringer als 10 % ausfällt [20]. Daher wird davon ausgegangen, dass die vom BDS aufgezeichneten Schlagereignisse unter 50 m/s² ein geringes Risiko einer tödlichen Verletzung für Fische mit einer vergleichbaren Grösse wie der des BDS-Sensors (Gesamtlänge 14,0 cm) darstellen. Diese Methode wurde aus einer früheren Studie über das BDS und lebende Fische (Europäischer Aal, Rotaue und Brasse) bei grossen Turbinen übernommen, bei der Schleif-, Quetsch- und Schaufelschlagereignisse zu Verletzungen und Mortalität führten [21].

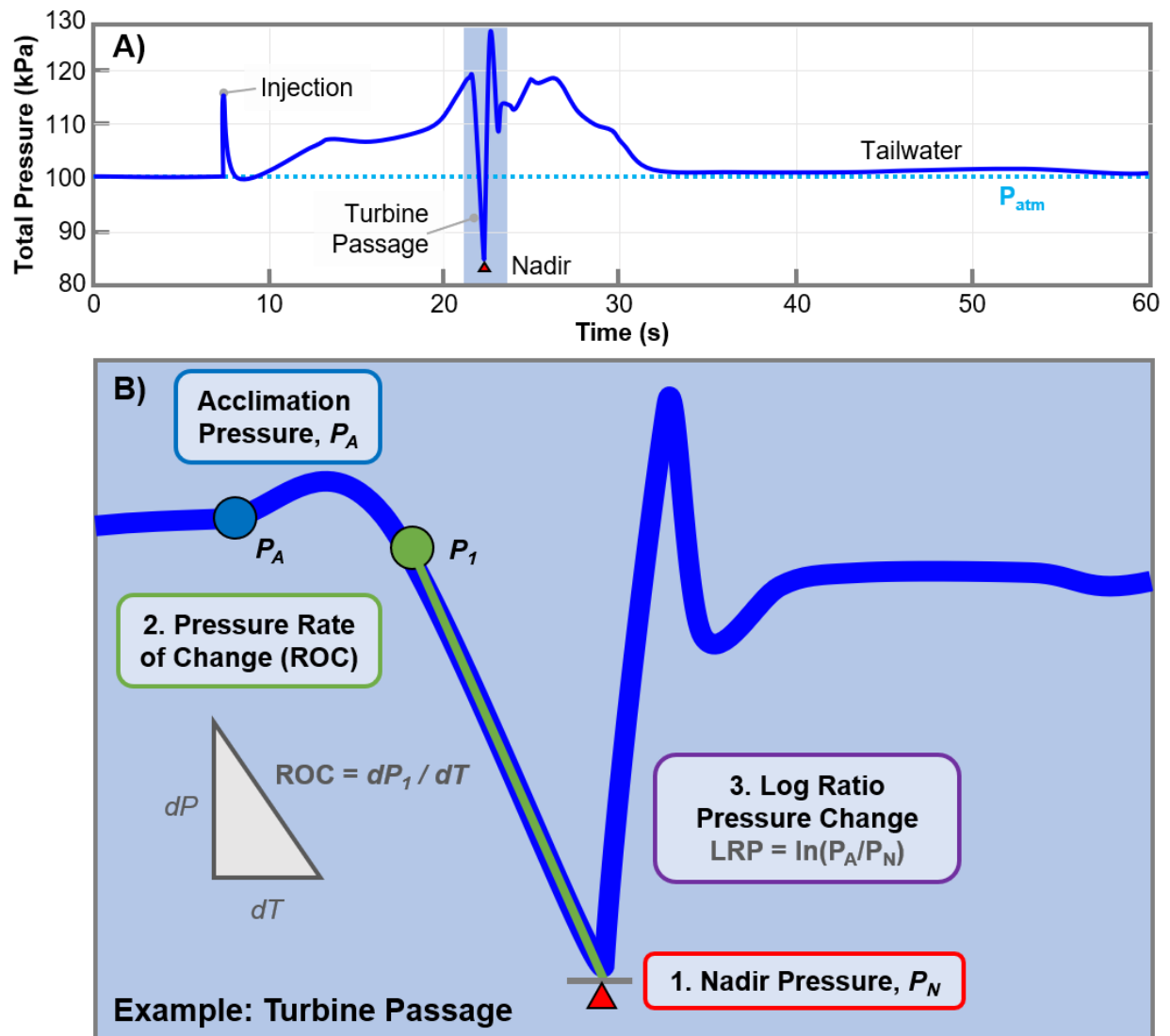


Abbildung 5: A) Zeitreihe des BDS-Drucksensors während einer typischen Turbinendurchquerung. B) Die drei druckbezogenen physikalischen Parameter, die zur Bewertung des Fischmortalitätsrisikos durch rasche Dekompression verwendet werden, sind der Nadir-Druck (1), die Druckänderungsrate (2) und die logarithmische Druckänderung (3).

Tabelle 5: Zusammenfassung der endemischen Familien und ausgewählten Fischarten in Bannwil, mit Angabe der Verfügbarkeit von veröffentlichten physikalischen Schwellenwerten aus früheren Studien, und ihre biologische Empfindlichkeit gegenüber der Mortalität. Wenn Schwellenwertdaten verfügbar sind, werden die spezifischen Parameter und ihre Werte in die Zusammenfassung der druckbezogenen physikalischen Parameter in Tabelle 6 aufgenommen. Die biologischen Empfindlichkeitsklassen und die Punktzahlen stammen von [13].

Familie	Fischarten	Veröffentlichte physikalische Schwellenwerte (J = Ja, N= Nein)	Klasse der biologischen Empfindlichkeit	Punktzahl der biologischen Empfindlichkeit
Anguillidae	Europäischer Aal (<i>Anguilla anguilla</i>)	N	Hoch	3,67
Balitoridae	Schmerle (<i>Barbatula barbatula</i>)	N	Moderat	2,50
Cottidae	Groppe (<i>Cottus gobio</i>)	N	Moderat	3,17
Cyprinidae	Karpfen (<i>Cyprinus carpio</i>)	N	Moderat	3,17
	Brachse (<i>Abramis brama</i>)	N	Moderat	3,25
	Schneider (<i>Alburnoides bipunctatus</i>)	N	Niedrig	2,25
	Ukelei (<i>Alburnus alburnus</i>)	N	Moderat	2,50
	Barbe (<i>Barbus barbus</i>)	N	Hoch	4,25
	Nase (<i>Chondrostoma nasus</i>)	Y	Hoch	3,58
	Gründling (<i>Gobio gobio</i>)	N	Moderat	2,58
	Hasel (<i>Leuciscus leuciscus</i>)	N	Moderat	3,08
	Döbel (<i>Leuciscus cephalus</i>)	N	Moderat	3,17
	Strömer (<i>Leuciscus souffia</i>)	N	Moderat	3,17
	Rotauge (<i>Rutilus rutilus</i>)	Y	Moderat	3,17
	Rotfeder (<i>Scardinius erythrophthalmus</i>)	N	Moderat	3,33
	Schleie (<i>Tinca tinca</i>)	N	Moderat	3,42
	Esocidae	Hecht (<i>Esox lucius</i>)	N	Moderat
Percidae	Flussbarsch (<i>Perca fluviatilis</i>)	Y	Moderat	3,08
	Zander (<i>Sander lucioperca</i>)	N	Moderat	3,33
Salmonidae	Atlantischer Lachs (<i>Salmo salar</i>)	N	Hoch	4,17
	Meerforelle (<i>Salmo trutta trutta</i>)	N	Hoch	3,75
	Bachforelle (<i>Salmo trutta fario</i>)	N	Hoch	3,58
	Seeforelle (<i>Salmo trutta lacustris</i>)	N	Hoch	3,58
	Europäische Äsche (<i>Thymallus thymallus</i>)	Y	Moderat	3,17
Siluridae	Flusswels (<i>Silurus glanis</i>)	N	Moderat	3,00

Tabelle 6: Zusammenfassung der in dieser Studie verwendeten druckbezogenen physikalischen Parameter und der entsprechenden Schwellenwerte. Die Schwellenwerte wurden zur Abschätzung des Fischmortalitätsrisikos bei Überschreitung von 10 % während der Passage des über- und unterströmten Wehrs bei niedrigem Unterwasserstand am Wehr Bannwil WF2 verwendet.

Physikalische Parameter	Fischart / Teststelle	Schwellenwerte für Verletzung oder Mortalität	In dieser Studie verwendeter Schwellenwert	Literaturquelle
4	Nase (L1, 0+), Rotauge (L6/J1) Flussbarsch (0+) / oberflächenakkl. Flussbarsch (L6/J1), Rotauge (0+) / oberflächenakkl. Flussbarsch (L1), Europäische Äsche (L1/2) / oberflächenakkl. Europäische Äsche (0+) / tiefenakkl. bei 251 kPa	50 kPa (einige Verletzungen) 40 kPa (einige Verletzungen) 20–25 kPa (einige Verletzungen) 15 kPa (einige Verletzungen) 42 kPa (94 % Mortalität)	50 (Werte, die unter diesem Schwellenwert liegen, können zu einem Mortalitätsrisiko von > 10 % führen)	
	Königslachs (<i>Oncorhynchus tshawytscha</i>) Blauer Sonnenbarsch (<i>Lepomis macrochirus</i>)	70 kPa (keine Verletzung) 70 kPa (49.1.8 % Verletzungen)		[22]
	Königslachs (<i>Oncorhynchus tshawytscha</i>) Regenbogenforelle (<i>Oncorhynchus mykiss</i>) Blauer Sonnenbarsch (<i>Lepomis macrochirus</i>)	2–10 kPa (einige Mortalitätsfälle) 2–10 kPa (einige Verletzungen) 50 kPa (einige Mortalitätsfälle)		[15]
	Amerikanischer Aal, Gelbphase Amerikanischer Aal, Silberphase (<i>Anguilla rostrata</i>)	2,4 kPa (keine Mortalität) 2,7 kPa (keine Mortalität)		[19]
Druckänderungsrate, ROC (kPa/s)	Bachneunauge (<i>Lampetra richardonii</i>) Pazifisches Neunauge (<i>Entosphenus tridentatus</i>)	1,05 kPa/s (keine Mortalität) 0,73 kPa/s (keine Mortalität)	550 (Werte, die über diesem Schwellenwert liegen, können zu einem Mortalitätsrisiko von > 10 % führen)	[23]
	Bonneville Dam Ice Harbor Dam	62,0 kPa/s (nur Sensordaten) 5784,7 kPa/s (nur Sensordaten)		[17]
	ARL-Leitlinien für fischfreundliche Turbinenlaufräder	< 550,3 kPa/s (bei 1100,6 kPa/s werden Verletzungen angenommen)		[24]
Logarithmische Druckänderung, LRP (-)	Nase (L1, 0+), Rotauge (L6/J1) Flussbarsch (0+) / oberflächenakkl. Flussbarsch (L6/J1), Rotauge (0+) / oberflächenakkl. Flussbarsch (L1), Europäische Äsche (L1/2) / oberflächenakkl. Europäische Äsche (0+) / tiefenakkl. bei 251 kPa	1,0 (einige Verletzungen) 1,5 (einige Verletzungen) 2,0 (einige Verletzungen) 0,9 (47 % Mortalität) 1,8 (94 % Mortalität)	0,5 (Werte, die über diesem Schwellenwert liegen, können zu einem Mortalitätsrisiko von > 10 % führen)	
	Juveniler Königslachs (<i>Oncorhynchus tshawytscha</i>)	0,92 (10 % Mortalität)		[25]
	Glasaugenbarsch (<i>Sander vitreus</i>) Tigerhecht (<i>Esox lucius</i> × <i>Esox Masquinongy</i>)	0,94 (10 % Mortalität) 0,82 (10 % Mortalität)		[26]
	Juveniler Amerikanischer Maifisch (<i>Alosa sapidissima</i>)	0,64 (10 % Mortalität)		[18]
	Amerikanischer Aal, Silberphase (<i>Anguilla rostrata</i>)	2,23 (keine Mortalität, 13,3 % Verletzungen)		[19]

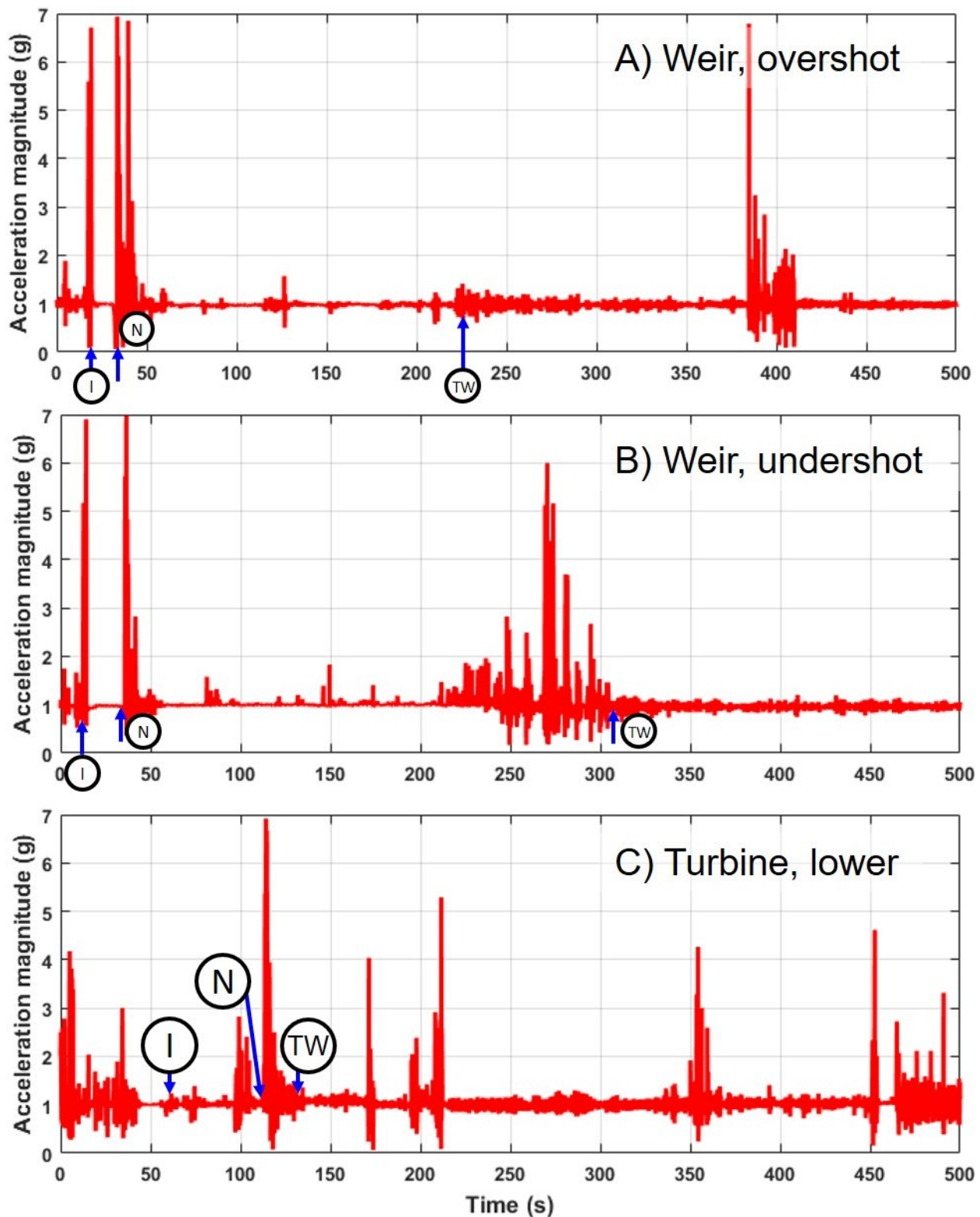


Abbildung 6: Beispielhafte Darstellung der Zeitreihen der Beschleunigungsmagnitude (g) der A) Wehrüberströmung, B) Wehrunterströmung und C) der Turbine T1 bei 95 % Vollast und tieferer Eintauchtiefe. Die Zeitpunkte für das Eintauchen des BDS-Sensors (I), den Nadir-Druck (N) und den Eintritt in das Unterwasser (TW) sind in jeder Zeitreihe durch blaue Pfeile hervorgehoben. Die Zeitreihen der Beschleunigungsmagnitude stammen von denselben Einsätzen, die in Abbildung 4 dargestellt werden.

3. Ergebnisse und Diskussion

3.1. Mortalitätsrisiko durch schnelle Dekompression

Die Ergebnisse für jeden der drei druckbezogenen physikalischen Parameter wurden anhand des Mittelwerts für die Versuche bei Überströmung (n = 59) und Unterströmung (n = 35) des Wehrs bewertet. Die Unsicherheit der Parameter wurde auf der Grundlage ihrer Standardabweichungen berechnet (Tabelle 7). Aufgrund der grossen Unsicherheit der Annahme einer Akklimatisierungstiefe von 4 m bei der Berechnung der LRP, wurden die berechneten Unsicherheiten für die LRP vernachlässigt.

Die Nadir-Drücke sowohl für die Überströmung (98.2 kPa) als auch für die Unterströmung (95.0 kPa) des Wehrs liegen weit unter dem Schwellenwert von 50 kPa, der für die Abschätzung des Risikos einer mehr als 10%igen Mortalität aufgrund einer schnellen Dekompression verwendet wird (Abbildung 7). Zum Vergleich: Die Untersuchung eines kleineren überströmten Wehrs (Fallhöhe 1.8 m) ergaben ähnliche Nadir-Drücke von 99.1 kPa bei Sensorversuchen in Unterströmung und 97.0 kPa bei Versuchen in Überströmung [27]. Die Nadir-Drücke der Über- und Unterströmung am Wehr in Bannwil ähneln denen der BDS-Messungen (n = 30) an einem natürlichen Wasserfall mit Fallhöhen von 5 bis 15 m (93.3 kPa) und 1 bis 5 m (91.5 kPa) [28]. Zum weiteren Vergleich: Die Nadir-Drücke aus den Sensordaten von Bannwil (min. 72.3 kPa bis max. 94.6 kPa) sowie einer horizontalen Kaplan-Turbine mit geringer Fallhöhe waren mit 67.1 kPa deutlich niedriger [7].

Tabelle 7: Mittelwerte der druckbasierten physikalischen Parameter, ± ihre Standardabweichungen von den Versuchen des Wehrs in Bannwil. Die Ergebnisse der Turbine T1 in Bannwil sind zum Vergleich beigefügt. Aufgrund der grossen Unsicherheit bei der Schätzung der Akklimatisierungstiefe (4 m) sind nur die mittleren LRP-Werte angegeben.

Physikalische Parameter	Schwellenwert	Wehr WF2, Überströmung (n = 59)	Wehr WF2, Unterströmung (n = 35)	Turbine T1, Vollast, höher (n = 36)	Turbine T1, Vollast, tiefer (n = 32)	Turbine T1, Teillast, höher (n = 17)	Turbine T1, Teillast, tiefer (n = 31)
Nadir-Druck (kPa)	50	98.2 ±5.2	95.0 ±5.2	75.1 ±15.4	72.3 ±26.0	93.6 ±13.0	92.2 ±26.4
Druck-änderungsrate, ROC (kPa/s)	550	239.9 ±254.1	330.9 ±50.9	152.2 ±18.5	158.6 ±37.6	156.9 ±69.5	165.7 ±69.3
Logarithmische Druckänderung, LRP (-)	0.5	0.35	0.38	0.62	0.65	0.40	0.41

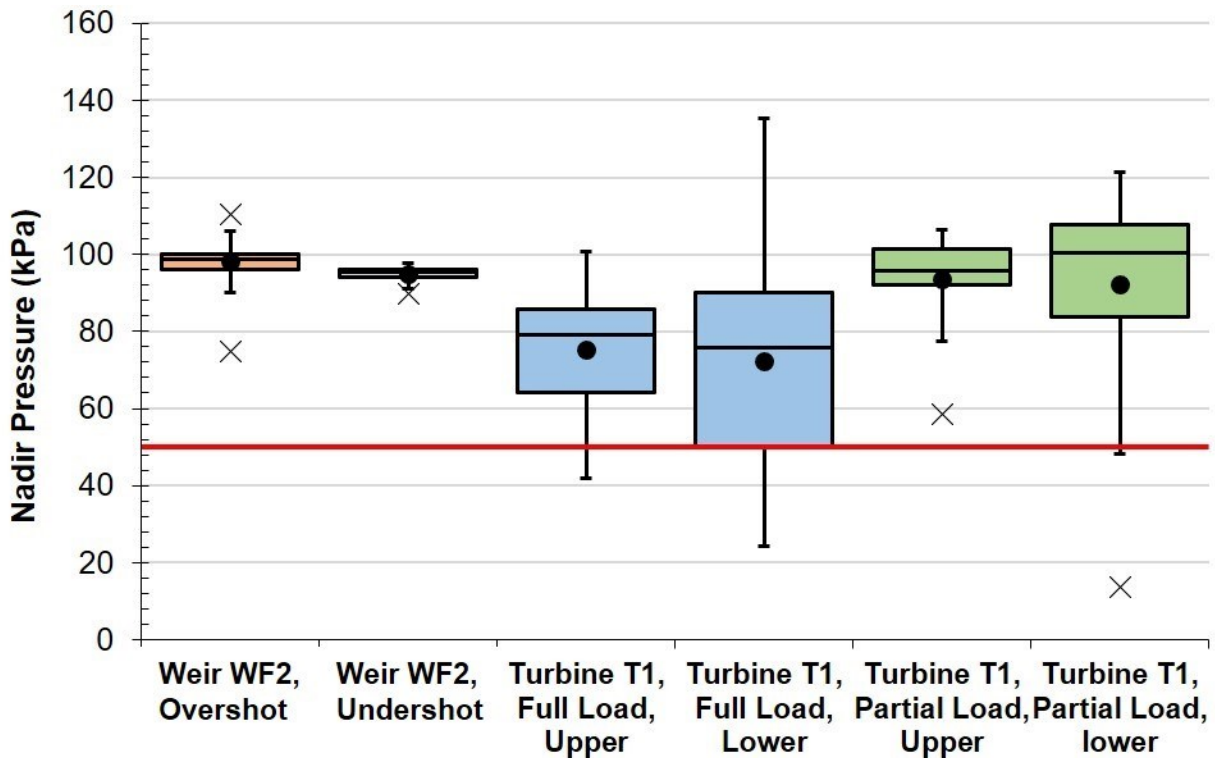


Abbildung 7: Boxplots der Nadir-Drücke für die Versuche in Überströmung und Unterströmung sowie für die Turbine T1 in Bannwil mit Vollast und Teillast in höherer und tieferer Tiefe. Die Boxen stellen den Interquartilsabstand (IQR) über die 25. bis 75. Perzentile dar, die Mittellinie entspricht dem Median, der schwarze Kreis ist der Mittelwert, die Fehlerbalken erstrecken sich vom IQR bis zu einem Faktor von 1,5 und Ausreisser sind als schwarze X-Kreuze dargestellt. Die rote Linie bei 50 kPa ist der Nadir-Schwellenwert, Werte darunter können zu einem Mortalitätsrisiko von > 10 % führen.

Ähnlich wie bei den Nadir-Drücken lagen die Druckänderungsraten für die Überströmung (239.9 kPa/s) und die Unterströmung (330.9 kPa/s) weit vom Schwellenwert von 550 kPa/s entfernt (Abbildung 8). Die Unsicherheit des mittleren ROC-Wertes bei Überströmungsbedingungen (± 254.1 kPa/s) war fast fünfmal so gross wie die Unsicherheit bei den Versuchen in Unterströmung (± 50.9 kPa/s). Ein extremer Ausreisserwert von 1704.9 kPa/s wurde bei den Überströmungsversuchen beobachtet. Dies entspricht einem Fall, in dem der Sensor die Wehrklappe passiert hat und danach einem Sog (Druck < P_{atm}) ausgesetzt war, der die extrem hohe Druckänderungsrate verursachte. Diese Feststellung zeigt, dass es physikalisch möglich ist, dass ein Sog den Nadir-Druck in der Überströmung unter den Luftdruckwert absenkt, auch wenn dies nur selten vorkommt (in dieser Studie in nur 1.7 % der Versuche). In Anbetracht der Tatsache, dass der Stichprobenumfang bei den Versuchen in der Überströmung grösser war ($n = 59$) als bei denen in der Unterströmung ($n = 35$), stellen wir die Hypothese auf, dass die erhöhten grossräumigen Turbulenzen, die bei Überströmungsbedingungen entstehen, eine mögliche Ursache dafür sind. Die Untersuchung der Unterströmung des Wehrs ergab eine ROC von 223.2 kPa/s [27]. Die niedrigen Dekompressionsraten in der Turbine T1 in Bannwil lagen zwischen 152.2 und 165.7 kPa/s und waren deutlich niedriger als bei einer horizontalen Kaplan-Turbine mit geringer Fallhöhe (243.6 kPa) [7].

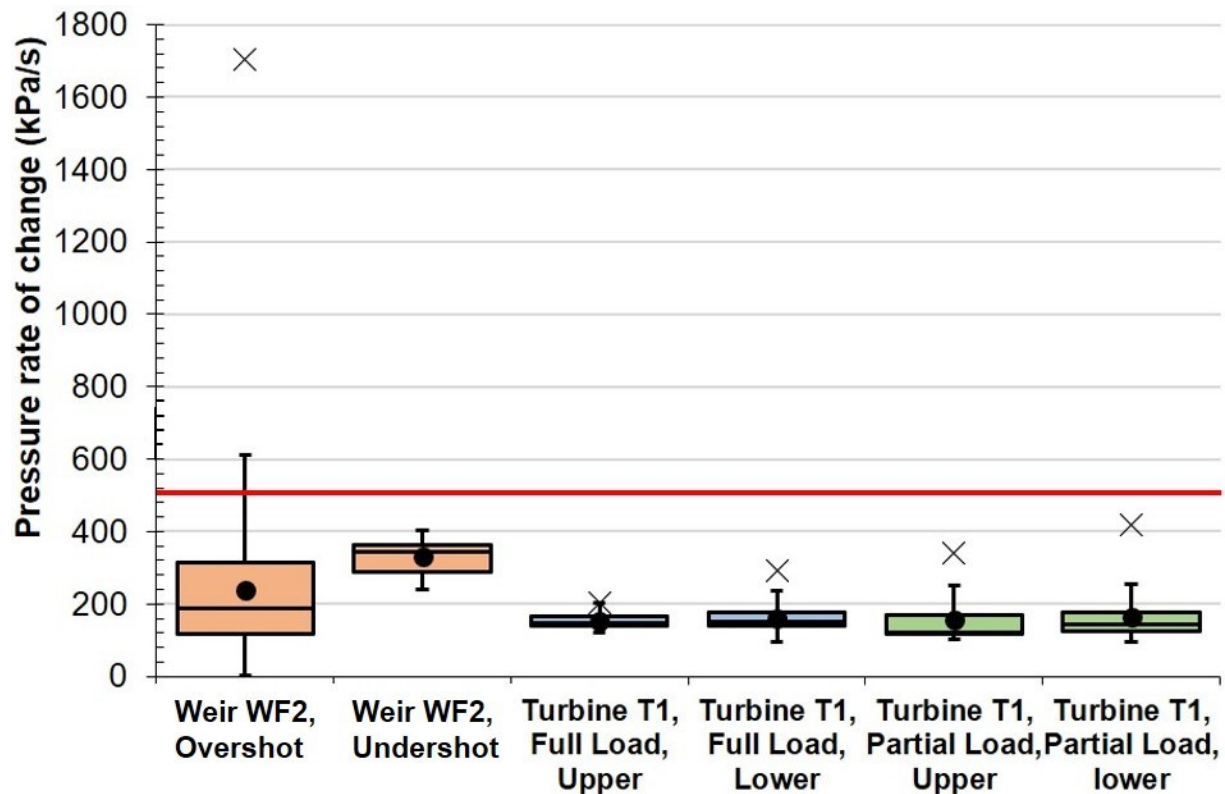


Abbildung 8: Boxplots der Druckänderungsrate (ROC) für das Wehr WF2 in Bannwil bei Versuchen in Über- und Unterströmung sowie für die Turbine T1 in Bannwil bei Versuchen mit Voll- und Teillast in höherer und tieferer Tiefe. Die rote Linie bei 550 kPA ist der ROC-Schwellenwert, Werte darüber können zu einem Mortalitätsrisiko von > 10 % führen.

Die geringe Fallhöhe am Wehr Bannwil spiegelt sich in den niedrigen LRP-Werten sowohl für die Versuche in Überströmung (0.35) als auch in Unterströmung (0.38) wider (Abbildung 9). Sowohl das Über- als auch das Unterströmungsszenario am Wehr wiesen LRP-Werte auf, die unterhalb des Schwellenwerts $LRP > 0.5$ lagen, der zur Abschätzung des Mortalitätsrisikos von mehr als 10 % angenommen wurde. Die LRP lag zwischen 0.40 und 0.65 in der Turbine in Bannwil und reichte von 0.75 für oberflächenakklimatisierte Fische bis zu 0.36 für tiefenakklimatisierte Fische in einer ähnlichen Studie, die an einer horizontalen Kaplan-Turbine mit geringer Fallhöhe durchgeführt wurde [7]. Im Gegensatz zu Bannwil ergab eine Studie passiver Sensoren an einem kleineren überströmten Wehr ($n = 12$, Fallhöhe 1.8 m, Beckentiefe 0.7 m) eine wesentlich höhere LRP von 1,02. Das unterströmte Wehr ($n = 11$, Tiefe 2.5 m, Unterwassertiefe 0.7 m) wies an diesem Studienstandort eine ermittelte LRP von 1.29 auf [27]. Eine BDS-Studie wurde an einem norwegischen Wasserfall durchgeführt, der eine natürliche Gefahr für flussabwärts wandernde Forellen und Lachse darstellte. An diesem Wasserfall wurden die LPR als vernachlässigbar angesehen, da davon ausgegangen wurde, dass die Akklimatisierungstiefe der Fische, die den Wasserfall hinabwandern, an oder nahe der Wasseroberfläche liegt [28]. Obwohl die Akklimatisierungstiefen an Wasserkraftwehren in den meisten Fällen wesentlich geringer sind als an grossen Dämmen, können die LRP-Werte ein Verletzungs-

und Mortalitätsrisiko darstellen. Das Verletzungs- und Mortalitätsrisiko an Wehren sollte nicht allein anhand der Fallhöhe abgeschätzt werden.

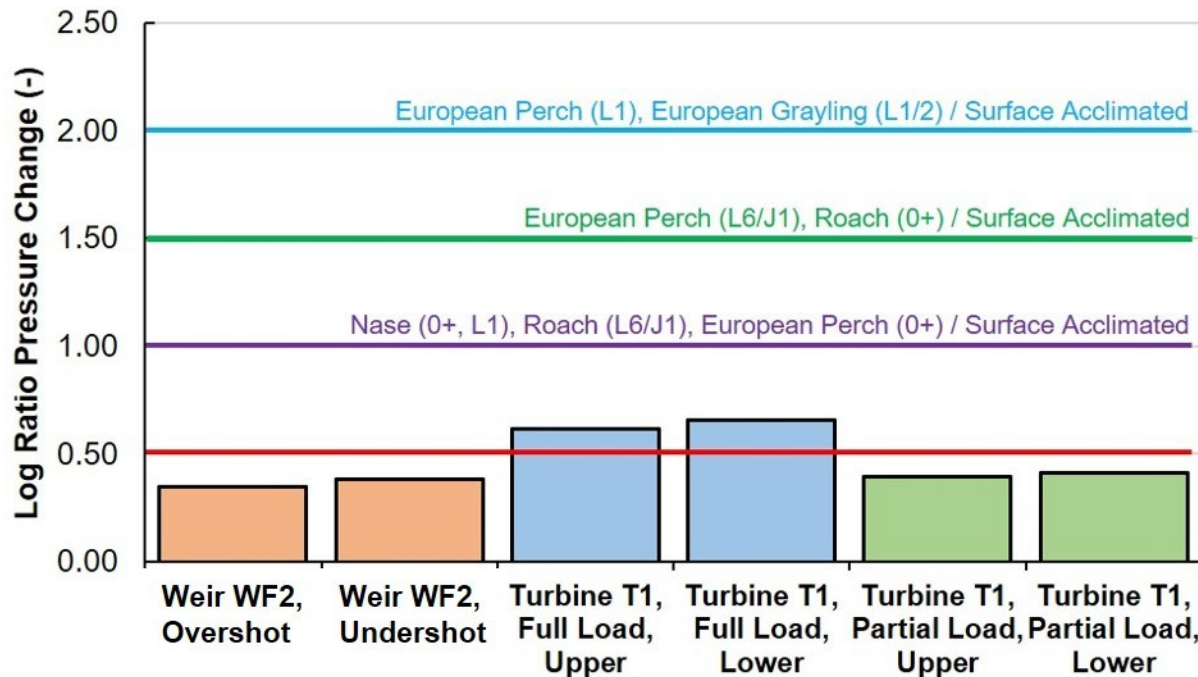


Abbildung 9: Säulendiagramm der logarithmischen Druckänderung (LRP) für das Wehr WF2 in Bannwil in Versuchen in Überströmung und Unterströmung sowie für die Turbine T1 in Bannwil in Versuchen mit Volllast und Teillast in höherer und tieferer Tiefe. Die rote Linie bei 0.50 ist der LRP-Schwellenwert, Werte darüber können zu einem Mortalitätsrisiko von > 10 % führen. Die Schwellenwerte für ausgewählte endemische Fischarten sind als Referenz angegeben.

3.2. Mortalitätsrisiko aufgrund von Aufprallereignissen

Aufprallereignisse wurden nur dann als risikoreich eingestuft, wenn sie 50 m/s überstiegen. Ausserdem wurden alle Sensoren nach dem Einsatz auf Anzeichen physischer Schäden untersucht, bevor sie als „Schlag“-Ereignisse (Passieren der Turbine) oder „Kollisions“-Ereignisse (Passieren des Wehrs) eingestuft wurden. Bei den Versuchen in der Über- und Unterströmung des Wehrs Bannwil traten keine Aufprallereignisse auf. Bei der Turbine in Bannwil wurden Schlagereignisse bei Volllast am höheren Eintauchpunkt (2 %) und bei Teillast am höheren Eintauchpunkt (11 %) festgestellt, was darauf hindeutet, dass das Risiko von Schlägen sowohl bei Voll- als auch bei Teillast in der tieferen Eintauchhöhe geringer ist. Bei den in dieser Studie untersuchten Bedingungen kam es zu keinen Kollisionen mit Prallblöcken oder Aufprallen auf Felsbrocken im Unterwasser. Die gemessenen Beschleunigungen für die Versuche in der Über- und Unterströmung des Wehrs zeigten, dass bei niedrigem Unterwasserstand generell keine Aufpralle im Unterwasser zu verzeichnen waren (Abbildung 10). Die Ergebnisse einer früheren Sensorstudie an einem Wehr (2.5 m Fallhöhe), bei der passive Sensoren eingesetzt wurden, zeigten eine Schlagquote von 75 % in Überströmung (n = 12) und 91 % in Unterströmung (n = 11) [27]. An diesem Standort wurde festgestellt, dass 83 % der Schlagereignisse in der Überströmung und 72 % der Schlagereignisse in der

Unterströmung direkt unter dem Wehrverschluss selbst stattfanden. Eine BDS-Studie an einem natürlichen norwegischen Wasserfall mit einer Fallhöhe von 5 bis 15 m ergab, dass bei 26 % der vom BDS aufgezeichneten Aufprallereignisse auftraten, die wahrscheinlich zu einer tödlichen Verletzung der flussabwärts wandernden Fische führen. Die am Wasserfall beobachteten höheren Raten schwerer Schläge sind auf den direkten Kontakt der Sensoren mit dem Grundgestein aus Granit an diesem Standort zurückzuführen. Die Tiefe des Gewässers unterhalb des untersuchten Wasserfalls betrug an vielen Aufprallstellen unter 0.25 m [28].

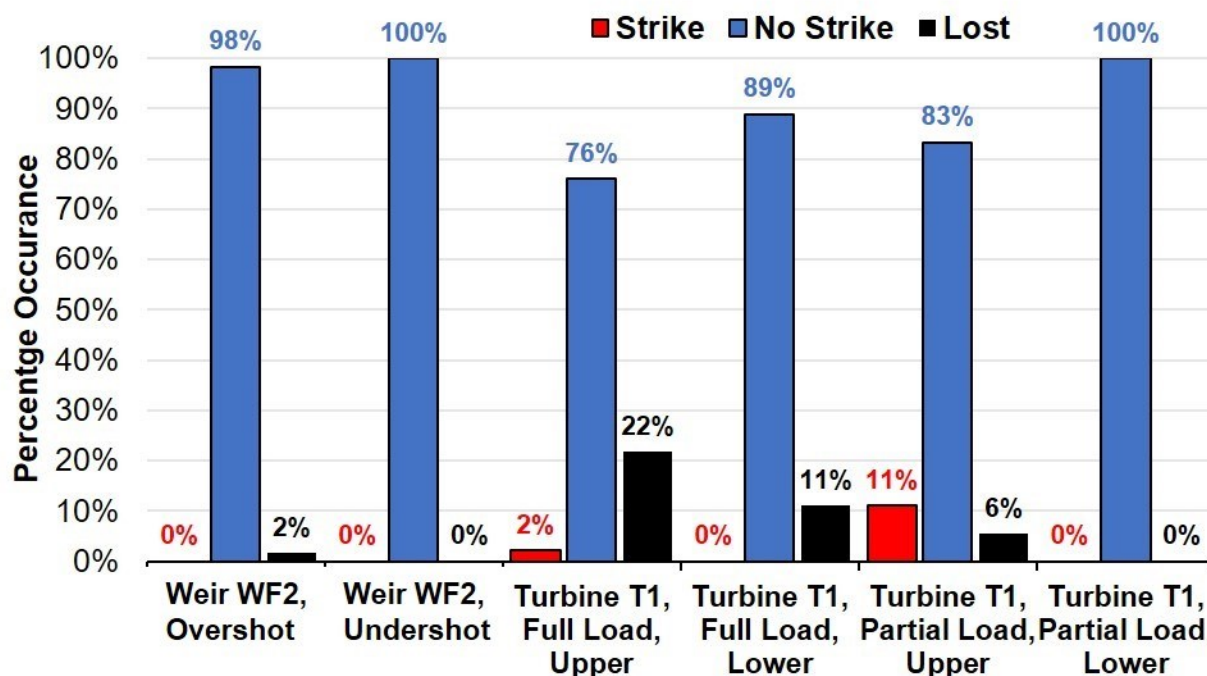


Abbildung 10: Säulendiagramme der Anzahl der Schläge, der Nicht-Schläge und der verlorenen Sensoren während aller Versuche am Bannwiler Wehr WF2 in Über- und Unterströmung sowie an der Bannwiler Turbine T1 bei Voll- und Teillast in höherer und tieferer Tiefe.

3.3. Vergleich von lebenden Fischen mit dem BDS

Bei den Versuchen in der Über- und Unterströmung des Wehrs in Bannwil kam es zu keinen Schlagereignissen. Zurzeit gibt es nur wenige Studien, die sich mit den Auswirkungen der Überströmung von Wehren auf lebende Fische befassen. Bemerkenswerte Ausnahmen wurden zur Wanderung von Fischen durch Bypässe gemacht. Um sicherzustellen, dass die Fische nicht auf dem Grund des Flussbettes aufschlagen, wurden für Bypässe Grenzwerte für die Bewegungsgeschwindigkeit im Rohr von 9.2 m/s und die Mindesttiefe des aufnehmenden Gewässers von mindestens 0.9 m (bzw. ¼ der Fallhöhe) in der Literatur festgehalten [29]. Darüber hinaus gibt es eine begrenzte Anzahl von Studien, die die maximale Fallhöhe von Wehren zur Vermeidung von Mortalität auf 13 m festlegen [30]. Die Autoren haben die Aufprallereignisse des BDS und lebender Fische an der Wasseroberfläche am Fischlift Runserau in

Österreich verglichen [31]. In dieser Studie wurden lebende, adulte Regenbogenforellen (*Oncorhynchus mykiss*, n = 55, 280–450 g), die ein 600 m langes Bypass-Rohr flussaufwärts durchquerten, mit externen Drucksensoren versehen. Beim Verlassen des Bypass-Rohrs erfuhren die Fische einen Fall von 1, 2 oder 5 m in das Oberwasser. Die Fische wurden unmittelbar nach dem Bergen aus dem Netzgehege sowie 24 Stunden später biologisch untersucht, um die verzögerte Mortalität zu ermitteln. Darüber hinaus wurden identische Versuche mittels BDS durchgeführt. Es wurde festgestellt, dass Fallhöhen von 1, 2 und 5 m keine Verletzungen und auch keine um 24 Stunden verzögerte Mortalität zur Folge hatten [32] und die druckbezogenen physikalischen Parameter statistisch ähnlich waren [33].

Staudämme erzeugen ähnliche Fallhöhen und hydraulische Bedingungen wie ein natürlicher Wasserfall. In den USA wurden an den 30 m hohen Dämmen Bonneville, McNary und John Day Mortalitätsraten von 0 bis 4 %, am 60 m hohen Glines Dam von 8 % und am 30 m hohen Lower Elwha Dam von 37 % festgestellt [34]. Unabhängig von den unterschiedlichen physikalischen Bedingungen an den verschiedenen Standorten und der Länge des Fischkörpers deuten die experimentellen Daten auf eine maximale Aufprallgeschwindigkeit von 15 bis 16 m/s hin, bei der es zu erheblichen Verletzungen der Fische kommt. Im freien Fall, bei denen der Fisch nicht mit der Wassersäule mitgerissen wird, entspricht dies einer maximalen Fallhöhe von 10 m. Wenn Fische mit dem fallenden Wasser mitgerissen werden, tritt die kritische Geschwindigkeit bei Fallhöhen von bis zu 13 m auf. Die derzeitige geschätzte Fallhöhe, die zu einer 100%igen Mortalität führt, beträgt laut Fachliteratur 50 bis 60 m [35].

4. Schlussfolgerungen

Das erste Ziel dieser Studie war der Einsatz von Barotrauma-Sensoren am Wehr Bannwil bei niedrigem Unterwasserstand, um die physikalischen Bedingungen während der Über- und Unterströmung des Wehrs zu bewerten. Dies wurde während der Feldeinsätze im September 2021 erfolgreich erreicht: Insgesamt wurden 59 BDS-Datensätze (98 % Bergung) für das Überströmungsszenario am Wehr sowie 35 BDS-Datensätze (100 % Bergung) für das Unterströmungsszenario am Wehr erstellt, beide bei niedrigem Unterwasserstand.

Das zweite Ziel bestand darin, die BDS-Sensoren bei 95 % (Volllast) und 66 % (Teillast) des Bemessungsabflusses in 12 m und 14 m unter der Wasseroberfläche durch die Turbine zu leiten, um die physikalischen Bedingungen während der flussabwärtsgerichteten Wanderung zu ermitteln. Im Juni 2019 wurden im Rahmen des EU-Projekts FitHydro insgesamt 116 erfolgreiche BDS-Durchgänge (89 % Bergung) durchgeführt, die in diesem Bericht zusammen mit den im Rahmen des ersten Ziels gesammelten BDS-Versuche am Wehr untersucht wurden.

Das dritte Ziel bestand darin, die Daten der am Wehr und an der Turbine eingesetzten BDS-Sensoren mit Studien über die Flussabwärtsbewegung unter Anwendung lebender Fische und passiver Sensoren zu vergleichen. Dies wurde im Rahmen einer Auswertung der Fachliteratur durchgeführt, deren Ergebnisse in Tabelle 5 sowie in Abschnitt 3 zusammengefasst sind. Obwohl es Daten aus öffentlich zugänglichen Studien zum Verletzungs- und Mortalitätsrisiko für bestimmte Fischarten und Lebensstadien gibt, sind viele der in der Aare bei Bannwil vorkommenden endemischen Arten in den vorhandenen Studien nicht vertreten. Da es für die meisten endemischen Arten, die in Tabelle 5 aufgeführt sind, keine Schwellenwerte gibt, wurden die Werte für die druckbasierten physikalischen Parameter aufgrund von Studien über lebende Fische und Sensoren aus der Fachliteratur ausgewählt. Bei der Betrachtung des Nadir-Drucks und der logarithmischen Druckänderung wurden kürzlich veröffentlichte Werte aus der österreichischen Druckkammerstudie für larvale und juvenile Europäische Äschen, Flussbarsche, Nasen und Rotaugen berücksichtigt. Da die Forschung zur flussabwärts gerichteten Wanderung rasch voranschreitet, muss betont werden, dass die in diesem Bericht verwendeten Schwellenwerte für das geschätzte druckbedingte Mortalitätsrisiko in Zukunft auf der Grundlage laufender Studien mit endemischen Fischarten aktualisiert werden können, falls diese öffentlich zugänglich werden.

Das vierte Ziel dieser Studie bestand darin, festzustellen, ob das Risiko der Fischmortalität am Wehr Bannwil für das Unterströmung- und Überströmungsszenario bei niedrigem Unterwasserstand und bei Turbinenpassage mehr als 10 % beträgt. Die biologische Empfindlichkeit gegenüber Mortalität wurde für endemische Arten in Tabelle 5 angegeben. Die physikalischen Schwellenwerte für druckbedingte Verletzungen und Mortalität wurden, soweit verfügbar, der Fachliteratur entnommen. Auf der Grundlage der in dieser Studie verwendeten druckbasierten Schwellenwerte, wurde das geschätzte Fischmortalitätsrisiko auf unter 10 % eingestuft. Am Wehr Bannwil wurden bei niedrigem Unterwasserstand keine Aufprallereignisse beobachtet. Daher wurde das geschätzte Mortalitätsrisiko aufgrund von Schlagereignissen am Wehr Bannwil für die Über- und Unterströmung bei niedrigem Unterwasserstand ebenfalls auf unter 10 % bestimmt. Bei der Passage der Turbine lagen die durchschnittlichen LRP-Werte sowohl für die höhere ($LRP = 0.62$) als auch für die tiefere ($LRP = 0.65$) Eintauchtiefe über dem Schwellenwert von 0.5. Es besteht jedoch nach wie vor eine grosse Unsicherheit hinsichtlich des Verletzungs- und Mortalitätsrisikos, welche diese relativ niedrigen LRP-Werte mit sich bringen können. Diese Unsicherheit ist insbesondere auf die unbekanntes Akklimatisierungstiefen, in denen die Fische in den Turbineneinlauf gelangen bevor sie flussabwärts passieren, zurückzuführen. Betrachtet man die Unterströmung und die Überströmung des Wehrs sowie die Turbinenpassage, so unterscheiden sich die physikalischen Bedingungen in den Korridoren für die flussabwärts gerichteten Passage nur geringfügig. Die BDS-Daten für die Über- und Unterströmung am Wehr liegen insgesamt am weitesten von den Schwellenwerten für Verletzungen und Mortalität, basierend auf physikalischem Druck,

entfernt. Zudem konnten bei niedrigem Unterwasserstand keine Aufprallereignisse beobachtet werden. Im Gegensatz dazu wurden bei der Turbinenpassage LRP-Werte oberhalb des empfohlenen Schwellenwerts festgestellt und es kam sowohl bei Volllast (2 %) als auch bei Teillast (11 %) in der höheren Eintauchtiefe zu vereinzelt Schlagereignissen.

Unter Berücksichtigung der druckbasierten physikalischen Parameter wird die Mortalitätsrate von Fischen, die flussabwärts durch die Turbine oder über das Wehr (Über- und Unterströmt) des WKW Bannwils abwandern bei Niedrigwasserbedingungen, auf weniger als 10 % geschätzt. Eine detaillierte Schätzung der Mortalitätsraten aufgrund druckbedingter physikalischer Parameter für einzelne Arten und Lebensstadien würde die Kenntnis der Akklimatisierungstiefe sowie Tests mit lebenden Fischen in einer Druckkammer erfordern. Ausserdem deuten die Ergebnisse dieser Studie darauf hin, dass die Mortalitätsrate bei der Wehrpassage unter den untersuchten Betriebsbedingungen wahrscheinlich geringer ist als die Mortalitätsrate bei der Turbinenpassage. Es besteht jedoch die Möglichkeit, dass es zwischen diesen beiden Korridoren einen Unterschied in der Mortalitätsrate gibt, der nur durch Tests an lebenden Fischen vor Ort festgestellt werden kann.

5. Danksagung

Dieses Projekt wurde grosszügig vom Verband Aare-Rheinwerke finanziert. Wir danken dem Ingenieur Andres Ernits von der TalTech für seine unermüdliche Arbeit an der Optimierung des BDS. Ausserdem möchten wir ein herzliches Dankeschön an die Mitarbeiter der BKW Bannwil im Bereich Technik und Unterhalt sowie an die Bootsbesatzung dafür aussprechen, dass wir die Feldarbeiten am Wehr und an der Turbine des Kraftwerks Bannwil dank ihrer Unterstützung professionell, sicher, effizient und effektiv durchführen konnten.

6. Referenzen

1. Pracheil BM, DeRolph CR, Schramm MP, Bevelhimer MS. 2016 A fish-eye view of riverine hydropower systems: the current understanding of the biological response to turbine passage. *Rev. Fish Biol. Fish.* **26**, 153–167. (doi:10.1007/s11160-015-9416-8)
2. Colotelo AH, Goldman AE, Wagner KA, Brown RS, Deng ZD, Richmond MC. 2016 A comparison of metrics to evaluate the effects of hydro-facility passage stressors on fish. *Environ. Rev.* **25**, 1–11.
3. Cada G Carlson, T, Ferguson, J, Richmond, M, Sale, M, Oak Ridge National Lab, TN (US) W '99 Las Vegas, NV (US), 07/06/1999--07/09/1999; Other Information: PBD: 6 Jul 1999. 1999 *Exploring the Role of Shear Stress and Severe Turbulence in Downstream Fish Passage*.
4. Deng ZD, Lu J, Myjak MJ, Martinez JJ, Tian C, Morris SJ, Carlson TJ, Zhou D, Hou H. 2014 Design and implementation of a new autonomous sensor fish to support advanced hydropower development. *Rev. Sci. Instrum.* **85**, 115001. (doi:10.1063/1.4900543)
5. Schneider, J, Ratschan, C, PG, Avalos, JC, Tuhtan, JA, Haas, C, Reckendorfer, W, Schletterer, M, Zitek, A. In press. Flussabwärts gerichtete Fischwanderung an mittelgrossen Fließgewässern in Österreich. *Wasserwirtschaft* , 39–44.
6. Deng ZD, Duncan JP, Arnold JL, Fu T, Martinez J, Lu J, Titzler PS, Zhou D, Mueller RP. 2017 Evaluation of Boundary Dam spillway using an Autonomous Sensor Fish Device. *J. Hydro-Environ. Res.* **14**, 85–92. (doi:10.1016/j.jher.2016.10.004)
7. Boys CA, Pflugrath BD, Mueller M, Pander J, Deng ZD, Geist J. 2018 Physical and hydraulic forces experienced by fish passing through three different low-head hydropower turbines. *Mar. Freshw. Res.* **69**, 1934–1944. (doi:10.1071/MF18100)
8. Boys CA, Robinson W, Miller B, Pflugrath B, Baumgartner LJ, Navarro A, Brown R, Deng Z. 2016 A piecewise regression approach for determining biologically relevant hydraulic thresholds for the protection of fishes at river infrastructure. *J. Fish Biol.* **88**, 1677–1692. (doi:10.1111/jfb.12910)
9. Amaral SV, Bevelhimer MS, Čada GF, Giza DJ, Jacobson PT, McMahon BJ, Pracheil BM. 2015 Evaluation of Behavior and Survival of Fish Exposed to an Axial - Flow Hydrokinetic Turbine. *North Am. J. Fish. Manag.* **35**, 97–113. (doi:10.1080/02755947.2014.982333)
10. Saylor R, Sterling D, Bevelhimer M, Pracheil B. 2020 Within and Among Fish Species Differences in Simulated Turbine Blade Strike Mortality: Limits on the Use of Surrogacy for Untested Species. *Water* **12**, 701. (doi:10.3390/w12030701)
11. 2014 Interkantonale Aareplanung: Strategische Planung Sanierung Fischgängigkeit Fischwanderhilfen bei Aarekraftwerken. *Einheitliche Grundsätze Kantone Version 1.1 / 15.08.2014*, 1–6.
12. In press. BNO55. See https://www.bosch-sensortec.com/bst/products/all_products/bno055 (accessed on 12 May 2018).
13. van Treeck R, Van Wichelen J, Wolter C. 2020 Fish species sensitivity classification for environmental impact assessment, conservation and restoration planning. *Sci. Total Environ.* **708**, 135173. (doi:10.1016/j.scitotenv.2019.135173)

14. Ratschan C, Zitek A. 2023 Effekte der Schädigung von Larven, Jungfischen, subadulten und adulten Individuen typischer europäischer Fischarten bei der Passage von Kaplan-Turbinen an mittelgrossen Fließgewässern in Österreich auf das Populationsniveau.
15. Becker JM, Abernathy CS, Dauble DD. 2003 Identifying the effects on fish of changes in water pressure during turbine passage.
16. Fu T, Deng ZD, Duncan JP, Zhou D, Carlson TJ, Johnson GE, Hou H. 2016 Assessing hydraulic conditions through Francis turbines using an autonomous sensor device. *Renew. Energy* **99**, 1244–1252. (doi:10.1016/j.renene.2016.08.029)
17. Brown RS *et al.* 2012 Quantifying Mortal Injury of Juvenile Chinook Salmon Exposed to Simulated Hydro-Turbine Passage. *Trans. Am. Fish. Soc.* **141**, 147–157. (doi:10.1080/00028487.2011.650274)
18. Pflugrath BD, Harnish RA, Rhode B, Engbrecht K, Beirão B, Mueller RP, McCann EL, Stephenson JR, Colotelo AH. 2020 The Susceptibility of Juvenile American Shad to Rapid Decompression and Fluid Shear Exposure Associated with Simulated Hydroturbine Passage. *Water* **12**, 586. (doi:10.3390/w12020586)
19. Pflugrath BD, Harnish R, Rhode B, Beirao B, Engbrecht K, Stephenson JR, Colotelo AH. 2019 American eel state of buoyancy and barotrauma susceptibility associated with hydroturbine passage. *Knowl. Manag. Aquat. Ecosyst.* , 20. (doi:10.1051/kmae/2019012)
20. Bevelhimer MS, Pracheil BM, Fortner AM, Saylor R, Deck KL. 2019 Mortality and injury assessment for three species of fish exposed to simulated turbine blade strike. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* (doi:10.1139/cjfas-2018-0386)
21. Pauwels IS, Baeyens R, Toming G, Schneider M, Buysse D, Coeck J, Tuhtan JA. 2020 Multi-Species Assessment of Injury, Mortality, and Physical Conditions during Downstream Passage through a Large Archimedes Hydrodynamic Screw (Albert Canal, Belgium). *Sustainability* **12**, 8722. (doi:10.3390/su12208722)
22. Abernathy CS, Amidan BG, Cada GF. 2003 Fish passage through a simulated horizontal bulb turbine pressure regime: A supplement to ‘Laboratory Studies of the Effects of Pressure and Dissolved Gas Supersaturation on Turbine-Passed Fish’. (doi:10.2172/1218146)
23. Colotelo AH, Pflugrath BD, Brown RS, Brauner CJ, Mueller RP, Carlson TJ, Deng ZD, Ahmann ML, Trumbo BA. 2012 The effect of rapid and sustained decompression on barotrauma in juvenile brook lamprey and Pacific lamprey: Implications for passage at hydroelectric facilities. *Fish. Res.* **129–130**, 17–20. (doi:10.1016/j.fishres.2012.06.001)
24. Odeh M. 1999 A summary of environmentally friendly turbine design concepts. *US Dep. Energy Ida. Oper. Off.*
25. Carlson TJ *et al.* 2012 The Influence of Tag Presence on the Mortality of Juvenile Chinook Salmon Exposed to Simulated Hydroturbine Passage: Implications for Survival Estimates and Management of Hydroelectric Facilities. *North Am. J. Fish. Manag.* **32**, 249–261. (doi:10.1080/02755947.2012.661384)
26. Brown RS, Walker RW, Stephenson JR. 2015 A Preliminary Assessment of Barotrauma Injuries and Acclimation Studies for Three Fish Species. (doi:10.2172/1237809)

27. Pflugrath BD, Boys CA, Cathers B, Deng ZD. 2019 Over or under? Autonomous sensor fish reveals why overshoot weirs may be safer than undershot weirs for fish passage. *Ecol. Eng.* **132**, 41–48. (doi:10.1016/j.ecoleng.2019.03.010)
28. Tuhtan JA, Toming G. 2019 Assessment of Fish Injury and Mortality Risk during Downstream Passage at the Rafoss Waterfall, Kvinesdal, Norway.
29. 2005 Fischschutz-und Fischabstiegsanlagen–Bemessung, Gestaltung, Funktionskontrolle, 2. korrigierte Auflage, Juli 2005, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. *DWA Verl. Hennef*
30. Schwevers U. 1998 *Die Biologie der Fischabwanderung*. Verlag Natur & Wiss.
31. Schletterer M, Reindl R, Thonhauser S. 2016 Options for re-establishing river continuity, with an emphasis on the special solution “fish lift”: examples from Austria. *Rev. Eletrônica Gest. E Technol. Ambient.* **4**, 109–128. (doi:10.9771/gesta.v4i1.16954)
32. Angerer, Thomas. 2017 Veterinärmedizinisches Gutachten zur Passage von Fischen am Fischlift Runserau. , 17.
33. Schletterer, Martin, Tuhtan, Jeffrey Andrew, Fuentes-Pérez, Juan Francisco, Kruusmaa, Maarja. 2017 More than depth: developing pressure sensing systems for aquatic environments. Madrid, Spain: International Association for Hydro-Environment Engineering and Research.
34. Ruggles C, Murray D. 1983 A review of fish response to spillways.
35. Bell MC, DeLacy AC. 1972 A compendium on the survival of fish passing through spillways and conduits.