Untersuchungen von Druckverhältnissen in Kaplanturbinen und Barotraumaschäden bei Fischlarven und Jungfische mittels Barotraumakammer

Arbeitspaket 4, Projekt
„Flussabwärts gerichtete Fischwanderung an mittelgroßen Fließgewässern in Österreich. Populationsbiologische Grundlagen und Implikationen für den Fischschutz und Fischabstieg“

Andreas Zitek, EcoScience

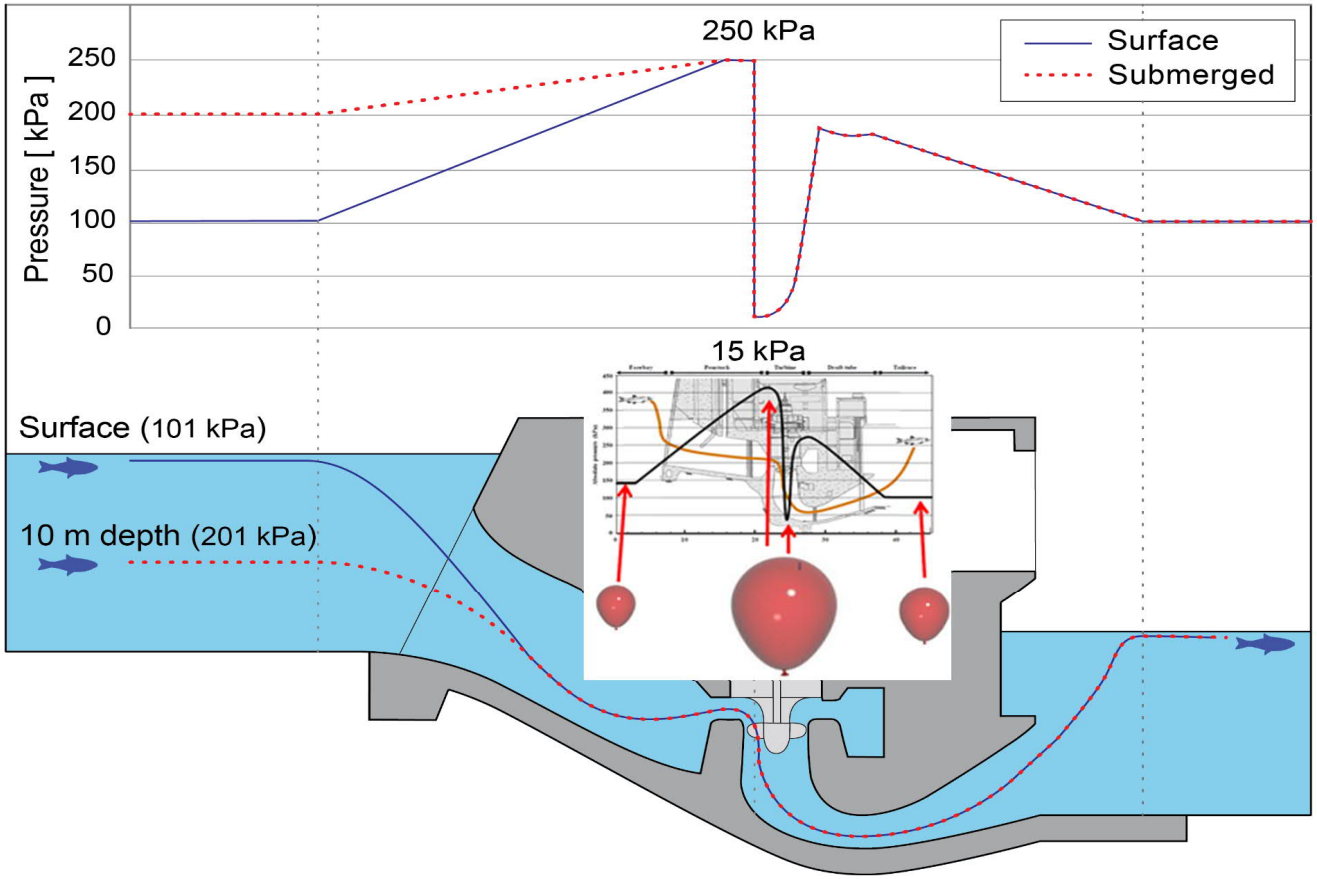
Augsburg, 26. Februar 2025

Im Auftrag von:

Gefördert durch:

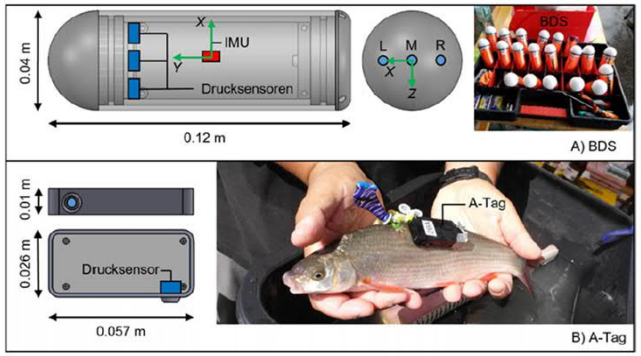
FFG Forschungsgesellschaft (Projektnummer: 867778)

Turbinenpassage von Fischen und Barotrauma



Boyle'sches Gesetz

- Bei konstanter Temperatur ist das Volumen eines Gases umgekehrt proportional dem Druck.
  - **Druck*V = Druck1*V1**
    - **V1=(Druck*V)/Druck1**
    - **101*1=15*V1**
    - **V1=101/15=6,7 fache Ausdehnung**
- Entscheidend für die Schädigung ist das **Verhältnis zwischen Ausgangsdruck und Nadir.**



Realmessungen von Druckverläufen mit Barotrauma Detection System (BDS)

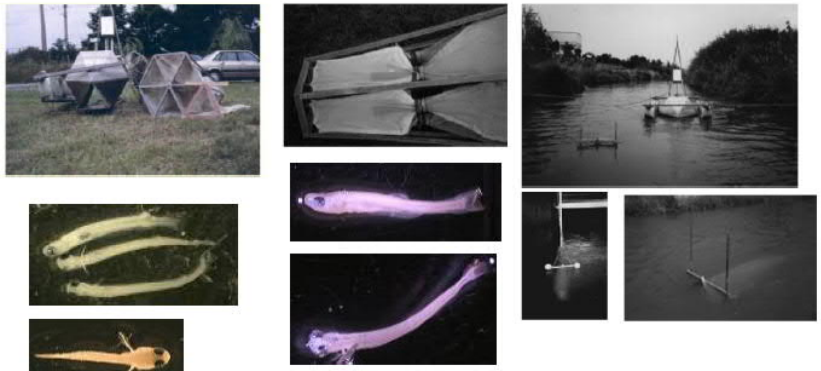
Zielsetzung: Systematische Feststellung von Barotraumaschäden bei Larven & Jungfischen

Driftende Larven- und Jungfische (Zitek et al., 2007)

1. Obligatorisch: 15 Arten wie Brachse, Güster, Laube, Schied, Barbe, Giebel, Nase, versch. Gründlingsarten, Aitel, Nerfling, Hasel, Bitterling, Rotauge, Zander, Rotfeder; zusätzlich Äsche (Bardonnet & Gaudin, P. 1990; Van Leeuwen et al. (2017))
2. Fakultativ – manchmal durchaus häufig: Arten wie Schmerle, Sonnenbarsch, Schwarzmundgrundel, Flussbarsch, Elritze, Marmorgundel, Blaubandbärbling, Karpfen, Dreistacheliger Stichling, Moderlieschen, Kessler-Gründling, Sichling, Schleie, Streber, Zingel
3. Zufällig: Arten wie Zope, Zobel, Karausche, Steinbeißer, Koppe, Donaukaulbarsch, Schrätzer, Wolgazander, Wels, Rußnase
4. Flussabwanderungen 0+ Fische im Herbst (siehe Wiesner et al. 2004 bzw. Flussabwärtstreiben „riesiger Mengen“ von Fischen im Herbst)

- Umfangreiche Driftuntersuchungen am Marchfeldkanal

Zitek, A., Schmutz, S., Unfer, G. & Ploner, A. (2004) Fish drift in a Danube/sidearm-system: I. Site-, species-, and stage-specific drift. *Journal of Fish Biology*, **65**, 1319-1338.
Zitek, A., Schmutz, S. & Ploner, A. (2004) Fish drift in a Danube/sidearm-system: II. Seasonal and diurnal patterns. *Journal of Fish Biology*, **65**, 1339-1357.

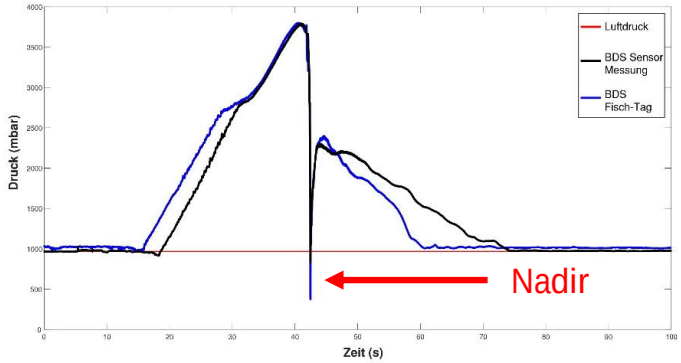


Länge= 6-13 mm

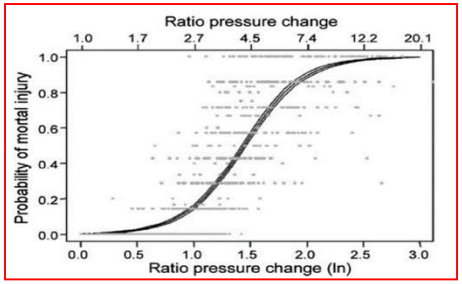
Herbst/Winterdrift, Juvenile, 20. Oktober – 29. Jänner 2000 (Wiesner et al., 2004)

Methodik - Stadien & Umsetzung

- Äsche (L1/L2, 0+), Nase (L1, 0+), Rotauge (L6/J1 und 0+), Flussbarsch (L1, L4, L6/J1 und 0+)
- Anlieferung und 24-48 h Akklimatisation vor Ort
- Feststellung Betäubungsmittelkonzentration
- Vorversuche, um mögliche Auswirkung der Betäubung festzustellen (n=70, Nadir 50 und Nadir 15, Kontrolle), 24 h Nachbeobachtung
- Hauptversuche (3 * 10 Fische + Kontrolle) Spektrum von Druckverläufen (Nadire 60, 40, 30, 15, Kontrolle) zur Erstellung von Dosis-Wirkungskurven, 24 h Nachbeobachtung
- Akklimatisation auf Ausgangsdruck (nur für Juvenile) von 15 m (252 kPa) für 18-24 h – und dann mit Nadir (15-40) oder Entlastung auf Atmosphäre (n=70) um Effekte durch Gasübersättigung auszuschließen
- Durchführung 2020-21 in Graz
  - Monitoring Wasserqualität alle 4 h (Messungen von Temperatur, pH, Leitfähigkeit Sauerstoff, Ammonium, Nitrat, Nitrit
- Umlegung auf Turbinenbedingungen



$$P(X) = \frac{e^{b0+b1*\left(LN\left(\frac{DruckAkkl}{DruckNadir}\right)\right)}}{1+e^{b0+b1*\left(LN\left(\frac{DruckAkkl}{DruckNadir}\right)\right)}}$$



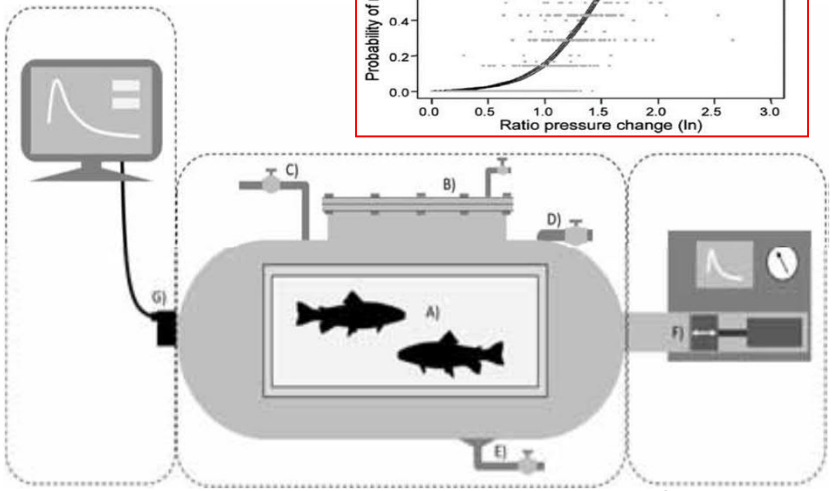
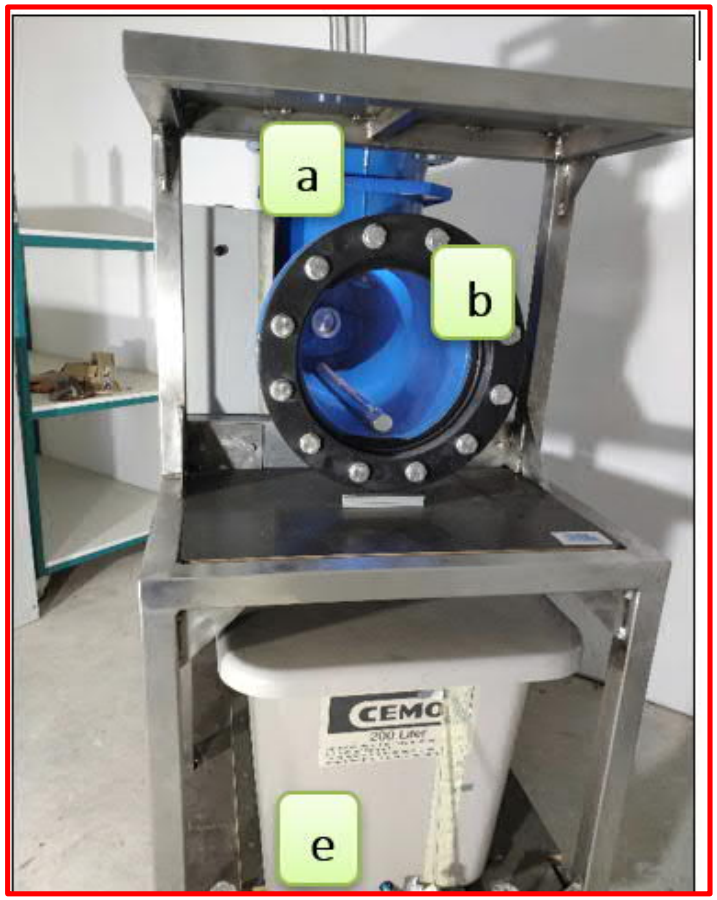


Abbildung: I AM HYDRO

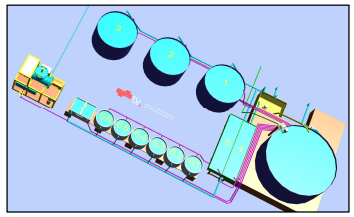
Barotraumakammer TU Graz



a. Kammer (70 l)
b. Schauglas mit Zuleitung (unten) und Kolben (hinten)
c. Deckel
d. Steigrohr mit Dosierventil
e. Versorgungsbehälter (dotiert mit ca. 75-80 l)
f. Zuleitung
g. Linearantrieb
h. Druck- und Temperarturfühler
i. Schaltkästen
j. Anschluss Strom und Hauptschalter
k. Sauerstoffsonde
l. Entnahme aus Versorgungsbehälter und Ablauf

Barotrauma-Anlage an der TU Graz & Versuchsablauf

- Barotraumakammer, Wasser aus Hauptbecken
- Versuch
- Aufwachen in Becken mit 5 mg/l Tricaine
- Nachbeobachtung Larven Vor- und Hauptversuche zumeist in Langstrombecken, vereinzelt in großem Rundbecken (24 h)
- Nachbeobachtung Vorversuche und Akklimatisationsversuche 0+ in weißen Rundbecken (24 h)



Betäubungsversuche, Tricaine (MS222)

Gepuffert mit 1:2 Natriumhydrogencarbonat

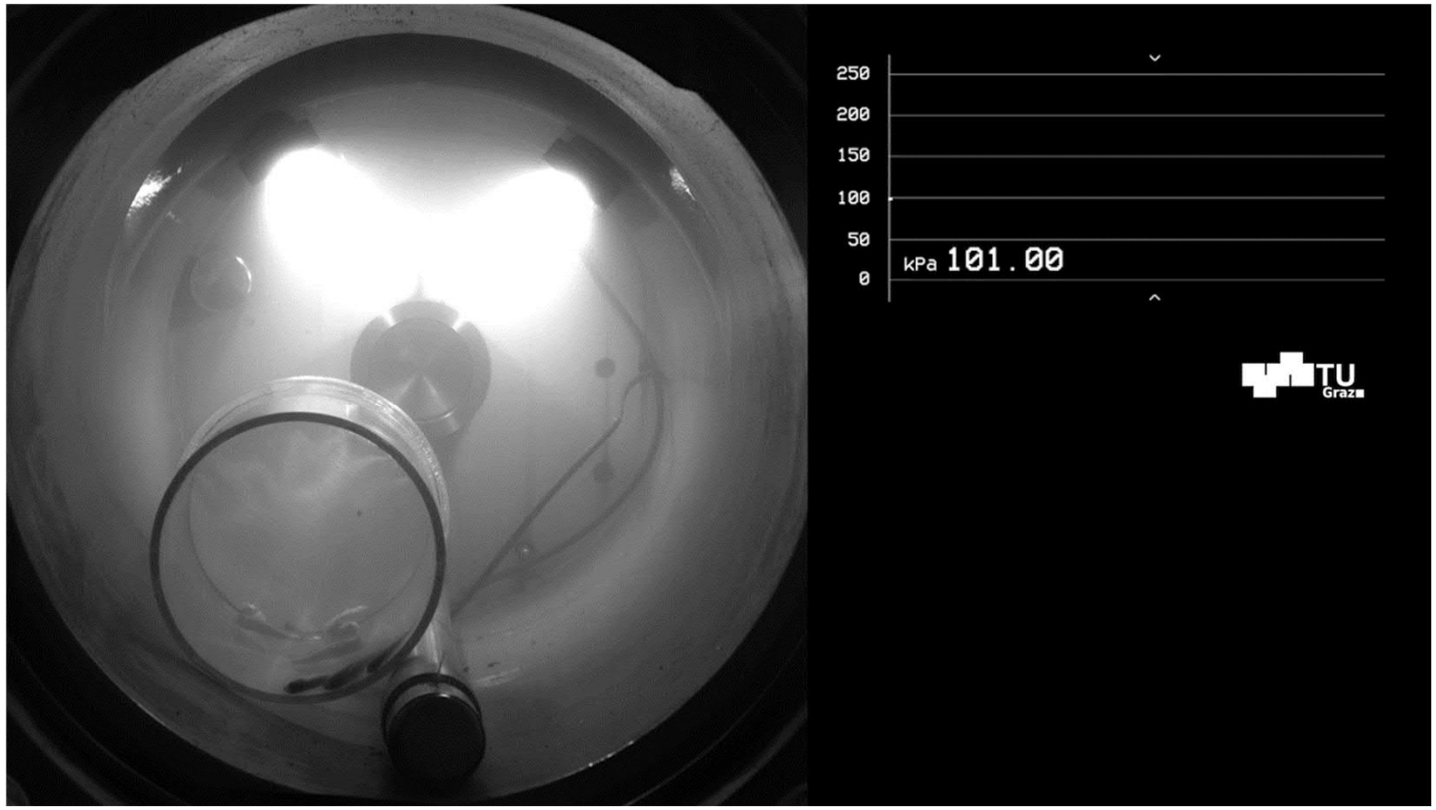
- Ziel
  - nach 3 Minuten alle Fische betäubt und reaktionslos
  - Betäubungsdauer 8 Minuten
  - Aufwachen nach 10 Minuten
  - 24h Beobachtung alle lebendig
- 3 WH mit je 5 Fischen
- Ursprünglich von Schritten 50-100-150 ausgegangen!
- Zum Beispiel getestet bei Flussbarsch L4:
  - 50 mg/l
  - 25 mg/l
  - 35-40 mg/l
  - 35 mg/l
  - 30 mg/l

Phase III Stufe 2 (tiefe Anästhesie für chirurgische Eingriffe, keine Reak auf Schmerz, flache regelmä Kiemenbewegung)

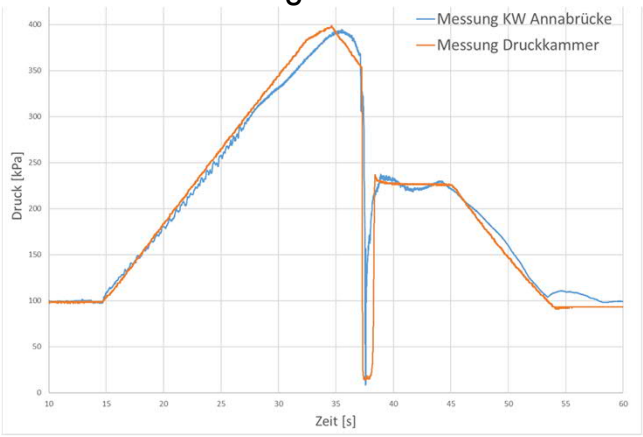
Keine Auswirkung der Betäubung

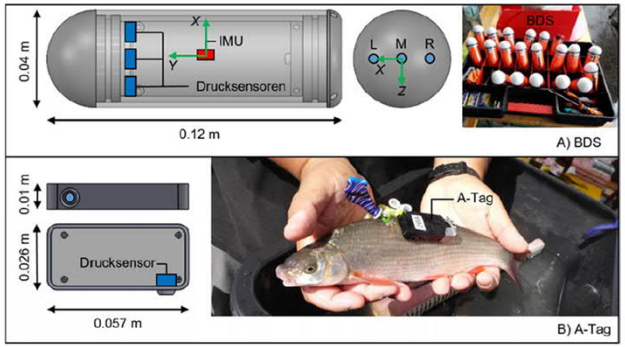
Art	Stadium	Durchg	Anmerkungen
Äsche	L1		Keine Auffälligkeiten
	0+		Keine Auffälligkeiten
Nase	L1		Keine Auffälligkeiten
		mg/L	Sehr unterschiedliche Betäubungstiefe, abhängig von der etwas unterschiedlichen Größe der Jungfische
	L2	Ja, 5 mg/L	Fische immer noch beweglich, bei 30 bzw. 20 mg/L jedoch nach 11 Minuten (3+8 Minuten) alle tot
	L4	Ja, 30 mg/L	Keine Auffälligkeiten
	L6/J1	Ja, 40 mg/L	Keine Auffälligkeiten
	0+	Ja, 90 mg/L	Keine Auffälligkeiten
Rotauge	L1	Nein	Keine Fische verfügbar
	L3	Nein	Keine Fische verfügbar
	L6/J1	Ja, 50 mg/L	Keine Auffälligkeiten
	J2	Nein	Keine Fische verfügbar
	0+	Ja, 65 mg/L	Keine Auffälligkeiten

Applikation Druckverlauf



Messung vs. Simulation





Barotrauma Detection System (BDS)

Einstufung und Schadenskategorien Larven und Jungfische

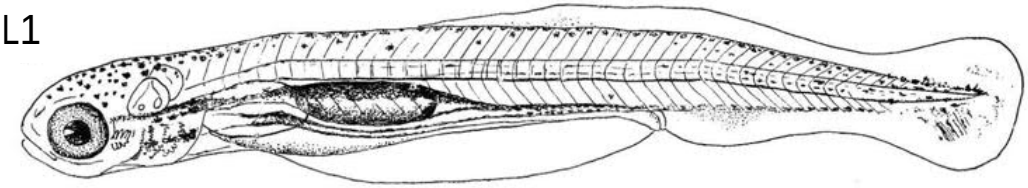
Einstufung und Bewertung	Kategorie bzw. Schadensbild
Grundeinstufung Larven und Jungfische direkt nach dem Versuch und nach 24 h	• Tot • Auffällig • Lebend
Schadensbewertung Larven (tot, bzw. auffällig nach der Euthanasie) direkt unter dem Binokular mit Licht bzw. Fotoapparat	• Entleerte Schwimmblase (stark, teilweise) • Geplatzte Schwimmblase (bei Cypriniden immer in Bezug zum vorderen bzw. hinteren Teil der zweikammrigen Schwimmblase) • Innere Emphyseme (Bläschen) • Innere Blutungen
Schadensbewertung Jungfische (tot, bzw. auffällig nach der Euthanasie) unter Lichtmikroskop mit Dissektion	• Entleerte Schwimmblase (stark, teilweise) • geplatzte Schwimmblase (bei Cypriniden immer in Bezug zum vorderen bzw. hinteren Teil der zweikammrigen Schwimmblase) • Emphyseme (Bläschen) im Auge, in Flossen, Kiemendeckel, Gewebe, in Blutgefäßen oder Blasen im Bauchinnenraum • Blutungen in Flossen, Augen, Kiemendeckel, Herz, Muskel, Innenraum-Eingeweide, im Bereich der Schwimmblase • Bauchdeckenriss als Muskelriss von außen zu erkennen • Bauchfellriss bei der Nase, erkennbar nach dem Aufschneiden • Herausgetretene Augen

Schlussendlich Berechnung jener Faktoren, die statistisch gesehen signifikant zum Tod führen – und Anwendung auf jene Fische, die nach 24 h noch gelebt haben („tödlich verletzt“, McKinstry et al. 2007).

Hauptversuche Nase L1 – N15, hintere Schwimmblase befüllt

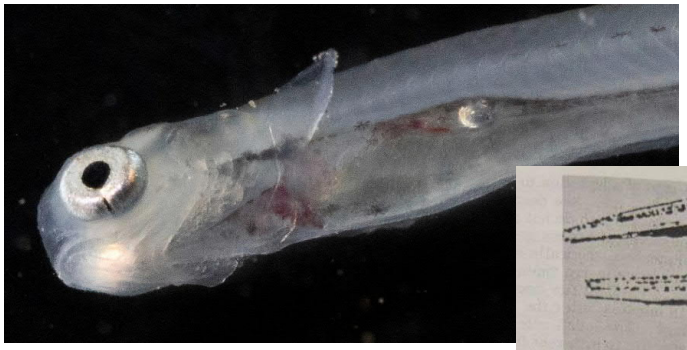
85 % tödlich Verletzte beim Hauptversuch bei Nadir 15

L1



Penáz, 1974

Schäden Nase L1



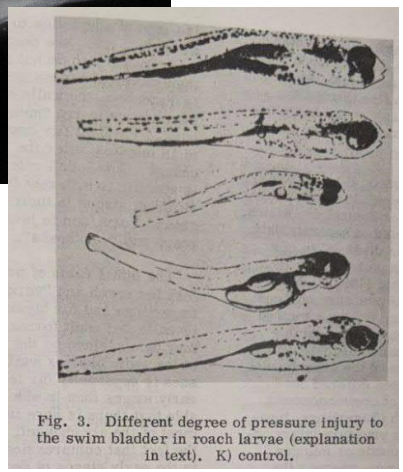
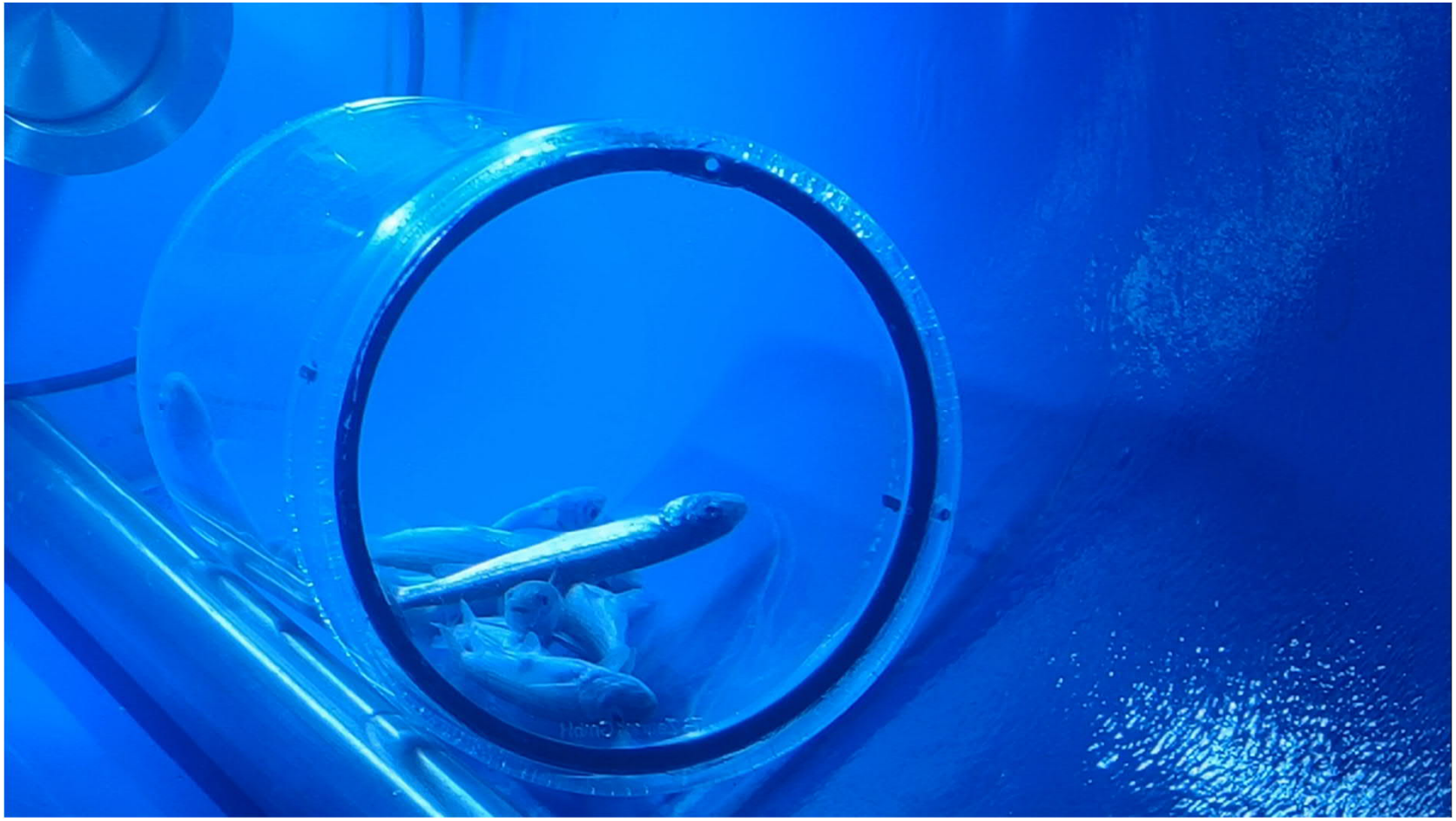


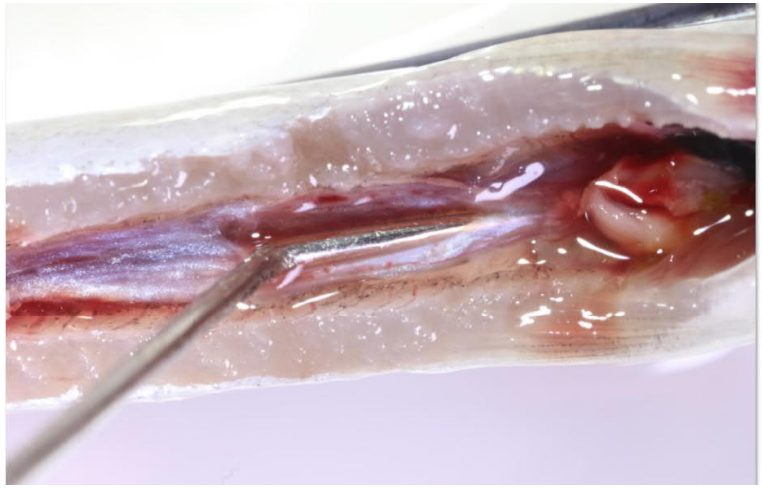
Fig. 3. Different degree of pressure injury to the swim bladder in roach larvae (explanation in text). K) control.

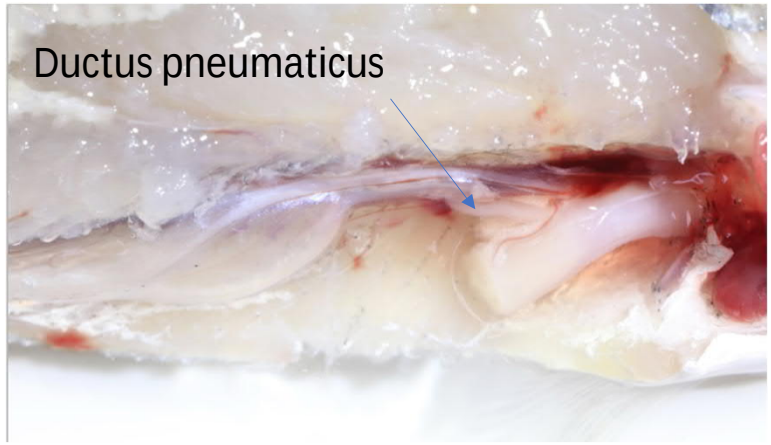
Tsvetkov, et al. 1972

Äsche 0+, Nadir 15,17 % tödlich Verletzte (Zeitlupe)

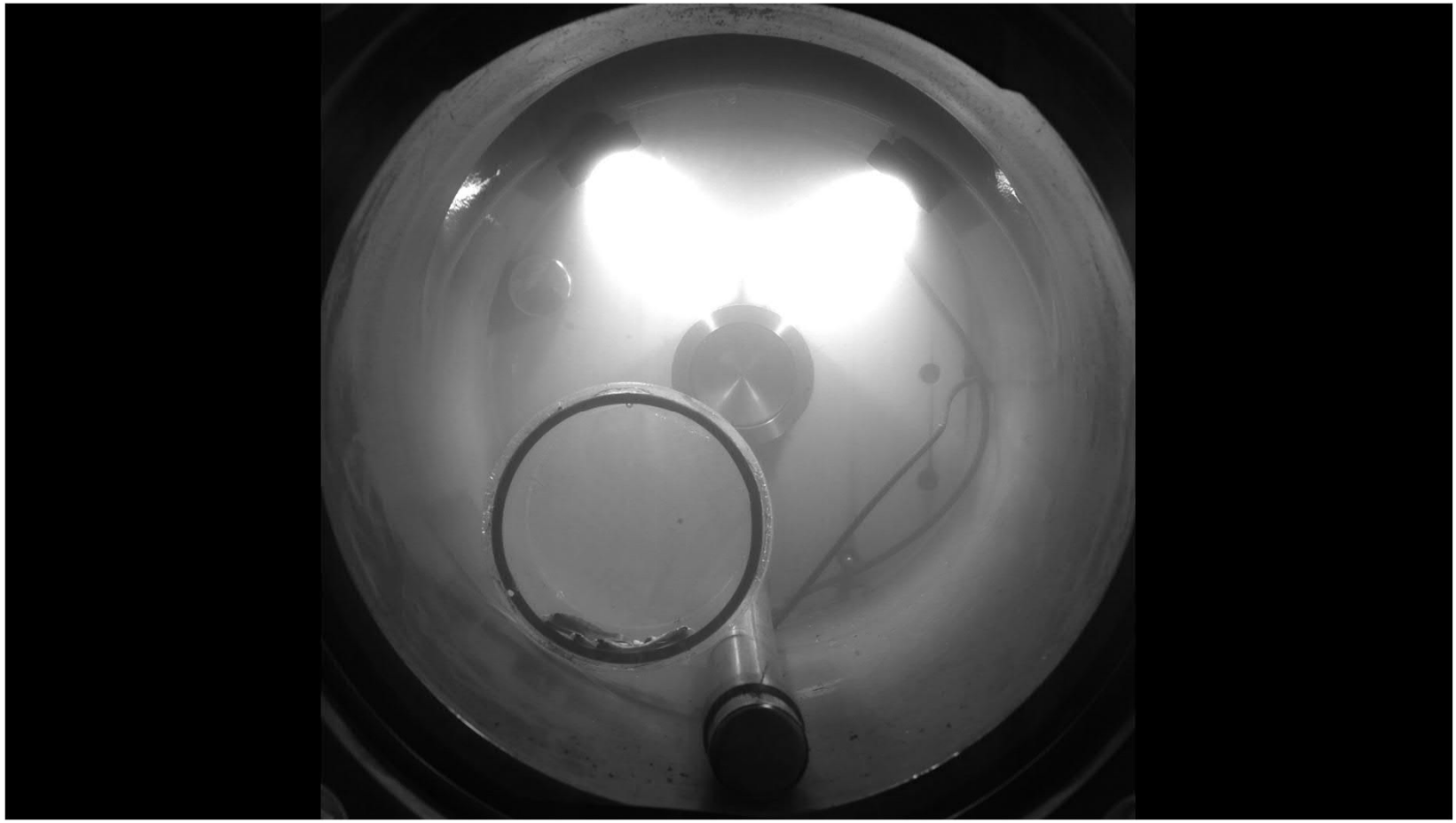


Beispiel Schäden – Äsche 0+





Flussbarsch 0+, Nadir 15, 97 % tödlich Verletzte (ZL)



Beispiel Schäden – Flussbarsch 0+

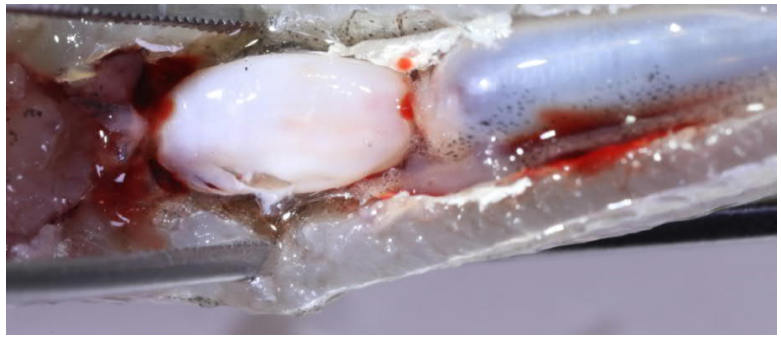
Geplatzte und eingeblutete Schwimmblase

Herzblutung und Luft in Gefäßen

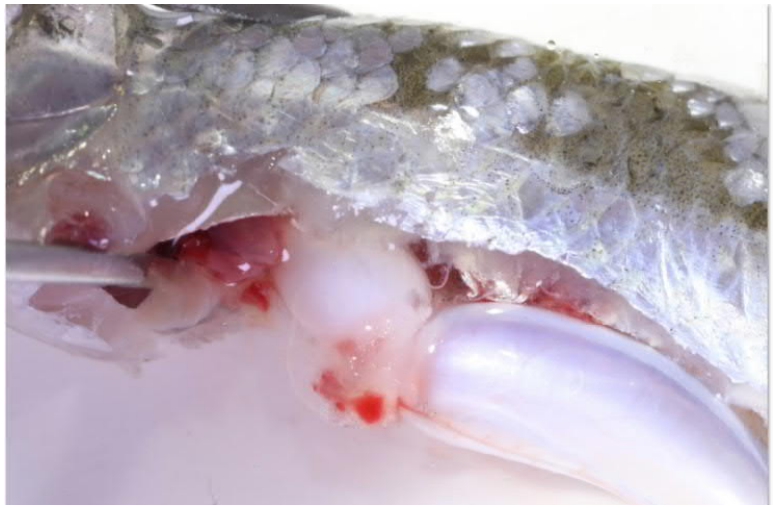
L=39,83 ± 4,54 mm

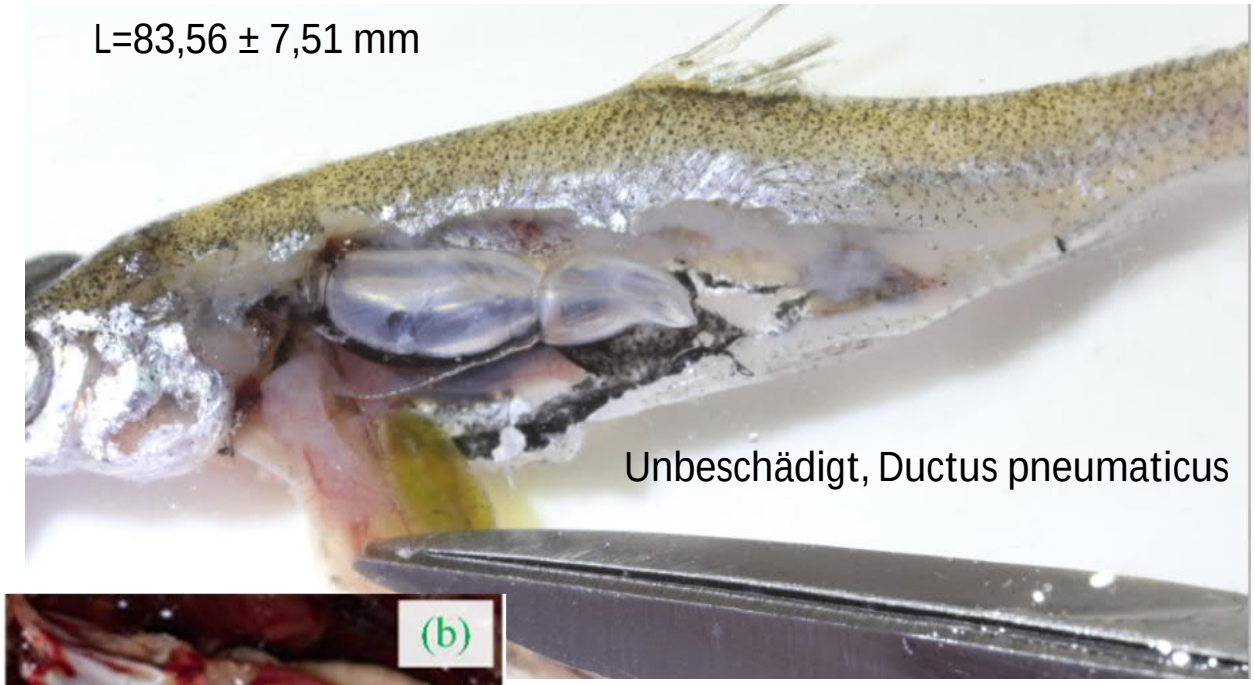
Rotauge 0+, Nadir 15, 77 % tödlich Verletzte (ZL)

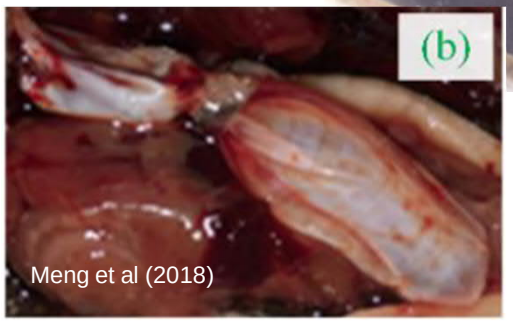
Beispiel Schäden – Rotauge 0+



Geplatzte vordere Schwimmblase



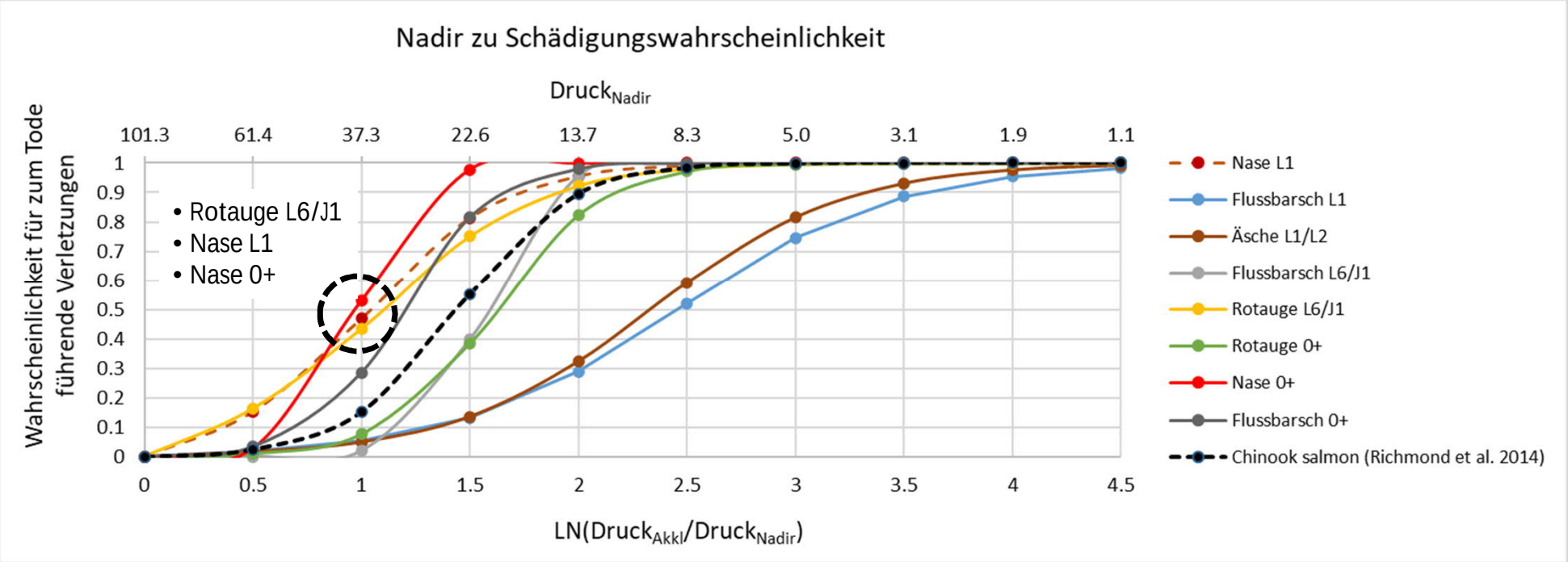




Meng et al (2018)

Ergebnisse der Barotrauma-Hauptversuche

Logistische Funktion der Schädigungswahrscheinlichkeiten aller untersuchten Fischarten und Stadien bei unterschiedlichen Nadir-Drücken (Akklimatisation auf Atmosphärendruck) bzw. bei unterschiedlichen LN(A/N) Werten im Vergleich zu den Werten des Chinook salmon. Keine Funktion für 0+ Äschen.



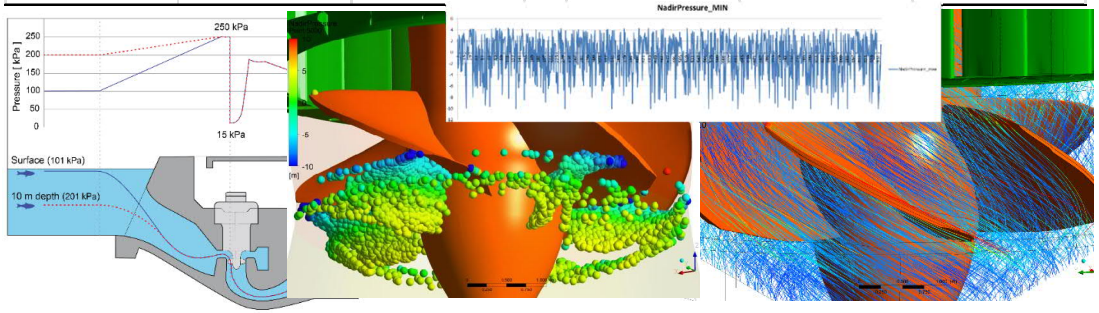
Umlegung auf Turbinen - Nadirverteilungen einzelner Partikel in einer Turbine (CFD)

- Partikelsimulationen geben einen Überblick über die statistische Verteilung von Drücken in einer Turbine (n=5000)
- Mittels der logistischen Funktion kann eine Schädigungswahrscheinlichkeit je LN($Druck_{Akkl}$/$Druck_{Nadir}$) errechnet werden
- Danach wird die Wahrscheinlichkeit mit der prozentuellen Häufigkeit des Druckes multipliziert
- Danach aufsummieren der Produktwerte = gesamter Prozentsatz geschädigter Fische

% Drücke unter 60 kPa

Daten weiterverwendet

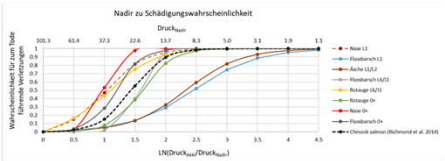
Mur-KW			Drau-KW		
Nadir	Volllast	Teillast	Nadir	Volllast	Teillast
[kPa]	[%]	[%]	[kPa]	[%]	[%]
101	98,92	88,03	101	49,72	8,62
80	74,23	36,03	80	31,94	5,36
60	32,61	5,64	60	18,55	2,69
50	16,78	1,49	50	12,72	1,44
40	6,54	1,23	40	8,01	0,49
30	2,51	0,93	30	4,37	0,04
15	1,02	0,84	15	1,17	0,02

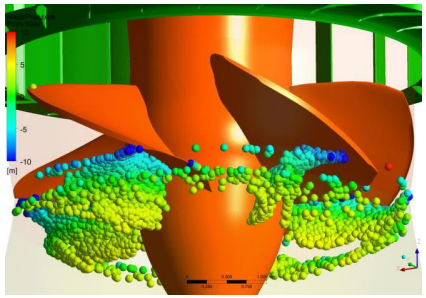


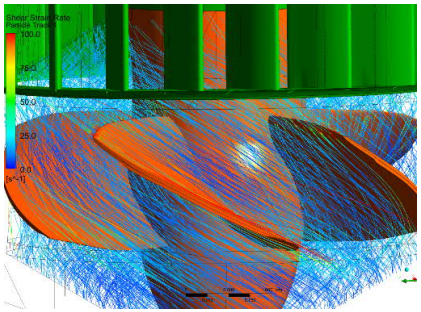
Benigni et al. (2022)

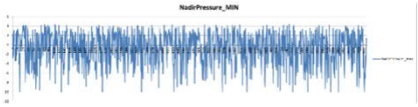
Umlegung auf Turbinen – finale Ergebnisse

Kraftwerksstandort		Drau-KW		Mur-KW	
Art/Stadium	Logistische Regression - Excel Formel	% M VL	% M TL	% M VL	% M TL
Äsche L1	Keine Ausfälle	0	0	0	0
Nase L1	P(X)=EXP(-3,319+3,194*LN($Druck_{Akkl}$/$Druck_{Nadir}$)/(1+EXP(-3,319+3,194* LN($Druck_{Akkl}$/$Druck_{Nadir}$))	8,2	0,80	10,7	2,0
Flussbarsch L1	P(X)=EXP(-4,848+1,974*LN($Druck_{Akkl}$/$Druck_{Nadir}$)/(1+EXP(-4,848+1,974* LN($Druck_{Akkl}$/$Druck_{Nadir}$))	1,4	0,10	1,9	0,9
Flussbarsch L6/J1	P(X)=EXP(-10,909+6,998*LN($Druck_{Akkl}$/$Druck_{Nadir}$)/(1+EXP(-10,909+6,998* LN($Druck_{Akkl}$/$Druck_{Nadir}$))	2,4	0.04	1,9	0,9
Rotauge L6/J1	P(X)=EXP(-3,003+2,737*LN($Druck_{Akkl}$/$Druck_{Nadir}$)/(1+EXP(-3,003+2,737* LN($Druck_{Akkl}$/$Druck_{Nadir}$))	7,8	0,78	10,5	2,0
Rotauge 0+	P(X)=EXP(-6,492+4,017*LN($Druck_{Akkl}$/$Druck_{Nadir}$)/(1+EXP(-6,492+4,017* LN($Druck_{Akkl}$/$Druck_{Nadir}$))	2,8	0,12	2,6	1,0
Nase 0+	P(X)=EXP(-7,257+7,377*LN($Druck_{Akkl}$/$Druck_{Nadir}$)/(1+EXP(-7,257+7,377* LN($Druck_{Akkl}$/$Druck_{Nadir}$))	8,0	0,56	8,1	1,4
Äsche 0+	P(X)=EXP(-5,182+2,222*LN($Druck_{Akkl}$/$Druck_{Nadir}$)/(1+EXP(-5,182+2,222* LN($Druck_{Akkl}$/$Druck_{Nadir}$))	1,4	0,09	1,9	0,9
Flussbarsch 0+	P(X)=EXP(-5,720+4,806*LN($Druck_{Akkl}$/$Druck_{Nadir}$)/(1+EXP(-5,720+4,806* LN($Druck_{Akkl}$/$Druck_{Nadir}$))	5,9	0,36	5,9	1,3

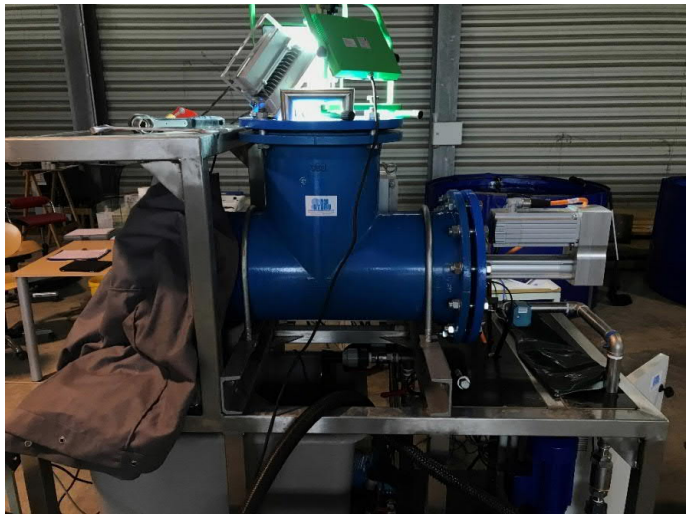




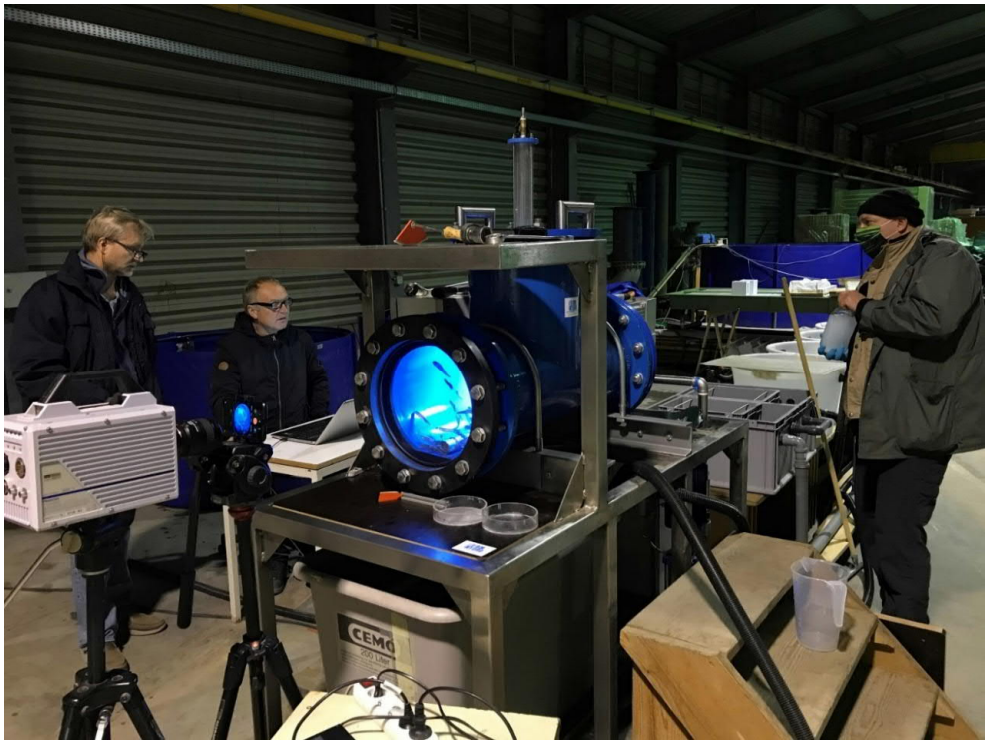




Akklimatisationsversuche, Herbst 2020



Auf 15 m Tiefe, 252 kPa
18-24 h Akklimatisation
Für Physostoma wurde eine Luftblase oben belassen



Ergebnisse Akklimatisation (geplatzte Schwimmblasen, auch bei Äsche)

Art	Akkl. Druck (kPa)	Akkl. Dauer	Nadir (kPa)	P (A/N)	LN P(A/N)	% Schädigung berechnet	% Schädigung festgestellt
Rotauge 0+	251	24	44	5,7	1,7	62,3	79,0
Rotauge 0+	251	24	101,3	2,5	0,9	5,5	0,0
Nase 0+	251	18	29	8,7	2,2	100,0	100,0
Nase 0+	251	18	101,3	2,5	0,9	36,3	9,0
Flussbarsch 0+	251	18	15	16,7	2,8	100,0	100,0
Flussbarsch 0+	251	18	101,3	2,5	0,9	20,4	0,0
Äsche 0+ (betäubt)	251	24	44	5,7	1,7	21,2	90,0
Äsche 0+ (unbetäubt)	251	24	42	6,0	1,8	23,0	94,0
Äsche 0+	251	24	101,3	2,5	0,9	4,0	47,0

Diskussion I -Studienergebnisse

- Larvenschädigungen abhängig von Stadium/Entwicklung der Schwimmblase
  - Keine Schäden bei Äsche L1, wenige Schäden bei Flussbarsch L1
  - Deutliche Schädigungen bei Flussbarsch L6/J1 ab Nadir 15
  - Deutliche Schädigungen bei L6/J1 Rotaugen ab Nadir 30
  - Deutliche Schäden bei Nase L1 ab Nadir 40
- Juvenilschädigungen
  - Geringste Schäden bei Äsche (Physostom)
  - Nase 0+ sprunghafter Totalausfall ab Nadir 30
  - Flussbarsch 0+ Schäden ab Nadir 40, langsam zunehmend
  - Rotauge 0+ Schäden ab Nadir 40, etwas stärker zunehmend
- Akklimatisation
  - erwartbare Schädigungsraten bei Flussbarsch, Nase und Rotauge
  - 0+ Äschen zeigen bei Akklimatisation auf eine Tiefe von 15 m und Entlastung auf Atmosphärendruck deutliche Schädigungen (47 %) ohne direkten Ausfall, jedoch mit hohem Prozentsatz an geplatzten Schwimmblasen
- Tiefenakklimatisierung und Barotrauma bei Adultfischen weitgehend unbekannt.

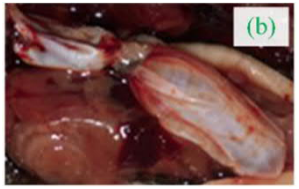
Diskussion II Gefährdungseinschätzung - Barotrauma

66 ursprünglich heimische Fischarten in Österreich

- 48,5 % (n=32) Cypriniden als Physostoma mit geteilter Schwimmblase – gefährdet bis sehr gefährdet (63 % in einer Gefährdungskategorie nach Spindler (1997)) -> bisher unterschätzt
- 12 % (n=8) Barschartige als Physoclisten – gefährdet bis sehr gefährdet
- 7,6 % (n=5) Salmoniden inklusive der Äsche als Physostoma mit einer einkammrigen Schwimmblase - gefährdet bei Tiefenakklimatisation
- Andere Arten – es fehlen Informationen

- Fischart (einfache – z.B. Hecht, Forelle, Wels und geteilte Schwimmblase wie Cypriniden)
  - Offene Schwimmblase (Physostoma, z. B. Hecht, Nase, Forelle, Äsche, Wels)

2-geteilte Schwimmblase



Meng et al (2018)

  - Geschlossene Schwimmblase (Physoclisti, z. B Flussbarsch, Zander, Aalrutte)

  - Keine Schwimmblase (Koppe)