

Fachgebiet Hydromechanik
der Technischen Universität München

GERÄUSCHARME FISCHAUFSTIEGSGERINNE -
EXPERIMENTELLE UND NUMERISCHE ANALYSE DES
FISCHPASSES VOM TYP *PERIODISCHE SCHÜTZE*

Matthias A. Haselbauer

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen
der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Erwin Zehe
Prüfer der Dissertation:	1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Manhart
	2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Franz Valentin, i.R.
	3. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Rutschmann

Die Dissertation wurde am 24.04.2008 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen am 11.07.2008 angenommen.

Für Paola und meine Eltern

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	i
Abbildungsverzeichnis	iv
Tabellenverzeichnis	x
Kurzzusammenfassung	xv
Abstract	xvi
Danksagung	xvii
Einleitung	1
1 Einführung in die Physiologie der Fische	5
1.1 Acustico-lateralis System	6
1.1.1 Das Seitenliniensystem	8
1.1.2 Schallwahrnehmung	10
1.2 Schwimmvermögen	15
1.2.1 Muskulatur	16
1.2.2 Geschwindigkeiten	16
1.3 Zusammenfassung	21
2 Übersicht über Fischaufstiegsanlagen	23
2.1 Typen von Fischaufstiegsanlagen	24
2.1.1 Beckenpass	24
2.1.2 Schlitzpässe	27
2.1.3 Denil-Pässe	30
2.1.4 Fischschleusen	32
2.1.5 Fischaufzüge	33
2.1.6 Transport per LKW	34
2.2 Motivation und Aufgabenstellung	35

3	Fischpass Typ <i>periodische Schütze</i>	39
3.1	Einführung	39
3.2	Ableitung des hydraulischen Verlustes	42
3.2.1	Verluste bei der Unterströmung von Schützen	43
3.2.2	Bereichsweiser Vergleich mit den Ergebnissen der Strahlhydraulik	46
3.2.2.1	Bereich I: Strahlkontraktion und angelegter Wandstrahl	48
3.2.2.2	Bereiche II und III: Strahlumlenkung und angelegter Wandstrahl	50
3.2.2.3	Bereiche IV und V: Rückspringende Stufe und Einfluss der freien Oberfläche	53
3.2.2.4	Bereiche VI und VII: Strahl senkrecht auf eine Wand in der Nähe einer freien Oberfläche und Zuströmung zur Schützöffnung	56
3.2.2.5	Bereiche VII, IX und X: Strahlumlenkung zur Schützöffnung und Rezirkulationszonen	57
3.2.3	Zusammenfassung	57
4	Laborversuche	59
4.1	Ähnlichkeitsbeziehungen zwischen Versuch und Praxis	59
4.2	Biologische Akzeptanzversuche	62
4.2.1	Versuchsaufbau	62
4.2.2	Versuchsergebnisse mit Lambari (<i>Astynax bimaculatus</i>)	67
4.2.3	Versuchsergebnisse mit Piau (<i>Leporinus reinhardtii</i>)	70
4.2.4	Versuchsergebnisse mit Mandi-Amarelo (<i>Pimelodus maculatus</i>)	71
4.2.5	Skalierung	72
4.2.6	Zusammenfassung	72
4.3	Laborversuch am Fachgebiet Hydromechanik	74
4.3.1	Konfiguration des Laborversuch	74
4.3.2	Energiehöhenverluste in den Becken	77
4.3.3	Kontraktionsbeiwerte unter den Schützen	81
4.3.4	Wasserspiegelschwankungen	84
4.3.5	Zusammenfassung	86
5	Simulation	88
5.1	Einführung	89
5.1.1	Der Strömungslöser <i>Flow3D</i>	89
5.1.2	Berechnungsnetz	90
5.1.3	Randbedingungen	90
5.2	Parameterstudie mit RANS	92
5.2.1	Allgemeines	93
5.2.2	Konfiguration der Simulation und Vorgehen	95
5.2.3	Energieverlust im Becken - Stufenhöhe c	97
5.2.4	Fließtiefe y im Becken	101

5.2.5	Höhe b der Prallwand	106
5.2.6	Position f der Prallwand	108
5.2.7	Länge e des Beckens	110
5.2.8	Abhängigkeit von der Reynoldszahl Re	113
5.2.9	Zusammenfassung der RANS-Parameterstudie	115
5.3	LES-Simulation	116
5.3.1	Allgemeines	116
5.3.2	Konfiguration der Simulation und Vorgehen	118
5.3.3	Analyse des mittleren Strömungsfeldes	119
5.3.4	Analyse der turbulenten Größen	123
5.3.5	Analyse von kohärenten Strukturen	134
5.4	Bewertung der Simulationen	139
6	Aspekte für die Anwendung	140
6.1	Geometrievariation	141
6.2	Dimensionierungsvorschrift für die Anlage	147
7	Zusammenfassung der Arbeit	153
	Literaturverzeichnis	155
	Anhang	160
	Anhang A - Konvergenzanalyse der Messungen zur Bestimmung des Abbruchzeitpunktes	160
	Anhang B - Abschätzung des Verlustes einer Strahlumlenkung mit Hilfe der Rohrhydraulik	162
	Anhang C - Ergebnisse der Labormessungen	165
	Anhang D - Ergebnisse der RANS - Parameterstudie	170

Abbildungsverzeichnis

1.1	Begriffserläuterung von Fernfeld und Nahfeld einer Schallquelle	6
1.2	Vibrationsrezeptoren	7
1.3	Seitenliniensystem	9
1.4	Gehörknöchelchen bei Ostariophysen	10
1.5	Audiogramme von verschiedenen Fischarten zur Verdeutlichung der Variation der Gehörempfindlichkeit.	11
1.6	Antworten des Gehörorgans einer Sprotte.	12
1.7	Elektronenmikroskopaufnahme eines Feldes von Haarzellen im Langenepithelium eines Zebrafisches (<i>Brachydanio rerio</i>).	13
1.8	Richtungssensitivität der Schallwahrnehmung von Fischen.	14
1.9	Elektromyogramm eines Karpfens bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten in einem Kanal.	17
1.10	Schwimtleistung von Fischen, aus [5]	18
1.11	Maximale Geschwindigkeiten und Ausdauer von Salmoniden in Abhängigkeit der Temperatur und der Fischlänge	19
1.12	Maximal geschwommene Distanz von Salmoniden in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit und der Temperatur bei zwei unterschiedlichen Fischlängen. Aus [39].	20
1.13	Grenzgeschwindigkeiten von mehreren Fischarten in Abhängigkeit von der Länge	21
2.1	Bezeichnungen bei einem Beckenpass; aus [20]	25
2.2	Beckenpass; aus [20]	26
2.3	Schlitzpass; aus [20]	27
2.4	Abflussbeiwert $\mu_r = f(h_o, h_u)$; aus [20]	29
2.5	Denil-Pass; aus [20]	30
2.6	Fischschleuse; aus [20]	32
2.7	Fischaufzug; aus [20]	33
2.8	Zielkonflikte zwischen Biologen und Ingenieuren bei der Planung einer Fischaufstiegsanlage	37
3.1	Neuartiges System	41

3.2	Vollkommener und unvollkommener Ausfluss unter einer vertikalen Schütztafel (nach [29])	43
3.3	Unterteilung der Strömung in Einzelströmungsvorgänge	46
3.4	Strömungsfeld des rückgestauten Schützstrahls nach Kraatz [36]	48
3.5	Dimensionen der Strahleinschnürung und des angelegten Wandstrahls.	49
3.6	Strahlumlenkung an der Prallwand.	50
3.7	Stromlinien und Vektoren in den Bereichen II und IV des Beckens	51
3.8	Strahlumlenkung nach Kraatz.	51
3.9	Ermittlung des Energieverlustes der Strahlumlenkung durch Integration des Energieflusses.	52
3.10	Einmischung des Wandstrahls in Bereich IV	54
3.11	Schematische Darstellung der Einflüsse auf den Strahl	55
3.12	Schematische Darstellung der Strahlumlenkung an der Schützwand in Bereich IV, nach [36]	56
4.1	Prinzipskizze des Modellaufbaus	63
4.2	Biologische Systematik der verwendeten Spezies	64
4.3	Lambari (<i>Astyanax Bimaculatus</i>)	65
4.4	Piau (<i>Leporinus reinhardtii</i>)	65
4.5	Grenzgeschwindigkeit von Lambaris (<i>Astynax bimaculatus</i>)	67
4.6	Verteilungen der Lambaris (<i>Astynax bimaculatus</i>) über die Zeit in den einzelnen Bereichen des Kanals bei einem Durchfluss von $Q = 4,27$ l/s.	68
4.7	Verteilungen der Lambaris (<i>Astynax bimaculatus</i>) über die Zeit in den einzelnen Bereichen des Kanals bei einem Durchfluss von $Q = 5,72$ l/s.	70
4.8	Versuchsaufbau am Fachgebiet Hydromechanik, TU München.	74
4.9	Prinzipskizze des Modellaufbaus	75
4.10	Gemessene Parameter im Laborversuch	75
4.11	Ultraschallfließtiefenmessung in den Becken	76
4.12	Energiehöhenverlustbeiwert ζ bei unterschiedlichen Fließtiefen y/d in Abhängigkeit der Reynoldszahl Re	79
4.13	Energiehöhenverluste Δe bei unterschiedlichen Reynoldszahlen Re in Abhängigkeit der Froude-Zahl Fr	80
4.14	Energiehöhenverlustbeiwert ζ bei unterschiedlichen Fließtiefen y_m/d	81
4.15	Kontraktionswerte bei unterschiedlichen Fließtiefen y/d und Froude-Zahlen	82
4.16	Kontraktionswert ψ und Abflussbeiwert μ_A für eine geneigte, scharfkantige Schütztafel	83
4.17	Verschiedene Möglichkeiten von Wasserspiegelschwankungen	85
4.18	Varianzen der Fließtiefen in Abhängigkeit der Fließtiefen y/d bei unterschiedlichen Froude-Zahlen	86
5.1	Geometrie des untersuchten Beckens	95

5.2	Mittleres Geschwindigkeitsfeld in unterschiedlichen Konfigurationen bei gleichem Höhenversatz c/d zwischen den Becken	98
5.3	Maximalgeschwindigkeit bei unterschiedlichen Energieverlusten $\Delta h = c$ in den Becken ($a, b, d, e, f = \text{const.}$)	99
5.4	Durchfluss q bei unterschiedlichen Energieverlusten $\Delta h = c$ in den Becken ($y, b, d, e, f = \text{const.}$)	100
5.5	Kontraktionswert ψ bei unterschiedlichen Energieverlusten $\Delta h = c$ in den Becken ($y, b, d, e, f = \text{const.}$)	100
5.6	Verlustbeiwert ζ bei unterschiedlichen Energieverlusten $\Delta h = c$ in den Becken ($y, b, d, e, f = \text{const.}$)	101
5.7	Mittleres Geschwindigkeitsfeld im Becken bei unterschiedlichen Fließtiefen y im Becken	101
5.8	Maximalgeschwindigkeit bei unterschiedlichen Fließtiefen y in den Becken ($b, c, d, e, f = \text{const.}$)	103
5.9	Durchfluss q bei unterschiedlichen Fließtiefen y in den Becken ($b, c, d, e, f = \text{const.}$)	103
5.10	Kontraktionswert ψ bei unterschiedlichen Fließtiefen y in den Becken ($b, c, d, e, f = \text{const.}$)	103
5.11	Verlustbeiwert ζ bei unterschiedlichen Fließtiefen y in den Becken ($b, c, d, e, f = \text{const.}$)	104
5.12	Verlustbeiwert ζ bei unterschiedlichen Fließtiefen y in der RANS und in den Laborexperimenten	105
5.13	Kontraktionswert ψ bei unterschiedlichen Fließtiefen y in der RANS und in den Laborexperimenten	105
5.14	Mittleres Geschwindigkeitsfeld im Becken bei unterschiedlichen Prallwandhöhen b im Becken	106
5.15	Maximalgeschwindigkeit bei unterschiedlichen Prallwandhöhen b in den Becken ($y, c, d, e, f = \text{const.}$)	107
5.16	Durchfluss q bei unterschiedlichen Prallwandhöhen b in den Becken ($y, c, d, e, f = \text{const.}$)	107
5.17	Mittleres Geschwindigkeitsfeld im Becken bei Prallwandpositionen f im Becken	109
5.18	Maximalgeschwindigkeit bei unterschiedlichen Prallwandpositionen f in den Becken ($y, b, c, d, e = \text{const.}$)	110
5.19	Durchfluss q bei unterschiedlichen Prallwandpositionen f in den Becken ($y, b, c, d, e = \text{const.}$)	110
5.20	Mittleres Geschwindigkeitsfeld im Becken bei unterschiedlichen Beckenlängen e	111
5.21	Maximalgeschwindigkeit bei unterschiedlichen unterschiedlichen Beckenlängen e ($y, b, c, d, f = \text{const.}$)	112

5.22	Durchfluss q bei unterschiedlichen unterschiedlichen Beckenlängen e ($y, b, c, d, f = \text{const.}$)	112
5.23	Verlauf von unterschiedlichen Strömungsparametern bei Variation der Schützhöhe d und der Prallwandhöhe b	114
5.24	Vergleich der Beträge der mittleren Geschwindigkeitsfelder von LES und RANS	119
5.25	Verteilung der Beträge der mittleren Geschwindigkeiten im Fischpass	121
5.26	Piezometrischer Druck des mittleren Strömungsfeldes im Fischpass . .	122
5.27	Turbulente kinetische Energie k	125
5.28	Enstrophie im Fischpass	126
5.29	Qualitatives Energiespektrum $E(\kappa)$	127
5.30	Mittlere Wirbelviskosität $\langle \nu_T \rangle$ im Fischpass	129
5.31	Anteil der turbulenten kinetischen Energie, die in der LES direkt berechnet wird. (nach [51])	131
5.32	Kolmogorov-Maß $\bar{\eta}$	132
5.33	Energiedissipation $\rho\varepsilon$ im Fischpass	133
5.34	Turbulente Druckschwankungen \tilde{p}' in der Strömung.	135
5.35	Q-Kriterium \tilde{Q} in der Strömung.	137
6.1	Geometrie des Fischpasses mit einer Erweiterung. Der Rampenbereich, von der Hauptströmung getrennt durch eine Leitwand, ermöglicht den Aufstieg von kleinen Fischen und dem Makrozoobenthos	142
6.2	Schnitte und Dimensionen der Geometrienerweiterung	143
6.3	Isoflächen der resultierenden Geschwindigkeit	144
6.4	Momentane Geschwindigkeitsfelder an unterschiedlichen Schnitten . .	145
6.5	Verteilung der Wandschubspannung auf den Boden des Beckens . . .	146
6.6	Überwindung des Höhenunterschiedes zwischen Ober- und Unterwasser in einem Kanal mit baugleichen Becken.	148
6.7	Geometrie des Referenzbeckens	149
6.8	Einflussparameter des Wasserspiegelunterschiedes Δh zwischen den Becken bzw. der Sohlstufe c im Becken k_c	152
6.9	Einflussparameter k_b der Höhe der Prallwand	152
6.10	Einflussparameter k_y der Fließtiefe im Becken	152
6.11	Einflussparameter k_e der Länge der Becken	152
6.12	Einflussparameter k_f der Position der Prallwand	152
B.1	Richtungsänderung bei Rohren, aus [11]	162
B.2	Geometrie der Richtungsänderung in der Strömung	162
B.3	Beiwerte zur Korrektur von ζ_u aus [11]	164
C.1	Prinzipskizze des Modellaufbaus	165
C.2	Ultraschallfließtiefenmessung in den Becken	165
D.1	Geometrie des untersuchten Beckens	170

D.2	Verlustbeiwert ζ bei unterschiedlichen Prallwandhöhen b in den Becken ($a, c, d, e, f = \text{const.}$)	173
D.3	Kontraktionswert ψ bei unterschiedlichen Prallwandhöhen b in den Becken ($a, c, d, e, f = \text{const.}$)	173
D.4	Verlustbeiwert ζ bei unterschiedlichen unterschiedlichen Beckenlängen e ($y, b, c, d, f = \text{const.}$)	174
D.5	Kontraktionswert ψ bei unterschiedlichen unterschiedlichen Beckenlängen e ($y, b, c, d, f = \text{const.}$)	174
D.6	Verlustbeiwert ζ bei unterschiedlichen Prallwandpositionen f in den Becken ($a, b, c, d, e = \text{const.}$)	175
D.7	Kontraktionswert ψ bei unterschiedlichen Prallwandpositionen f in den Becken ($a, b, c, d, e = \text{const.}$)	176

Tabellenverzeichnis

3.1	Kontraktionswert ψ eines vertikalen Schützes in Abhängigkeit vom Öffnungsverhältnis a/h_o	44
3.2	Unterteilung der Strömung in Einzelströmungsvorgänge	47
4.1	Konfiguration der biologischen Laborversuche	66
4.2	Physiologische Parameter der 15 getesteten Lambaris im Versuch 1	68
4.3	Physiologische Parameter der 15 getesteten Lambaris im Versuch 2	69
4.4	Technische Parameter des Ultraschallsensors USS 201300 der Firma General Acoustics	77
4.5	Übertragung der eingestellten Strömungsverhältnisse auf das unskalierte System bei Annahme $\psi = 0,5$	78
5.1	Geometrische Abmessungen des Simulationsbeckens	96
5.2	Geometrische Parameter im Becken bei der Untersuchung der Abhängigkeit von der Reynoldszahl	113
5.3	Gegenüberstellung der Ergebnisse der LES und der RANS	120
6.1	Geometrische Abmessungen des Referenzbeckens	149
C.1	Gemessene Fließtiefen y_i bei unterschiedlichen Durchflüssen Q und Wehrhöhen w	166
C.2	Gemessene Fließtiefen y_i bei unterschiedlichen Durchflüssen Q und Wehrhöhen w	167
C.3	Gemessene Varianzen σ_i bei unterschiedlichen Durchflüssen Q und Wehrhöhen w	168
C.4	Gemessene Varianzen σ_i bei unterschiedlichen Durchflüssen Q und Wehrhöhen w	169
D.1	Geometrische Abmessungen des Referenzbeckens	170
D.2	Simulationsergebnisse bei Variation der Sohlstufen c (Sohle horizontal; y,b,d,e,f nach Tab. D.1)	171
D.3	Simulationsergebnisse bei Variation der Sohlstufen c (Sohle hatte ein kontinuierliches Gefälle bei gleichbleibender Kote der Prallwandoberkante; y,b,d,e,f nach Tab. D.1)	171

D.4	Simulationsergebnisse bei Variation der Sohlstufen c (Sohle hatte ein kontinuierliches Gefälle bei gleichbleibender Prallwandhöhe; y,b,d,e,f nach Tab. D.1)	172
D.5	Simulationsergebnisse bei Variation der Höhe der Prallwand b (y,c,d,e,f nach Tab. D.1)	172
D.6	Simulationsergebnisse bei Variation der Fließtiefe a (b,c,d,e,f nach Tab. D.1)	173
D.7	Simulationsergebnisse bei Variation der Beckenlänge e (y, b, c, d, f nach Tab. D.1)	174
D.8	Simulationsergebnisse bei Variation der Prallwandposition f (y, b, c, d, e nach Tab. D.1)	175
D.9	Simulationsergebnisse bei Variation der Höhe der Prallwand b (d = 0,30 m; y,c,d,e,f nach Tab. D.1)	176
D.10	Simulationsergebnisse bei Variation der Höhe der Prallwand b (d = 0,60 m; y,c,d,e,f nach Tab. D.1)	176
D.11	Simulationsergebnisse bei Variation der Höhe der Prallwand b (d = 0,15 m; y,c,d,e,f nach Tab. D.1)	177

Symbolverzeichnis

Lateinische Buchstaben

<i>Symbol</i>	<i>Beschreibung</i>	<i>Einheit</i>
a	Höhe der Schützöffnung	[m]
a_s	Höhe der Bodenöffnung	[m]
b	Breite	[m]
b	Höhe der Prallwand	[m]
B_0	ursprüngliche Strahldicke nach Kraatz	[m]
b_a	lichte Breite der Öffnungen in Denilpässen	[m]
b_m	mittlere Breite der Ruhebecken in Denilpässen	[m]
c	Stufenhöhe	[m]
C_s	Smagorinsky-Konstante	[-]
d	Höhe des Durchlasses	[m]
E	Energiedissipation	[Watt/m ³]
e	Länge des Becken	[m]
E_0	Ursprüngliche kinetische Energie eines Strahls nach Kraatz	[kg/ms ² =J/m ³]
E_x	Kinetische Energie eines Strahls nach Kraatz an der Stelle x	[kg/ms ² =J/m ³]
f	Position der Prallwand	[m]
g	Erdbeschleunigung	[m/s ²]
Q	Durchfluss	[m ³ /s]
h	Fließtiefe	[m]
h^*	Fließtiefe in Denilpässen normal zur Sohle	[m]

$h_{\ddot{u}}$	Überstauhöhe	[m]
Δh	Höhenunterschied zwischen zwei Becken	[m]
h_{ges}	Höhenunterschied zwischen Ober- und Unterwasserspiegel	[m]
h_{gr}	Grenztiefe	[m]
h_m	mittlere Fließtiefe	[m]
h_o	Fließtiefe im Oberwasser	[m]
h_u	Fließtiefe im Unterwasser	[m]
I	Gefälle	[-]
k	turbulente kinetische Energie	[m ² /s ²]
L	Geometrisches Mittel der Zellabmessungen ($\Delta x \Delta y \Delta z$) ^{$\frac{1}{3}$}	[m]
l	Länge	[m]
L_{Fisch}	Gesamtlänge eines Fisches	[m]
l_b	Länge des Beckens	[m]
d	Dicke der Beckentrennwand	[m]
m	Eingangswert für die Berechnung von κ	[-]
n	Anzahl der Becken	[-]
n	Öffnungsverhältnis h_o/a	[-]
p_a	Druck am Boden unter dem Schütz	[N/m ²]
\bar{p}	mittlerer Druck	[N/m ²]
$\langle \tilde{p} \rangle$	Mittlerer räumlich gefilterter Druck	[N/m ²]
\tilde{p}	Momentaner räumlich gefilterter Druck	[N/m ²]
\tilde{p}'	turbulenter räumlich gefilterter Druck	[N/m ²]
p'	turbulente Druckschwankung	[N/m ²]
q	breitenbezogener Durchfluss	[m ³ /sm]
Q	Q-Kriterium ($\tilde{\Omega}_{ij} \tilde{\Omega}_{ij} - \tilde{S}_{ij} \tilde{S}_{ij}$) = $\frac{1}{2\rho} \nabla^2 p$	[-]
r	Radius	[m]
h_s	Schlitzbreite	[m]
S_{ij}	Symmetrischer Anteil des Geschwindigkeitsgradiententensors	[1/s]
T	Temperatur	[°C]
t	Zeit	[s]

V	Volumen	[m ³]
v	Absolutgeschwindigkeit	[m/s]
v_0	Strahlgeschwindigkeit nach Kraatz	[m/s]
v_{gr}	Grenzgeschwindigkeit	[m/s]
\bar{v}	mittlere Geschwindigkeit	[m/s]
$\langle \tilde{U} \rangle$	Mittlere räumlich gefilterte Geschwindigkeit	[m/s]
\tilde{U}	Momentane räumlich gefilterte Geschwindigkeit	[m/s]
\tilde{U}'	Turbulente räumlich gefilterte Geschwindigkeit	[m/s]
v_{max}	Maximalgeschwindigkeit	[m/s]
v'	turbulente Schwankungsgeschwindigkeit	[m/s]
x	x-Koordinate	[m]
Δx	Abmessung der Berechnungszelle in x-Richtung	[m]
y	Fließtiefe y im Becken	[m]
y	y-Koordinate	[m]
Δy	Abmessung der Berechnungszelle in y-Richtung	[m]
z	z-Koordinate	[m]
Δz	Abmessung der Berechnungszelle in z-Richtung	[m]
z_{OW}	Kote des Oberwasserspiegels	[m]
z_{UW}	Kote des Unterwasserspiegels	[m]

Griechische Buchstaben

<i>Symbol</i>	<i>Beschreibung</i>	<i>Einheit</i>
α	Umlenkwinkel in Schlitzpässen	[°]
ε	Energiedissipationsrate	[m ² /s ³]
η	Kolmogorov-Maß	[m]

κ	Abminderungsfaktor zur Berücksichtigung der Rückstauinflusses bei Schützen	[-]
μ	Abflussbeiwert in der <i>Poleni</i> -formel	[-]
μ_r	Abflussbeiwert in Schlitzpässen	[-]
∇	Nabla-Operator	[-]
ν	kinematische Viskosität	[m ² /s]
ν_T	Wirbelviskosität	[m ² /s]
Ω_{ij}	Asymmetrischer Anteil des Geschwindigkeitsgradiententensors	[1/s]
ψ	Abflussbeiwert in der <i>Toricelli</i> -Formel	[-]
ψ	Kontraktionswert	[-]
ρ	Dichte	[kg/m ³]
σ	Rückstauinfluss	[-]

Indizes

Symbol *Beschreibung*

a	Kronenausschnitt
i	i-te Komponente eines Vektors
j	j-te Komponente eines Vektors
o	Oberwasser
s	Bodenöffnung/Durchlass
s	Schütz
u	Unterwasser

Kurzzusammenfassung

In den letzten 15 Jahren führte die Weiterentwicklung von numerischen Strömungssimulationsprogrammen dazu, dass die Strömungsfelder in Fischaufstiegsgerinnen mit numerischen Methoden untersucht werden können. Es stellt sich heraus, dass ein dreidimensionales Verständnis der Strömung sowie Kenntnisse über die Fischphysiologie und -sinneswahrnehmung notwendig sind, um einen Zusammenhang zwischen der Funktionsfähigkeit der Anlage und der Strömung in den Anlagen zu erkennen.

In der vorliegenden Arbeit wird nach einer Einführung in die Fischphysiologie und der Vorstellung der aktuell meist konstruierten Fischaufstiegsanlagen ein neuer Typ Fischpass vorgestellt. In einem Kanal wird durch die Anordnung von aufeinander folgenden Schützen und zwischen den Schützen angebrachten Prallwänden die Einmischung von Luft in das Wasser vermieden, was die Geräusentwicklung sowohl über als auch unter Wasser vermeidet. Durch die fehlenden Luftblasen im Wasser werden Fische nicht in ihrer Sinneswahrnehmung gestört. Sie können sowohl die Strömung als auch Fressfeinde leichter wahrnehmen, was die Wirksamkeit der Anlage erhöht. Die neue Anlage wurde in einem Modellversuch nachgebaut und eingehend untersucht. Durch numerische Parameterstudien konnte eine Dimensionierungsvorschrift zur Prognose der Strömungsgeschwindigkeiten, die aus den geometrischen Randbedingungen der Anlage folgen, erarbeitet werden. Die detaillierte Untersuchung mit einer aufwändigeren numerischen Simulationsmethode, der Large Eddy Simulation (LES), ermöglicht die Analyse von Turbulenzen und Wirbelstrukturen in den Becken. Am Ende der Arbeit wird eine geometrische Variation des Basismechanismus vorgestellt. Durch das Hinzufügen eines Rampenbereichs wird es am Boden lebenden Kleinstlebewesen (Makrozoobenthos) und kleinen Fischen ermöglicht, eine derartige Anlage zu überwinden. Die Selektivität der Fischaufstiegsanlage wird dadurch stark vermindert.

Abstract

The construction of various hydroelectric power plants in rivers is accompanied by inevitable barriers for the normal fish movement. Upon the construction, a marked decrease of the fish population is occurring. In the past century, many fish passes were installed to re-establish the passability of rivers. But the functional capability of many fish passes is very poor. It became obvious that a three-dimensional design and a thorough understanding of fish physiology and sensual capabilities are essential for a good fish pass design.

In the present work, a new type of fish pass is presented. The use of alternating vertical sluice gates and impingement walls avoids the entrainment of air into the water. The result consists in reduced disturbances in the fish pass due to air bubbles and in a lower noise level in the water and in the air along the fish pass.

In a first step, experimental data with fish is presented. The behaviour of three species of fish was studied in order to demonstrate the acceptance of the fish pass. A series of experimental data is presented for the discussion of the correlation between flow and geometry of such a fish pass. The use of parameter studies with CFD simulations led to design rules of a sluice gate type fish pass. By means of another numerical method, the Large Eddy Simulation, a more detailed analysis of the instantaneous flow regime was possible. The distribution of velocity and turbulence fields, as well as coherent turbulent structures within the pools allowed a better understanding of fish behaviour.

Additionally to the basic mechanism, a geometric variation is presented. By means of a geometric expansion, the passage of the fish pass becomes possible for small organisms like macrozoobenthos and fish which live near the riverbed as well as small fish. Thus, the selectivity of the fish pass is significantly reduced.

Danksagung

Um Fischaufstiegsanlagen untersuchen zu können, ist normalerweise eine Ausbildung als Umwelt- oder Bioingenieur von Vorteil. Neben den klassischen baulichen und strömungsphysikalischen Gesichtspunkten, die ein Bauingenieur zu beurteilen versteht, sind profunde Kenntnisse der Biologie, in diesem speziellen Fall der Ichthyologie notwendig. Nur durch das Verständnis der Biologie von Fischen ist es möglich, eine optimal auf deren Bedürfnisse zugeschnittene Anlage zu entwerfen.

Um den biologischen Anforderungen der Doktorarbeit gerecht zu werden, verbrachte ich im Sommer 2005 ein halbes Jahr am Centro de Pesquisas Hidráulicas e Recursos Hídricos (Zentrum für hydraulische Forschung und Wasserressourcen) an der Universidade Federal de Minas Gerais in Belo Horizonte, Brasilien. Das Forscherteam von Prof. Carlos Barreira Martinez arbeitet dort an der Beantwortung grundlegender Fragestellungen für die Verbesserung der Durchgängigkeit von Fließgewässern. In einem interdisziplinären Team aus Ingenieuren und Biologen werden Grundlagenexperimente durchgeführt und ausgewertet. Durch die Zusammenarbeit mit den dortigen Kollegen habe ich zum einen sehr viel über Biologie und den Umgang mit Fischen gelernt. Zum anderen war die interdisziplinäre Zusammenarbeit mit Biologen sehr interessant. Ich möchte mich vor allem bei Prof. Carlos Martinez, bei Prof. Edna Maria de Faria Viana und bei Viviane Pinto Ferreira bedanken. Neben der Finanzierung meiner Versuche in Brasilien haben sie mich großartig unterstützt, so dass es in kurzer Zeit möglich war, viele experimentelle Daten zu bekommen.

In meiner Zeit an der TU München ergaben sich durch den Wechsel des Lehrstuhlinhabers und die Umbenennung des Lehrstuhls Hydraulik und Gewässerkunde in das Fachgebiet Hydromechanik größere strukturelle Veränderungen. Die Arbeit am Lehrstuhl unter Prof. Dr.-Ing. Franz Valentin war zu Beginn auf die Praxis ausgerichtet.

Diese Ausrichtung veränderte sich unter Prof. Dr.-Ing. Michael Manhart hin zur numerischen Grundlagenforschung. Dieser Wechsel erwies sich sowohl für mich als auch für diese Arbeit als Glücksfall. Zum einen konnte ich mir profunde Kenntnisse über das experimentelle Versuchswesen aneignen, was die in Arbeit enthaltenen zahlreichen Ergebnisse strömungsphysikalischer Versuche ermöglichte. Zum anderen ergab sich für mich die Möglichkeit, viel über numerische Simulationen zu erfahren und zu lernen, was u. a. zu den in der Arbeit diskutierten numerischen Ergebnissen führte. Ich möchte mich bei beiden Professoren für ihre Unterstützung bei der Doktorarbeit bedanken.

Weiterhin möchte ich mich bei allen Kollegen für die Unterstützung und die wertvollen Impulse bei der Erstellung dieser Arbeit bedanken.

Neben den Danksagungen an Professoren und Kollegen möchte ich mich bei meinen Eltern bedanken. Sie haben mich auf meinem Weg mit Kräften unterstützt, auch wenn der Weg über Brasilien ein wenig außergewöhnlich war. Vielen Dank für Euer offenes Ohr, Eure moralische Unterstützung und nicht zuletzt für die finanzielle Hilfe während meines Auslandsaufenthaltes.

Die Hauptleidtragende der Doktorarbeit war aber meine Frau Paola. Viele Abende und Wochenenden musste sie auf mich verzichten, wenn ich wieder mal etwas fertig machen wollte. Ich möchte mich deshalb für ihre aufopfernde Geduld, ihre fortwährende Motivierung und ihr unendliches Vertrauen in mich bedanken.

München, im Sommer 2008

Matthias A. Haselbauer

Einleitung

In den letzten 150 Jahren wurde in Europa die Gewässernutzung immer weiter ausgebaut. Um die Schiffbarkeit von Flüssen sicherzustellen, zur Wasserkraftnutzung und nicht zuletzt zur Verbesserung des Hochwasserschutzes wurden immer mehr Querbauwerke gebaut. Diese unterbinden häufig die natürlichen Wanderungen von Fischen oder anderen Lebewesen, die für die Erhaltung ihrer Art auf diese Wanderungen angewiesen sind. Neben der Verminderung der ökologischen Durchgängigkeit kommt es durch das Aufstauen von Flüssen zu einer drastischen Veränderung der Lebensräume. Aus Fließgewässern werden oberstrom von Dämmen und Kraftwerken Stauseen, die eine gänzlich andere Verteilung von Fischarten aufweisen als die Fließgewässer. Zudem werden durch den Aufstau häufig Laichplätze und Wanderrouten zerstört. Es kam zu einem massiven Rückgang der Fischpopulationen bis zum Aussterben von einzelnen Fischarten. Dieser Problematik wurde man sich weltweit bewusst. Sowohl in Europa [1], Nord- und Südamerika als auch in Asien und Australien sind verstärkte Forschungsanstrengungen in dieser Richtung zu erkennen. Unter der Federführung der Vereinten Nationen wird versucht, die nationalen Ansätze international zu koordinieren und ein globales Verständnis der Problematik und der lokalen Lösungsmöglichkeiten zu schaffen [41].

Um die ökologische Durchgängigkeit von Flüssen nach oberstrom zu erhöhen, werden Fischaufstiegsanlagen an den Querbauwerken angebracht. Die Funktionsfähigkeit derartiger Anlagen stellt sich jedoch in vielen Fällen als unbefriedigend dar. Dies liegt oft am fehlenden biologischen Verständnis der Bedürfnisse und Reaktionen der Zielorganismen oder an einer mangelhaften ingenieurmäßigen Dimensionierung.

An dieser Stelle sei der Vollständigkeit halber erwähnt, dass die Positionierung der Anlage im Flusslauf einen großen Einfluss auf die Funktionsfähigkeit hat. Ist diese

mangelhaft, können die Fische sie nicht finden. Die Positionierung der Fischaufstiegsanlagen ist jedoch nicht Gegenstand dieser Arbeit.

Motivation für die Arbeit

Bei den meisten technischen Fischpässen kommt es zu einem Lufteintrag in das Wasser. Dieser Lufteintrag führt zu einer Geräusentwicklung (Rauschen) sowohl über als auch unter Wasser. Dieses Rauschen stellt vor allem im urbanen Umfeld ein immer größer werdendes Problem dar. Da Fischaufstiegsanlagen ortsfeste Konstruktionen darstellen, fallen die von ihnen ausgehenden Schallemissionen unter die Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm (TA Lärm [2]), einer Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz. So darf die Schallemission von derartigen Anlagen in Mischgebieten nachts lediglich 45 dB betragen. Um diesen Lufteintrag zu vermeiden und so die Geräusentwicklung zu unterbinden, kann man die Energie mit Hilfe von Schützen mit rückgestautem Abfluss umwandeln. Im Rahmen der Arbeit wird eine neuartige Fischaufstiegsanlage auf der Grundlage dieser Schütze vorgestellt und untersucht.

Die ingenieurmäßige Dimensionierung von Fischaufstiegsanlagen geschieht nach dem aktuellen Stand der Technik durch eindimensionale Gleichungen. Es werden im Allgemeinen nur die maximalen Geschwindigkeiten, die Abmessungen sowie die mittlere Energiedissipationsrate nachgewiesen. Bei der Analyse von aktuellen Fischpässen stellt sich heraus, dass die dreidimensionalen Verteilungen der Geschwindigkeiten und der Turbulenzen für die Entwicklung eines guten Fischpasses wichtig sind. Es stehen dem planenden Ingenieur heute numerische Methoden zur Verfügung, um die Strömung in einem Fischpass bis zu einer gewissen Genauigkeit zu berechnen. Anwendung und Funktionalität dieser Werkzeuge sollen in der Arbeit am Beispiel der Analyse des neuartigen Fischpasses gezeigt werden. Es kann somit durch die Simulationsergebnisse bereits in der Planung eine Diskussion mit den verantwortlichen Biologen zustande kommen. In einem Iterationsprozess kann interdisziplinär die bestmögliche Dimensionierung erarbeitet werden.

Nach der Dimensionierung wurde jedoch häufig eine mangelnde Akzeptanz der Anlage durch Fische festgestellt. Die Kopplung von Biologie und Ingenieurwesen bei

der Planung von Fischaufstiegsanlagen ist in den letzten beiden Jahrzehnten stark vorangetrieben worden. Im Vorfeld dieser häufig sehr fruchtbaren Zusammenarbeit bestehen oft gegenseitige Verständigungsschwierigkeiten. Diese beginnen bereits mit der Terminologie. Der Begriff *Turbulenz* kann z. B. in den einzelnen Disziplinen sehr unterschiedlich interpretiert werden. Im Weiteren bestehen häufig Unterschiede in den Zielsetzungen. Biologen setzen oft den Idealzustand als Zielvorgabe fest. Die Bauwerke sollen möglichst allen Lebewesen dienen. Dem hingegen sind die beteiligten Ingenieure häufig in ein Netz von Bemessungsregeln und ökonomischen Zielvorgaben verflochten, was ein nicht zu unterschätzendes Konfliktpotential darstellt. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit soll der Zielkonflikt zwischen Effizienz und Akzeptanz näher beleuchtet werden. Effizienz bedeutet in diesem Zusammenhang, dass sowohl die Kosten in der Herstellung mit der Maximierung des Gefälles, der Minimierung des Platzbedarfs und der Möglichkeit der Vorfertigung von einzelnen Bauteilen als auch die Kosten im Betrieb durch möglichst wenig Durchfluss und wenig Unterhaltsmaßnahmen minimiert werden. Die dem gegenüberstehende Akzeptanz bedeutet eine gute Abstimmung der Strömungsverhältnisse für möglichst viele unterschiedliche Organismen z. B. durch Vermeidung von Geschwindigkeitsbarrieren oder durch naturnahe Sohlengestaltung.

Gliederung der Arbeit

Wie bereits erwähnt, sind biologische Grundkenntnisse für die Dimensionierung von Fischpässen äußerst wichtig. Kapitel 1 enthält eine kurze Einführung in die Physiologie, in die Leistungsfähigkeit und in die Sinneswahrnehmung von Fischen. Mit der Einführung soll zum einen das Verständnis für die Grenzwerte bei der Dimensionierung verbessert werden. Zum anderen stellt sie die Grundlage für die Diskussion der Simulationsergebnisse der späteren Kapitel dar.

In Kapitel 2 sind die aktuell verwendeten Typen von Fischpässen zusammengestellt. Neben den Bemessungsregeln werden Erfahrungen und Probleme mit den einzelnen Varianten geschildert.

In Kapitel 3 wird das neue Anlagendesign der periodischen Schütze vorgestellt. Nach der Beschreibung des Basismechanismus werden theoretische Überlegungen zur Ableitung des hydraulischen Verlustes in den einzelnen Becken präsentiert.

Zur Analyse des neuen Designs wurden zahlreiche Laborversuche gemacht, die im Kapitel 4 vorgestellt werden. Da für die Funktion des Anlagendesigns zum einen die biologische Akzeptanz ausschlaggebend ist, wurden Untersuchungen mit mehreren Fischarten durchgeführt. Für die ingenieurmäßige Dimensionierung von Fischpässen ist die Prognose der Verluste in den Anlagen wichtig. Es werden deshalb Versuche zur Bestimmung der Verlustbeiwerte unter den Schützen präsentiert und deren Abhängigkeit von einzelnen geometrischen oder strömungsphysikalischen Größen diskutiert.

Die geometrische Variation von Laborversuchen ist meist kosten- und zeitintensiv. Um die Abhängigkeit der Strömung in den einzelnen Becken von einzelnen geometrischen Abmessungen zu untersuchen, wurde eine numerische Parameterstudie durchgeführt, welche sich im Kapitel 5 findet. Es konnte mit Hilfe dieser Simulationen eine Bemessungsvorschrift entwickelt werden, die eine Prognose der maximalen Strömungsgeschwindigkeit und des Durchflusses anhand der Geometrie erlaubt. Um die in den Becken herrschenden Geschwindigkeitsfelder genauer untersuchen zu können, wurde die Strömung mit einer aufwändigeren numerischen Methode, der Large Eddy Simulation (LES) untersucht. Im zweiten Teil des Kapitels wird eine Diskussion sowohl der Geschwindigkeitsfelder als auch von turbulenten Strukturen sowie deren Auswirkungen auf Fische präsentiert.

Am Ende der Arbeit wird in Kapitel 6 eine geometrische Variation des Basismechanismus vorgestellt. Durch das Hinzufügen eines Rampenbereiches im Nebenschluss der Strömung wird die Durchgängigkeit der Sohle wieder hergestellt. Es wird auf diese Weise kleineren Fischen und anderen Organismen, die am Grund leben, dem sog. Makrozoobenthos, ermöglicht, den Fischpass zu überwinden. Die Selektivität wird durch diesen Rampenbereich stark reduziert.

Mit einer Zusammenfassung in Kapitel 7 schließt die Arbeit.

Kapitel 1

Einführung in die Physiologie der Fische

Um die Auswirkungen des Eingriffs des Menschen in das Ökosystem Fluss zu reduzieren, versucht man mit Hilfe von Umgehungsgerinnen die ökologische Durchgängigkeit von Flüssen wieder herzustellen. Die Planung dieser Gerinne erfolgt in der Regel anhand von Konstruktionsvorschriften, die sich im Laufe der Zeit entwickelt haben und in die sowohl Erfahrungen mit früheren Anlagen als auch experimentelle Testergebnisse Eingang gefunden haben.

Bei der Analyse einer Vielzahl von derartigen Anlagen wurde herausgefunden, dass sie, obwohl sie nach hydraulischen Gesichtspunkten ohne Fehler ausgelegt wurden, eine mangelnde Funktionstüchtigkeit im Bezug auf die Anzahl von Individuen und Spezies in der Anlage aufweisen. Es ist deshalb bereits im Planungsprozess eine konstruktive Zusammenarbeit zwischen Biologen und Ingenieuren notwendig, um das der Situation optimal angepasste Ergebnis zu erhalten.

In diesem Kapitel soll zum besseren Verständnis der Restriktionen bei der Planung einer Fischaufstiegsanlage auf die Physiologie von Fischen eingegangen werden. Die Wahrnehmung von Turbulenz und Schall ist für Fische von grundlegender Bedeutung, da sich Fische anhand der Strömung und des Schalls orientieren. Können Fische eine Aufstiegsanlage schlichtweg nicht finden, so hat die Konstruktion bereits ihren Zweck verfehlt. Der Auffindbarkeit von Fischpässen kommt daher eine zentrale, meist unterschätzte Bedeutung zu.

Sobald ein Fisch die Aufstiegshilfe gefunden hat, muss das vorherrschende Geschwindigkeitsfeld mit seinen physischen Möglichkeiten übereinstimmen. Um die Geschwindigkeitsanforderungen für Fische aufstiegsanlagen besser verstehen zu können, wird sowohl auf die Muskulatur von Fischen als auch auf die Abhängigkeit der möglichen Geschwindigkeiten von der Größe des Fisches, von seinem Alter und von der Temperatur des umgebenden Wassers näher eingegangen.

Die präsentierte Einführung in die Fischbiologie soll sich jedoch auf eine allgemeine Vorstellung beschränken. Für weitere, detailliertere Angaben sei auf die einschlägige Fachliteratur wie z. B. Kapoor [35] oder Bone [12] verwiesen.

1.1 Acustico-lateralis System

Unter dem acustico-lateralen System der Fische versteht man das Ohr und das Seitenliniensystem. Mit diesen Sinnesorganen können Fische sowohl Schallquellen orten als auch Schwerkraft und Beschleunigungskräfte wahrnehmen. Eine Schallquelle, die sich unter Wasser befindet, erzeugt dabei zwei unterschiedliche physikalische Effekte, eine Strömung des Wassers und eine Druckwelle. Die durch das Verdrängen des umgebenden Wassers entstehende Strömung kann mit dem Seitenlinienorgan wahrgenommen werden. Da diese Strömung mit $1/r^3$, also der dritte Potenz des Abstandes von der Schallquelle gedämpft wird und der räumliche Einflussbereich deshalb sehr begrenzt ist, spricht man bei diesem Effekt auch vom Nahfeldeffekt einer Schallquelle

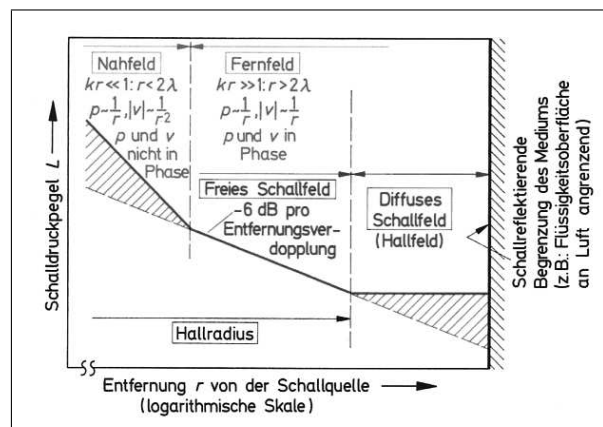


Abbildung 1.1: Begriffserläuterung von Fernfeld und Nahfeld einer Schallquelle. Aus [49]

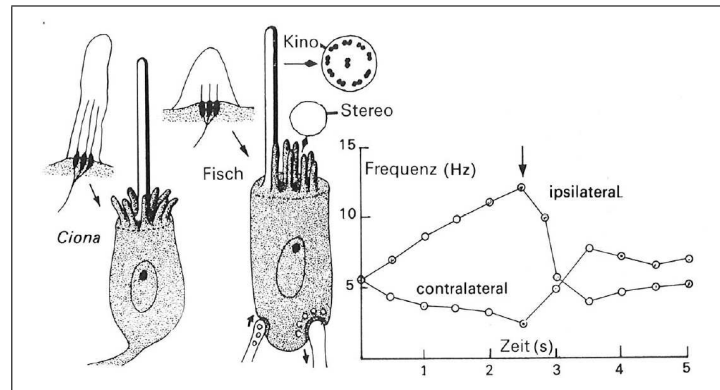


Abbildung 1.2: *Vibrationsrezeptoren. Links: Vergleich der cupulären Rezeptoren von Ascidien und Fischen. Querschnitte durch das Kinocilium (Kino) und eine Stereocilie (Stereo) sind über der Fischhaarzelle abgebildet. Man beachte die afferenten und efferenten Synapsen an der Basis. Rechts: Antworten einer Maculae des halbkreisförmigen Horizontalkanals von Raja, die die Veränderungen der Impulsfrequenz bei Rotation zeigen (Stopp beim Pfeil). Nach Lowenstein und Sand (1940). Aus [12].*

(Abb. 1.1). Die Größe der erzeugten Wasserverdrängung ist umgekehrt proportional zum Quadrat der Frequenz der Schallquelle. Dadurch ist der Nahfeldeffekt einer Schallquelle bei höheren Frequenzen sehr klein. Die Wahrnehmung durch das Seitenlinienorgan ist auf Frequenzen unter 200 Hz begrenzt.

Parallel zur Wasserverdrängung wird durch die Komprimierung des umgebenden Wassers eine Druckwelle erzeugt, die sich im Wasser mit Schallgeschwindigkeit fortpflanzt. Die Druckamplitude ist direkt proportional zur Vibrationsamplitude der Schallquelle und wird im Gegensatz zum Nahfeldeffekt nur mit der $1/r^2$, also der zweiten Potenz des Abstandes von der Schallquelle gedämpft. Die Schall- oder Fernfeldwahrnehmung spielt bei größeren Entfernungen von der Schallquelle und bei höheren Frequenzen eine entscheidende Rolle. Bei Entfernungen bis zu einem Fünftel der Wellenlänge der von der Schallquelle emittierten Frequenz überwiegen die durch den Nahfeldeffekt erzeugten Teilchenbewegungen. Außerhalb dieses Bereiches kann der Fernfeldeffekt als dominant betrachtet werden. Bei 100 Hz liegt diese Grenze bei 3 m, bei 200 Hz bei 1,5 m und bei 500 Hz bei 60 cm.

Die Wahrnehmung von Schall unterscheidet sich bei Fischen und anderen Tieren grundlegend, was durch den Aufbau der jeweiligen Hörzellen begründet ist. Diese

Hörzellen (Abb. 1.2) sind bei Fischen im Gegensatz zu den Hörzellen anderer Tiere asymmetrisch aufgebaut. Die Zellen reagieren auf Verformung der Härchen der Zelle, die durch Strömung oder durch Druckwellen verursacht werden. Versuche haben gezeigt, dass nicht das lange Haar, das sog. Kinocilium auf Auslenkung reagiert, sondern die kleineren Stereocilien. Diese reagieren vor allem bei Verformung parallel der Symmetrieachse der Hörzelle. Wie in der Abbildung zu sehen ist, kommt es zu unterschiedlichen Potentialen, je nachdem, ob sich die Stereocilien auf die Position des Kinocilium zu oder von ihm weg bewegen. Durch den asymmetrischen Aufbau der Hörzellen ist die Schallwahrnehmung der Fische richtungssensitiv, was sie in die Lage versetzt, gänzlich anders auf akustische Signale zu reagieren als andere Tiere oder der Mensch.

Ein weiterer grundlegender Unterschied der Hörzellen liegt an den beiden angeschlossenen Synapsen an der Basis der Zelle. Bone [12] vermutet dahinter einen Mechanismus der bewussten Hemmung von Zellen, um die aus der Schwimmbewegung der Fische erzeugten Signale zu filtern.

1.1.1 Das Seitenliniensystem

Unter dem Seitenlinienorgan versteht man bei Fischen ein Sinnesorgan, mit dem die Strömung des umgebenden Wassers erfasst werden kann. Es besteht aus einem Kanal unter der Haut der Fische, der kurz hinter den Kiemen anfängt und seitlich entlang des Rumpfes bis zur Schwanzflosse verläuft (Abb. 1.3). Einige Fische weisen zudem im Bereich des Kopfes weitere kleine unter der Haut liegende Kanäle auf, die ebenfalls zum Seitenlinienorgan hinzu zu zählen sind, da sie die gleiche Funktion haben. Artspezifisch variiert die Ausbildung des Seitenlinienorgans stark.

Die Rezeptoren im Seitenlinienorgan, die Neuromasten, sitzen entweder im Inneren einer Pore, die groß genug ist, um sichtbar zu sein, oder befinden sich im Inneren eines Unterhautkanals. Sie bestehen aus einer Gruppe von Hörzellen, deren Kinocilien eine Länge zwischen $1/10$ und $1/5$ mm haben. Die Hörzellen sind von einer gallertartigen Hülle umgeben, der Cupula.

Die Hörzellen im Seitenlinienorgan gleichen denen im Innenohr von Wirbeltieren,

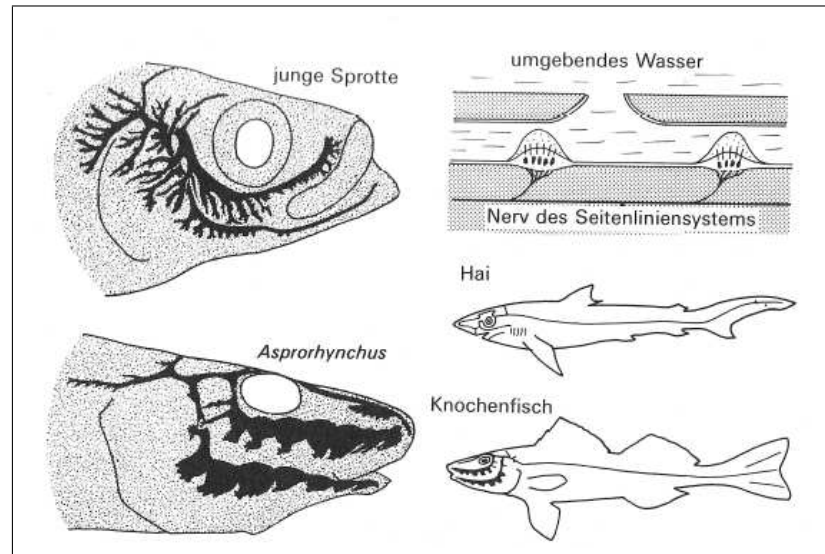


Abbildung 1.3: *Seitenliniensystem, Links: Seitelinienkanäle bei einer jungen Sprotte und bei Asprorhynchus. Rechts, oben: Anordnung der Neuromasten in der Seitenlinie eines Haies. Unten: Seitenlinienkanäle bei Haien und Knochenfischen. Aus [12]*

so dass angenommen wird, dass sie den gleichen Ursprung in der Evolution haben. Der Zweck des Seitenlinienorgans ist die Erfassung von Fluidströmungen und damit auch von Nahfeldeffekten von Schallquellen. Das Seitenlinienorgan versetzt Fische in die Lage, sich rheotaktisch im Fluss zu orientieren. Ferner können sie selbsterzeugte und fremderzeugte Strömungen wahrnehmen. Es können Kollisionen mit anderen Objekten auch bei schlechter Sicht vermieden und andere Fische, Feinde oder Futter registriert werden. Aus der Literatur ist bekannt, dass blinde Fische wie z. B. der Höhlensalmmler (*Astyanax mexicanus*) über das Seitenlinienorgan ihr Futter orten. Als weiteres Beispiel seien Killifische angeführt, die über das Organ auf der Oberfläche befindliche Insekten detektieren.

Artspezifisch sind Teile des Organs zu Elektrozeporen weiterentwickelt, die benutzt werden können, um elektrische Impulse wahrzunehmen. Auf diese Weise ist es z. B. Haien möglich, ihr Futter aufgrund des von der Beute emittierten magnetischen Feldes aufzuspüren.

1.1.2 Schallwahrnehmung

Wasser stellt für Schall einen hervorragenden Leiter dar. Die Schallgeschwindigkeit beträgt im Wasser in etwa 1500 m/s, also das ca. Fünffache der Schallgeschwindigkeit in Luft.

Befinden sich Fische in einem ausreichenden Abstand zu den Schallquellen im sog. Fernfeld, so sind die induzierten Strömungsgeschwindigkeiten zu klein, als dass sie noch mit dem Seitenlinienorgan erfassbar wären. Die von den Schallquellen verursachten Druckschwankungen werden mit Hilfe von Hörzellen im Gehör des Fisches registriert. Dabei haben Fische keine Gehörgänge, die das Gehör mit dem umgebenden Fluid verbinden. Die höchste Frequenz, die mit den Hörzellen auf diese Weise wahrnehmbar ist, liegt bei etwa 400 Hz. Typische Vertreter von Fischen, die auf diese Weise hören, sind der Thunfisch und der Dorsch.

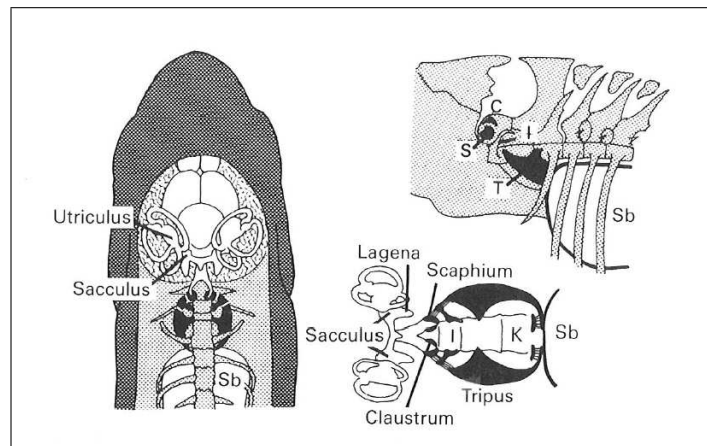


Abbildung 1.4: Gehörknöchelchen bei Ostariophysen. Links: Dorsalansicht eines Goldfisches; Oben rechts: Seitenansicht eines jungen Goldfisches; Unten rechts: Dorsalansicht der Gehörknöchelchen eines adulten Goldfisches. Sb Schwimmbase; S Scaphium; I Intecalare; T Tripus; C Clastrum; K unterstützender Knochen. Aus Bone [12]

Zur Steigerung dieser Hörschwelle bedienen sich einige Fische der Schwimmbase als Resonanzkörper (Abb. 1.4). Da die mit Gas gefüllte Schwimmbase bei Durchdringung des Fisches durch eine Druckwelle eine akustisch harte Berandung darstellt, wird die Schwimmbase durch die Schallwellen in Schwingung versetzt. Diese Schwingungen werden durch die sog. Weber'schen Knöchelchen, die sich im Laufe der Evolution aus

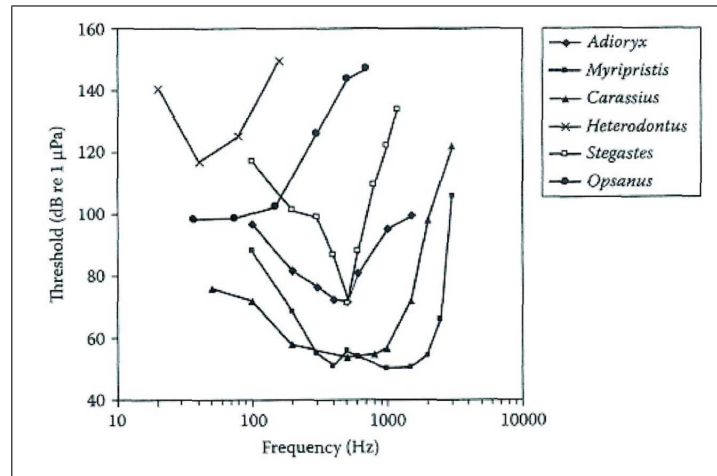


Abbildung 1.5: Audiogramme von verschiedenen Fischarten zur Verdeutlichung der Variation der Gehörempfindlichkeit. Eine geringere Hörschwelle auf der y-Achse bedeutet eine höhere Gehörempfindlichkeit. *Adioryx* ist der hawaiianische Husarenfisch, *Myripristis* ein Soldatenfisch, *Carassius* der Goldfisch, *Heterodontus* der Hornhai, *Stegastes* ein Riffbarsch, *Opsanus* ist ein Froschfisch

Wirbeln entwickelt haben, mit Hilfe von Körperschall an das Gehör weitergeleitet. Auf diese Weise kann die Hörempfindlichkeit auf bis zu 7 kHz erhöht werden. Die maximale Empfindlichkeit liegt in einem Bereich zwischen 500 Hz und 1,5 kHz. Die Audiogramme von einigen Hörspezialisten sind in Abbildung 1.5 aufgetragen.

Nachgewiesen wurde dieser Mechanismus, indem man die Schwimmblase der Fische mit Wasser füllte. Fische verloren auf diese Weise das verbesserte Wahrnehmungsvermögen. Neben der Schallwahrnehmung dient das Gehör von Fischen wie bei Säugetieren dem Gleichgewichtssinn und der Beschleunigungswahrnehmung. In kleinen mit Fluid gefüllten Kanälen werden bei Veränderung der Körperlage oder bei Beschleunigung kleine Kalk- oder Sandpartikel bewegt, die auf ihrem Weg Haarzellen anregen.

Neben der Empfindlichkeit gegenüber Schallwellen scheinen Fische auf eine gänzlich andere Art zu hören als Säugetiere. Die bestuntersuchte Gattung unter den Fischen stellen die Clupeiden dar, zu denen der Hering und die Sprotte gehören. Denton und Gray [18] konnten bei Experimenten mit Sprotten die im Gehör erzeugten Potentiale anhand von Elektroden abgreifen (Abb. 1.6). Erzeugt man eine

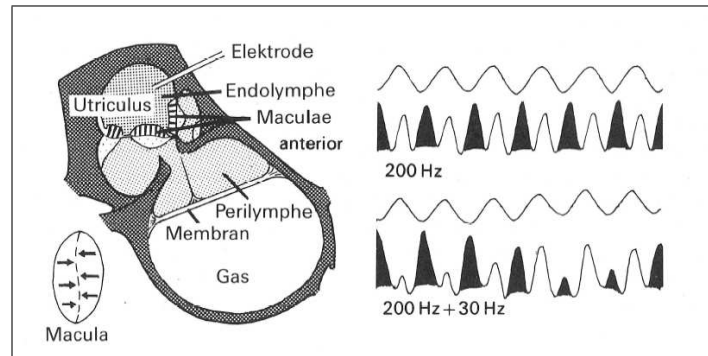


Abbildung 1.6: Antworten des Gehörorgans einer Sprotte. Links: Sagittalschnitt (hinten=links), der den durch eine Membran von der Perilymphe (fein gepunktelt) abgetrennten, gasgefüllten Bereich der Bulla zeigt. Die Ableitelektrode befindet sich in der Endolymphe (grob gepunktelt) des Utriculus über den Maculae (gestreift). Abordnung der beiden Orientierungen der Kinocilien in der mittleren Macula utriculi, von links gesehen. Rechts: Antworten der Haarzellen der Maculae utriculi auf Schallschwingungen (sinusförmige Druckwellen). Nach Denton und Gray [18]. Aus Bone [12]

sinusförmige Druckschwankung der Frequenz f , konnte im Gehör ein Signal mit doppelter Frequenz nachgewiesen werden. Man erklärt dieses Phänomen durch die asymmetrische Anordnung der Haarzellen (Abb. 1.7). Es scheint so, als wenn das Drucksignal getriggert wird, d. h. einige Zellen nur auf Druckanstiege und andere nur auf Druckabfälle reagieren. Die abgegriffenen Druckpotentiale waren bei Frequenzen zwischen 40 und 700 Hz jedoch sehr flach. Diese Druckpotentiale erhöhten sich jedoch bei einem Signal mit zwei unterschiedlichen Frequenzen stark. In Abb. 1.6 sind die Verläufe der Druckpotentiale qualitativ angegeben. Die Bereiche von gleichgerichteten Hörzellen antworteten auf Druckänderungen anhängig vom mittleren Druck. Aus den gemessenen Potentialen können Phasenunterschiede sowie die Frequenzen des Signals besser erkannt werden als im Druckverlauf.

Säugetiere benötigen zur Wahrnehmung einer Frequenz mehrere Wellenzyklen. Ist das Signal zu kurz, kann nur ein *Klick* wahrgenommen werden. Fische hingegen können durch den Abgleich der Potentiale der einzelnen Haarzellen die Frequenz bereits nach einer halben Schwingungsperiode wahrnehmen, was sie zu schnellen Reaktionen befähigt. Im Allgemeinen muss man davon absehen, die Schallwahrnehmung

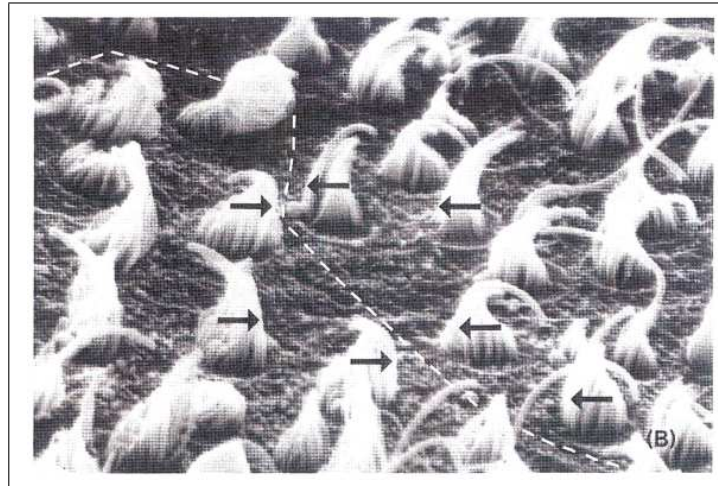


Abbildung 1.7: *Elektronenmikroskopaufnahme eines Feldes von Haarzellen im Längenepithelium eines Zebrafisches (*Brachydanio rerio*). Die gestrichelte Linie trennt zwei Gruppen von Haarzellen, die zueinander entgegengerichtet sind. (Bereich der Aufnahme etwa 20 μm). Aus [21]*

von Fischen mit der von Säugetieren oder speziell des Menschen zu vergleichen. Fische sind, wie Bone [12] bemerkt, „offensichtlich an anderen Klangparametern interessiert als wir“.

Auf ihrem Weg durch das Medium Wasser orientieren sich Fische primär anhand des Acustico-lateralis-Systems. Es wurde in zahlreichen Beiträgen gezeigt, dass Fische zum Auffinden eines Fischpasses eine Leitströmung benötigen, an welcher sie sich orientieren. Bei der Definition dieser Leitströmung kommt es dabei weniger auf den Durchfluss an als um eine Mindstdifferenz der Geschwindigkeiten zwischen der Leitströmung und dem umgebenden Wasser. Für die Auffindbarkeit von Fischaufstiegsanlagen spielt diese Leitströmung deshalb bei der Konstruktion einer Fischtreppe eine zentrale Rolle.

Die Wechselwirkung zwischen Akustik und Verhalten von Fischen wird in der Literatur äußerst kontrovers diskutiert. Sieht man von künstlichen Schallquellen wie Turbinen oder Fische scheuchanlagen ab, so entsteht Unterwasserschall in der Regel aufgrund von Lufteinmischung. Wenn es in Oberflächennähe zu Scherströmungen wie z. B. beim Eintauchen eines Flüssigkeitsstrahls kommt, wird an der Scherfläche Luft in das Medium Wasser eingetragen [16]. Diese Luft wird unter Wasser aufgrund von

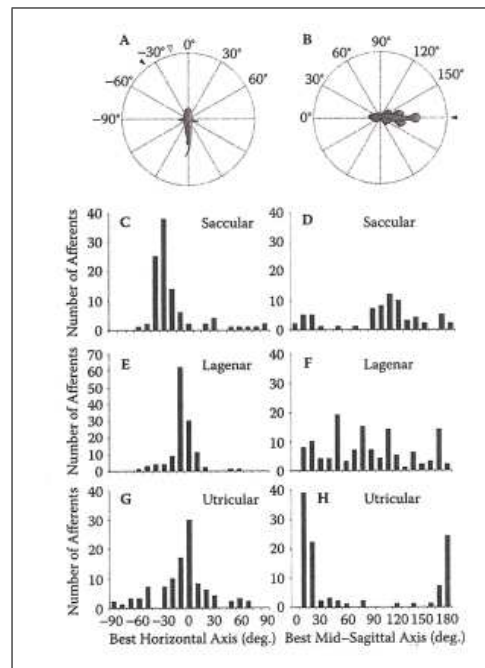


Abbildung 1.8: *Richtungssensitivität der Schallwahrnehmung von Fischen. Stimulierungsachsen (A und B) und die Verteilungen der besten Ergebnisse von Saccular (C und D), Lagenar (E und F) und Utricular (G und H) Potentialen einer Sandgrundel (*Pomatoschistus minutus*). Die gefüllten und offenen Pfeile in A markieren die Längsachsen der der Sacculae und der Lagena. Der Pfeil in B markiert die Orientierung der Utricula. Aus [22].*

turbulenten Scherkräften (Deane [17]) so lang zerteilt, bis stabile Blasen gebildet wurden. Beim Zerteilen von einer Blase in zwei kleine Blasen schwingen letztere wie Schallquellen zweiter Ordnung um ihr Zentrum, bis sie aufgrund von Zähigkeitseinflüssen zur stabilen Kugelform gefunden haben. Danach schwimmen sie durch den Auftrieb in Richtung der freien Oberfläche und verlassen dort das Medium Wasser. Bei diesem Vorgang wird jedoch kein Schall induziert. Natürlicher Unterwasserschall ist demnach stark mit dem Lufteintrag an der Wasseroberfläche korreliert. Will man demnach ein möglichst geräuscharmes Wasserbauwerk bauen, so sollte dieser Lufteintrag vermieden werden.

Beim Versuch, Fische von Turbineneinlässen fernzuhalten, werden in der Literatur unter anderem akustische Scheuchanlagen vorgeschlagen. Diese arbeiten mit Schallintensitäten bis zu 180 dB re 1 μ Pa. Es konnte gezeigt werden, dass dieser Schallpegel

die Sinneszellen von Fischen schädigt, sie aufgrund des Schalls gleichsam taub werden. Die Sinnhaftigkeit von derartigen Anlagen muss aus Umweltgesichtspunkten in Frage gestellt werden. Es konnte durch Messungen nachgewiesen werden, dass der Turbinenlärm mehrere Kilometer entfernt vom Krafthaus noch zu hören ist. Dies liegt daran, dass Wasser den Schall hervorragend leitet, und dieser nur aufgrund der Wechselwirkung mit der Sohle gedämpft wird. Es konnte ferner gezeigt werden, dass Fische durch Schallquellen angelockt werden, was genau den gegenteiligen Effekt von Scheuchanlagen hat. Der Einsatz von akustischen Scheuchanlagen mit hoher Energie sollte demnach gründlich abgewogen werden.

Durch die Einführung in das Acusto-lateralis-System von Fischen konnte gezeigt werden, dass sich Fische aufgrund von Schall sowohl im Nahfeld als auch im Fernfeld orientieren. Fische besitzen ein höher entwickeltes Gehör, das es ihnen erlaubt, neben dem Schallpegeln auch die Richtung des Schalls durch die Hörzellen zu bestimmen. Im Zuge dieser Erkenntnis sollte eine Sensibilisierung entstehen, so dass Schallquellen unter Wasser aufgrund ihrer möglichen Wirkung auf Fische bewertet werden. Das im nächsten Kapitel vorgestellte Prinzip einer Fischeaufstiegsanlage vermeidet durch die spezielle Konstruktion die ungewollte Entstehung von Schall unter Wasser, so dass die Wahrnehmung von anderen, weiter entfernten und teilweise lebenswichtigen oder -bedrohlichen Schallquellen nicht maskiert wird.

1.2 Schwimmvermögen

Das Schwimmvermögen von Fischen hängt von den physischen Voraussetzungen sowie von den Umweltbedingungen ab. Da dem Schwimmverhalten für die Bemessung von Fischeaufstiegsanlagen eine zentrale Bedeutung zukommt, soll im Folgenden auf die muskulären Voraussetzungen von Fischen näher eingegangen werden. Danach wird die Abhängigkeit des Schwimmvermögens von einzelnen Umwelteinflüssen diskutiert. Es soll dadurch ein besseres Verständnis der Geschwindigkeitsrestriktionen bei der Bemessung von Fischpässen entwickelt werden.

1.2.1 Muskulatur

Die Muskulatur der Fische setzt sich aus zwei unterschiedlichen Muskelgruppen zusammen. Direkt unter der Haut befindet sich eine dünne Schicht mit roten Muskelfasern. Diese Fasern gewinnen die notwendige Energie zur Fortbewegung durch aerobe chemische Vorgänge. Die Kontraktion der roten Muskelfasern geschieht sehr langsam. Die rote Muskulatur dient daher dazu, sich längere Zeit mit niedriger Geschwindigkeit fortzubewegen. Müssen kurzzeitig höhere Geschwindigkeiten erreicht werden, benutzen Fische die so genannte weiße Muskulatur. Diese Muskulatur macht den Hauptanteil der Masse des Fisches aus. Die für die Fortbewegung notwendige Energie wird hierbei mit Hilfe von Milchsäuregärung gewonnen. Da diese Form der Energiegewinnung nicht sehr effektiv ist, ermüdet die weiße Muskulatur sehr schnell. Die hohen Geschwindigkeiten können nur sehr kurze Zeit aufrecht gehalten werden. In Versuchen, bei denen die Leistungsfähigkeit von Fischen gemessen wurde, stellte sich heraus, dass sich der Fisch im Falle eines zu hohen Erschöpfungsgrades nicht mehr regenerieren kann.

Der muskuläre Mechanismus konnte mit Hilfe von Elektromyogrammen von Fischen aufgedeckt werden. Wie man in Abbildung 1.9 sieht, gibt es bei sehr niedrigen Geschwindigkeiten nur geringe Potentiale in der roten Muskulatur. Wenn die Geschwindigkeit erhöht wird, kommt der Fisch in einen Bereich, wo er die Geschwindigkeit mehrere Minuten halten kann. Es zeigen sich sowohl in der weißen als auch in der roten Muskulatur Potentiale. Wenn der Fisch jedoch gezwungen wird mit sehr hoher Geschwindigkeit zu schwimmen, werden die größten Potentiale in der weißen Muskulatur gemessen.

1.2.2 Geschwindigkeiten

Fische rufen wie alle im Wasser befindlichen Körper bei Vorhandensein einer Relativgeschwindigkeit zum Fluid einen Strömungswiderstand hervor. Um an einem ortsfesten Punkt zu verbleiben und damit ein Verdriften in der Strömung zu vermeiden, müssen Fische durch ihre Eigenbewegungen eine gleich große dem Strömungswiderstand entgegen gesetzte Kraft erzeugen. Unterscheidet sich diese Geschwindigkeit

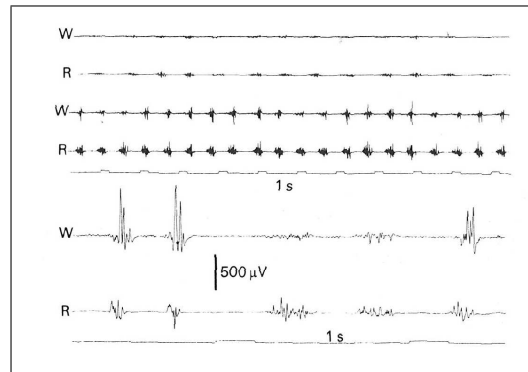


Abbildung 1.9: *Elektromyogramm eines Karpfens bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten in einem Kanal. Die Ableitungen der roten (R) und weißen (W) Bereiche der Myomeren bei niedriger Geschwindigkeit (oben), erhöhter Geschwindigkeit (Mitte) und hoher Geschwindigkeit. Aus [39]*

jedoch, so bewegt sich der Fisch relativ zur Strömung. Er kann sich auf diese Weise mit der Strömung treiben lassen oder aktiv gegen sie anschwimmen.

Die von den Fischen durch Bewegungen erzeugten Geschwindigkeiten können abhängig von der körperlichen Leistungsfähigkeit des Fisches unterschiedlich lang aufrechterhalten werden. In der Literatur werden deshalb meist drei verschiedene Geschwindigkeiten unterschieden (Abb. 1.10).

Mit der Dauergeschwindigkeit [5] oder Wandergeschwindigkeit [27], [34] kann sich ein Fisch über mehrere Stunden fortbewegen, ohne Ermüdungserscheinungen zu zeigen. Die Höhe dieser Geschwindigkeit ist innerhalb einer Fischart von der Größe des Fisches abhängig. Um diese Geschwindigkeiten zu klassifizieren, hat man sich in der Biologie deshalb darauf verständigt, die auf das Leistungsvermögen der Fische bezogenen Geschwindigkeiten in Fischlängen pro Sekunden ($v = L_{Fisch}/s$) anzugeben. Die Größenordnung der Dauergeschwindigkeit liegt dabei bei ca. $2 L_{Fisch}/s$ [5]. Die kritische [27] oder gesteigerte [5] Geschwindigkeit können Fische nutzen, um Bereiche erhöhter Strömungsgeschwindigkeiten zu überwinden. Die in der Literatur angegebenen Definitionen beziehen sich auf einen Geschwindigkeitsbereich oder eine maximale Geschwindigkeit, die über einige Minuten aufrechterhalten werden kann. Die Größenordnung liegt bei ca. 5 Körperlängen pro Minute. Nach dieser Belastung müssen sich die Fische jedoch regenerieren. Aus diesem Grund sollten Fischaufstiegsanlagen

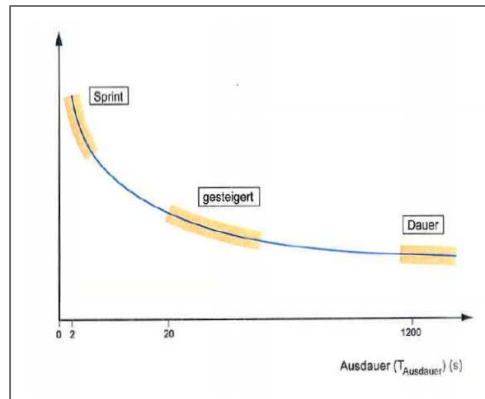


Abbildung 1.10: Schwimmleistung von Fischen, aus [5]

so ausgelegt sein, dass die Bereiche mit erhöhter Schwimmbelastung für die Fische möglichst klein sind, oder es ausreichend große Ruhebecken gibt.

Die Sprint- [5] oder Explosionsgeschwindigkeit ist die maximale Geschwindigkeit, die ein Fisch erzeugen kann. Sie dient dem Fisch dazu, um Räubern mit wenigen Bewegungen zu entkommen oder schwierige Hindernisse zu überwinden. Diese Geschwindigkeit kann nur über wenige Sekunden aufrechterhalten werden und beträgt nur ca. 10 bis 12 L_{Fisch}/s . Wenn diese Geschwindigkeit zu lang aufrecht erhalten wird, kann es sein, dass sich der Fisch nicht mehr regenerieren kann. Er geht kurz nach der Belastung ein oder wird eine leichte Beute von Räubern [3].

Zu den hier angegebenen Geschwindigkeiten ist zu bemerken, dass die Größenordnungen der einzelnen Geschwindigkeiten sowohl artspezifisch und auch größen- und temperaturabhängig sind.

In Abbildung 1.11 sind die geschwommenen Geschwindigkeiten von Salmoniden und deren zugehörige Ausdauer bei unterschiedlichen Temperaturen und unterschiedlichen Längen aufgetragen. Die Abbildung gilt dabei qualitativ für alle Fischarten, so dass qualitative Aussagen über die Abhängigkeiten der einzelnen Parameter getroffen werden können.

Die Funktionsgraphen bezogen auf eine konstante Fischlänge weisen alle eine negative Steigung auf. Fische können demnach bei höheren Temperaturen eine höhere Maximalgeschwindigkeit erreichen als bei niedrigeren Temperaturen. Diese höheren

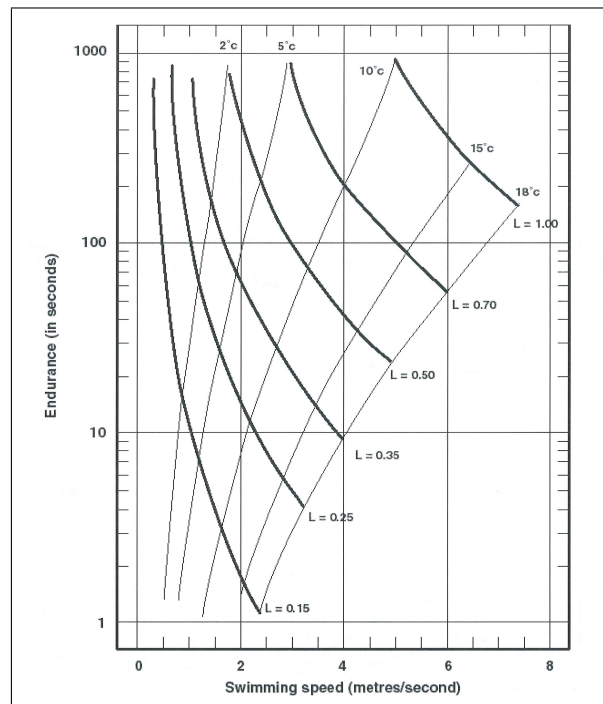


Abbildung 1.11: *Maximale Geschwindigkeiten und Ausdauer von Salmoniden in Abhängigkeit der Temperatur und der Fischlänge. Aus [39]*

Geschwindigkeiten können jedoch bei steigender Temperatur immer kürzer aufrechterhalten werden. Sieht man sich in der Abbildung die Isothermen an, so sieht man, dass bei der Länge des Fisches nicht nur dessen Maximalgeschwindigkeit steigt, sondern auch dessen Ausdauer. Als Konsequenz aus den Betrachtungen nach Abbildung 1.11 müsste in den Bemessungsgrundlagen die Wassertemperatur beim Fischeaufstieg in Betracht gezogen werden.

Eine Tatsache, die bei der Betrachtung der Leistungsfähigkeit von Fischen meist unberücksichtigt bleibt, ist der Zusammenhang zwischen den Geschwindigkeiten und den zurückgelegten Distanzen, wie sie in Abbildung 1.12 für Salmonide abgebildet sind. Die Dauergeschwindigkeit ist bei kleineren Fischen niedriger als bei großen, was einleuchtend ist. Entscheidend ist jedoch die Betrachtung der Isotachen, d. h. der Linien gleicher Geschwindigkeit. Legt man beispielsweise eine maximale Geschwindigkeit eines Fischpasses von 2,0 m/s zugrunde, so sieht man, dass die großen Fische bei dieser Strömungsgeschwindigkeit etwa 10,5 m bei Temperaturen über 10°C zurücklegen können. Bereits bei 5°C wird jedoch bei den großen Salmoniden

die Grenzgeschwindigkeit erreicht, so dass sie sich lediglich in der Strömung gegen Abdriften halten können. Ein Überwinden eines Hindernisses ist jedoch nicht mehr möglich.

Gravierender ist dieser Effekt bei der Betrachtung von kleineren Fischen, die „nur“ 10 cm kleiner sind. Die maximale Distanz, die bei maximalen Strömungsgeschwindigkeiten von 2,0 m/s gegen die Strömung geschwommen werden kann, beträgt bei $T > 15^\circ\text{C}$ etwa 4 m, und ist damit sehr viel kleiner als bei den größeren Fischen. Sinkt nun die Temperatur, so wird die maximale Distanz immer kleiner. Dies kann dazu führen, dass bei Temperaturen von 10°C , die in Gebirgsbächen nicht selten sind, ein Aufstieg aufgrund der Geometrie nicht mehr möglich ist, da die Bereiche schnellerer Strömung zu lang sind.

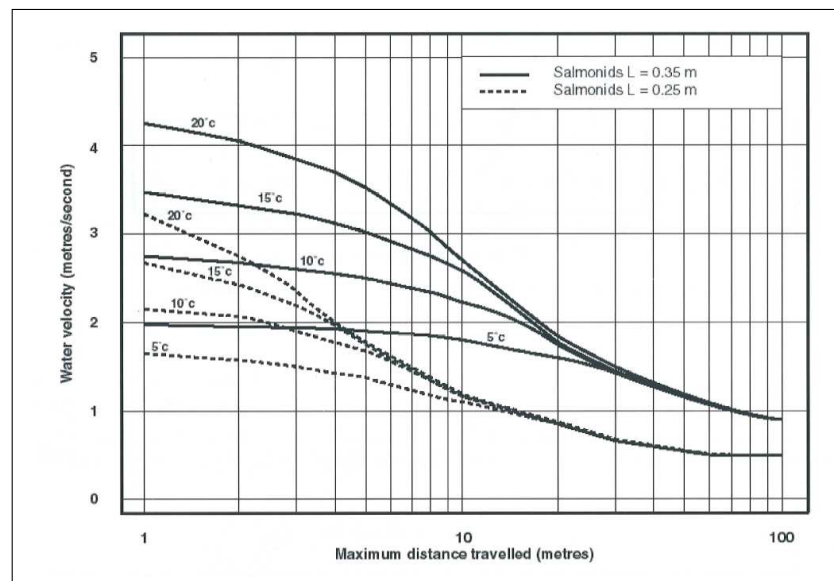


Abbildung 1.12: Maximal geschwommene Distanz von Salmoniden in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit und der Temperatur bei zwei unterschiedlichen Fischlängen. Aus [39].

Wie bereits beschrieben sind die maximalen Geschwindigkeiten von der Art abhängig (Abb. 1.13). Santos [45] untersuchte in diesem Zusammenhang die Leistungsfähigkeit von tropischen Fischen, um eine Übertragbarkeit der theoretischen Überlegungen aus Ländern der nördlichen Hemisphäre in die Tropen zu überprüfen. Aufgrund der von ihr gefundenen wesentlich höheren Leistungsfähigkeit (Abb. 1.13) von tropischen Fischen wurde klar, dass man die bisherigen Erkenntnisse nicht ohne

weiteres nach Südamerika übertragen kann.

Die in der Literatur beschriebenen Versuchsergebnisse zur Bestimmung der Geschwindigkeitsbereiche sind meist mehr argumentativ als deterministisch. So wird unter Experten kontrovers diskutiert, inwieweit ein Fluchtreflex im Fisch, der die Sprintgeschwindigkeit auslöst, durch elektrische Impulse oder im Schwimmversuch nach Brett [14][15][45] nach ausgelöst werden kann. Es ist jedoch unumstritten, dass es für jeden Fisch je nach Leistungsvermögen die drei angesprochenen Geschwindigkeiten gibt, und sich technische Eingriffe in den natürlichen Lebensraum der Fische am Leistungsvermögen der Fische orientieren sollten.

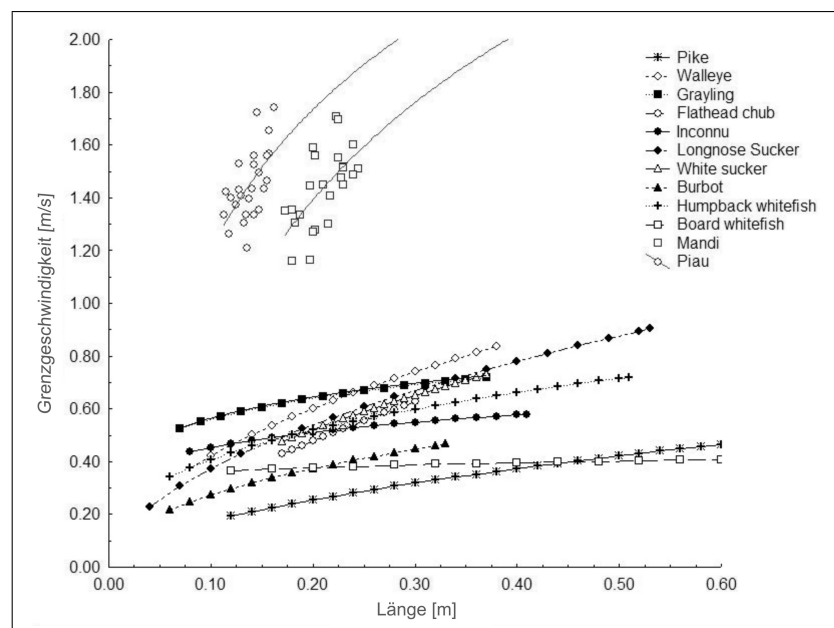


Abbildung 1.13: Grenzgeschwindigkeiten von mehreren Fischarten in Abhängigkeit von der Länge

1.3 Zusammenfassung

Bei der Dimensionierung von Wasserbauwerken, die von Fischen zum Auf- oder Abstieg verwendet werden sollen, oder von funktionierenden Fischeuchanlagen müssen physiologische Grundkenntnisse über die Zielspezies bekannt sein, um die Funktionstüchtigkeit der Anlagen im Betrieb sicherzustellen.

Fische orientieren sich im Wasser bei schlechten Sichtverhältnissen vor allem über das Gehör. Im Gegensatz zu Säugetieren erlaubt es der richtungssensitive Aufbau der Hörzellen den Fischen, Schallquellen im Wasser zu lokalisieren. Diese Schallquellen können dabei sowohl strömungsbedingte Einmischgeräusche von Luft in das Wasser sein als auch künstliche Schallquellen wie Turbinen oder Lautsprecher.

Über das Seitenlinienorgan können Fische Informationen über die Strömung und die darin enthaltene Turbulenz gewinnen. Da die von einer Schallquelle erzeugte Strömung jedoch nur in einem sehr begrenzten Radius, im sog. Nahfeld (Abb. 1.1), wahrnehmbar ist, spielt die Lokalisierung über das Seitenlinienorgan eine eher untergeordnete Rolle. Über die wahrgenommenen Strömungsgeschwindigkeiten können jedoch Leitströmungen Fische anziehen. Aus dem Zusammenspiel aus Strömungsgeschwindigkeiten und Schall kann somit ein optimales Ergebnis gewonnen werden.

Die Leistungsfähigkeit von Fischen ist stark von ihrer Art, ihrer Größe und der Wassertemperatur abhängig. Es konnte gezeigt werden, dass tropische Fische gänzlich andere physische Parameter haben als europäische, was primär an einer wesentlich höheren Wassertemperatur liegt. Ein schlichtes Kopieren von existierenden Anlagen aus Europa ist deshalb in den Tropen nicht zielführend, da auf die lokalen Besonderheiten der Fauna explizit eingegangen werden muss.

Abschließend kann somit zusammengefasst werden, dass es nur mit einem guten biologischen Verständnis und einer Analyse der lokalen Verhältnisse möglich ist, gut funktionierende Fischpässe zu bauen und zu betreiben.

Kapitel 2

Übersicht über Fischaufstiegsanlagen

In Deutschland begann der ingenieurtechnische Gewässerausbau Anfang des 19. Jahrhunderts [5]. Der Fokus lag damals auf einer Längenkorrektur zur Landgewinnung und dem Hochwasserschutz. Außerdem wurden größere Flüsse ausgebaut, um die ganzjährige Schiffbarkeit sicherzustellen. Seit 1890 werden Wasserkraftanlagen zur Erzeugung von elektrischem Strom verwendet. Heute sind in Deutschland von etwa 400.000 Gewässerkilometern 75% künstlich verändert.

Durch diese Veränderungen wurde häufig die ökologische Durchgängigkeit unterbrochen, d. h. Fische oder andere Lebewesen können die für ihren Lebensrhythmus notwendigen Wanderungen in den Flüssen nicht mehr unternehmen. Es ergab sich ein drastischer Rückgang in der Anzahl der Spezies und der Individuen im Lebensraum Fluss. Um dem entgegenzuwirken, wurde u. a. die Europäische Wasserrahmenrichtlinie [1] verabschiedet, die die Durchgängigkeit der Oberflächengewässer fordert.

Um diesem Eingriff in den Lebensraum Fluss durch den Menschen entgegenzuwirken, wurden vor allem in den letzten 30 Jahren eine Vielzahl von Fischaufstiegsanlagen mit unterschiedlichem Erfolg gebaut. Im diesem Kapitel werden einzelne technische Bauformen sowie deren Bemessung vorgestellt. Abschließend werden Probleme und Gründe aufgezeigt, warum derartige Fischaufstiegsanlagen in der Praxis häufig nur mangelhaft funktionieren.

Zur Überwindung der einzelnen Nachteile und vor allem zur Schallreduzierung wird in dieser Arbeit ein neuer Typ Fischpass vorgestellt. Es werden deshalb am Ende des Kapitels die Anforderungen an einen Fischpass diskutiert und daraus die

Motivation für die Arbeit abgeleitet.

2.1 Typen von Fischaufstiegsanlagen

Fischaufstiegsanlagen können prinzipiell in zwei Arten unterteilt werden. Bei naturnahen Aufstiegsanlagen wird in einem Gerinne ein natürlicher Flusslauf nachgebildet, wie ihn die Fische an anderer Stelle vorfinden. Auf diese Weise entstehen z. B. raue Rinnen und Umgehungsgerinne. Der Vorteil dieser naturnahen Bauweisen ist der geringe Gewöhnungsbedarf für Fische, da diese ähnliche Strömungsverhältnisse kennen. Die naturnahen Aufstiegsanlagen sind jedoch teils sehr platzintensiv. Ferner können nur sehr geringe Gefälle realisiert werden, was den maximal überwindbaren Höhenunterschied beschränkt.

Dieser Höhenunterschied vor allem bei Anlagen zur Wasserkraftnutzung ist meist beträchtlich. Für diese Anwendungsfälle werden technische Bauweisen benutzt, die im Folgenden einzeln vorgestellt und diskutiert werden.

2.1.1 Beckenpass

Bei einem Beckenpass wird das Wasser durch eine Reihe von Becken vom Ober- zum Unterwasser geführt. Durch Bodenöffnungen und Kronenausschnitte in den Wänden zwischen den Becken wird das Wasser von einem Becken in das nächste geleitet. Die kinetische Energie der entstehenden Strömung wird durch Einmischung in jedem Becken dissipiert, so dass die potentielle Energie stufenweise abgebaut wird. Um eine Kurzschlussströmung zu vermeiden, müssen die Bodenöffnungen und Kronenausschnitte der Zwischenwände versetzt oder weit genug auseinander angelegt werden.

Die physiologischen Restriktionen der Fische bedingen die Maximalgeschwindigkeiten v_{max} in den Becken. Da v_{max} 2,0 m/s [20] nicht überschreiten sollte, ergibt sich daraus eine maximale Wasserspiegeldifferenz von $\Delta h = v_{max}^2 / 2g = 0,20$ m. Wenn zudem die Belange von kleineren Fischen und den Benthosorganismen berücksichtigt werden, sollte $\Delta h = 0,15$ m gewählt werden, um die Selektivität des Fischpasses zu verringern.

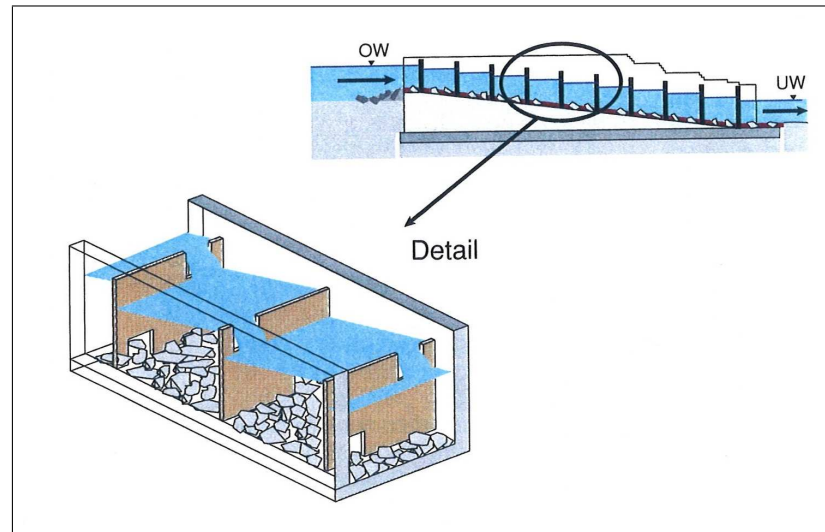


Abbildung 2.2: Beckenpass; aus [20]

Um den Rückstau einfluss σ auf den oberflächennahen Abfluss von unterstrom zu berücksichtigen, verwendet Larinier [38] folgende Gleichung mit Δh und der Überstromhöhe $h_{\ddot{u}}$:

$$\sigma = \left(1 - \left(1 - \frac{\Delta h}{h_{\ddot{u}}} \right)^{1,5} \right)^{0,385} \quad (2.1.5)$$

Diese Gleichung gilt für $0 \leq \frac{\Delta h}{h_{\ddot{u}}} \leq 1$. Ist $\frac{\Delta h}{h_{\ddot{u}}} > 1$, gilt $\sigma = 1$. Der Gesamtabfluss ergibt sich aus der Summe der Einzelabflüsse Q_s und Q_a :

$$Q = Q_s + Q_a \quad (2.1.6)$$

Um die Turbulenzen in den einzelnen Becken zu beschränken, soll die über das Beckenvolumen gemittelte Energiedissipation einen Grenzwert von $E < 150$ bis 200 W/m^3 nicht übersteigen. Dieser Wert ist aus der Betrachtung von natürlichen Gerinnen abgeleitet, in denen Fische die Turbulenzen ohne Probleme überwinden können. Dieser Wert enthält jedoch keine Aussage über die Verteilung von E in den Becken. Die Energiedissipation E kann über folgende Formel berechnet werden:

$$E = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot \Delta h}{b \cdot h_m (l_b - d)} \quad (2.1.7)$$

Beckenpässe gehören zu den ältesten Arten von Fischtrepfen und haben sich oft bewährt. Vorteilhaft ist ihre Einfachheit und ihr relativ geringer Wasserbedarf, der bei den üblichen Schlupflochabmessungen in einer Größenordnung zwischen 0,05 und 0,5 m³/s liegt [20]. Sie weisen jedoch eine hohe Gefahr der Zusetzung durch Treibgut oder Geschiebe auf und erfordern darum einen hohen Wartungsaufwand. Dies stellt ihren hauptsächlichlichen Nachteil dar. Sie werden häufig bei kleineren und mittleren Fallhöhen verwendet, wie sie bei Kulturstauen und Wasserkraftanlagen vorkommen. Mit Hilfe von Beckenpässen können bei entsprechenden Abmessungen alle Fischarten aufsteigen. Es sollte jedoch auf einen Mindestabfluss geachtet werden, um die für die Auffindbarkeit notwendige Leitströmung sicherzustellen.

2.1.2 Schlitzpässe

Der Schlitzpass oder Vertical-Slot Fischpass basiert auf dem gleichen Prinzip wie der Beckenpass, wo die Energiehöhe von Becken zu Becken abgebaut wird. Der Durchfluss wird durch einen oder zwei über die gesamte Höhe durchgehenden Schlitze an der Seite der Zwischenwände gewährleistet. Im Gegensatz zum Beckenpass werden diese jedoch immer an derselben Seite des Gerinnes angebracht.

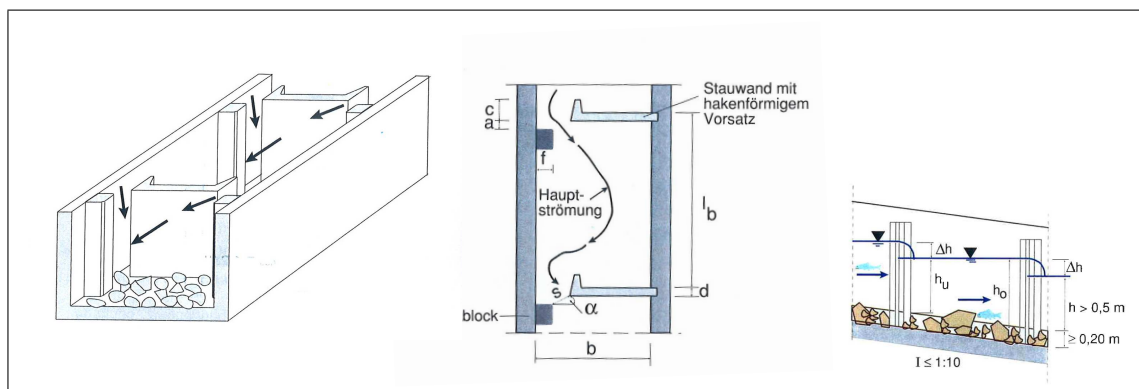


Abbildung 2.3: Schlitzpass; aus [20]

Die Gestaltung und Dimensionierung eines Schlitzpasses gleicht der eines Beckenpasses. Die Mindestschlitzweite wird über die Größe der Fische bestimmt. Die Abflüsse hängen von der Schlitzweite und Anzahl der Schlitze ab. Die Energiedissipation von $E < 200 \text{ W/m}^3$ muss ebenfalls eingehalten werden. Bei Verwendung von zwei

Schlitzten wird bei der Bemessung das durch die Symmetrieachse geteilte halbe Becken betrachtet und der ermittelte Durchfluss anschließend verdoppelt.

Bei Schlitzpässen muss grundsätzlich darauf geachtet werden, dass kein hydraulischer Kurzschluss entsteht. Der hakenförmige Vorsatz und der Umlenkblock dienen zur Umlenkung der Strömung und sollen einen Kurzschluss verhindern. Es wird auf diese Weise eine Richtungsänderung der Strömung erzeugt, die ein Mindestversatzmaß α einhalten muss. Bei kleinen Schlitzpässen ist $\alpha \geq 20^\circ$, bei großen Schlitzpässen $\alpha \geq 30 - 45^\circ$.

Aufgrund der Einengung werden die Maximalgeschwindigkeiten v_{max} kurz nach dem Schlitz erreicht. Diese dürfen 2,0 m/s nicht überschreiten. Die Fließtiefe muss im Schlitz ausreichend groß sein, so dass es nicht zu einem schießenden Abfluss im Schlitz kommt. Dazu muss die Fließtiefe im Unterwasser h_u größer als die Grenztiefe h_{gr} sein. Ebenso gilt, dass v_{max} kleiner als die Grenzgeschwindigkeit v_{gr} sein muss.

$$h_{gr} = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{gs^2}} \quad (2.1.8)$$

$$v_{max} = \sqrt{2g\Delta h} \quad (2.1.9)$$

$$v_{gr} = \sqrt{gh_{gr}} \quad (2.1.10)$$

Der Abfluss wird durch die Schlitzabmessungen bestimmt und berechnet sich nach einer modifizierten *Poleni*-Formel [20] nach:

$$Q = \frac{2}{3} \cdot \mu_r \cdot s \cdot \sqrt{2g} \cdot h_o^{3/2} \quad (2.1.11)$$

Der Bestimmung des Abflussbeiwertes μ_r erfolgt mit Hilfe von Abbildung 2.4.

So wie beim Beckenpass muss auch beim Schlitzpass eine maximale Energieumwandlung von $E < 200 \text{ W/m}^3$ gewährleistet sein.

$$E = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot \Delta h}{bh_m(l_b - d)} \quad (2.1.12)$$

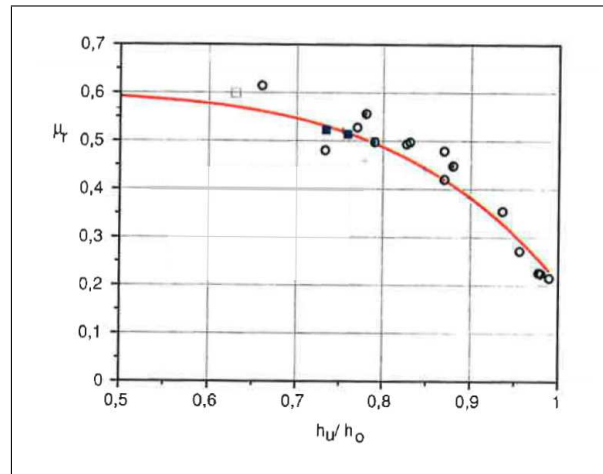


Abbildung 2.4: Abflussbeiwert $\mu_r = f(h_o, h_u)$; aus [20]

Durch seine über die gesamte Höhe reichenden Öffnungen bietet der Schlitzpass unterschiedliche Vorteile. Zum einen neigt er weniger stark durch Treibgut zu Verstopfen, wie der konventionelle Beckenpass. Zum anderen eignet er sich für den Aufstieg sowohl von bodennah lebenden Fischen als auch von Fischen in mittleren Tiefen des Beckens. Bei geeignetem Einbau von rauem Sohlensubstrat mit einzelnen großen Störsteinen können auch schwächere Fische den Pass durchqueren, da die Fließgeschwindigkeit in der Nähe des Bodens stark abnimmt. Der Schlitzpass ist daher sowohl für große als auch für kleine Abflüsse geeignet. Allerdings gestaltet es sich für einen Fisch häufig als schwierig, den Pass zu überwinden. Die Hauptströmung im Schlitz selbst ist für die meisten Fische zu stark, um direkt überwunden zu werden. Aufgrund dessen müssen die Fische eine Möglichkeit finden, die Becken durch Queren der Hauptströmung zu überwinden. Es ergaben sich dadurch teils wesentlich höhere Durchgangszeiten [50].

Der Schlitzpass stellt nach dem derzeitigen Erkenntnisstand die günstigste Bauweise dar, da seine ökologische Selektivität sehr gering ist. Er ist geeignet für wechselnde Oberwasserstände, da keine Gefahr der Überlastung besteht. Der relativ hohe Abfluss sorgt für eine gute Leitströmung, an der sich Fische rheotaktisch orientieren können. Schlitzpässe finden deshalb sowohl bei kleineren Flüssen als auch bei größeren Strömen Anwendung.

2.1.3 Denil-Pässe

Der Denil-Pass besteht aus einer geraden Rinne mit geneigten Lamellen, die Rückströmungen verursachen. Diese bremsen das Wasser soweit ab, dass ein Aufstieg für Fische möglich wird. Im unteren Bereich der konkav geformten offenen Lamellen entsteht eine niedrige Fließgeschwindigkeit, die die Fische nützen können.

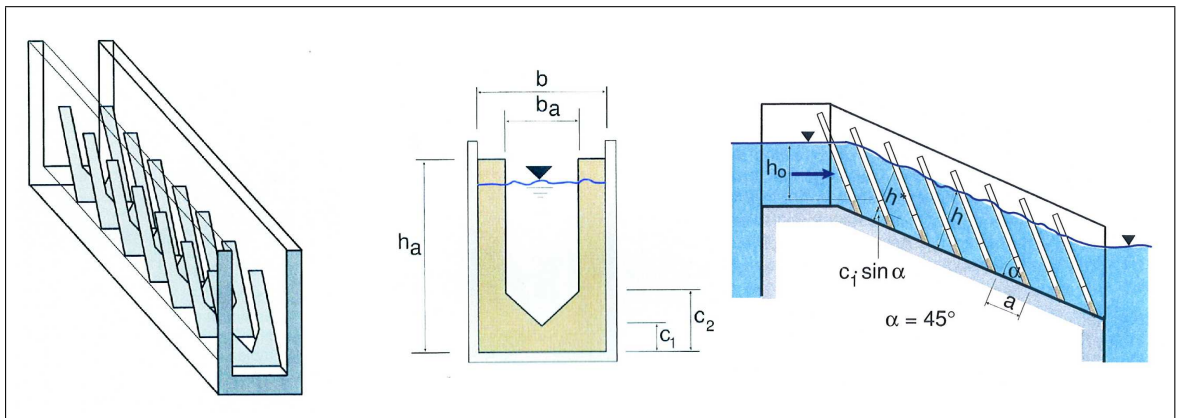


Abbildung 2.5: Denil-Pass; aus [20]

Die Denil-Pässe müssen von einem Fisch in einem Zug überwunden werden, so dass bei größeren Höhenunterschieden Ruhebecken notwendig sind. Die Länge des Gerinnebeckens sollte an den schwächsten Fisch angepasst sein, damit der Denil-Pass nicht selektierend wirkt. Bei Krümmungen müssen ebenfalls Zwischenbecken eingebaut werden, die keinen negativen Einfluss auf die Geschwindigkeit haben. Die Ruhebecken sollten sehr turbulenzarm sein mit einer mittleren Energieumwandlung von $25 \leq E \leq 50 \text{ W/m}^3$ [20].

Normalerweise betragen die Neigungen eines Denil-Passes 1 : 5 bis 1 : 10 bei einer Länge von 10 bis 12 m für z. B. Salmonide. Die Breite wird von der Größe der Zielfischarten bestimmt. Die Lamellen, die meistens aus Holz sind, werden in einem 45°-Winkel zur Gerinnesohle entgegen der Strömungsrichtung angebracht. Sie haben einen U- oder V-förmigen Ausschnitt, der den Fischen den Durchlass gewährt. Beim Ein- und Auslauf muss darauf geachtet werden, dass das Wasser parallel zur Gerinneachse ein- und ausläuft. Zusätzlich sollte der Auslauf so bemessen sein, dass

bei Niedrigwasser die Fließtiefe am Auslauf der Fischtreppe dem Unterwasserstand entspricht.

Der Denil-Pass kann nur mit empirisch gewonnenen Berechnungsansätzen bemessen werden, die nur für bestimmte Standardabmessungen gelten. Extrapolationen auf andere Gerinneabmessungen führen zu Ungenauigkeiten und sollten vermieden werden. Der Durchfluss in einem Denil-Fischpass errechnet sich zu [20]:

$$Q = 1,35 \cdot b_a^{2,5} \cdot \sqrt{gI} \cdot \left(\frac{h^*}{b_a}\right)^{1,583} \quad (2.1.13)$$

wobei sich h^* , die Fließtiefe normal zur Sohle auf die Unterkante der Lamellenausschnitte bezieht und senkrecht zur Sohle gemessen wird; h^* sollte den Wert 0,35 m nicht unterschreiten und den Relativwert $1,5 \leq h^*/b_a \leq 1,8$ einhalten. Die Abmessungen eines Ruhebeckens sollten so gewählt werden, dass die oben genannten Werte der Energieumwandlung nicht überschritten werden:

$$E = \frac{\frac{\rho}{2} \cdot Q \cdot v^2}{b_m \cdot h_m \cdot l_b} \quad (2.1.14)$$

$$v = Q/(h^* \cdot b_a)$$

Hierbei sind b_m , l_b und h_m die mittlere Breite, Länge und Fließtiefe der Ruhebecken. Aufgrund seines großen möglichen Gefälles braucht der Denil-Pass im Vergleich zu anderen Pässen wenig Platz. Ferner lässt er sich leicht im Trockenen vorfertigen. Somit eignet er sich sehr gut zur Nachrüstung von Staustufen, wo aufgrund des Platzmangels keine andere Lösung in Betracht kommt. Während der Denil-Pass gegenüber Schwankungen des Unterwasserpegels unempfindlich ist, sind im Bereich des Oberwassers nur Wasserspiegelschwankungen im Zentimeterbereich möglich. Zusätzlich hat verstopfendes Treibgut einen negativen Einfluss auf die Geschwindigkeitsverteilung im Pass, so dass er regelmäßig gewartet werden muss. Anhand mehrerer Untersuchungen an Denil-Pässen wurde festgestellt, dass der Denil-Pass gegenüber leistungsschwächeren Fischen leicht selektiv wirkt. Benthosorganismen können den Fischpass nicht überwinden, sondern nur leistungsstarke Salmonide und Cyprinide.

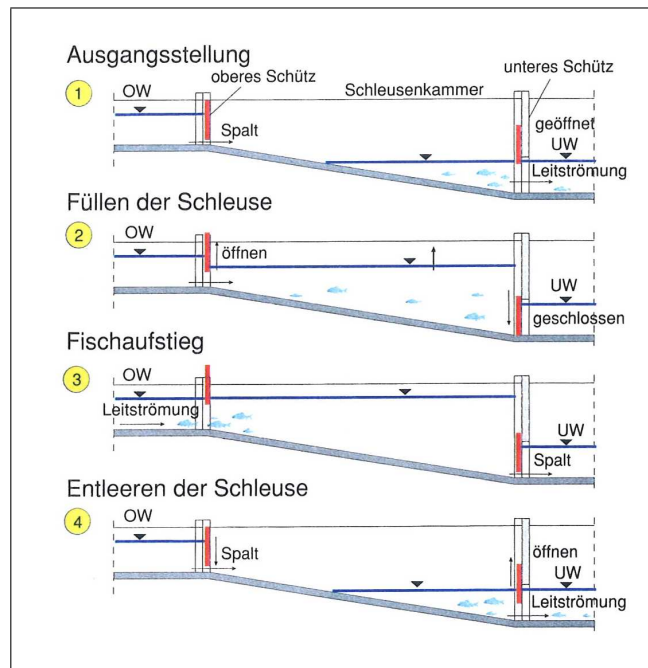


Abbildung 2.6: *Fischschleuse; aus [20]*

Somit sollte er nur dort geplant und gebaut werden, wo keine andere Lösung in Betracht kommt.

2.1.4 Fischschleusen

Fischschleusen basieren auf dem gleichen Prinzip wie Schiffschleusen. Die Fische werden durch eine Öffnung zum Unterwasser in ein Becken eingelassen. Anschließend wird diese Öffnung geschlossen und eine andere zum Oberwasser geöffnet. Durch das hereinströmende Wasser wird eine Leitströmung gebildet, welcher die Fische entgegen schwimmen. Damit verlassen die Fische das Schleusenbecken wieder. Die Öffnung zum Oberwasser wird wieder geschlossen und die Öffnung zum Unterwasser wieder geöffnet. Wieder entsteht eine Leitströmung durch das herausfließende Wasser, an welcher sich die Fische orientieren können.

Der Unterschied der Fischschleusen zu Schiffschleusen besteht in der Leitströmung. In Schiffschleusen haben Fische keine Leitströmung, an der sie sich orientieren können. Zusätzlich entstehen in den Schleusenbecken beim Ein- und Auslauf hohe Turbulenzen, welche die Fische behindern. Somit kann eine Schiffsschleuse grundsätzlich

keine Fischaufstiegsanlage ersetzen.

Die Fischschleuse hat den Vorteil, dass sie sowohl für leistungsschwache wie auch für große Fische wie den Stör einsetzbar ist. Sie braucht für große Höhenunterschiede wenig Platz und ist somit für räumlich begrenzte Vorhaben empfehlenswert. Ferner kann sie für die Fische sowohl als Aufstiegs-, als auch als Abstiegsanlage genutzt werden. Allerdings ist sie durch ihre Schließ- und Öffnungsmechanismen an den Schleusenein- und -ausgängen im Gegensatz zu herkömmlichen Aufstiegsanlagen aufwändig im Unterhalt.

2.1.5 Fischaufzüge

Bei einem Fischaufzug werden mit Hilfe einer Wanne Fische von unten nach oben befördert. Die Wanne wird im Unterwasser in die Gewässersohle versenkt. Durch einen Bypass wird eine Leitströmung erzeugt, welche die Fische unmittelbar über die Wanne lockt. Anschließend wird den Fischen mittels einer Klappe der Rückweg versperrt und die Wanne angehoben, bis sie sich knapp oberhalb des Oberwassers befindet. Anhand eines Auslasses im Wannensboden werden die Fische in das Oberwasser geleitet.

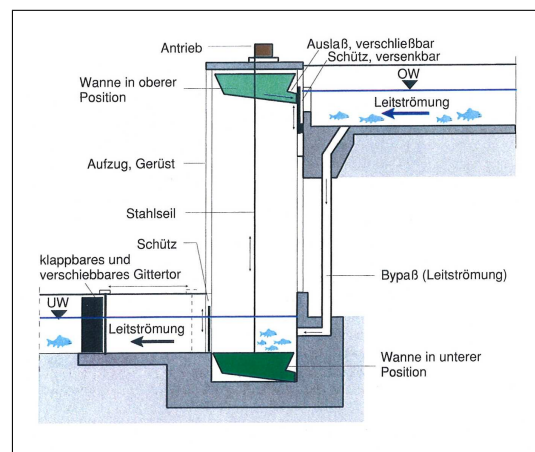


Abbildung 2.7: Fischaufzug; aus [20]

Durch den Fischaufzug können sehr große Höhenunterschiede auf kurzem Weg überwunden werden, womit dieses Anlagendesign für große Talsperren empfehlenswert ist. Zusätzlich genügt ein im Vergleich zu herkömmlichen Anlagen geringer Durchfluss. Dadurch, dass die Fische vertikal befördert werden, hat die Anlage

für leistungsschwache Fische keine selektierende Wirkung und eignet sich für alle Fischgrößen. Der Betrieb kann automatisiert und die Anzahl der Beförderungen pro Zeiteinheit auf den jeweiligen Wanderzyklus angepasst werden. Nachteilig ist, dass die Anlage auf wechselnde Pegelschwankungen des Unterwassers empfindlich reagiert, da sie die Leitströmung oberhalb der Wanne gefährdet. Ferner ist der Unterhalt für diese Aufstiegsart im Vergleich zu den konventionellen Fischaufstiegsanlagen aufwändig.

2.1.6 Transport per LKW

In vereinzelt Fällen kann es ökonomisch sinnvoll sein, statt des Baus einer technischen Aufstiegsmöglichkeit den Transport der Fische mit LKW zu bewerkstelligen [46]. Wie beim System der Fischaufzüge wird oberhalb einer in der Gerinnesohle befindlichen Wanne eine künstliche Leitströmung erzeugt, die die Fische anzieht. Wenn den Fischen durch ein Tor der Rückweg versperrt wird, kann die Wanne mit den Fischen mit Hilfe eines Kranes aus dem Wasser gehoben und auf einen LKW verladen werden, der die Fische nach dem Transport oberstrom wieder in das Wasser entlässt.

Die Methode der Verladung der Fische auf LKW kann vor allem bei sehr beengten Verhältnissen ökonomisch als Alternative zu den anderen technischen Anlagen betrachtet werden. Ökologisch ist der summierte Energieaufwand der LKWs geringer, als der durch den Bau und den Unterhalt eines des Fischpasses notwendige Energieaufwand, auch bei Betrachtung von sehr langen Laufzeiten. Häufig jedoch ist die Akzeptanz dieser Methode in der Bevölkerung so gering, dass sie als ökologisch nicht sinnvoll betrachtet wird.

2.2 Motivation und Aufgabenstellung

In den bisherigen Abschnitten der Arbeit wurde in die Physiologie der Fische und die aktuellen technischen Lösungen zur ökologischen Durchgangsproblematik eingeführt. Auf Grundlage dieser Einführungen soll im Folgenden die Problemstellung der Arbeit abgeleitet werden.

Bei den meisten technischen Fischpässen kommt es zu einem Lufteintrag in das Wasser. Dieser Lufteintrag führt zu einer Geräuscentwicklung (Rauschen) sowohl über als auch unter Wasser. Dieses Rauschen stellt vor allem im urbanen Umfeld ein immer größer werdendes Problem dar. Da Fischaufstiegsanlagen ortsfeste Konstruktionen darstellen, fallen die von ihnen ausgehenden Schallemissionen unter die „Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm“ (TA Lärm [2]), einer Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz. So darf die Schallemission von derartigen Anlagen in Mischgebieten nachts lediglich 45 dB betragen. Die erste Frage der im Rahmen der vorliegenden Arbeit nachgegangen werden soll ist:

Gibt es eine geänderte Bauweise von Fischaufstiegsanlagen, die in Hinblick auf Schallentwicklung, Bauweise und Selektivität Vorteile gegenüber den herkömmlichen Bauweisen besitzt?

Um diesen Lufteintrag zu vermeiden und so die Geräuscentwicklung zu unterbinden, kann man die Energie mit Hilfe von Schützen mit rückgestautem Abfluss umwandeln. Im Rahmen der Arbeit wird eine neuartige Fischaufstiegsanlage auf der Grundlage von dieser Schützen vorgestellt und untersucht. Da sich Fische über den Schall in der Strömung orientieren können, kann sich ein Zusammenwirken von Schall und Leitströmung durchaus positiv auf die Auffindbarkeit der Anlagen auswirken. In der Anlage hingegen kann der Schall einen störenden Einfluss auf den Aufstieg haben. In den Becken wird der Schall von den Wänden reflektiert, was eine hohe Lautstärke zur Folge hat. Dies kann dazu führen, dass Raubfische, die vereinzelt Fischtreppe als Lebensraum nutzen [3], verzögert wahrgenommen werden. Diese Verzögerung dürfte sich negativ auf die Wahrscheinlichkeit einer erfolgreichen Passage der Fischtreppe auswirken. Die Beziehung zwischen dem Schall in den Becken und

der Funktionstauglichkeit sollte daher in weiteren Arbeiten und Studien untersucht werden.

Aufgrund der Vielzahl bereits bestehender Fischpässe kann man heute bei Fischaufstiegsgerinnen auf einen enormen Erfahrungsschatz in Hinblick auf Wirkungstauglichkeit und Hydraulik zurückgreifen. Demnach sollte es eine gute Übereinstimmung zwischen prognostizierten und tatsächlichen Zuständen geben. Da jedoch jede Fischaufstiegsanlage in ihrer Struktur einen Prototyp darstellt, der auf die speziellen örtlichen Verhältnisse ausgelegt werden muss, ist bereits die Übereinstimmung der Wirksamkeit von baugleichen Fischpässen an unterschiedlichen Orten nicht mehr gegeben. In jüngerer Zeit wurde in Südamerika versucht, europäische oder amerikanische Fischpässe zu kopieren. Es hat sich jedoch herausgestellt, dass sowohl die hydraulischen Verhältnisse als auch die Akzeptanz derartiger Anlagen nicht mit dem Original übereinstimmen. So hat z. B. Viana [50] in ihrer Untersuchung eines Schlitzpasses herausgefunden, dass es zu periodischen Wasserspiegelschwankungen mit einer Frequenz von 50 Sekunden kommt, die am Originalbauwerk nicht zu finden waren. Der Grund hierfür könnte im Gegensatz zum Original die größere Länge des Fischpasses sein, wo der stabilisierende Einfluss des Ober- und Unterwasserstandes deutlich geringer ist als im untersuchten Fischpass.

Im Vorfeld des Baus einer derartigen Anlage können heute numerische Hilfsmittel dazu benutzt werden, um die einzelnen Strömungsverhältnisse in den Becken zu untersuchen. Aus den Berechnungen ergibt sich eine wesentlich bessere Vorhersagbarkeit der Strömungsverhältnisse [28]. Da diese numerischen Techniken jedoch erst in den letzten Jahren im Zusammenhang mit Fischaufstiegsanlagen eingesetzt werden, soll im Rahmen der Arbeit weiterhin folgender Frage nachgegangen werden:

Können numerische Methoden wie RANS oder LES dazu benutzt werden, die Vorhersagbarkeit der Strömungsverhältnisse von Fischaufstiegsanlagen zu erhöhen und wenn ja, wie hoch ist der Nutzen der numerischen Methoden?

In der vorliegenden Arbeit werden zur Beantwortung dieser Fragestellung neben experimentellen Versuchen zahlreiche numerische Ergebnisse präsentiert und diskutiert.

Die wohl wichtigste Frage beim Bau eines Fischpasses ist die Frage, für welche Lebewesen er wirksam sein soll. Die weitest verbreitete Auslegungsweise ist die Definition von so genannten Zielfischarten, die meist in der Ordnung der Salmoniden oder Cypriden zu finden sind. Bei der Argumentation für die Notwendigkeit von Fischpässen wird hierbei häufig mit den großräumigen Wanderbewegungen von Salmoniden argumentiert. In Deutschland hingegen wird von den verantwortlichen Gremien die Auffassung einer ganzheitlichen Verbesserung der ökologischen Situation für alle Lebewesen, also auch für kleinere Fische und Benthosorganismen, vertreten. Dieser Ansatz stellt weit komplexere Anforderungen an die Bauweise und den Betrieb von Fischpässen, und geht weit über die reine Notwendigkeitsbetrachtung z. B. durch die Europäischen Wasserrahmenrichtlinie [1] hinaus.

Im Gegensatz zu den Biologen sind die beteiligten Ingenieure häufig in ein Netz von Bemessungsregeln und ökonomischen Zielvorgaben verflochten. Die zu planenden Fischaufstiegsgerinne sollen dabei möglichst effizient sein. Effizienz bedeutet in diesem Zusammenhang, dass sowohl die Kosten in der Herstellung mit der Maximierung des Gefälles, der Minimierung des Platzbedarfs und der Möglichkeit der Vorfertigung von einzelnen Bauteilen als auch die Kosten im Betrieb durch möglichst wenig Durchfluss und wenig Unterhaltsmaßnahmen minimiert werden sollen. In der folgenden Abbildung ist der zu lösende Zielkonflikt zwischen den beiden Disziplinen dargestellt:

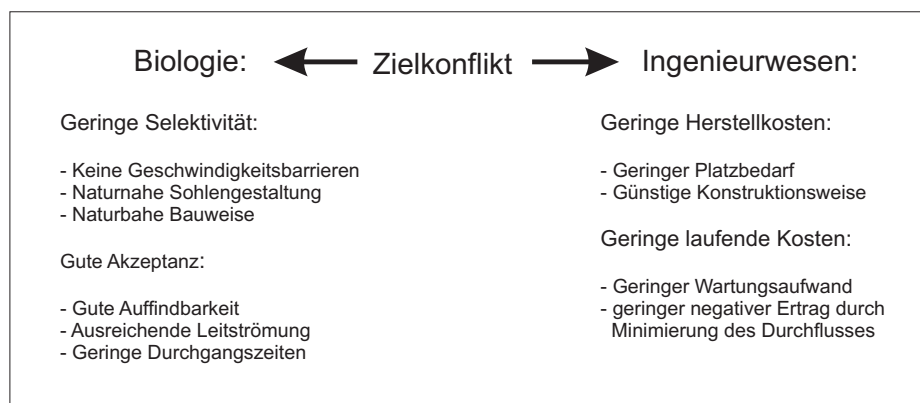


Abbildung 2.8: Zielkonflikte zwischen Biologen und Ingenieuren bei der Planung einer Fischaufstiegsanlage

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit soll untersucht werden, in wie weit moderne Ingenieurmethoden genutzt werden können, um diesen Zielkonflikt zu lösen. Die

zugehörige Frage lautet:

Können numerische Methoden helfen, durch ihre Anschaulichkeit die Diskussion zwischen Biologie und Ingenieurwesen zu verbessern und damit die Zielkonflikte zu minimieren?

Bei der Dimensionierung von Fischpässen werden wie vorgestellt eindimensionale Bemessungsformeln angewendet. In der Praxis hat sich dabei gezeigt, dass vereinzelte Fischpässe, die nach den aktuellen Regeln der Technik ausgelegt waren, nicht wirksam waren, weil dreidimensionale Effekte wie Kurzschlussströmungen zu hohen Geschwindigkeiten in den Becken führen können. Weiterhin hat sich gezeigt, dass die Verteilung der Strömungsgrößen wie Geschwindigkeit und Energiedissipation einen entscheidenden Einfluss auf die Funktionstauglichkeit eines Fischpasses hat. Da sich Fische in den Fluidströmungen bewegen, müssen diese auch lokal auf Bedürfnisse der Zielorganismen abgestimmt sein. Der Einsatz von numerischen Simulationswerkzeugen bietet hierbei den Vorteil, dass neben den Geschwindigkeitsverteilungen auch Verteilungen von turbulenten Größen in den Strömungen zugänglich sind. Es können somit auch kohärente Wirbelstrukturen in der Strömung identifiziert und deren Einfluss auf den Fischaufstieg diskutiert werden, was den Planungserfolg immens erhöhen könnte. In den folgenden Abschnitten der Arbeit wird gezeigt werden, dass die numerischen Ergebnisse eine verbesserte konstruktive Diskussion zwischen Biologen und Ingenieuren in der Planungsphase erlauben und damit einen höheren Erfolg versprechen als die bisherige Auslegung anhand von Plänen und vereinzelten skalierten Laborversuchen.

Kapitel 3

Fischpass Typ *periodische Schütze*

3.1 Einführung

Bei der Analyse von traditionellen Fischtreppen fällt auf, dass es sowohl bei Becken- als auch bei Schlitzpässen zu Lufteinmischungen über die Grenzfläche Luft-Wasser kommt. Luft wird an der Grenzfläche Luft-Wasser beim Eintauchen eines Wasserstrahls in das Wasser mitgerissen. Das Auftreffen des Strahls auf die Wasseroberfläche und der Lufteintrag sind die Ursache für den entstehenden Luftschall [16]. Die Luft wird im Medium Wasser aufgrund von turbulenten Scherkräften in kleinere Blasen zerteilt. Die entstehenden kleineren Blasen schwingen nach ihrer Entstehung um ihr Zentrum, bis die Schwingung durch das Wasser gedämpft ist. Diese Schwingungen sind die primäre Ursache für den Unterwasserschall (vgl. Deane [17]). Sind die Blasen schließlich so klein und stabil, dass sie durch turbulente Scherkräfte nicht weiter zerkleinert werden könnten, schwimmen sie aufgrund des Auftriebs an die Wasseroberfläche und verlassen das Wasser. Dieses Aufschwimmen führt nicht mehr zu erhöhtem Schall.

Zu starke Schallemissionen stellen sowohl über als auch im Wasser unerwünschte Umweltbedingungen dar. Der Luftschall in der Nähe von Wasserbauwerken wird vor allem im Umfeld von bebauten Gebieten als wachsendes Problem empfunden. Wasserbauwerke stellen technische Konstruktionen dar, in deren Umfeld die technischen Richtlinien und Grenzwerte für Schallemissionen gelten [2]. Der Unterwasserschall beeinflusst hingegen nur die im Wasser lebenden Organismen. Wie im einführenden Kapitel über Fischphysiologie dargestellt, orientieren sich Fische im Wasser auch

anhand von Schall, der sie sowohl anlocken als auch verscheuchen kann. Da der Schall also vielfältige Auswirkungen hat, sollten die Schallpegel von künstlichen Schallemissionen begrenzt werden. Dadurch wird verhindert, dass natürliche lebensnotwenige oder -feindliche Schallquellen durch künstliche starke Schallquellen überlagert werden. Diese Überlagerung kann dazu führen, dass Hindernisse oder Fressfeinde nicht oder zu spät wahrgenommen werden.

Um die Schallentwicklung im Umfeld von Wasserbauwerken zu vermeiden oder zu reduzieren, gibt es verschiedene Ansätze. Boes und Ötzbrugger [9] verringern mit Hilfe von Gabionen (mit Steinen gefüllte Drahtkörbe) den oberflächennahen Abfluss und verringern dadurch die Schallemission von Wehren. Durch diese technische Maßnahme wird ein Großteil des Durchflusses im Rahmen einer Sickerströmung durch das Wehr geführt. Durch den verminderten Abfluss über das Gabionenwehr reduziert sich die ökologische Durchgängigkeit des Fließgewässers jedoch deutlich.

Eine weitere Möglichkeit, die Energie einer Freispiegelströmung schallarm in Wärme umzuwandeln, ist das Schütz mit rückgestautem Abfluss. Es entwickelt sich aufgrund der Öffnung einer Schützwand ein am Boden anliegender Flüssigkeitsstrahl. Da die Strömung rückgestaut ist, kommt es beim Einmischen des Strahls zu keiner Lufteinmischung und deshalb zu keiner Lärmentwicklung. Auf diese Art und Weise können jedoch nur kleine Höhenunterschiede überwunden werden, da mit dem steigenden Höhenunterschied der Impulsstrom des Ausflusses steigt. Wenn dieser Impulsstrom den hydrostatischen Druck der Rückstauung übersteigt, bildet sich ein Schussstrahl mit freiem Wechselsprung aus.

Um diesen Effekt zu vermeiden, kann man den zu überwindenden Höhenunterschied mit Hilfe einer Mehrfachanordnung von Schützen mit rückgestautem Abfluss schrittweise überwinden. Bei einem einfachen Hintereinanderschalten von mehreren Schützen kommt es zu einem hydraulischen Kurzschluss. Der Schussstrahl des ersten Schützes gelangt in den Einflussbereich der weiteren Schütze, die dann hydraulisch unwirksam werden.

Um die Wirkung der Schütze zu entkoppeln, müssen zwischen den Schütztafeln Prallwände angeordnet werden, so dass es bei jeder der Schütztafeln zu einem

vollständigen Einmischen des Schussstrahls kommt. Die folgende Abbildung zeigt das grundlegende System:

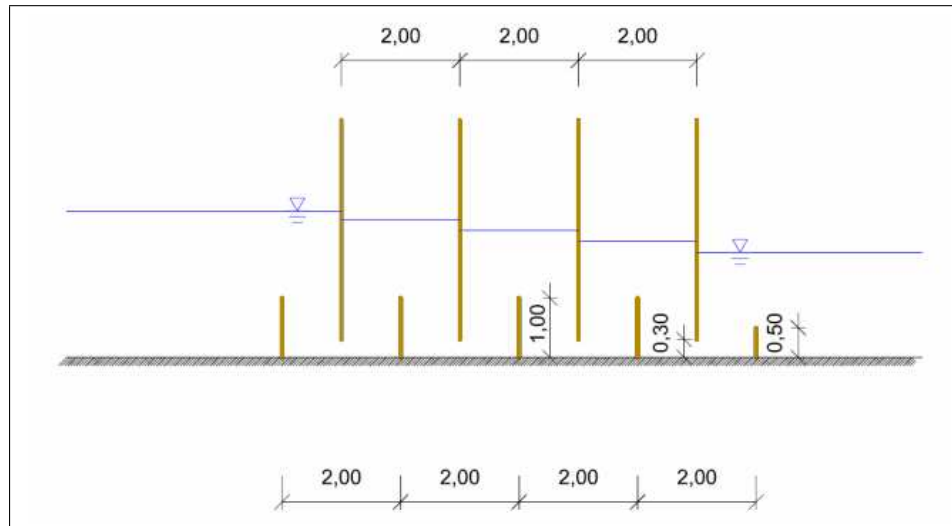


Abbildung 3.1: *Neuartiges System*

Im folgenden Kapitel wird das neue System der periodischen Schütze eingehend untersucht. Ausgehend von Bemessungsregeln aus der Literatur für Schütze mit rückgestautem Abfluss und anhand von Analogien aus der Strahlhydraulik sollen die Vorgänge im neuen System phänomenologisch analysiert werden.

Zur Diskussion der Akzeptanz durch Fische wurde für das System ein Laborversuch im Maßstab 1 : 5 im Rahmen eines Auslandsaufenthaltes an der Bundesuniversität von Minas Gerais in Brasilien gebaut. Es wurden biologische Versuche mit drei in Brasilien repräsentativen Fischarten gemacht. Hierbei wurden jeweils mehrere Fische einer Art bei einem definierten Durchfluss in das Testgerinne eingesetzt und deren Verhalten während einer Dauer von 120 Minuten aufgezeichnet.

Zur Bestimmung der strömungsphysikalischen Zusammenhänge im neuen System wurde ein weiterer Laborversuch an der Technischen Universität München aufgebaut. Es wurden bei definierten Randbedingungen die Fließtiefen an unterschiedlichen Orten im Versuchsgerinne gemessen. Damit können Aussagen über den Einfluss der Randbedingungen auf das Strömungsfeld getroffen werden.

Als Ergänzung zu den Laborversuchen wurde mit Hilfe von numerischen Simulationen der Einfluss von geometrischen Parametern auf das Strömungsfeld untersucht. Eine detailliertere Simulationsmethode, die so genannte Large Eddy Simulation, erlaubt den Zugang zu instationären Strömungsgrößen und turbulenten Strukturen in der Strömung.

Am Ende des Kapitels werden verschiedene anwendungsspezifische Gesichtspunkte erörtert. Neben der Vorstellung einer geometrischen Variation, die die Belange von kleineren Fischen und anderen wirbellosen Lebewesen berücksichtigt, wird eine Bemessungshilfe für Ingenieure präsentiert, mit deren Hilfe die maximalen Geschwindigkeiten und Durchflüsse bereits in der Planung einer derartigen Anlage vorhergesagt werden können.

3.2 Theoretische Überlegungen zur Ableitung des hydraulischen Verlustes

Im vorliegenden Abschnitt werden zwei ingenieurmäßige Herangehensweisen für die Beschreibung des hydraulischen Verlustes in der Strömung beschrieben.

Zum einen können, sofern möglich, für die ingenieurmäßige Dimensionierung der Strömungsgrößen, wie Durchfluss oder Geschwindigkeit, die gängigen Bemessungsregeln angewendet werden. Im Fall des Systems der periodischen Schütze wird der Berechnungsgang für Schütze mit rückgestautem Abfluss, der auf der Grundlage der Beschreibung von Verlust- und Kontraktionskennwerten basiert, auf dessen Anwendbarkeit analysiert.

Eine andere Möglichkeit der Untersuchung der Strömungsverhältnisse in der neuen Fischtreppe besteht darin, dass man die Strömung bereichsweise phänomenologisch untersucht. Für diese einzelnen Bereiche erhält man schließlich Teilverlustbeiwerte, die es zu addieren gilt. In der vorliegenden Strömung können neben dem Bereich kurz nach dem Schütz, in dem der am Boden anliegende Schützstrahl entsteht, der Bereich der Strahlumlenkung oder der Bereich der Strahlablösung identifiziert werden. Diese bereichsweise Untersuchung von Flüssigkeitsstrahlen geht auf Kraatz [36] zurück, der dies exemplarisch für rückgestaute Ablüsse im Tosbecken durchgeführt hat.

3.2.1 Verluste bei der Unterströmung von Schützen

Der Durchfluss unter Schützen wird in der Literatur im Allgemeinen durch einen Energiehöhenvergleich nach Bernoulli (siehe Abb. 3.2) zwischen ober- und unterstrom der Schütztafel ermittelt. Da die Berechnung des Durchflusses bei rückgestauten Schützen meist aus einer Abminderung des Durchflusses bei vollkommenem Abfluss unter Schützen geschieht, wird zuerst die Bemessung bei vollkommenem Abfluss vorgestellt, der Bollrich [11] und Heinemann [29] entnommen ist.

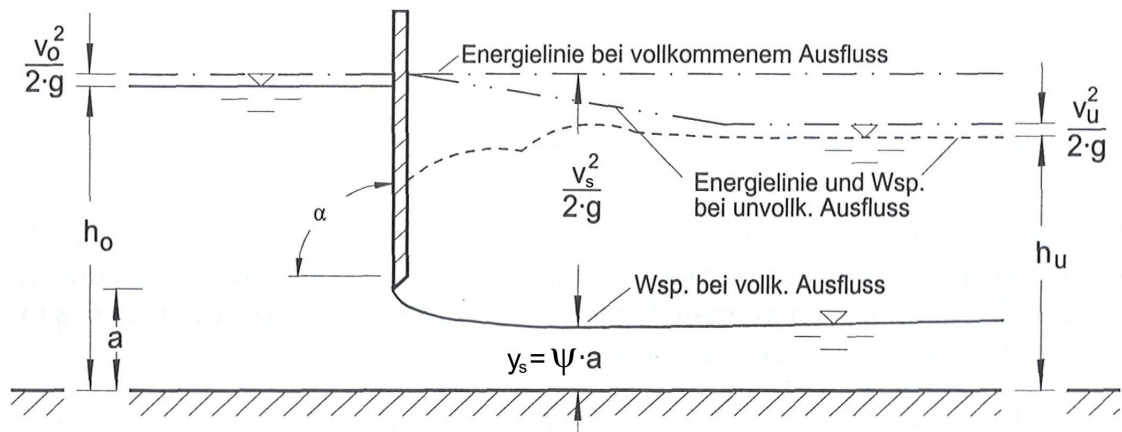


Abbildung 3.2: Vollkommener und unvollkommener Ausfluss unter einer vertikalen Schütztafel (nach [29])

Bei einer horizontalen Sohle gilt nach Bernoulli

$$\frac{v_o^2}{2 \cdot g} + h_o = \frac{v_s^2}{2 \cdot g} + \psi \cdot a, \quad (3.2.1)$$

wobei ψ die Kontraktionsziffer des Schützstrahls ist. Nach Berücksichtigung der Kontinuitätsbedingung und mehreren Umformungen erhält man die Geschwindigkeit v_s

$$v_s = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\psi \cdot a}{h_o}}} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h_o} \quad (3.2.2)$$

und den Durchfluss Q

$$Q = A_s \cdot v_s = \frac{\psi \cdot a \cdot b}{\sqrt{1 + \frac{\psi \cdot a}{h_o}}} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h_o}. \quad (3.2.3)$$

Die Kontraktionsziffer ψ hängt vom Öffnungsverhältnis a/h_o und vom Winkel α der Schützwand ab (Tab.3.1).

Öffnungsverhältnis a/h_o	$\psi[-]$
0,1	0,612
0,3	0,622
0,5	0,644

Tabelle 3.1: Kontraktionswert ψ eines vertikalen Schützes in Abhängigkeit vom Öffnungsverhältnis a/h_o

Häufig wird die Gleichung durch die Einführung einer Abflussziffer μ_a vereinfacht:

$$Q = \mu_a \cdot a \cdot b \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h_o} \quad \text{mit} \quad \mu_a = \frac{\psi}{\sqrt{1 + \frac{\psi \cdot a}{h_o}}}. \quad (3.2.4)$$

Der Ausfluss unter einem Planschütz wird als unvollkommen bezeichnet, wenn der Unterwasserstand den Abfluss beeinflusst. Über theoretische Überlegungen kann man einen maximalen Unterwasserstand $h_{u,max}$ herleiten, der zur Strahltiefe y_s die konjugierte Fließtiefe darstellt [29]:

$$\frac{h_{u,max}}{a} = \frac{\psi}{2} \cdot \left[\sqrt{1 + \frac{16 \cdot \frac{h_o}{a}}{\psi \cdot \left(1 + \psi \cdot \frac{a}{h_o}\right)} - 1} \right]. \quad (3.2.5)$$

Der unvollkommene Ausfluss unter Planschützen wird aus dem vollkommenen Ausfluss durch Berücksichtigung eines Abminderungswertes κ berechnet .

$$Q_{unvoll} = \chi \cdot Q_{vollk} \quad (3.2.6)$$

der Faktor χ errechnet sich hierbei zu [29]:

$$\chi = \sqrt{m - \sqrt{m^2 - 1 + \left(\frac{h_u}{h_o}\right)^2}} \quad (3.2.7)$$

$$\text{mit } m = 1 - \frac{2 \cdot \psi \cdot \frac{a}{h_o}}{1 + \psi \cdot \frac{a}{h_o}} + \frac{2 \cdot \psi^2 \cdot \frac{a}{h_o}}{1 + \psi \cdot \frac{a}{h_o}} - \frac{a}{h_u} \quad (3.2.8)$$

Valentin [48] zeigt eine weitere Möglichkeit der Bemessung eines rückgestauten Schützes auf. Mit Hilfe der Oberstromfließtiefe h_o und des Sohl Druckes p_a unter der Schützöffnung a ergibt sich:

$$q = a \cdot \sqrt{g \cdot a} \sqrt{\frac{2n^2}{\kappa^2 n^2} \left(n - \frac{p_a}{\rho g a} \right)} \quad (3.2.9)$$

Für ein Öffnungsverhältnis $a/h_o \leq 0,5$ kann $\kappa = 1,16$ gesetzt werden. Ferner gilt:

$$0,575n + 0,325 \leq \frac{p_a}{\rho g a} \leq n. \quad (3.2.10)$$

Der untere Grenzwert stellt hierbei den Zustand des vollkommenen Abflusses unter einem Schütz dar, wohingegen der obere Grenzwert den Wasserspiegelausgleich markiert.

Die gezeigten Bemessungsmethoden berechnen den Abfluss bei rückgestauten Schützen aufgrund der Annahme einer uniformen Zuströmung zum Schütz. Diese Zuströmung beeinflusst maßgeblich die Form des sich einstellenden Schussstrahls und somit die Kontraktionsziffer ψ und die Strahltiefe y_s .

In der Fischaufstiegsanlage von Typ periodische Schütze kommt es aufgrund der Strahlführung zu einer stärkeren Kontraktion des Schützstrahls als dies bei der ungestörten Zuströmung der Fall ist. Des Weiteren kann aus den Bemessungsformel nicht abgeleitet werden, ob und wie sich die Schütze gegenseitig beeinflussen, bzw. inwieweit sie unabhängig voneinander sind. Die gezeigten Bemessungsformeln sind daher in diesem speziellen Fall der periodischen Schütze nur für eine erste Abschätzung anwendbar. In den folgenden Abschnitten des Kapitels werden für eine genauere Berechnung Bemessungsmöglichkeiten erarbeitet, die einen direkten Zusammenhang zwischen den Energiehöhen, der Geometrie und der sich entwickelnden Strömung herstellen.

3.2.2 Bereichsweiser Vergleich mit den Ergebnissen der Strahlhydraulik

Für einen besseren Zugang zu den einzelnen Strömungsvorgängen wird das Becken im folgenden Abschnitt phänomenologisch in unterschiedliche Bereiche unterteilt (Abb. 3.3). Wie in der Abbildung zu erkennen ist, können auf diese Weise u. a. der Schützstrahl, die Strahlumlenkung, die Einmischung des Wandstrahls sowie zwei Rezirkulationszonen identifiziert werden. Eine vollständige Liste der einzelnen Bereiche ist in Tabelle 3.2 zusammengestellt.

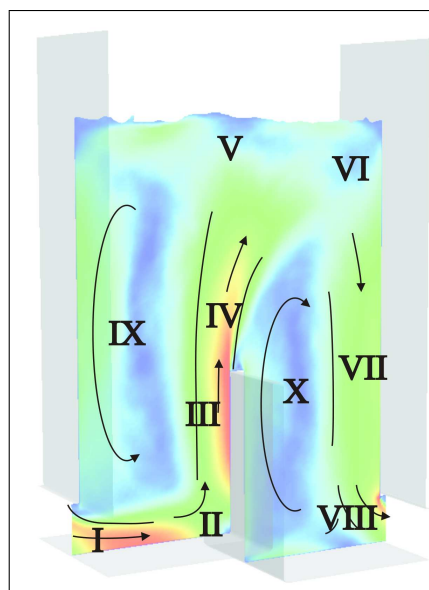


Abbildung 3.3: Unterteilung der Strömung in Einzelströmungsvorgänge

Bereich	Beschreibung
I:	Ausfluss unter einem Schütz mit Strahlkontraktion
II:	90° Umlenkung eines Strahls
III:	Angelegter Wandstrahl
IV:	Zurückspringende Stufe
V:	Ablenkung des Strahls durch eine seitliche Strömung und evtl. Auftreffen auf die Wasseroberfläche
VI:	Senkrechtes Auftreffen eines Strahls auf eine Wand
VII:	Angelegter Wandstrahl
VIII:	Senkrechtes Auftreffen eines Strahls auf eine Wand überlagert mit einer seitlichen Strömung
IX:	Rezirkulationsgebiet
X:	Rezirkulationsgebiet

Tabelle 3.2: Unterteilung der Strömung in Einzelströmungsvorgänge

Die Analyse der strömungsphysikalischen Zusammenhänge in den einzelnen Bereichen erlaubt die Energieverluste einzelnen Strömungszuständen zuzuordnen. Weiterhin können aufgrund der präsentierten Überlegungen die Auswirkungen von Geometrieänderungen auf das Strömungsfeld vorhergesagt werden, was bei der Dimensionierung mit Bemessungsformeln, die im vorherigen Abschnitt vorgestellt wurden, nur beschränkt möglich ist. In den folgenden Ausführungen wird die eindimensionale Strahlhydraulik mit Simulationsergebnissen (RANS) sowie mit experimentellen Ergebnissen (beide im Vorgriff) verglichen.

In der Mitte des betrachteten Beckens ($l \times b = 2,20 \times 1,00 \text{ m}$) (Abb. 3.3) befand sich eine Prallwand der Höhe 1,00 m. Das Becken war dabei Teil einer sehr langen Anlage, so dass nur ein in der Mitte liegendes repräsentatives Becken betrachtet werden musste. Die in den Becken entstehende Energiehöhendifferenz betrug 0,20 m, was einer maximalen Geschwindigkeit im Strahl von etwa 2,0 m/s entspricht. Um vergleichmäßigte Verhältnisse im Versuchsbecken zu gewährleisten, wurde eine mittlere Fließtiefe von 2,50 m gewählt. Auf die numerischen Simulationen

der Fischtreppe wird im Abschnitt 5 ausführlich eingegangen. Es wird daher an dieser Stelle auf eine detaillierte Beschreibung der Simulationen verzichtet.

Aus den Simulationsergebnissen wurden numerisch die Werte für die Geschwindigkeitsverteilung sowie für geometrische Abmessungen wie die Dicke des Schützstrahls ermittelt. Die gefundenen Parameter wurden anschließend unter anderem mit den Ergebnissen aus der Strahlhydraulik nach Kraatz [36] verglichen. Kraatz betrachtet dabei lediglich glatte Wände und mittlere Geschwindigkeitsfelder. Andere Einflüsse auf das Strömungsfeld wie z. B. die Wandmaterialien werden dabei nicht berücksichtigt. Die für den Vergleich herangezogenen numerisch ermittelten Werte sind dabei nur als Anhaltswerte für die Argumentation zu verstehen. Sie werden jedoch als ausreichend genau betrachtet, da die funktionalen Zusammenhänge von Kraatz durch die geschilderte Vernachlässigung ebenfalls nur als Richtwert zu verstehen ist.

3.2.2.1 Bereich I: Strahlkontraktion und angelegter Wandstrahl

Im Bereich 1 des Beckens bildet sich aufgrund der Unterströmung der Schützwand ein Freistrahл, der sich am Boden anlegt. Der Strahl wird bei der Bildung kontrahiert und beschleunigt. Sowohl in den numerischen Simulationen als auch in den durchgeführten Laborexperimenten haben sich Kontraktionswerte ψ in der Größenordnung von 0,45 ergeben. Im Folgenden werden die vorliegenden Strömungsverhältnisse mit dem theoretischen Strömungsfeld nach Kraatz verglichen, wie es in Abbildung 3.4 abgebildet ist.

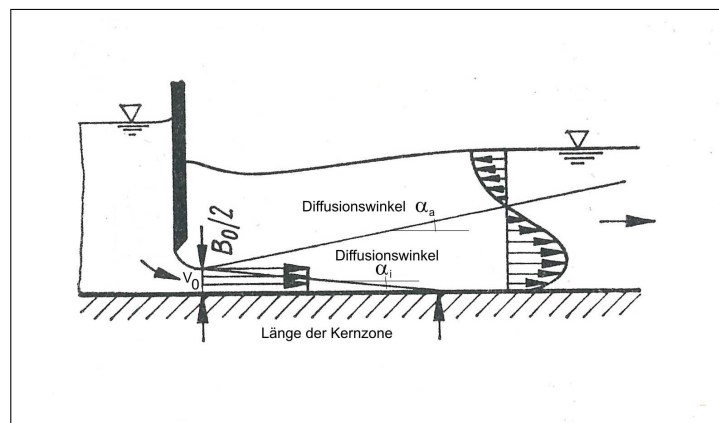


Abbildung 3.4: Strömungsfeld des rückgestauten Schützstrahls nach Kraatz [36]

Die maximale Geschwindigkeit des Wandstrahls liegt bei etwa $v_0 = \sqrt{2g\Delta h}$ (siehe Kap. 2). Da dies etwa der Umwandlung der gesamten potentiellen Energie in kinetische Energie entspricht, können die in der Zuströmung und Ausbildung des Schützstrahls entstehenden Energieverluste als sehr klein und deshalb vernachlässigbar betrachtet werden.

Die Strahleinschnürung ist bei $x = 16,8$ cm gemessen von Rückseite der Schützwand abgeschlossen (Abb. 3.5). Die Strahldicke beträgt an dieser Stelle 13,5 cm, was nach Kraatz $B_0/2$ entspricht.

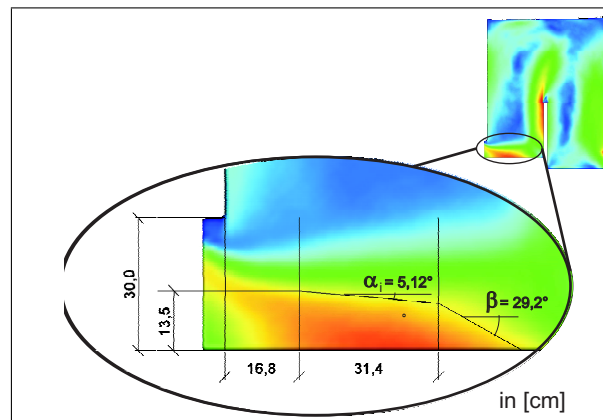


Abbildung 3.5: Dimensionen der Strahleinschnürung und des angelegten Wandstrahls im verwendeten Versuchsbecken. Darstellung der maximalen mittleren Geschwindigkeit.

Da sich ein Wandstrahl langsam in das umgebende Fluid einmischet, wird die Breite des Bereiches mit ursprünglicher Strahlgeschwindigkeit, die Kernzone, kontinuierlich kleiner. Die maximale Länge der Kernzone würde nach Kraatz $10,4 \cdot B_0/2 = 140,4$ cm betragen. Hier beträgt er jedoch nur 31,4 cm (Abb. 3.5). Der Strahl wird vor der kompletten Einmischung der Kernzone umgelenkt. Der auftretende Diffusionswinkel α_i (Abb. 3.4) beträgt $5,12^\circ$, was sehr gut mit den in der Literatur angegebenen $5,50^\circ$ für den klassischen Freistrahл übereinstimmt.

Am Ende des ungestörten Bereichs bei $x = 31,4$ cm wurde der Freistrahл bereits anteilig an der Scherzone der Strahloberseite eingemischt und ein Teil der ursprünglichen kinetischen Energie des Strahls in Wärme umgewandelt. Nach Kraatz kann der Energieverlust mit

$$\frac{E_x}{E_0} = 1 - 0,035 \cdot \frac{x}{B_0} \quad (3.2.11)$$

berechnet werden, wobei E_0 der kinetischen Energie des Schützstrahls und E_x der kinetischen Energie des teilweise eingemischten Wandstrahls an der Stelle x entspricht. Im vorliegenden Fall würde nach Kraatz das Verhältnis $E_x/E_0 \approx 0,959$ betragen, so dass der Energieverlust für diesen Bereich mit 4,1% angegeben werden kann. Dies gilt jedoch nur bei einem konstanten Druck p_a .

3.2.2.2 Bereiche II und III: Strahlumlenkung und angelegter Wandstrahl

In Abbildung 3.5 ist am Ende des Bereiches I das Ansteigen des Diffusionswinkel β auf $29,2^\circ$ zu erkennen. Dies ist auf den bereits vorhandenen Einfluss der Strahlumlenkung an dieser Stelle zurückzuführen. Bei Betrachtung des instantanen Geschwindigkeitsfeldes (Abb. 3.6) sind Fluidballen hoher Geschwindigkeit zu erkennen, die entlang des Bodens gleiten.

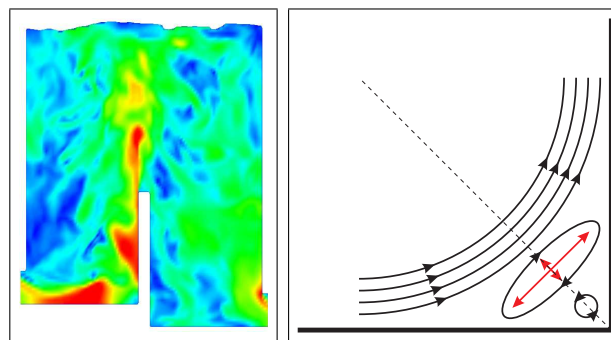


Abbildung 3.6: *Strahlumlenkung an der Prallwand.*

Links: Instantanes Geschwindigkeitsfeld im Becken.

Rechts: Schematische Darstellung der sich entwickelnden Wirbel bei der Strahlumlenkung

In der Ecke zwischen Boden und Prallwand entsteht eine Zone hohen Drucks, die zu einer Strahlablösung vor der Prallwand führt. Die aufgrund der Strahlablösung in der Ecke sich entwickelnden Wirbel entgegengerichteter Drehrichtung (Abb. 3.6) sind nicht stationär, sondern verändern im Lauf der Zeit sowohl ihre Größe als auch ihre Position in der Strömung. Sie sind bei Betrachtung des mittleren Geschwindigkeitsfeldes deshalb nicht mehr auszumachen (Abb. 3.7). Die Vektoren des mittleren Geschwindigkeitsfeldes sind weitgehend parallel. Durch die instationären Wirbel werden intermittierend Fluidballen hoher kinetischer Energie (Abb. 3.6) an die Prallwand geführt.

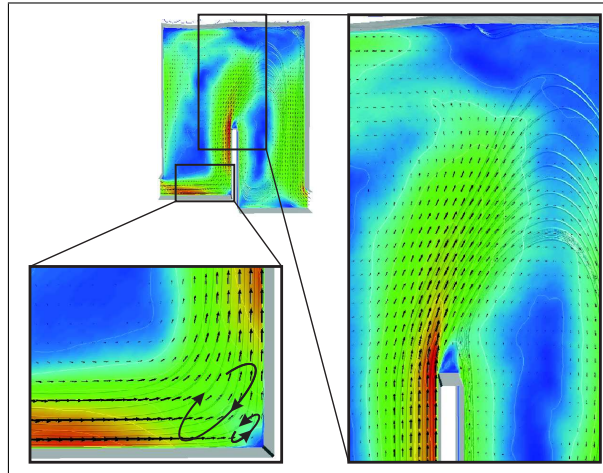


Abbildung 3.7: *Stromlinien und Vektoren in den Bereichen II und IV des Beckens*

Kraatz nimmt in seinen Betrachtungen über Strahlumlenkungen an, dass der Wandstrahl außerhalb der Kernzone umgelenkt wird und der Diffusionswinkel konstant etwa 5° ist. Da der Wandstrahl im vorliegenden Fall jedoch innerhalb der Kernzone umgelenkt wird, lassen sich die von Kraatz angegebenen Geschwindigkeitsverläufe bei einer Strahlumlenkung nur qualitativ anwenden. Die mittlere Geschwindigkeit des Strahls wird entlang der Strahlachse (x -Achse in Abb. 3.8) kontinuierlich abgebremst, bis sie in der Ecke den Wert 0 erreicht. Gleichzeitig nimmt die Geschwindigkeit entlang der Prallwand linear zu (x_1 -Achse in Abb. 3.8), bis sie erneut die maximale Geschwindigkeit vor der Strahlumlenkung erreicht.

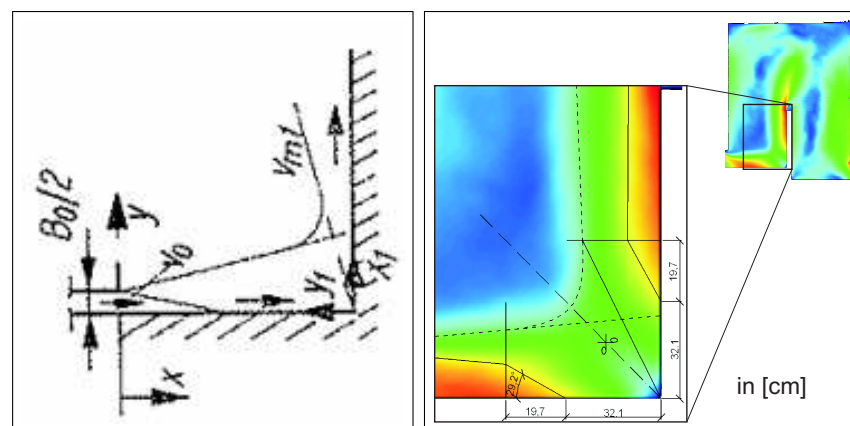


Abbildung 3.8: *Strahlumlenkung nach Kraatz. Links: Schematische Darstellung aus [36]
Rechts: Dimensionen der Strahlumlenkung in Bereich II*

In Abbildung 3.8 sind die Dimensionen bei Anwendung der Theorie von Kraatz für den vorliegenden Fall eingetragen. Wie in der Abbildung zu sehen ist, treffen die qualitativen Aussagen auch im konkreten Fall zu. Da mit Verwendung der Strahltheorie jedoch aufgrund der zu frühen Umlenkung keine quantitativen Aussagen über den Energieverlust gemacht werden können, könnte der Versuch unternommen werden, diesen über die Theorie von Richtungsänderungen in der Rohrhydraulik abzuschätzen, wie sie im Anhang der Arbeit zu finden ist. Die Übertragbarkeit ist jedoch aufgrund der sehr unterschiedlichen Strömungsbedingungen schwierig und mit Vorsicht zu betrachten. Man kann deswegen versuchen, den Energieverlust über die Integration des Energieflusses zu berechnen.

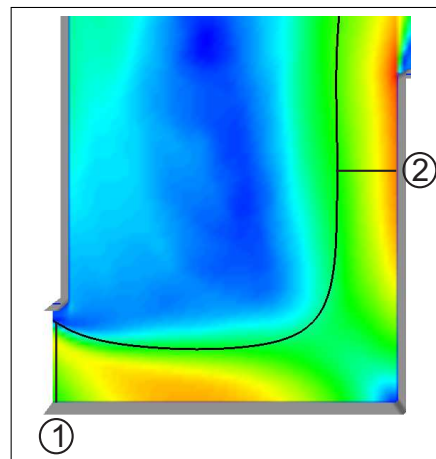


Abbildung 3.9: Ermittlung des Energieverlustes der Strahlumlenkung durch Integration des Energieflusses an mehreren Querschnitten. Begrenzung des Integrationsbereiches durch eine Randstromlinie.

Wie in Abbildung 3.9 dargestellt ist, kann man zwischen einer Randstromlinie und der Wand eine Stromröhre definieren. Durch diese Definition ist sichergestellt, dass es keinen konvektiven Energiefluss über die Berandungen gibt. Der Energiefluss lässt sich wie folgt berechnen:

$$E = \int_A H \cdot \vec{v} \cdot \vec{n} \cdot dA \quad (3.2.12)$$

$$H = \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} + z$$

Die Variable H ist dabei die Energiehöhe nach Bernoulli. Es wurde nun an den zwei in der Abbildung gezeigten Querschnitten diese Integration durchgeführt, wobei die gemittelten Strömungsverhältnisse betrachtet wurden. Es ergibt sich zwischen den Querschnitten 1 und 2 ein Verlust von unter 3%. Die Umlenkung erfolgt dementsprechend beinahe verlustfrei.

Der ermittelte Verlust von 3% ist kleiner als die im dem vorherigen Abschnitt gezeigten ca. 5% nach Kraatz in der Strahlkontraktion. Es sei deshalb darauf hingewiesen, dass sowohl die gezeigte Auswertung über die Bestimmung des Energieflusses als auch die Berechnung des Energieverlustes nach Kraatz nur Abschätzungen darstellen.

Nachdem der Strahl umgelenkt wurde, strömt er entlang der Prallwand nach oben (Abb. 3.8). Der Diffusionswinkel des Strahls ist kleiner als 5° . Dies kann durch den Einfluss der Rotationsbewegung im Bereich IX erklärt werden. Befindet sich ein Strahl in einem Strömungsfeld, in dem eine gleich gerichtete parallele Strömungsgeschwindigkeit v_p vorherrscht, nimmt der Diffusionswinkel mit steigendem v_p ab, da die Differenz zwischen Strahlgeschwindigkeit und v_p an der Grenzfläche zum Strahl abnimmt. Im vorliegenden Fall kann kein verlässlicher Wert für α_i angegeben werden.

Da der Energieverlust des Wandstrahls im Bereich I ($\alpha_i > 5^\circ$) in der Größenordnung von 2% liegt, kann er im aufwärtsgerichteten Wandstrahl bei einem sehr viel kleineren α_i -Wert mit kleiner als 1% also vernachlässigbar abgeschätzt werden.

3.2.2.3 Bereiche IV und V: Rückspringende Stufe und Einfluss der freien Oberfläche

Der angelegte Wandstrahl aus Bereich III wird bis an das Ende der Prallwand geführt, wo er sich von der Wand ablöst und zum Freistrahler wird. Aufgrund der nun vorhandenen zwei Grenzflächen zum umgebenden Fluid mischt sich der Strahl sehr schnell ein. Die Zone der höchsten Geschwindigkeiten hat im untersuchten Fall nach der Ablösung eine maximale Länge von etwa 33 cm (Abb. 3.10).

Die Abbildung zeigt, dass der Freistrahler nach rechts geneigt ist. Dies hat zwei gänzlich unterschiedliche Ursachen. Zum einen kommt es nach dem Ablösen des Strahls von der Prallwand zur Bildung einer Scherschicht mit starken Geschwindigkeitsgradienten. Da sich die Scherschicht nach dem Rückspringen der Prallwand erst

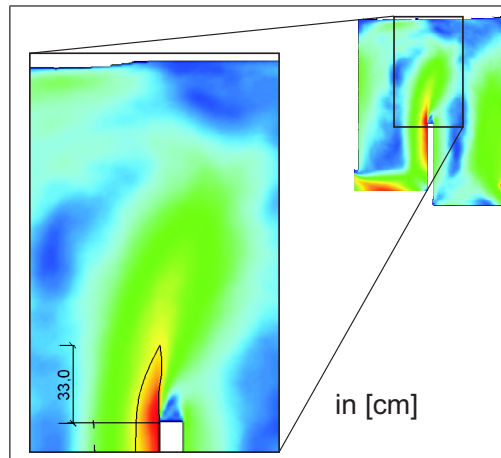


Abbildung 3.10: *Einmischung des Wandstrahls in Bereich IV*

ausbilden muss, dürften die in der Scherschicht auf der entgegen gesetzten Seite des Strahls befindlichen Wirbel dafür sorgen, dass es einen resultierenden Impulsstrom in Richtung der Ablenkung gibt. In den Auswertungen des mittleren Druckes in Abschnitt 5.3 wurde zudem ein nach rechts gerichteter Druckgradient ermittelt, der den Strahl zusätzlich ablenkt.

Die zweite Ursache für die Strahlablenkung ergibt sich aus dem mittleren Volumenstrom. Befindet sich ein Strahl innerhalb einer Querströmung, wird er seitlich abgelenkt (Abb. 3.11). Im konkreten Fall liegt oberhalb der Prallwand aufgrund der Kontinuität eine mittlere seitliche Strömungsgeschwindigkeit von $0,20 \text{ m/s}$ vor. Dieser Wert ist im Vergleich zur Strahlgeschwindigkeit von $2,0 \text{ m/s}$ sehr klein, was auch für die seitliche Strahlablenkung folgt. Der Einfluss der Querströmung steigt bei sinkender Fließtiefe in den Becken, der angesprochene Druckgradient bleibt jedoch erhalten.

Der nach der Ablösung verbleibende sich einmischende Strahl hat eine nach oben gerichtete Geschwindigkeitskomponente. Er tritt deshalb in Wechselwirkung mit der Wasseroberfläche. Diese Wechselwirkung ist umso größer, je niedriger die Fließtiefe in den Becken ist und je höher die Geschwindigkeiten in den Wandstrahlen sind. Bei einer Geschwindigkeit des Wandstrahls von $2,0 \text{ m/s}$ ergibt sich dabei eine maximale Steighöhe a des Strahls (Abb. 3.11) von $0,20 \text{ m}$. Der Impuls des in der Nähe der Oberfläche verbleibenden Strahls sorgt für eine Vertikalbewegung der Oberfläche. Da

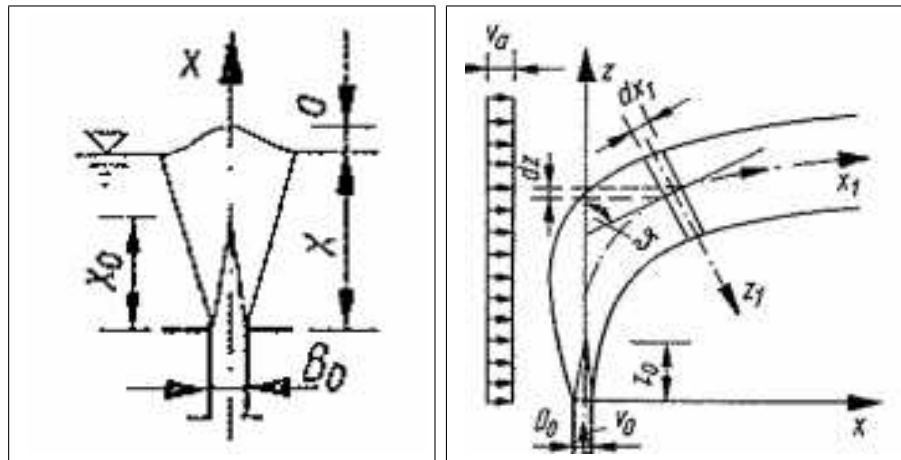


Abbildung 3.11: Schematische Darstellung der Einflüsse auf den Strahl. Links: Einfluss der freien Oberfläche. Rechts: Ablenkung des Strahls aufgrund einer Querströmung, nach [36]

die Strahlen aus instationären Fluidballen unterschiedlicher Geschwindigkeit bestehen, kommt es zu starken Oszillationen der Oberfläche. Der Strahl wird horizontal abgelenkt, und die verbleibenden Geschwindigkeitsballen an der Oberfläche, die eine Grenzfläche darstellt, werden an die Schützwand in Bereich VI geführt.

Energetisch betrachtet kommt es im Bereich IV zu einem starken Einmischen des Strahls und deshalb zu einer großen Energiedissipation. Bedingt durch das komplexe Strömungsfeld ist es jedoch nicht mehr möglich, die verbleibenden Verluste unterschiedlichen strömungsphysikalischen Phänomenen zuzuordnen und zu diskutieren. Idealerweise wird in den Bereichen IV und V der Rest der kinetischen Energie dissipiert. Je größer die Fließtiefe dabei ist, desto größer wird der Bereich IV der Einmischung, und desto besser ist die Energiedissipation. Es ergeben sich zu einer kleineren Geschwindigkeiten in den restlichen Bereichen V bis IV, was eine Vergleichmäßigung der Strömung, und letztlich eine positive Auswirkung auf die ökologische Durchgängigkeit zur Folge hat. Zum anderen hat man damit eine Möglichkeit, bei kurzer Baulänge, große Becken mit niedriger mittlerer Dissipation zu gestalten.

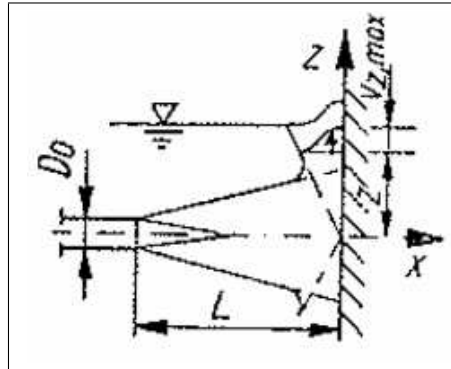


Abbildung 3.12: Schematische Darstellung der Strahlumlenkung an der Schützwand in Bereich IV, nach [36]

3.2.2.4 Bereiche VI und VII: Strahl senkrecht auf eine Wand in der Nähe einer freien Oberfläche und Zuströmung zur Schützöffnung

Wie bereits angesprochen können bei unzureichender Energiedissipation in den Bereichen IV und V einzelne Fluidballen mit höherer Geschwindigkeit entlang der Oberfläche in Bereich VI horizontal auf die Schützwand treffen. Es kommt zu einer Strahlumlenkung teils nach oben und teils nach unten. Der nach oben geleitete Anteil tritt erneut in Wechselwirkung mit der Oberfläche. Dies kann sowohl dazu führen, dass der mittlere Wasserspiegel lokal steigt (Abb. 3.12) als auch Wasserspiegelschwankungen auslöst werden. Diese Schwankungen wurden vor allem bei sehr niedrigen Fließtiefen experimentell beobachtet (siehe Kap. 4.3.4).

Der nach unten gerichtete Anteil legt sich als Wandstrahl an die Schützwand an. Je höher dabei die Geschwindigkeiten in den an die Schützwand geführten Fluidballen sind, umso höher wird die Geschwindigkeit des Wandstrahls im Bereich VII. Gelangt dieser schließlich in den Zulauf des Schützes, kommt es im nächsten Becken zu höheren Geschwindigkeiten als $v_0 = \sqrt{2g\Delta h}$. Es besteht die Gefahr eines hydraulischen Kurzschlusses oder von periodischen Schankungen.

In den experimentellen Untersuchungen hat sich gezeigt, dass auch bei sehr niedrigen Fließtiefen der Großteil der kinetischen Energie des Schützstrahls im Bereich IV dissipiert wird. Es kommt zwar zu einem Ansteigen der Geschwindigkeiten, allerdings nur in einer Größenordnung von 10 bis 15%. Das vorgestellte System der periodischen Schütze weist folglich keine Gefahr eines hydraulischen Kurzschlusses auf.

3.2.2.5 Bereiche VII, IX und X: Strahlumlenkung zur Schützöffnung und Rezirkulationszonen

Die Strömung in der Zuströmung zum Schütz im Bereich VII ist abhängig von der Intensität des Wandstrahls im Bereich VI. Je höher dessen Geschwindigkeit ist, desto stärker muss die mittlere Strömung bei der Bildung des horizontalen Schützstrahls umgelenkt werden. Es kommt bei gleich bleibender Maximalgeschwindigkeit zu einer größeren Strahlkontraktion.

Die Umlenkung des Strahls geschieht durch die bereits in der Diskussion des Bereiches IV angesprochene Querströmung. Im Bereich VII hat die Querströmung eine mittlere Geschwindigkeit von 1,0 m und ist somit größer als die Geschwindigkeit des Wandstrahls aus Bereich VI. Durch die Überlagerung der Strahlumlenkung am Beckenboden mit der beschriebenen Querströmung kommt es zur Umlenkung eines Großteils des Strahls in Richtung der Schützöffnung. Nur ein Teil des Wandstrahls wird nach der Ablösung von der Schützwand nach links abgelenkt und sorgt zusammen mit der Scherfläche des Wandstrahls in Bereich VI dafür, dass im Bereich X eine großräumige Rezirkulationszone entsteht.

Die Rotationsbewegung der Rezirkulationszonen im Bereich IX und X wird durch die Scherflächen der Wandstrahlen mit Energie versorgt und beschleunigt. Durch den Einfluss der Wände wird sie jedoch kontinuierlich verzögert. Es entwickeln sich zwei Gleichgewichtssysteme mit gleich bleibender Geschwindigkeit und kleinen Geschwindigkeitsschwankungen.

3.2.3 Zusammenfassung

Das System der periodischen Schütze setzt sich aus einer Mehrfachanordnung von Schützen mit ruckgestautem Abfluss mit zwischenliegenden Prallwänden zusammen. Zum Zwecke der Dimensionierung wurde untersucht, in welchem Umfang bestehende Bemessungsregeln angewendet werden können. Es konnte gezeigt werden, dass der nach den Schützen sich ausbildende Abfluss eine andere Strömungscharakteristik hat als der Abfluss bei rückgestauten Schützen mit freier Anströmung. Aufgrund der Strahlführung in den Becken kommt es zu kleineren Kontraktionswerten als in

der Literatur für Schütze mit rückgestautem Abfluss angegeben. Da die bestehenden Bemessungsvorschriften für das bestehende System nicht angewendet werden können, müssen für eine Dimensionierung eines derartigen Systems eingehende Untersuchungen durchgeführt und spezielle Bemessungsvorschriften erarbeitet werden.

Um die Verteilung der Energieverluste in den Becken zu untersuchen, wurde die Strömung in einzelnen Bereichen des Beckens mit Hilfe von hydraulischen Analogien untersucht. Bei konsequenter Anwendung der Strahlhydraulik ergeben sich Hinweise darauf, dass die Strahleinmischung nach Ablösen von der Prallwand für einen Großteil der Energieverluste verantwortlich ist. Den größten Einfluss auf die Verteilung der Energieverluste hat die Fließtiefe in den Becken, da mit ihr der Einfluss der Wasseroberfläche auf die Strahleinmischung und Größe des Bereichs der Energiedissipation in Verbindung steht.

Kapitel 4

Laborversuche

Nachdem das neuartige Anlagendesign vorgestellt wurde, werden im folgenden Abschnitt die Ergebnisse von unterschiedlichen Laborversuchen diskutiert. Die Versuche wurden dabei im Maßstab 1 : 5 durchgeführt. Um die aus den Laborversuchen gewonnen Erkenntnisse auf Modelle in einem größeren Maßstab übertragen zu können kann man sich der Dimensionsanalyse bedienen, die zu Beginn des Kapitels näher vorgestellt wird.

Nach dieser Einführung wird ein biologischer Laborversuch mit verschiedenen Fischarten vorgestellt um die prinzipielle Akzeptanz des neuartigen Anlagendesigns zu belegen. Zur Klärung der strömungsphysikalischen Zusammenhänge in einer derartigen Anlage wurde ein Untersuchungskonzept aus Laborexperimenten und numerischen Simulationen entwickelt, die sich in ihren strömungsphysikalischen Aussagen jeweils ergänzen.

4.1 Ähnlichkeitsbeziehungen zwischen Versuch und Praxis

Um strömungsphysikalische Aussagen und Zusammenhänge zwischen unterschiedlichen Maßstäben zu übertragen werden in der Strömungsmechanik sogenannte Ähnlichkeitsgesetze verwendet. Im Rahmen der Arbeit werden eine Vielzahl von Ergebnissen präsentiert, die entweder aus numerischen Simulationen oder aus Laborversuchen abgeleitet wurden. Da die Übertragung dieser Ergebnisse auf unterschiedliche Maßstäbe in den unterschiedlichsten Abschnitten der Arbeit ausführlich diskutiert wird,

sollen an dieser Stelle die Grundlagen der strömungsmechanischen Ähnlichkeit und damit auch die sogenannte Dimensionsanalyse vorgestellt werden.

Zur Untersuchung von Ähnlichkeitsgesetzmäßigkeiten im beschriebenen Gerinne werden die Navier-Stokes-Gleichungen näher betrachtet. Diese lauten:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} + g_i \quad (4.1.1)$$

Mit Hilfe von Referenzgrößen können die in den Gleichungen vorkommenden physikalischen Größen dimensionlos gemacht werden. Die Umrechnung der Kenngrößen erfolgt gemäß:

$$u_i^* = \frac{u_i}{U_0}; \quad x_i^* = \frac{x_i}{L_0}; \quad t^* = \frac{t}{L_0/U_0}; \quad p^* = \frac{p}{\rho U_0^2}; \quad g^* = \frac{g}{g_0} \quad (4.1.2)$$

Werden die Navier-Stokes-Gleichungen durch U_0^2/L_0 dividiert erhält man:

$$\frac{\partial u_i^*}{\partial t^*} + u_j^* \frac{\partial u_i^*}{\partial x_j^*} = -\frac{\partial p^*}{\partial x_i^*} + \frac{\nu}{U_0 L_0} \frac{\partial^2 u_i^*}{\partial x_j^{*2}} + \frac{g_0 L_0}{U_0^2} g_i^* \quad (4.1.3)$$

Diese kann man weiter umformen in:

$$\frac{\partial u_i^*}{\partial t^*} + u_j^* \frac{\partial u_i^*}{\partial x_j^*} = -\frac{\partial p^*}{\partial x_i^*} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 u_i^*}{\partial x_j^{*2}} + \frac{1}{Fr^2} g_i^* \quad (4.1.4)$$

mit

$$Re = \frac{U_0 L_0}{\nu} \quad \text{und} \quad Fr^2 = \frac{U_0^2}{g_0 L_0} \quad (4.1.5)$$

Man sieht, dass bei Skalierung einer Freispiegelströmung lediglich zwei Parameter konstant gehalten werden müssen, um ähnliche Strömungsverhältnisse zu erreichen, nämlich die Reynolds-Zahl Re und die Froude-Zahl Fr . Wenn jedoch in den beiden Versuchen unterschiedlicher Skalierung ein und dasselbe Fluid benutzt wird, so können die beiden Kennzahlen nicht gleichzeitig konstant gehalten werden, und es ist eine Analyse der Strömung notwendig, um die dominierenden Vorgänge in der Strömung zu identifizieren.

Die Strömung in Freispiegelgerinnen wird durch die Schwerkraft angetrieben.

Wenn demnach die Froude-Zahl, die diesen Effekt beschreibt, als dominant erachtet wird und somit konstant gehalten, muss der Einfluss der sich ändernden Reynolds-Zahl untersucht werden.

In den nächsten Abschnitten wird sowohl mit Hilfe von Laborversuchen als auch durch numerische Simulationen versucht, empirische Gesetzmäßigkeiten zu ermitteln. Dabei müssen alle gefundenen Gleichungen bezüglich ihrer Dimension konsistent sein. Die Einheiten der einzelnen Größen in der Hydromechanik lassen sich dabei aus den drei Grundeinheiten m, kg und s zusammensetzen.

Nach dem Buckingham II-Theorem [10] können nach der Wahl je eines Maßes für die Länge \mathbf{L} , der Masse \mathbf{M} und der Zeit \mathbf{T} alle anderen hydromechanischen Größen aus dem Produkt einer dimensionslosen Kennzahl mit dem Produkt oder Quotienten der Grundmaße in der jeweils benötigten Potenz ermittelt werden. In der vorliegenden Arbeit wurden als Referenzgrößen der Schützenhub d , die mittlere Geschwindigkeit unter dem Schütz v_m und die Dichte des Fluides ρ gewählt. Das Strömungsfeld in einer bestimmten Konfiguration stellt somit einen funktionalen Zusammenhang Φ zwischen den einzelnen Größen her:

$$\Phi = f(d, v_m, \rho, l_1/d, l_2/d, \dots, l_n/d, Fr, Re) \quad (4.1.6)$$

wobei $l_1 \dots l_n$ verschiedene geometrische Maße in der Anlage sind. Weitere, detaillierte Ausführungen zur sogenannten Dimensionsanalyse können [33] und [47] entnommen werden.

4.2 Biologische Laborversuche zur Untersuchung der Akzeptanz durch Fische

Entscheidend bei der Entwicklung einer neuartigen Bauweise von Fischaufstiegsanlagen ist letztlich, wie gut sie durch Fische und andere Lebewesen, die die Anlagen zum Aufstieg benutzen sollen, angenommen wird. Um diese Frage zu beantworten, wurde im Sommer 2005 am Zentrum für hydraulische Forschung (CPH) an der Bundesuniversität von Minas Gerais (UFMG) in Belo Horizonte, Brasilien, ein Laborversuch entwickelt. In einem skalierten Modell im Maßstab 1 : 5 wurden kleine Fische dreier Fischarten eingesetzt und ihr Verhalten im vorhandenen Strömungsfeld beobachtet. Im Folgenden werden nach einer Beschreibung des Versuchsaufbaus und des Versuchsprogramms die Ergebnisse der Versuche präsentiert. Eine Interpretation der Ergebnisse erlaubt Rückschlüsse auf die Akzeptanz des neuen Anlagendesigns.

4.2.1 Versuchsaufbau

Das vorgestellte System der periodischen Schütze wurde im Maßstab 1 : 5 im Labor nachgebaut (Abb. 4.1). Für die Versuche stand ein Kanal aus Acrylglas mit einer Breite von 30 cm und einer Länge von etwa 10 m zur Verfügung. Der Kanal war auf einer neigbaren Fachwerkkonstruktion aus Aluminiumrohren gelagert. Zur Aussteifung der seitlichen Wände gegen den Wasserdruck dienten angeklebte Acrylglasstege.

In einem Abstand von etwa 4 m vom Einlass wurden vier Schütztafeln der Stärke 5 mm angebracht, wobei der Abstand zwischen den Schütztafeln 40 cm betrug. Sämtliche Einbauten waren dabei aus Acrylglas, da sich das Material zum einen leicht verarbeiten lässt, und zum zweiten einen visuellen Zugang zu den Vorgängen im Kanal ermöglicht. Der lichte Abstand zwischen der Schützunterseite und dem Boden betrug 6 cm. Zwischen den Schützen wurden in der Mitte der Becken Prallwände der Höhe 20 cm angebracht. Nach dem letzten Schütz wurde eine Prallwand der Höhe 10 cm angebracht, um ein Anlegen der Strömung am Boden zu verhindern. Die daraus folgende Vergleichmäßigung der Strömung sollte unterstrom der Fischtreppe den Einstieg für Fische vereinfachen. Am Auslass des Kanals wurde eine Wehrtafel der Höhe 30 cm angebracht. Diese Höhe führt bei stehendem Wasser dazu, dass die Prallwände im

Kanal 10 cm überdeckt waren. Die verbleibende Bewegungsfreiheit minimierte für die Fische die Gefährdung durch den Betrieb des Kanals. Vor der Wehrtafel sorgte ein Sieb dafür, dass die Fische nicht über das Wehr in das Rücklaufbecken gerieten.

Der Kanal wurde mit einer Pumpe aus dem Rücklaufbecken mit Wasser versorgt. Über ein im Zulaufrohr eingebautes Fluviometer konnte der Durchfluss hinreichend genau bestimmt werden.

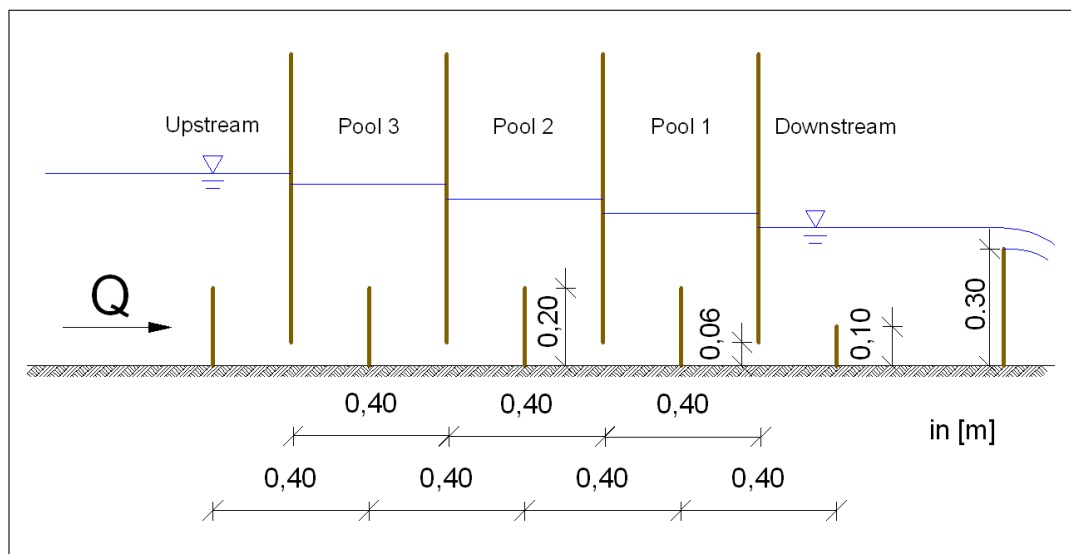


Abbildung 4.1: Prinzipskizze des Modellaufbaus

Zur Überprüfung der Akzeptanz eines neuen Mechanismus muss auf die Besonderheiten von einzelnen Fischarten eingegangen werden. Für die Wahl von repräsentativen Fischarten wurde im Vorfeld der Versuche der Artenreichtum von südamerikanischen Süßwasserfischen untersucht.

Derzeit sind in Südamerika mehr als 4400 Süßwasserfischarten bekannt [44]. Hierbei wird der Artenreichtum sowohl in der Anzahl von Individuen als auch in der Anzahl von Fischarten von den beiden Ordnungen der Salmmler (*Characiformes*) und Welse (*Siluriformes*) dominiert [40].

Die Kopfstecher (*Anostomidae*) stellen eine wichtige Familie der Salmmler dar, welche weit über Südamerika verbreitet sind. Die zu dieser Familie gehörigen Gattung der Schlammalsalmmler (*Leporinus*) ist dafür bekannt, dass sie weite Wanderungen in den Flüssen unternimmt, um abzulaichen. Die Schlammalsalmmler sind in Brasilien eine

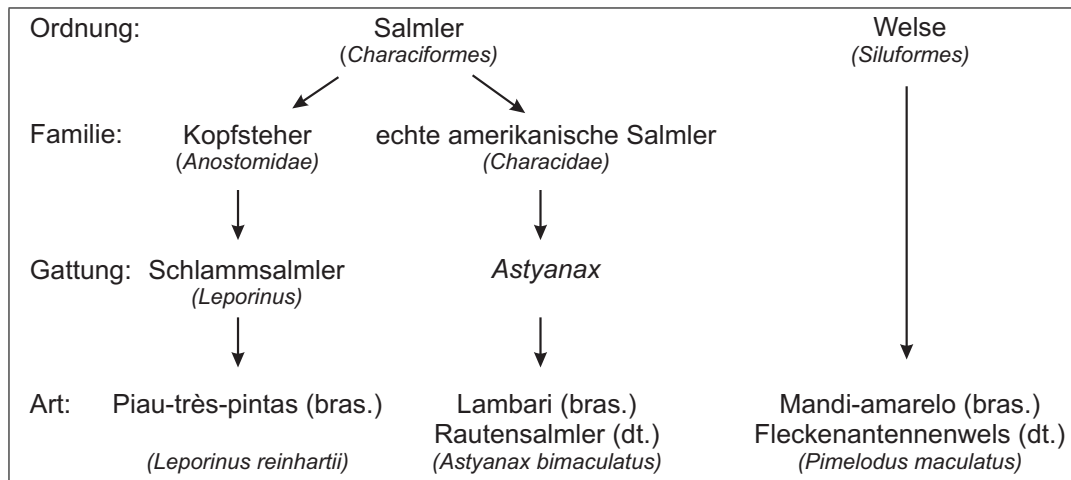


Abbildung 4.2: *Biologische Systematik der verwendeten Spezies mit lateinischer, deutscher und brasilianischer Bezeichnung, sofern vorhanden.*

wichtige Gattung, sowohl für die Ernährung der einheimischen Bevölkerung als auch für den kommerziellen Fischfang [6][25][26].

Der Piau (*Leporinus reinhardtii*) ist ein wandernder Fisch aus der Familie der Kopfsteher. Seine maximale Gesamtlänge beträgt etwa 15 cm. Der Piau ist ein Schwarmfisch, d. h. mindestens 10 Individuen leben in einer Gruppe. Er ernährt sich von am Boden lebenden Pflanzen und Pflanzenteilen, was der Familie letztlich den Namen gab.

Eine zweite sehr große Familie aus der Ordnung der Salmmler stellen die echten amerikanischen Salmmler (*Characidae*), mit einer enormen Anzahl und Vielfalt von Gattungen dar. In dieser Familie sind sowohl zahlreiche kleine Fische als auch große Raubfische vertreten, die für den kommerziellen Fischfang wichtig sind [40]. Die Gattung der *Astyanax* ist eine der größten Gattungen in der Familie der *Characidae*, mit insgesamt 86 verschiedenen Arten. Der Rautensalmmler (*Astyanax bimaculatus*) ist ein kleiner nicht migrierender Fisch dieser Gattung mit einer Gesamtlänge von etwa 13 cm. Er kommt in gesamten Becken des Rio São Francisco vor [4] sowie in seinen Zuflüssen und weiteren kleineren Flüssen im Osten Brasiliens [7]. Er ist ebenfalls ein Schwarmfisch, der sich von Pflanzen ernährt.



Abbildung 4.3: *Lambari*
(*Astyanax bimaculatus*)

Abbildung 4.4: *Piau*
(*Leporinus reinhardtii*)

Die beiden Fischarten Lambari und Piau der Ordnung der Salmler wurden für die Akzeptanzversuche ausgesucht, da sie sehr leicht im Laboraquarium gehalten werden können und ihre zugehörigen Gruppen (Familie der der Kopfsteher und die Gattung der *Astyanax*) in der südamerikanischen Fischfauna eine große Bedeutung haben.

Abschließend wurden die Versuche auch mit einer Spezies der Ordnung der Welse, dem Fleckenantennenwels oder Mandi (*Pimelodus maculatus*) durchgeführt. Da es nicht möglich war, sehr kleine Fische zu finden, sind die Ergebnisse der Versuche aufgrund der ungünstigen Größenverhältnisse als relativ zu betrachten. Des weiteren ist aus umfangreichen Versuchen bekannt, dass der Mandi ein nachtaktiver Fisch ist. Die Versuche wurden deshalb sowohl bei Tag als auch bei Nacht durchgeführt.

Für die Akzeptanzversuche wurde ein Versuchsprogramm entwickelt, dem alle drei Fischarten unterzogen wurden. Bei einem definierten Durchfluss in der Fischtreppe wurden jeweils fünf Fische der gleichen Spezies gleichzeitig unterstrom des letzten Schützes eingesetzt. In Intervallen von 10 Minuten wurde die Anzahl der Fische in den einzelnen Becken notiert. Zu statistischen Zwecken wurde der Versuch dreimal wiederholt, wobei jeweils fünf neue Fische für die Versuche ausgewählt wurden. Bei der Analyse der Versuchsreihen wurden die drei gleichen Versuche einer Reihe gemittelt und graphisch ausgewertet.

Die im Laborversuch eingestellten Durchflüsse wurden mittels Dimensionsanalyse ermittelt. Im den einschlägigen Normen (u. a. [20]) wird das Geschwindigkeitsmaximum in Fischpässen auf 2 m/s festgelegt. In Freispiegelströmungen skalieren sich die

Strömungsverhältnisse bei Vorhandensein ausreichender Strömungsgeschwindigkeiten primär nach der Froude-Zahl Fr :

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gy}} \quad (4.2.1)$$

Die dimensionslose Kennzahl Fr setzt die mittlere Geschwindigkeit v zur Wellenausbreitungsgeschwindigkeit \sqrt{gy} in Beziehung. An dieser Stelle sei erwähnt, dass die Leistungsfähigkeit von Fischen proportional von ihrer Länge abhängt (Kap. 1.2). Eine ausführliche Diskussion der unterschiedlichen Skalierungsgesetzmäßigkeiten von Strömung und Fischen geschieht in Kap. 4.2.5.

Aus der Bedingung der maximalen Geschwindigkeit und aus dem Skalierungsfaktor von 1 : 5 ergaben sich die in den beiden Versuchsreihen verwendeten Durchflüsse von 256 bzw. 343 l/min, die mit Oberwasserfließtiefen von 40,5 bzw. 45,4 cm korrespondieren. Da der verwendete Kanal lediglich eine Höhe von 50 cm hatte, war eine weitere Steigerung des Durchflusses nicht möglich. In Tabelle 4.1 sind die verwendeten Werte sowie deren Umrechnungswerte angegeben.

	Versuch 1	Versuch 2
Durchfluss im Modell [l/min]	256	343
Durchfluss im Modell [l/s]	4,27	5,72
Fließtiefe oberstrom [cm]	40,5	45,4
v_{mittel} unter den Schützen im Modell 1 : 5 [m/s]	0,237	0,318
Fr-Zahl unter Schütz [-]	0,309	0,414
v_{max} im Modell mit Strahlkontraktion $\psi = 0,5$ [m/s]	0,472	0,635
Fr bei v_{max} [-] ($\psi = 0,5$)	0,874	1,171
v_{mittel} unter den Schützen, unskaliert [m/s]	0,530	0,710
v_{max} im Becken, unskaliert, mit Strahlkontraktion $\psi = 0,5$ [m/s]	1,06	1,42

Tabelle 4.1: Konfiguration der biologischen Laborversuche

4.2.2 Versuchsergebnisse mit Lambari (*Astynax bimaculatus*)

Die Akzeptanzversuche begannen mit dem Lambari. Bei den Versuchen wurden jeweils fünf Fische unterstrom der Schütze in den Kanal eingesetzt. Um die Fische in ihrer Leistungsfähigkeit einschätzen zu können, wurden sie nach Beendigung der Versuche gewogen und gemessen. Die im Laborversuch ermittelte Grenzgeschwindigkeit von Lambari in Abhängigkeit von der Länge sind in Abbildung 4.5 dargestellt.

Nachdem der Versuch für jeden Durchfluss dreimal wiederholt worden war, wurden die physiologischen Angaben aller 15 verwendeten Fische statistisch ausgewertet. Neben dem Gewicht sind in den Tabellen verschiedene Längenmaße angegeben. In der Ichthyologie beschreibt die Standardlänge eines Fisches die Länge bis zum Ansatz der Schwanzflosse, wobei die Gesamtlänge die Flosse beinhaltet.

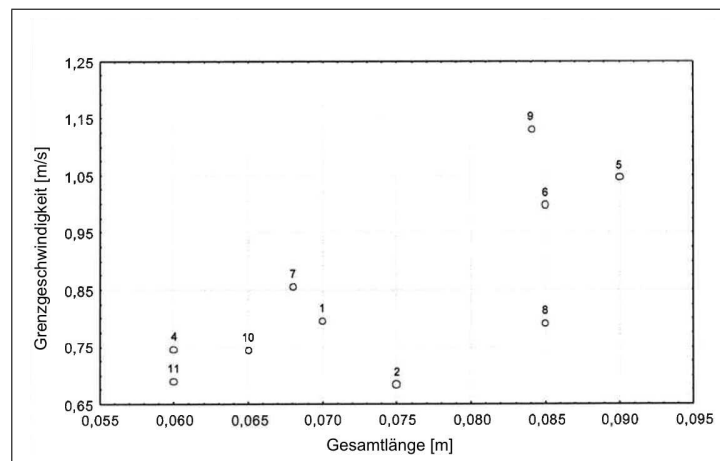


Abbildung 4.5: Grenzgeschwindigkeit von Lambaris (*Astynax bimaculatus*) im Laborversuch, nach [50]

Versuch 1 mit $Q = 4,27 \text{ l/s}$

Die physiologischen Daten der verwendeten Lambaris bei einem Durchfluss von $Q = 4,27 \text{ l/s}$ sind in Tabelle 4.2 angegeben. Die Gesamtlänge lag bei etwa 11 cm. Diese Länge erlaubte es den Lambaris, sich in der Anlage frei zu bewegen, da die Becken eine Länge von 40 cm hatten. Die Versuche konnten nicht mit kleineren Fischen gemacht werden, da diese bereits in der Gewöhnungsphase an das Laboraquarium aufgrund der unterschiedlichen Temperatur und Lichtbedingungen und aufgrund von Befall mit Pilzkrankheiten eingingen. Größere Fische erwiesen sich als wesentlich resistenter.

	Mittelwert	Varianz
Gewicht [g]	18,07	59,07
Gesamtlänge [cm]	10,83	1,42
Standardlänge [cm]	8,80	1,17
Höhe [cm]	3,21	0,35
Breite [cm]	1,26	0,06

Tabelle 4.2: *Physiologische Parameter der 15 getesteten Lambaris im Versuch 1*

Die Verteilung der Fische über die Zeit ist in Abbildung 4.6 dargestellt. Bereits in den ersten 10 Minuten des Versuches überwindet über ein Viertel der Fische die gesamte Fischtreppe. Die Fische hatten dabei offensichtlich keine Mühe, die vorherrschende Strömung zu überwinden. In den nächsten 50 Minuten ist eine Verteilung der Fische auf unterschiedliche Becken in der Fischtreppe zu sehen. Nach einer Stunde sind die Fische entweder oberstrom oder unterstrom der Anlage anzutreffen. Es ist zu erkennen, dass es in der Zeit zwischen 80 und 100 Minuten zu einem Wiedereinschwimmen von oberstrom nach unterstrom kommt. Die Lambaris überwinden die Anlage in beide Richtungen und schwimmen sogar nach Überwinden der Anlage wieder von oberstrom ein. Die verbleibenden ca. 25% der Lambaris, die die Anlage nach über 100 Minuten scheinbar noch nicht überwunden haben, sind lediglich ein statistischer Effekt, da die zurückgeschwommenen Fische in die Statistik eingehen.

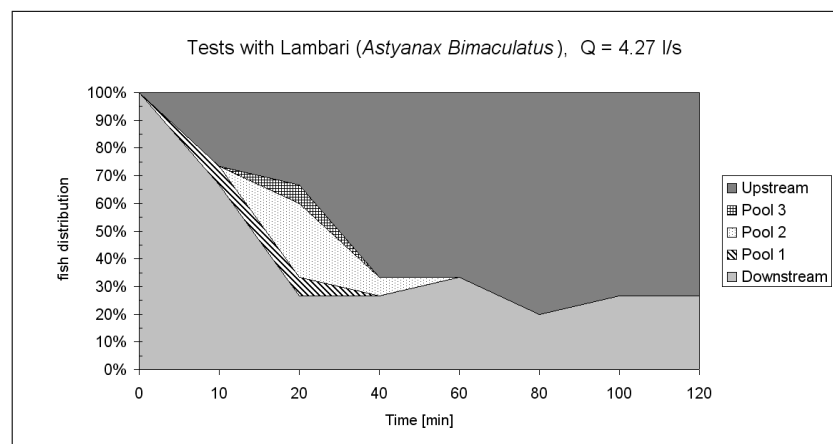


Abbildung 4.6: *Verteilungen der Lambaris (*Astyanax bimaculatus*) über die Zeit in den einzelnen Bereichen des Kanals bei einem Durchfluss von $Q = 4,27 \text{ l/s}$.*

Versuch 2 mit $Q = 5,72$ l/s

Im Versuch 2 wurde der Durchfluss auf $Q = 5,72$ l/s gesteigert. Die verwendeten Fische hatten in etwa die gleichen physiologischen Werte (Tabelle 4.3) wie in Versuch 1, was eine gute Vergleichbarkeit zwischen den Versuchen ermöglicht.

	Mittelwert	Varianz
Gewicht [g]	17,93	41,35
Gesamtlänge [cm]	11,07	0,92
Standardlänge [cm]	9,03	0,87
Höhe [cm]	3,43	0,32
Breite [cm]	1,41	0,10

Tabelle 4.3: *Physiologische Parameter der 15 getesteten Lambaris im Versuch 2*

Wie in der graphischen Auswertung der Versuche in Abbildung 4.7 zu erkennen ist, überwinden in den ersten 10 Minuten bereits etwa 20% der Fische die Anlage. Es fällt auf, dass in den zwischenliegenden Becken der Treppe zu diesem Zeitpunkt keine Fische anzutreffen sind. In diesem Zeitbereich überwinden die Fische die Fischtreppe, ohne Regenerationspausen in den zwischenliegenden Becken. Nach etwa 60 Minuten kommt es wie in Versuch 1 zu einer Aufteilung der Fische nach ober- und unterstrom der Anlage. Es sind keine Fische in den einzelnen Becken anzutreffen. Nach 80 Minuten verbleiben etwa 10% der Fische, die sich unterstrom der Schütze aufhalten. Dieser Prozentanteil kommt zum einen aus einem statistischen Effekt. Es wurde bereits erwähnt, dass einige Fische nach erfolgreichem Überwinden der Anlage erneut in diese einschwimmen und sie in Strömungsrichtung durchschwimmen. Auf diese Weise erhöhen die zurückgeschwommenen Fische den statistischen Mittelwert unterstrom des Beckens. Zum anderen wurde die Beobachtung gemacht, dass der Lambari sein Verhalten nach dem seiner Artgenossen richtet. Es wurde beobachtet, dass Lambaris, die sich allein in einem Becken befanden, einen geringeren Antrieb zur Überwindung der Fischtreppe aufwiesen, als solche, die mit mehreren in einem Becken waren. Der einzelne Fisch verblieb unterstrom des Beckens und schwamm nicht in die Anlage ein.

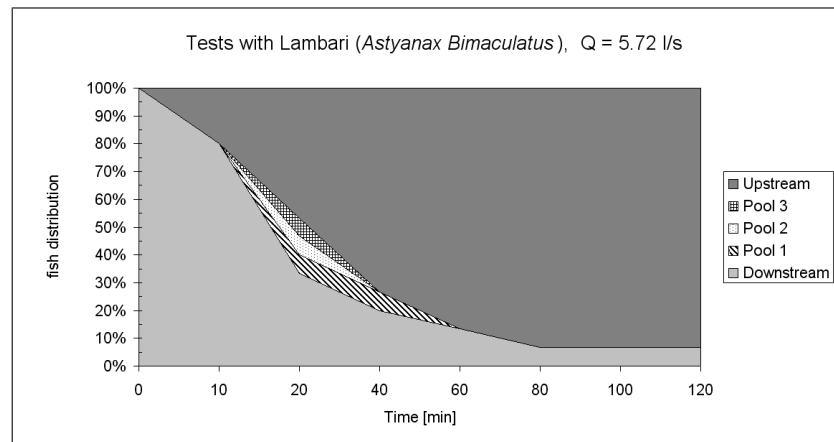


Abbildung 4.7: Verteilungen der Lambaris (*Astyanax bimaculatus*) über die Zeit in den einzelnen Bereichen des Kanals bei einem Durchfluss von $Q = 5,72 \text{ l/s}$.

4.2.3 Versuchsergebnisse mit Piau (*Leporinus reinhardtii*)

Ähnlich wie die Versuche mit den Lambaris wurde die Akzeptanz des Anlagendesigns mit einer weiteren Fischart, dem Piau getestet. Es wurden erneut bei den Durchflüssen $Q = 4,27 \text{ l/s}$ und $Q = 5,72 \text{ l/s}$ jeweils drei Versuche mit fünf Fischen ähnlicher Größe und ähnlichen Alters getestet.

Es wurde beobachtet, dass viele der Fische dieser Spezies nach erfolgreichem Überwinden eines Schütze wieder in das vorherige Becken zurückschwimmen. Die Fische schwimmen zwischen zwei Becken hin und her. Während der Versuchsdauer von 120 Minuten passierte kein Fisch die gesamte Anlage.

Die Analyse der unterschiedlichen Versuche zeigte bei gleichen Strömungsbedingungen einen wesentlich geringeren Durchgang von Piaus als von Lambaris, was mehrere Ursachen haben kann. So waren die Piaus mit einer mittleren Gesamtlänge von etwa 19 cm im Vergleich zu den Lambaris mit nur etwa 11 cm wesentlich größer. Es wurde beobachtet, dass sie aufgrund ihrer Körpergröße größere Schwierigkeiten zum Manövrieren hatten. Für weitere Versuche müssten kleinere Piaus verwendet werden.

Die Piaus konnten zwar die Strömung jederzeit gut kontrollieren, sie zeigten jedoch einen wesentlich geringeren Antrieb zum Auf- bzw. Abstieg verglichen mit den Lambaris. Da die Experimente nur als Stichproben gewertet werden können, sind

für die Beantwortung der weiterhin offenen Fragen bezüglich Antrieb und Strömung weiter gehende Versuche nötig.

4.2.4 Versuchsergebnisse mit Mandi-Amarelo (*Pimelodus maculatus*)

Nach den Versuchen mit den beiden Arten der Ordnung der Salmmler wurde das neuartige Anlagendesign mit einer Fischart der Ordnung der Welse getestet. Der Mandi-Amarelo (*Pimelodus maculatus*) ist ein typischer Vertreter dieser Ordnung. Er lebt am Grund von Flüssen und orientiert sich mit seinen Antennen an einer Oberfläche. Zu Beginn der Versuche wurde von Biologen die Befürchtung geäußert, dass diese Ordnung von Fischen Probleme bei der Orientierung in der Anlage hat und der Labyrinthströmung in den Becken nicht folgt.

Es wurden erneut bei den Durchflüssen $Q = 4,27 \text{ l/s}$ und $Q = 5,72 \text{ l/s}$ jeweils drei Versuche mit fünf Fischen ähnlicher Größe und ähnlichen Alters getestet. Es kam erneut zu keinem Überwinden der gesamten Anlage. Es ist festzustellen, dass der Mandi die angebotene Strömung beherrschen kann und durchaus in der Lage ist, bei genügend innerem Antrieb die Anlage zu überwinden. Die meisten Mandis wiesen jedoch nach dem Einsetzen eine sehr geringe Aktivität auf.

Um die Abhängigkeit der Aktivität von Mandis von der Tageszeit [8] zu untersuchen, wurde ein Nachtversuch mit einem Durchfluss von $Q = 4,27 \text{ l/s}$ durchgeführt. Die eingesetzten Fische zeigten in diesem Versuch ein sehr unterschiedliches Verhalten. Vier der fünf Fische verblieben über die gesamte Dauer des Versuches unterstrom des Fischpasses und ließen keinerlei Aktivität erkennen. Der fünfte Mandi dagegen war hoch aktiv. Er überwand die Anlage komplett, und schwamm nach 40 Minuten wieder in die Anlage ein. Der aktive Fisch schwamm ohne ersichtliche Schwierigkeiten frei zwischen den Becken hin und her.

Da dieser abschließende Versuch nur als Stichprobe gewertet werden kann, kann aus ihm lediglich das Indiz gewonnen werden, dass die Nachtaktivität der Mandis zutrifft. Bei genügend innerem Antrieb können sich die Fische gut an der angebotenen Strömung in der Anlage orientieren und diese gut beherrschen.

4.2.5 Skalierung

In den bisherigen Ausführungen des Kapitels 4.2 sollte durch Versuche mit Fischen die Akzeptanz des neuartigen Prinzips nachgewiesen werden. Dazu wurden in den Laborversuch im verkleinerten Maßstab Fische einer bestimmten Größe eingesetzt und deren Verhalten im Versuchskanal interpretiert. Die entscheidende Frage ist nun, ob und wie die Ergebnisse der Versuche auf ein Gerinne im größeren Maßstab übertragen werden können.

Die Strömung im untersuchten Gerinne wird durch die Schwerkraft getrieben. Wie in späteren Abschnitten der Arbeit gezeigt wird, bleiben bei einer geometrischen Skalierung des Kanals die Froude-Zahlen konstant. Wenn alle geometrischen Abmessungen sowie die Fließtiefen um den Faktor λ vergrößert werden, sind die sich einstellenden Strömungsgeschwindigkeiten um den Faktor $\sqrt{\lambda}$ größer als die Strömungsgeschwindigkeiten im ursprünglichen Laborversuch.

In Kapitel 1.2 wurde gezeigt, dass das Schwimmvermögen von Fischen in Körperlängen pro Sekunde gemessen wird. Fische, die um einen Faktor λ größer sind als andere können demnach auch um den Faktor λ schneller schwimmen. Folgt man der Argumentation, so kann man sehen, dass die Strömungsgeschwindigkeiten bei Vergrößerung des Kanals langsamer steigen als das Schwimmvermögen der um den selben Faktor vergrößerten Fische. Dies führt dazu, dass in der realen Fischaufstiegsanlage im Vergleich zur Anlage auch wesentlich kleinere Fische die körperlichen Voraussetzungen besitzen, um die Anlage zu überwinden. Die Übertragung der ermittelten Zusammenhänge auf Gerinne im größeren Maßstab müsste demnach möglich sein.

4.2.6 Zusammenfassung

In den beschriebenen Versuchen wurde das Verhalten von drei verschiedenen Fischarten bei zwei unterschiedlichen Durchflüssen untersucht. Je nach Fischart wurde eine gute bis sehr gute Akzeptanz der neuen Anlage nachgewiesen. Die kleinen Fische bewegen sich in der Anlage frei in beide Stromrichtungen und erweckten den Eindruck,

dass sie die neuartige Fischtreppe mit Leichtigkeit und jederzeit gut kontrollierbar durchschwimmen können. Um die Selektivität der Fischtreppe insgesamt beurteilen zu können, sind Untersuchungen mit weiteren Fischarten notwendig.

Hydraulische Maßstabsversuche mit Fischen sind äußerst kompliziert. Man versucht anhand von Beobachtungen des Verhaltens von Jungfischen auf das Verhalten von adulten Fischen zu schließen. Das Problem daran ist die Frage nach dem inneren Antrieb der Wanderung. Warum sollten sich Jungfische genötigt fühlen, den beschwerlichen Weg durch eine Fischtreppe anzutreten? In den Versuchen mit Piau und Mandi wurde eine sehr geringe Aktivität der Fische beobachtet. Durch einen Nachtversuch wurde ein Indiz für die Abhängigkeit der Aktivität der Mandis von der Tageszeit gefunden. In weiteren Experimenten ist zu klären, welches die auslösenden Reize für eine Erhöhung der Aktivität sind. Diese können u. a. Tages- oder Jahreszeit, Helligkeit, Temperatur oder chemische Zusammensetzung des Wassers sein.

Im Experiment orientierten sich die Fische an der Strömung, um die Öffnungen unter den Schützen zu finden und zu unterschwimmen. Sie hielten sich zur Regeneration in den Rezirkulationsbereichen auf. Größere Fische drehen sich in den Rezirkulationsbereichen 90° um die Vertikalachse, so dass ihre Längsachse parallel zu den Schützwänden ist. Sie haben auf diese Weise eine geringe Angriffsfläche für die auftretenden Wirbel und benötigen einen geringen Kraftaufwand, um ihre Lage im Kern der Rezirkulationsgebiete zu stabilisieren.

In den Versuchen mit den Piaus und Mandis erwies sich die durch die letzte Prallwand erzeugte Strömung als problematisch für die Auffindbarkeit der Anlage. Durch die Prallwand sollte der Schützstrahl vom Boden abgelöst und durch die daraus folgende Einmischung der Einstieg in die Treppe vereinfacht werden. Es bildet sich jedoch eine Rezirkulationszone, die bodennahe Fische zu einer rheotaktisch falschen Ausrichtung ihres Körpers veranlasst. Bei einer Weiterentwicklung sollte diese Rezirkulationszone bei guter Einmischung des Strahls vermieden werden.

Das zusammenfassendes Ergebnis der Versuche mit Fischen ist eine prinzipielle Akzeptanz und der prinzipielle Nachweis, dass sich die betrachteten Fische in der Anlage orientieren können.

4.3 Beschreibung des Laborversuchs am Fachgebiet Hydromechanik

Nachdem das neuartige Anlagendesign vorgestellt und seine prinzipielle Akzeptanz anhand von Versuchen mit Fischen bereits belegt wurde, ist die Frage nach den strömungsphysikalischen Zusammenhängen in einer derartigen Anlage zu klären. Zu diesem Zweck wurde ein Untersuchungskonzept aus Laborexperimenten und numerischen Simulationen entwickelt, die sich in ihren Aussagen jeweils ergänzen. In einem Testgerinne am Fachgebiet Hydromechanik der Technischen Universität München wurde eine Anlage mit vier Becken im Maßstab 1 : 5 erstellt. In Abhängigkeit der Unterwasserfließtiefe ergeben sich bei Veränderung der Durchflüsse unterschiedliche Strömungszustände in den Becken. Durch die Messung der Fließtiefen an insgesamt 16 Stellen in der Anlage und anschließender strömungsphysikalischer Analyse konnten die Strömungsverluste in den Becken, die Strahlkontraktionen und die instationären Wasserspiegeländerungen untersucht werden.

4.3.1 Konfiguration des Laborversuch

In ein ca. 10 m langes Gerinne der Breite 30 cm und Höhe 70 cm wurde eine Anlage im Maßstab 1 : 5 mit insgesamt vier Becken eingebaut (Abbildung 4.8). Die Abmessungen des Laborversuches sind in Abbildung 4.9 dargestellt.

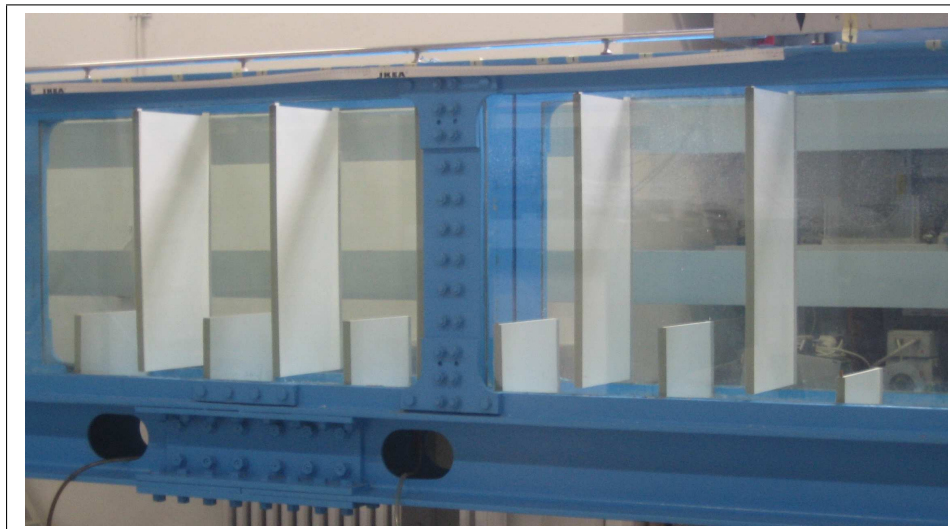


Abbildung 4.8: Versuchsaufbau am Fachgebiet Hydromechanik, TU München.

Der Unterwasserstand wurde durch ein Wehr mit veränderlicher Höhe eingestellt. Die Mindesthöhe des Wehres betrug 30 cm, so dass selbst bei stehendem Wasser im Gerinne eine durchgängige Verbindung zwischen den Becken gewährleistet ist. Der Durchfluss konnte durch einen im Zulauf eingebauten magnetisch-induktiven Durchflussmesser bestimmt werden. Um die Pumpe von der Gerinneströmung zu entkoppeln, wurde im Zulauf des Gerinnes ein Dreieckswehr eingebaut. Auf diese Weise konnten Schwingungen oberstrom des ersten Schützes, die durch die Pumpe induziert waren, reduziert werden.

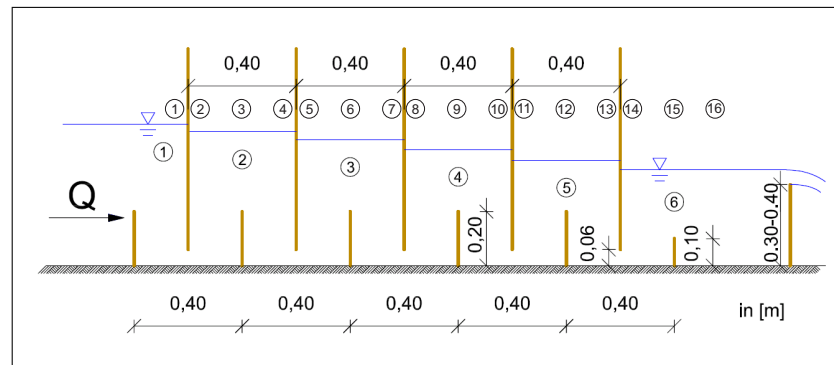


Abbildung 4.9: *Prinzipische Skizze des Modellaufbaus*

Im gegebenen Laborversuch wurden bei unterschiedlichen Durchflüssen und Wehrhöhen die Fließtiefen an 16 unterschiedlichen Orten gemessen (Abb. 4.9). In den weiteren Ausführungen dieses Abschnittes wird aufgrund der Messergebnisse versucht, Rückschlüsse auf die strömungsphysikalischen Zusammenhänge in der Anlage zu ziehen. Nach einer Entdimensionalisierung der Messergebnisse mit Hilfe des Schützenshubes $d = 6 \text{ cm}$, der mittleren Geschwindigkeit v_m und der Dichte ρ können folgende Messgrößen im Gerinne definiert werden:

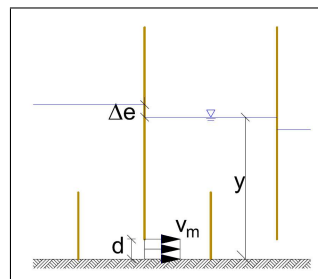


Abbildung 4.10: *Gemessene Parameter im Laborversuch*

- Fließtiefe y/d
- Wehrhöhe w/d
- mittlere Geschwindigkeit unter dem Schütz $v_m = Q/(d \cdot b)$
- Froude-Zahl $Fr = v_m/\sqrt{y \cdot g}$
- Reynolds-Zahl $Re = v_m \cdot d/\nu$
- Energieverlustbeiwert $\zeta = \Delta e/(v_m^2/2g)$
- Kontraktionsbeiwert $\psi = v_m/v_{max}$

Zur Messung der Fließtiefen wurde ein Ultraschallmesssystem der Firma *General Acoustics* verwendet. In den einzelnen Becken fanden dabei jeweils drei Messungen statt (Abbildung 4.11), oberstrom der Anlage eine Messung und unterstrom der Anlage drei Messungen.

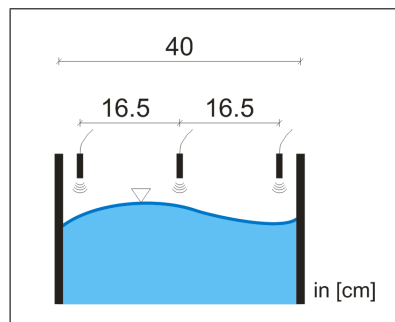


Abbildung 4.11: Ultraschallfließtiefenmessung in den Becken

An die Ultraschallsonde *USS20130* wurde über einen Spannungsverstärker eine AD/DA-Messkarte der Firma *National Instruments* angeschlossen. Die Spezifikationen des Sensors sind in Tabelle 4.4 angegeben. Für die Datenaufnahme und -auswertung wurde ein halbautomatisches Messsystem mit der Programmiersprache *LabVIEW* entwickelt. Nach dem Start der Messungen musste der Abbruchzeitpunkt so gewählt werden, dass von statistisch unabhängigen und reproduzierbaren Messergebnissen ausgegangen werden konnte. Dieser Abbruchzeitpunkt wurde numerisch durch Konvergenzanalyse der Messwerte ermittelt. Details zur Bestimmung der Messzeit mit Hilfe des Zentralen Grenzwertsatzes [13] können dem Anhang entnommen werden.

Parameter	Dimension
Blindbereich	200 mm
Messbereich	1300 mm
Frequenz	200 kHz
Technische Auflösung	0,18 mm
Reproduktivität	$\pm 15\%$
Ausgabefrequenz	50 Hz

Tabelle 4.4: Technische Parameter des Ultraschallsensors USS 201300 der Firma General Acoustics

4.3.2 Energiehöhenverluste in den Becken

Mit der dargestellten Messmethode wurden die Fließtiefen an 16 unterschiedlichen Punkten in der Anlage gemessen. Die Fließtiefen y_i im Kanal variieren dabei bei unterschiedlichem Durchfluss Q und unterschiedlicher Wehrhöhe w . In diesem Abschnitt werden die Fließtiefen in den Becken mit den unterschiedlichen Randbedingungen in Beziehung gesetzt und strömungsphysikalisch untersucht.

Vor der Diskussion der Ergebnisse des Laborversuches muss geklärt werden, welche Durchflüsse im Laborversuch untersucht werden müssen, um Aussagen über die reellen Strömungsverhältnisse in einem unskalierten Gerinne zu erhalten. Die Strömung im gegebenen Gerinne wird durch die Schwerkraft getrieben. Aufgrund dessen wurde bereits im vorherigen Abschnitt gemutmaß, dass die Froude-Zahl Fr bei unterschiedlichen Skalierungen des Systems konstant bleibt. Man spricht auch von einer Froude-Ähnlichkeit der Strömungsverhältnisse.

In der folgenden Tabelle wurden die im Versuch eingestellten mittleren Geschwindigkeiten unter der Annahme konstanter Fr -Zahlen auf das unskalierte System übertragen:

Die in einer Fischaufstiegsanlage auftretenden Maximalgeschwindigkeiten sollten 2 m/s nicht übersteigen (vgl. DVWK [20]). Wie man aus der Tabelle entnehmen kann, entspricht diese Geschwindigkeit bei Annahme eines Kontraktionswertes ψ von 0,5 einer mittleren Geschwindigkeit $v_m = 0,45$ m/s entspricht. Die Annahme der Gültigkeit der Froude-Ähnlichkeit der Strömungsverhältnisse wird in Abschnitt 5.2 nachgewiesen.

Die sich im Gerinne einstellenden Fließtiefen y_i/d hängen vom Durchfluss Q

$v_{m,Modell}$ [m/s]	$v_{m,Reell}$ [m/s]	$v_{max} = 1/\psi \cdot v_{m,Reell}$ [m/s]
0,08	0,19	0,37
0,14	0,31	0,62
0,19	0,43	0,87
0,25	0,56	1,12
0,31	0,68	1,37
0,36	0,81	1,62
0,42	0,93	1,86
0,47	1,06	2,11
0,53	1,18	2,36

Tabelle 4.5: Übertragung der eingestellten Strömungsverhältnisse auf das unskalierte System bei Annahme $\psi = 0,5$.

und von der Wehrhöhe w/d ab. Um die Strömungsverhältnisse in den verschiedenen Becken vergleichen zu können, werden nicht die Fließtiefen, sondern die Fließtiefenunterschiede Δy zwischen je zwei Becken abhängig von w/d betrachtet. Diese Fließtiefenunterschiede stellen die Verluste an Energiehöhe Δe zwischen den Becken dar. In den folgenden Auswertungen werden die Δe_i unabhängig von w/d zwischen den Becken 2, 3, 4 und 5 in Abhängigkeit der mittleren Fließtiefen der jeweiligen beiden Becken untersucht. In der Auswertung hat sich gezeigt, dass der Einstromvorgang von Becken 1 nach 2 sowie der Ausstromvorgang von Becken 5 nach 6 nicht den gezeigten Argumentationen folgt, und diese deshalb in den Betrachtungen nicht berücksichtigt wurden. In der Zusammenfassung in Kapitel 6.2 wird der Einfachheit halber angenommen, dass die Summe aus Δe_{1-2} und Δe_{5-6} wie Δe eines zwischenliegenden Beckens betrachtet werden kann.

In einem ersten Schritt wird der Zusammenhang zwischen der Re und Δe bzw. dem Verlustbeiwert ζ bei konstanten Fließtiefen y untersucht (Abb. 4.12):

$$\zeta = f(Re) \quad (4.3.1)$$

Wie man der Abbildung sieht, sind die Verläufe der Verlustbeiwerte ζ im Wesentlichen horizontal, d. h. unabhängig von Re . Die größten Einflüsse auf ζ sind bei kleinen Re-Zahlen, also sehr langsamen Strömungsgeschwindigkeiten, zu erkennen, die jedoch für

den Auslegungsfall keine größere Bedeutung haben.

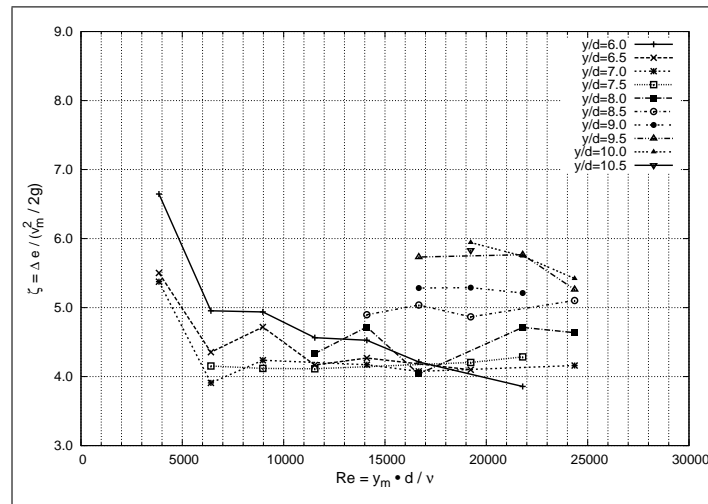


Abbildung 4.12: *Energieverlustbeiwert ζ bei unterschiedlichen Fließtiefen y/d in Abhängigkeit der Reynoldszahl Re*

Nach der Re soll in einem zweiten Schritt die Abhängigkeit der Energiehöhenverluste Δe von der Froude-Zahl Fr untersucht werden (Abb. 4.13):

$$\Delta e/d = f(Fr) \quad (4.3.2)$$

In der Abbildung ist ein parabolischer Zusammenhang zwischen Fr und Δe zu erkennen. Dies ist nicht verwunderlich, da Δe mit der Geschwindigkeitshöhe $v^2/2g$, d. h. dem Quadrat der Geschwindigkeiten in Beziehung steht. Betrachtet man weiterhin die Verteilung der ausgewerteten Messungen bei konstantem Re , so ist ein linearer Zusammenhang mit einer negativen Steigung zwischen Fr und Δe zu erkennen. Bei einer gegebenen mittleren Geschwindigkeit v_m sinkt Fr mit steigendem y . Gleichzeitig steigt Δe an. Man kann daraus schließen, dass man die Becken möglichst tief machen sollte, um bei gegebenem Durchfluss Q die Energiehöhenverluste Δe zu maximieren. Es sind somit mit tieferen Becken kürzere Entwicklungslängen der Fischtreppe möglich.

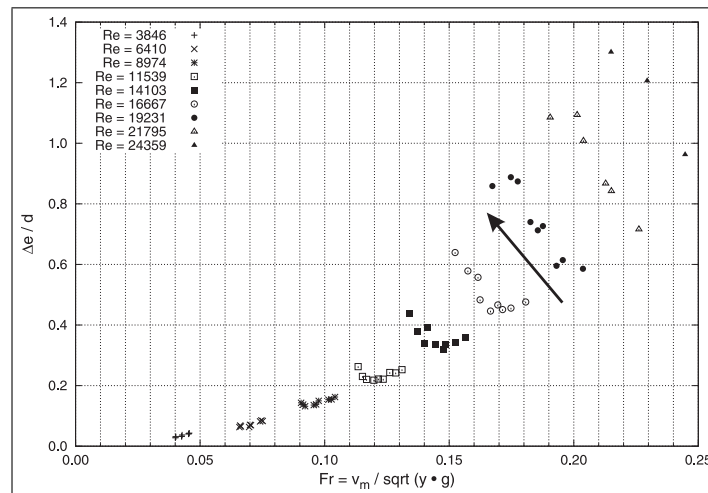


Abbildung 4.13: *Energiehöhenverluste Δe bei unterschiedlichen Reynoldszahlen Re in Abhängigkeit der Froude-Zahl Fr*

Vor der Dimensionierung einer Fischtreppe wird jedoch im Allgemeinen die Inklination der Fischtreppe und somit der Energiehöhenverlust zwischen den Becken bereits in der Planungsphase festgelegt. Die entscheidende Information für Biologen und Ingenieure ist nun, wie groß die mittleren Strömungsgeschwindigkeiten v_m bzw. wie groß der Durchfluss Q im Gerinne in Abhängigkeit der gewählten mittleren Fließtiefe y_m ist. Zu diesem Zweck wurde in Abbildung 4.14 der Verlustbeiwert ζ in Abhängigkeit der reziproken Fließtiefe d/y_m bei unterschiedlichen Re aufgetragen.

$$\zeta = f(d/y_m) \quad (4.3.3)$$

In der Abbildung ist ein schwacher Zusammenhang zwischen ζ und den Fließtiefen y_m zu erkennen. Mit steigendem ζ verringern sich bei gegebenem Δe die mittleren Geschwindigkeiten v_m und damit der Durchfluss Q . Da Δe mit den maximalen Geschwindigkeiten v_{max} in den Becken in Beziehung steht, folgt aus einer Reduzierung von v_m eine stärkere Kontraktion des Schützstrahls. Die maximalen Durchflüsse im gegebenen Gerinne werden bei Fließtiefen y_m/d zwischen 7,1 und 7,7 erreicht. Dies ist der ungünstigste Fall, da für die Fische die höchsten Geschwindigkeiten und für die Betreiber die größten Durchflüsse bzw. Kosten auftreten. Zu einer Reduzierung des Durchflusses sollten die Fließtiefen möglichst groß gewählt werden.

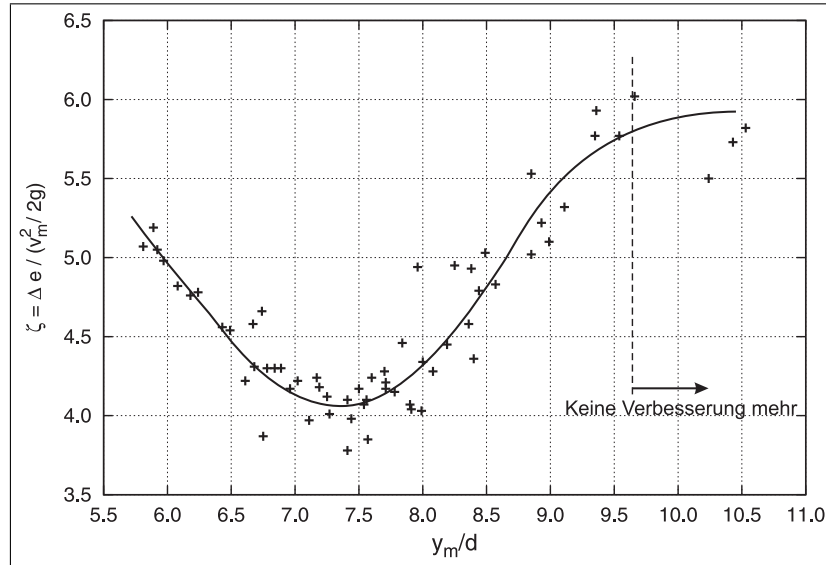


Abbildung 4.14: Energiehöhenverlustbeiwert ζ bei unterschiedlichen Fließtiefen y_m/d

4.3.3 Kontraktionsbeiwerte unter den Schützen

Die Unterschiede der mittleren Fließtiefen zwischen zwei Becken entsprechen bei vollständiger Energiedissipation des Schussstrahls der Energiehöhe des Schützstrahls zuzüglich eines Energieverlustes Δe_A in der Anströmung (Gl. 4.3.4). Bezieht man Δe_A mit Hilfe eines Energieverlustbeiwertes ζ_A auf die Geschwindigkeitshöhe $v_s^2/2g$ des Schussstrahls, so kann man schreiben:

$$\Delta y = \frac{v_s^2}{2g} + \Delta e_A = \frac{v_s^2}{2g} + \zeta_A \frac{v_s^2}{2g} = (1 + \zeta_A) \frac{v_s^2}{2g} \quad (4.3.4)$$

Franke [24] gibt den Verlustbeiwert ζ_A mit etwa 3% für den freien Abfluss unter Planschützen bei größeren Überstaugraden y/d an. Da dieser Wert sehr klein ist, wird ζ_A in den weiteren Ausführungen des Kapitels vernachlässigt und in den Kontraktionswert ψ des Schützstrahls miteingerechnet. Es lässt sich vereinfacht schreiben:

$$\Delta e = \Delta y \approx \frac{v_s^2}{2g} \quad (4.3.5)$$

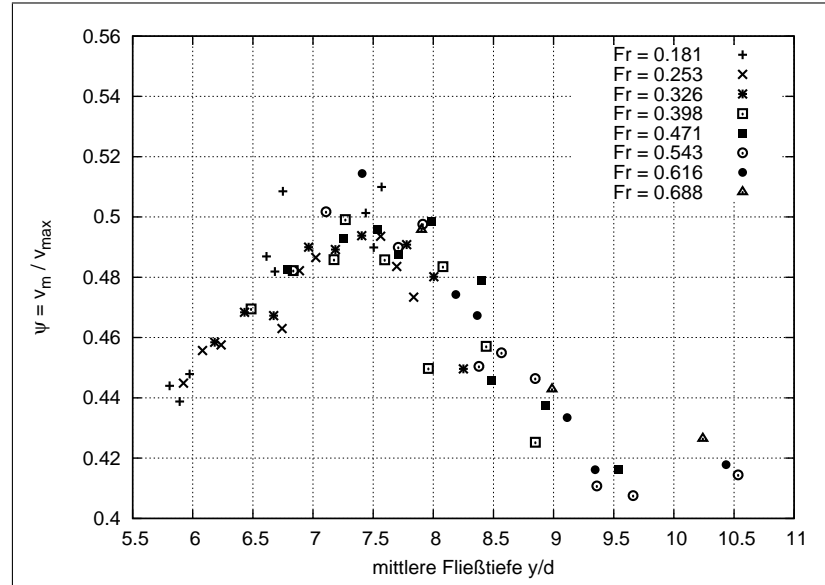


Abbildung 4.15: Kontraktionswerte bei unterschiedlichen Fließtiefen y/d und Froude-Zahlen

Bei Berücksichtigung der Strahlkontraktion ψ können folgende Beziehungen aufgestellt und nach ψ aufgelöst werden:

$$v_s = \frac{Q}{A_s} = \frac{v_m \cdot A}{A_s} = \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta y} \quad (4.3.6)$$

$$A_s = \psi \cdot A \quad (4.3.7)$$

$$\psi = \frac{v_m}{2} \sqrt{\frac{2}{\Delta y \cdot g}} \quad (4.3.8)$$

In den Gleichungen ist A_s die Querschnittsfläche des Schussstrahls an seiner größten Einengung und A die Querschnittsfläche unter dem Schütz. Diese Beziehungen gelten nur für den Idealfall $\zeta_A = 0$.

Für die Strömungszustände im Laborversuch wurden die ψ -Werte in den einzelnen Bereichen berechnet und bei unterschiedlichen Froude-Zahlen (Abb. 4.15) in Abhängigkeit der mittleren Fließtiefe y dargestellt. Für die Berechnung von Fr wurde d als Bezugsgröße verwendet.

Analog zu den Ausführungen des vorherigen Abschnittes ist zu erkennen, dass die Strahlkontraktion zwischen $y/d = 7,1$ und $7,7$ am geringsten und ψ deshalb am größten ist. Bei steigenden Fließtiefen sinkt ψ und sollte sich asymptotisch einem Wert annähern. Aufgrund der geringen Höhe des Versuchserinnes von 70 cm konnte

y/d jedoch nur bis etwa 10,5 gesteigert werden.

In der Literatur werden die Abflüsse bei Schützen mit rückgestautem Abfluss im Allgemeinen durch Abminderung des Abflusses bei Schützen mit freiem Abfluss berechnet. Die Abminderung berücksichtigt hierbei die Verringerung der Geschwindigkeitshöhe bei konstantem Kontraktionswert ψ .

Nach Bollrich errechnet sich der freie Abfluss unter einem Schütz zu:

$$Q = \mu_a \cdot d \cdot b \cdot \sqrt{2g \cdot h_0} \quad (4.3.9)$$

mit einem Abflussbeiwert μ_A von

$$\mu_a = \frac{\psi}{\sqrt{1 + \frac{\psi \cdot d}{y_0}}} \quad (4.3.10)$$

Die Kontraktionswerte ψ und Abflussbeiwerte μ_A für eine geneigte, scharfkantige Schütztafel sind in Abbildung 4.16 dargestellt. Wie man sieht, wird ψ bei steigender Fließtiefe y kleiner. Dies ist aus der Tatsache ersichtlich, dass der Schützstrahl zunehmend freier auch aus der Vertikalen zuströmen kann. Der Einfluss des Wasserspiegels auf die Strömung wird zunehmend kleiner und strebt einen asymptotischen Wert an.

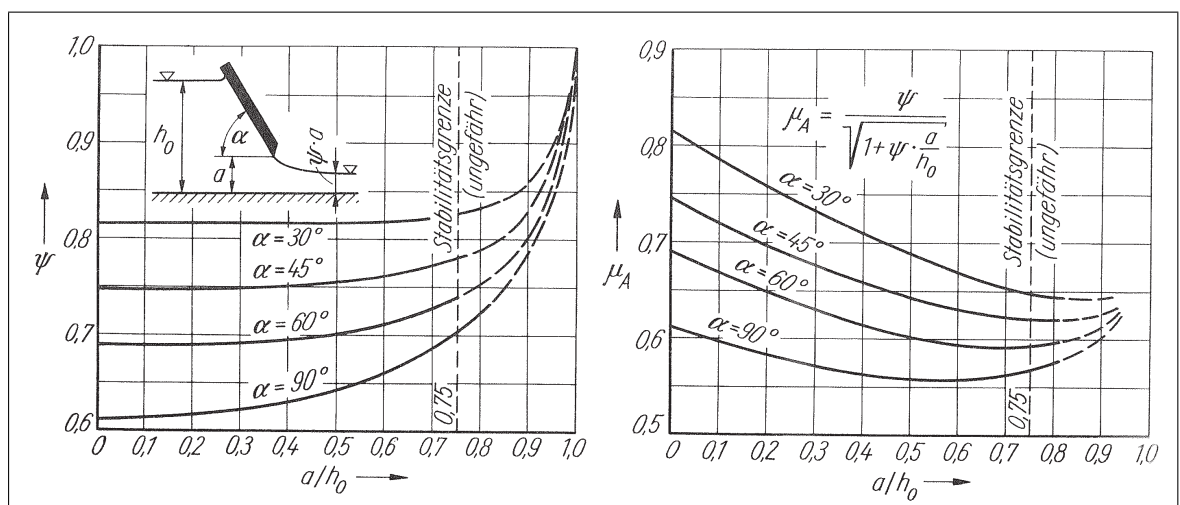


Abbildung 4.16: Kontraktionswert ψ und Abflussbeiwert μ_A für eine geneigte, scharfkantige Schütztafel, aus [11]

Die in der Auswertung für ein Schütz mit rückgestautem Abfluss dargestellten Werte liegen weit über den in den Laborversuchen gefundenen Werten. Hier werden lediglich ψ -Werte zwischen 0,40 und 0,52 gefunden. Durch die Strahlführung in den einzelnen Bereichen des Modellversuches kommt es zu keinem freien Zuströmen zu den Schützöffnungen, was in einer größeren Strahlkontraktion resultiert.

Durch die größere Strahlkontraktion wird die Querschnittsfläche A_s des Schussstrahls an seiner größten Einschnürung verringert, was einen wesentlich geringeren Durchfluss bedingt. Dies kommt zum einen den Fischen zugute, da der geringere Durchfluss in einem geringeren Impulsstrom resultiert, gegen den die Fische anschwimmen müssen. Zum anderen ist der Effekt der ψ -Wertreduzierung aus ökonomischer Hinsicht wünschenswert, da der Betrieb der Anlage mit wesentlich geringeren Kosten verbunden ist.

4.3.4 Wasserspiegelschwankungen in den verschiedenen Becken

Ein weiterer sehr wichtiger Gesichtspunkt bei der Auslegung einer Fischaufstiegsanlage ist die Untersuchung der Zeitabhängigkeit der Strömungsbedingungen in einer Anlage. Im Laborversuch wurden neben den mittleren Fließtiefen y_i auch deren Varianzen σ_i bestimmt. Durch die Wasserspiegelschwankungen kommt es in den einzelnen Bereichen zu Druckschwankungen, die von Fischen wahrgenommen werden können. Im Extremfall können diese Druckschwankungen die Sinneswahrnehmungen von Fischen derart überlagern, dass sie Räuber und Hindernisse, wie z. B. Wände, mit Verzögerung wahrnehmen.

Aus strömungsphysikalischer Sicht ändern sich bei Schwankungen des Wasserspiegels die Energiepotentiale in der Anlage. Es kommt zu positiven und negativen Beschleunigungsvorgängen in den Becken. Bei der Überwindung von derartigen instationären Hindernissen haben sich im Laborversuch längere Durchgangszeiten der Fische ergeben. Die verwendeten Fische versuchten zeitliche Muster zu erkennen, um die Anlage in den optimalen Zeitpunkten zu überwinden. Für die Quantifizierung dieser Hypothese sind jedoch weitgehende ichthyo-ethologische Versuche notwendig.

Wasserspiegelschwankungen treten in den einzelnen Becken in unterschiedlichster

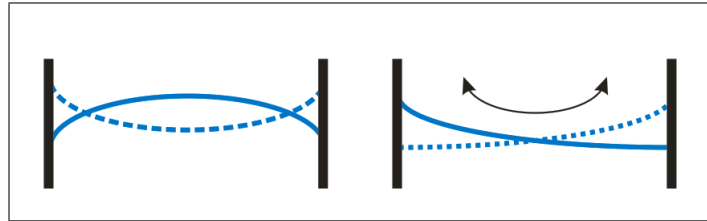


Abbildung 4.17: *Verschiedene Möglichkeiten von Wasserspiegelschwankungen.*

Links: gewölbte Schwingung.

Rechts: einfache Schwingung.

Form auf. Die Bandbreite liegt zwischen *Schwappen* in Strömungsrichtung und rhythmischen *Auf-/Ab-Bewegungen* bis hin zu großräumigen *Zirkulationen* (Abb. 4.17).

Da die Diskussion der einzelnen Zustände den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde, wurden die Varianzen der drei Messwerte σ_i eines jeden Beckens gemittelt. Es ergibt sich daraus ein Diskussionskriterium für die mittleren Wasserspiegelschwankungen in den einzelnen Becken. Das Ergebnis ist in Abbildung 4.18 graphisch dargestellt. Für die Berechnung von Fr wurde d als Bezugsgröße verwendet.

Die freie Oberfläche stellt eine Grenzfläche für den sich von der Prallwand ablösenden Flüssigkeitsstrahl dar. Mit steigendem Durchfluss und sinkender Entfernung zwischen der freien Oberfläche und der Oberkante der Prallwand steigt der verbleibende Impuls des Strahls in der Nähe der Oberfläche. Stellt man die Impulsbilanz in der Nähe des Wasserspiegels auf, so sieht man, dass die Oberfläche dem Impuls des Strahls in vertikaler Richtung durch die Schwerkraft entgegen wirken muss. Je stärker dieser Impuls ist, desto größer werden folglich die Wasserspiegelschwankungen in den einzelnen Becken.

Erhöht man in der Anlage die Fließtiefen, so verringert sich auch die Varianz in den Becken unabhängig von Fr . Eine Verringerung der Varianz bedeutet eine Vergleichmäßigung der Strömungsbedingungen in den einzelnen Becken und deshalb eine Verbesserung der Umgebungsbedingungen für die Fische. Im Dimensionierungsfall sollten die Fließtiefen in den Becken möglichst groß und die Wasserspiegel möglichst schwankungsfrei gewählt werden, um für Fische günstige und gleich bleibende Strömungszustände in der gesamten Anlage zu gewährleisten.

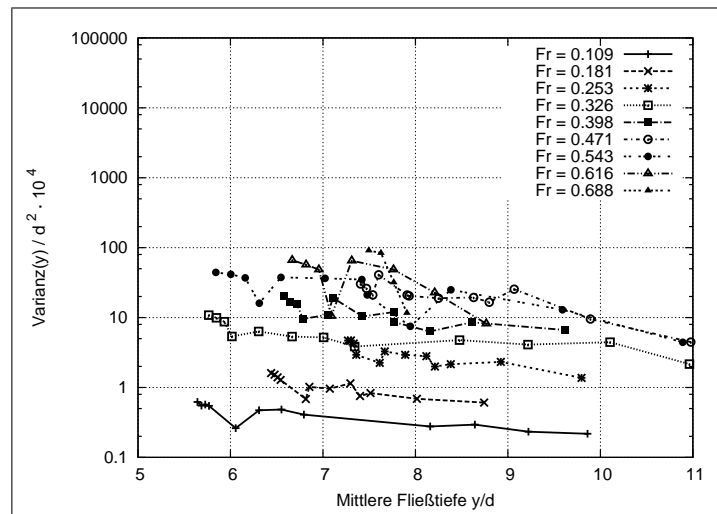


Abbildung 4.18: *Varianzen der Fließtiefen in Abhängigkeit der Fließtiefen y/d bei unterschiedlichen Froude-Zahlen*

4.3.5 Zusammenfassung der Laborexperimente und Ausblick

Im Rahmen eines Laborversuches wurden die strömungsphysikalischen Gesetzmäßigkeiten in einem Fischaufstiegsgerinne mit periodischen Schützen untersucht. Zu diesem Zweck wurde in ein Gerinne der Breite 30 cm und der Höhe 70 cm eine im Maßstab 1 : 5 skalierte Anlage mit vier Becken eingebaut. Die Mindestfließtiefe wurde durch ein am Ende des Gerinnes befindliches Wehr mit variabler Höhe definiert.

Im Versuch wurden bei unterschiedlichen Durchflüssen und Wehrhöhen die Fließtiefen an 16 unterschiedlichen Orten gemessen. Durch eine Analyse der Zeitreihe der Messwerte mit Hilfe des zentralen Grenzwertsatzes konnte die Messzeit derart bestimmt werden, dass von repräsentativen und reproduzierbaren Messwerten ausgegangen werden kann.

In einem ersten Schritt wurden der Fließtiefenunterschied, d. h. der Energiehöhenverlust zwischen zwei Becken untersucht, und mit der Reynolds-Zahl Re , der Froude-Zahl Fr und den mittleren Fließtiefen y in Beziehung gesetzt. Es konnte zum einen gezeigt werden, dass die Energieverluste weitgehend unabhängig von Re sind. Zwischen Fr und dem Verlustbeiwert ζ konnte ein parabolischer Zusammenhang gefunden werden, was durch die Beziehung von ζ auf die Geschwindigkeitshöhe von v_m begründet ist. Desweiteren steigt bei konstantem Re der Energieverlust Δe bei Erhöhung der Fließtiefe. Bei gegebenem Durchfluss ermöglichen tiefe Becken

demzufolge größere Inklinationen der Gerinne.

Die Entwicklung der Kontraktionswerte der Schützstrahlen wurde in Abhängigkeit der Fließtiefen bei unterschiedlichen Durchflüssen analysiert. Es konnte zum einen gezeigt werden, dass die geringste Strahlkontraktion bei Werten von y/d zwischen 7,1 und 7,7 vorliegt. Wenn die Fließtiefe weiter erhöht wird, so steigt die Strahlkontraktion, was zu einer Verminderung des Durchflusses führt. Durch die speziellen Strömungsverhältnisse kommt es zu keiner freien Zuströmung zur Schützöffnung. Es konnte gezeigt werden, dass die ermittelten Kontraktionswerte wesentlich geringer waren als die in der Literatur angegebenen Kontraktionsziffern, was zu signifikant geringeren Durchflüssen führt.

Im Laborversuch entwickelten sich teils sehr starke Wasserspiegelschwankungen, die mit steigender Fließtiefe in den Becken abnehmen. Diese Abnahme steht mit einer Verringerung der Interaktion der sich entwickelnden Strömung mit der Oberfläche in Zusammenhang. Eine Verringerung der Wasserspiegelschwankung führt zu einer Vergleichmäßigung der Strömung, was sich positiv auf die ökologische Durchgängigkeit auswirken dürfte. Es sollte deshalb bei der Dimensionierung einer derartigen Fischtreppe auf eine möglichst große Fließtiefe in den Becken geachtet werden.

In weitergehenden Laborversuchen sollte der Einfluss des Sohlgefälles auf das Strömungsfeld untersucht werden. Im vorliegenden Fall war die Gerinnesohle horizontal. Es stellten sich in den Becken des Modells jeweils unterschiedliche Strömungszustände ein. Obwohl der Fall einer horizontalen Sohle in der Praxis unwahrscheinlich ist, konnten mit der gewählten Konfiguration unterschiedlichste Fließtiefen in den Becken gleichzeitig analysiert werden. Um den Einfluss des Sohlgefälles und der Geometrie auf das Strömungsfeld zu quantifizieren, wurden als Ergänzung zu den Laborversuchen numerische Simulationen durchgeführt. Die im nächsten Abschnitt präsentierten Ergebnisse erlauben bereits in der Planung einer derartigen Anlage die Prognose des Durchflusses und der Maximalgeschwindigkeiten.

Kapitel 5

Simulation

Numerische Simulationen stellen heute ein wertvolles Werkzeug dar mit dem die herkömmlichen Laborexperimente unterstützt werden können. Es können zum einen geometrische Parameterstudien schneller und kostengünstiger durchgeführt werden. Zum anderen bieten Simulationsergebnisse aufgrund ihrer Datenfülle die Möglichkeit, andere, mit den herkömmlichen Messmethoden nicht zugängliche Strömungsgrößen, zu untersuchen. Hier finden zwei alternative Ansätze der numerischen Simulation Anwendung, die RANS- und die LES-Methode.

Zu Beginn des Kapitels werden das verwendete Simulationsprogramm *Flow3D* der Firma *FlowScience, Inc.* und die darin verwendeten numerischen Methoden vorgestellt. Danach werden die Ergebnisse einer geometrischen Parameterstudie, bei der die RANS-Methode benutzt wurde, präsentiert. Es werden die Strömungsfelder in Abhängigkeit von geometrischen und strömungsphysikalischen Randbedingungen wie der Beckengeometrie oder der mittleren Fließtiefe in einem Becken der Anlage näher untersucht. Die Ergebnisse der Parameterstudie erlauben eine Prognose der Geschwindigkeiten und der Durchflüsse in der Anlage aufgrund der Geometrie. In Kapitel 6.2 sind diese Ergebnisse in einer Dimensionierungsvorschrift zusammengefasst.

Die Simulation der Strömungsfelder mit einer aufwändigeren numerischen Methode, der Large Eddy Simulation (LES), erlaubt im Rahmen einer detaillierteren Strömungsanalyse, instationäre Strömungsgrößen zu untersuchen. Es können sowohl turbulente Schwankungsgrößen quantifiziert als auch kohärente Strukturen in der Strömung analysiert werden.

5.1 Einführung

5.1.1 Der Strömungslöser *Flow3D*

Bei einer numerischen Simulation wird das physikalische Experiment mit Hilfe von physikalischen Gleichungen beschrieben, die anschließend gelöst werden. Durch diese Vorgehensweise können geometrische Variationen des Experimentes sehr einfach implementiert werden, da nur einige Randbedingungen in den zu lösenden Gleichungen geändert werden müssen.

Zur Berechnung des gegebenen Systems wurde das kommerzielle Simulationsprogramm *Flow3D* der Firma *FlowScience, Inc.*, eingesetzt. Im Gegensatz zu anderen Strömungslösern wurde dieses Programm speziell für die Berechnung von Strömungen mit freien Oberflächen entwickelt und optimiert. Die Besonderheit des Programms besteht darin, dass eine Strömung mit einer freien Oberfläche nicht nur als Zweiphasenströmung, sondern auch als Einphasenströmung berechnet werden kann. Im Vergleich mit anderen Strömungslösern ist *Flow3D* deshalb in Hinblick auf Stabilität und Rechenzeit bei Strömungen mit freier Oberfläche überlegen. Das verwendete Programm ist am Fachgebiet Hydromechanik der TU München seit Jahren im Einsatz und wurde bereits im Rahmen diverser Diplom- und Doktorarbeiten (z. B. [42]) erfolgreich eingesetzt.

Das Programm bietet verschiedenste Berechnungsmethoden und Diskretisierungsmöglichkeiten an, um die physikalischen Randbedingungen zu beschreiben. In der verwendeten Programmkonfiguration löst *Flow3D* die inkompressiblen Navier-Stokes-Gleichungen auf einem kartesischen Gitter mit einem Finite-Volumen-Verfahren:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (5.1.1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} + g_i \quad (5.1.2)$$

Die räumliche Approximation der Flüsse erfolgt in der gewählten Konfiguration mit der *Monotonicity Preserving Second Order* Methode. Diese stellt eine Kombination aus einem Zentralfindungsverfahren (CDS, zweiter Ordnung) und einem Upwind-Verfahren (erster Ordnung) dar. Die Zeitintegration wird mit einem expliziten

Verfahren durchgeführt, wobei der Druck implizit durch eine iterative Berechnung gelöst wird. Die Länge der Zeitschritte wurde automatisch durch das Programm über eine Betrachtung der Courant-Zahl bestimmt. Für die Berechnung der freien Oberfläche wird der Algorithmus von Hirt und Nichols benutzt [30].

5.1.2 Berechnungsnetz

In *Flow3D* wird die Strömung an kartesischen strukturierten Gittern nach dem Finite-Volumen-Verfahren berechnet. Um Hindernisse in der Strömung zu beschreiben, bedient sich das Programm der *Fractional Area/Volume Obstacle Representation* Methode (*FAVORTM*-Methode). Es wird hierbei an jeder Zelle der Bereich bestimmt, der mit Fluid gefüllt werden kann. Dieser Bereich wird durch Flächen- und Kantenanteile der Zelle beschrieben. Die im Programm verwendeten Interpolationen werden nun derart modifiziert, dass die im Finite-Volumen-Verfahren verwendeten Erhaltungsgleichungen weiterhin gültig sind. Eine detaillierte Beschreibung der *FAVORTM*-Methode kann der Dokumentation [23] oder Hirt [31] entnommen werden.

5.1.3 Randbedingungen

Die in *Flow3D* zu lösenden Gleichungen stellen Differentialgleichungen dar, bei deren Berechnung Randbedingungen angegeben werden müssen, um eine eindeutigen Lösung zu erhalten.

Die Differentialgleichungen werden in *Flow3D* wie bereits angesprochen auf einem strukturierten kartesischen Gitter gelöst. Für jedes quaderförmige Berechnungsgitter können demnach insgesamt sechs Seitenflächen identifiziert werden. Da das Programm auf jeder dieser Seitenflächen nur eine konstante Randbedingung zulässt, sind somit insgesamt sechs Randbedingungen zu definieren.

In den ersten Simulationen wurde das neuartige Anlagendesign quasi zweidimensional berechnet, d. h. es wurde eine Breite des Kanals von 1 m angenommen. An den seitlichen Rändern des Berechnungsgebietes wurden *Symmetrie*-Randbedingungen gesetzt. Die Ergebnisse der Berechnung können an den Symmetrieebenen gespiegelt werden, was eine Übertragung der Ergebnisse auf beliebige Kanalbreiten erlaubt.

Die Randbedingung *Symmetrie* ist jedoch nur bei Berechnung von mittleren Geschwindigkeitsfeldern gültig. Auftretende instationäre Phänomene wie Wirbel werden durch die Mittelung eliminiert, was bedeutet, dass es im Mittel zu keinem Fluss über die seitlichen Ränder kommt. Wenn jedoch instationäre Phänomene wie bei Anwendung der Large Eddy Simulation in Betracht gezogen werden, kommt es sehr wohl zu einem Fluss über die Symmetrieebenen, da die instantanen Wirbel nicht symmetrisch zur Berandung sind. Im Fall der instationären Berandung wurde deshalb eine reibungsbehaftete Wand an den seitlichen Rändern berücksichtigt.

Auf der Unterseite des Berechnungsgebietes wurde eine *Wand*-Randbedingung gewählt. Da der Rand jedoch bei einer Kote von -0,7 m liegt, ist er außerhalb des Berechnungsgebietes und deshalb von geringerer Bedeutung. An der Oberseite des Berechnungsgebietes wurde eine *Druck*-Randbedingung mit einem statischen Druck von 0 Pa gesetzt. Dadurch wurden die Berechnungsergebnisse auf einen konstanten Relativdruck bezogen.

Man kann bei ausreichender Länge eines Fischpasses mit einer größeren Anzahl von Becken davon ausgehen, dass sich die Strömungsverhältnisse in den Becken stark ähneln. Bei Verwendung einer periodischen Randbedingung, bei der der Auslass des Beckens mit dem Einlass gekoppelt ist, muss nur ein Becken simuliert werden. Diese Methode bietet aus numerischer Sicht gleich mehrere Vorteile. Zum einen kann das Berechnungsnetz relativ hoch aufgelöst werden, was zu einer hohen Genauigkeit für die Ergebnisse im Becken führt. Zum zweiten müssen turbulente Schwankungen an den Rändern nicht definiert werden, was bei Verwendung von instationären Berechnungsmethoden wie der Large Eddy-Simulation der Fall wäre. Bei Verwendung von periodischen Randbedingungen stellen sich diese instationären Geschwindigkeits- und Druck-Randbedingungen automatisch ein. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass man bei Verwendung dieser Berechnungsmethode ein besonderes Augenmerk auf Störungen im Berechnungsgebiet haben sollte. Numerisch erzeugte Wellen wie z. B. bei zu schnellem Beschleunigen der Strömung zu Beginn der Simulation werden nach Verlassen des Berechnungsgebietes erneut über den Einlauf in das Berechnungsgebiet eingetragen. Da diese Wellen nur sehr langsam abklingen, sollten sie durch geeignete Maßnahmen vermieden werden. Des Weiteren muss im Vorfeld getestet werden, ob die Simulation von einem Becken ausreicht, oder ob zur Vermeidung von hydraulischen

Kurzschlussströmungen mehrere dieser Becken simuliert werden müssen.

In *Flow3D* wurden die periodischen Randbedingungen numerisch derart implementiert, dass die Zellen des Einlaufes mit Richtungsindex $i = 0$ auf die Stelle $i_{max}+1$ kopiert wurden. Die neuen Zellen bilden demnach die Nachbarzellen für den rechten Randes mit $i = i_{max}$.

In speziellen Fall der Simulation von Freispiegelgerinnen wird die Strömung durch die Schwerkraft getrieben. Die Sohle ist im Allgemeinen nicht horizontal. Es besteht deshalb ein Höhenversatz Δz zwischen dem linken und dem rechten Rand des Simulationsgebietes. Wollte man die ursprüngliche periodische Randbedingung in den Simulationen benutzen, so hätte die Geometrie zur Elimination des Höhenversatzes bei Berücksichtigung der entsprechenden Änderung des Gravitationsvektors um die y-Achse gedreht werden müssen. In den Simulationen wäre es zu unterschiedlichen Drehwinkeln entsprechend des jeweiligen Höhenversatzes Δz gekommen. Eine Vergleichbarkeit der einzelnen Simulationsergebnisse mit unterschiedlichen geometrischen Konfigurationen wäre äußerst aufwändig gewesen. Durch die Drehung der Geometrie wären alle Wände nicht parallel zu den Hauptachsen des Berechnungsgebietes gewesen, was sowohl aus numerischer Sicht als auch für die Auswertung der Ergebnisse nicht optimal gewesen wäre.

Um dennoch die periodische Randbedingung in den Simulationen verwenden zu können, wurde *Flow3D* um eine neue periodische Randbedingung mit Sohlenversatz Δz erweitert. Auf diese Weise kamen jeweils die Öffnungen unter den Schützen zur Deckung. Zur Vermeidung von numerischen Fehlern musste jedoch sichergestellt sein, dass die Wände an den oberen und unteren Enden der Randbedingung ausreichend verlängert waren.

5.2 Parameterstudie mit RANS

Eine bekannte Herangehensweise zur ingenieurmäßigen Dimensionierung und Untersuchung von komplizierten Zusammenhängen ist die so genannte Formfaktormethode. Bei dieser Methode werden die strömungsphysikalischen Änderungen bei Variation eines geometrischen Parameters untersucht, wobei die restlichen Parameter beibehalten werden. Diese Änderungen werden in graphischer oder mathematischer Form als

Funktion des verwendeten Parameters ausgedrückt. Die auf diese Weise gefundenen Funktionen dienen zur Übertragung von im Laborexperiment gefundenen Ergebnissen auf die diskrete Planungsaufgabe.

In diesem Abschnitt wird eine derartige Parameterstudie vorgestellt. Mit numerischen Strömungssimulationen wurden die strömungsphysikalischen Abhängigkeiten des Durchflusses Q , der Maximalgeschwindigkeiten v_{max} , des Kontaktionswertes ψ und des Energiehöhenverlustes ζ von geometrischen Parametern in der bereits vorgestellten Fischtreppe untersucht. In den einzelnen Simulationsreihen werden jeweils die Änderungen und deren Ursachen diskutiert. Die Ergebnisse werden anschließend in Abschnitt 6.2 zusammengefasst und im Rahmen einer Dimensionierungsvorschrift für die ingenieurmäßige Berechnung präsentiert.

5.2.1 Allgemeines

In *Flow3D* werden die inkompressiblen Navier-Stokes-Gleichungen in der gewählten Programmkonfiguration gelöst. Es ist jedoch aufgrund von Beschränkungen der Rechnerkapazität und der Berechnungszeit nicht möglich, die Gleichungen direkt zu lösen. Um dennoch hinreichend gute Ergebnisse zu erhalten, kann man die momentanen Strömungsgrößen als die Summe der Mittelwerte und der turbulenten Schankungsgrößen betrachten.

$$v = \bar{v} + v' \quad \text{und} \quad p = \bar{p} + p' \quad (5.2.1)$$

Durch Einsetzen der Terme in die Impulsgleichungen und anschließender Ensemble-Mittelung erhält man eine Form der Navier-Stokes-Gleichungen bezüglich der mittleren Strömungsgrößen, die Reynoldsgleichungen. Hier tritt als zusätzliche Unbekannte der Reynoldssche Spannungstensor $\overline{u'_i u'_j}$ auf. In Standard-Turbulenzmodellen wird dieser Spannungstensor durch den Wirbelviskositätsansatz $\overline{u'_i u'_j} = \nu_T \cdot \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}$ modelliert. Somit ergibt sich folgende modifizierte Impulsgleichung für die mittleren Geschwindigkeiten:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \nu_T) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right] + g_i \quad (5.2.2)$$

In den so erhaltenen *Reynolds-Averaged-Navier-Stokes*-Gleichungen (RANS) ist nun dieses ν_T letztlich noch zu modellieren.

Das heute noch am häufigsten eingesetzte Turbulenzmodell ist das so genannte k - ε Modell, bei dem die Wirbelviskosität mit Hilfe der turbulenten kinetischen Energie k und der Energiedissipationsrate ε errechnet wird:

$$\nu_T = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5.2.3)$$

Es sind somit zusätzlich zu den Navier-Stokes-Gleichungen weitere zwei Transportgleichungen für k und ε zu lösen, wobei die Modellkonstanten über die gesamte Simulationsdauer konstant gehalten werden.

Im Standard- k - ε -Modell wird angenommen, dass die gesamte Dissipation bei einem bestimmten Längenmaß geschieht. Da die Energiedissipation jedoch bei allen Längenskalen erfolgt, haben Yakhot et al. [53] das Standard- k - ε mit den Re-Normalization Group (RNG) Methoden weiterentwickelt. Im Zuge der Berechnung kommt es zum einen zu einer Reduktion der implementierten Modellkonstanten. Im RNG- k - ε Modell findet nur noch eine Konstante Eingang. Desweiteren wurde die Transportgleichung für ε durch einen Produktionsterm erweitert, der die Energiedissipation in den restlichen Längenskalen berücksichtigt.

Das RNG- k - ε Turbulenzmodell wurde am Fachgebiet Hydromechanik bereits häufiger erfolgreich eingesetzt (z. B. [42]), wobei die Ergebnisse sehr gut mit den Laborexperimenten übereinstimmen. Die in dieser Arbeit präsentierten RANS-Simulationen wurden deshalb mit diesem Turbulenzmodell gerechnet.

Möchte man neben den mittleren Strömungsgrößen auch deren turbulente Fluktuationen untersuchen, so kann man sich der Large Eddy Simulation bedienen, die strukturell zwischen den RANS-Simulationen und der direkten Lösung der Navier-Stokes-Gleichungen steht. Hierbei werden die auf dem Berechnungsgitter darstellbaren Wirbelstrukturen und Fluktuationen direkt berechnet und nur der nicht mehr darstellbare Anteil mit Hilfe einer Wirbelviskosität modelliert. Die LES-Methode wird in Abschnitt 5.3 ausführlich beschrieben.

5.2.2 Konfiguration der Simulation und Vorgehen

Ist eine Fischaufstiegsanlage ausreichend lang und besitzt eine größere Anzahl baugleicher Becken, so ähneln sich die Strömungsverhältnisse in den einzelnen Becken. Für die Strömungsberechnung muss nur ein einzelnes, in der Mitte des Fischpasses liegendes Becken, untersucht werden, da dieses als repräsentativ für alle Becken betrachtet werden kann. Kombiniert man bei diesem Becken den Auslauf mit dem Einlauf, bekommt man eine so genannte Periodizität, d. h. was aus dem Becken herausläuft, läuft gleichzeitig über den Einlauf zu. Der Vorteil dieser Methode ist, dass aufgrund der Konzentration der Rechenkapazität auf ein Becken die Strömung im betrachteten Becken wesentlich feiner aufgelöst werden kann, was das Rechenergebnis deutlich verbessert. Ferner sind die Berechnungszeiten der einzelnen Simulationen relativ kurz, so dass innerhalb von etwa sechs Wochen alle etwa 70 Simulationen für die Parameterstudie durchgeführt werden konnten.

Die für die Simulationsreihen verwendete Geometrie des Beckens ist in Abbildung 5.1 dargestellt. Da es sich um eine im Wesentlichen zweidimensionale Strömung handelt, wurde das Becken mit einer festen Breite von 1 m untersucht.

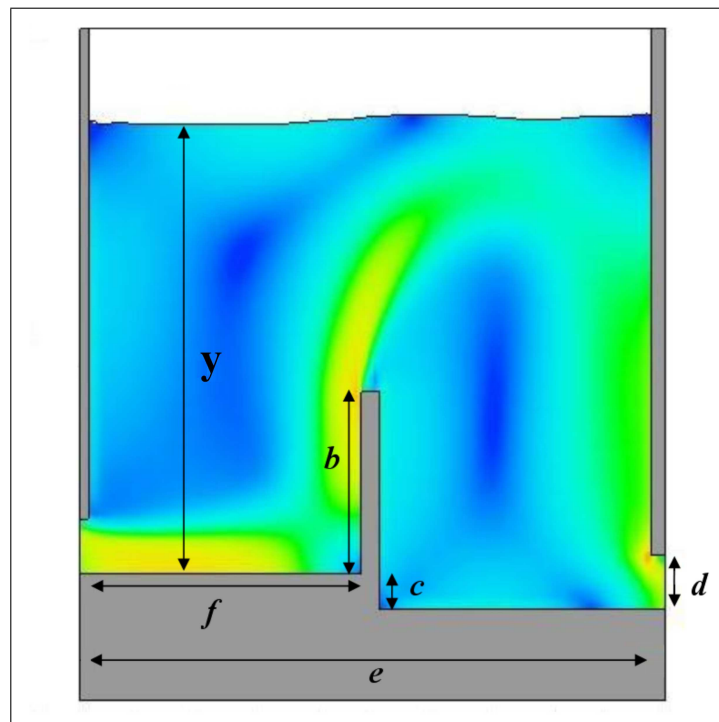


Abbildung 5.1: Geometrie des untersuchten Beckens

Fließtiefe y im Becken	250 cm
Höhe b der Prallwand	100 cm
Stufenhöhe c / Energieverlust im Becken in [m]	20 cm
Höhe des Durchlasses d	30 cm
Länge des Beckens e	210 cm
Position f der Prallwand	100 cm

Tabelle 5.1: *Geometrische Abmessungen des Simulationsbeckens*

In den Simulationsreihen wurde ausgehend von der Grundgeometrie jeweils einer der in Tabelle 5.1 aufgetragenen geometrischen Werte geändert. Es sei erwähnt, dass für die Parameter e und f jeweils die lichten Weiten im Becken gewählt wurden. Dies liegt daran, dass das Hauptaugenmerk der Studie auf einer optimalen Dimensionierung für Fische lag. Die verwendeten Wände hatten in der Simulation eine Stärke von 10 cm.

Auf eine Simulationsreihe zur Bestimmung der strömungsphysikalischen Abhängigkeiten von der Öffnungshöhe d des Schützes wurde verzichtet, da dieser Wert als Richtwert in den einschlägigen Vorschriften (z. B. [20]) für Durchlässe in Fischauftstiegsanlagen gilt.

Die Parameterstudie wurde mit dem Simulationsprogramm *Flow3D* durchgeführt, das bereits im vorherigen Abschnitt beschrieben wurde. Für die Simulationen wurde das zu berechnende Becken in $N_x \cdot N_y \cdot N_z = 88 \cdot 11 \cdot 148 = 143264$ Zellen unterteilt und berechnet. Als Turbulenzmodell wurde das RNG- $k-\epsilon$ Turbulenzmodell gewählt. Die Randbedingungen in Längsrichtung wurden derart gesetzt, dass eine modifizierte Periodizität eingeführt wurde. Die sich entsprechenden Geschwindigkeits- und Druckfelder des linken und rechten Randes des Beckens sind um den Wert c in negativer z -Richtung versetzt. Der Programmcode von *Flow3D* wurde so angepasst, dass mit dieser neuen Randbedingung gerechnet werden konnte. In y -Richtung wurde als Randbedingung eine so genannte *Symmetry* Randbedingung gewählt, bei der die wandnormalen Geschwindigkeiten und die wandnormalen Gradienten der Strömungsgrößen gleich null sind.

Sobald die einzelnen Simulationen stationär waren, wurden die maximale Geschwindigkeit und der Durchfluss in den Becken numerisch ermittelt und in Wertetabellen aufgetragen. Die zu den folgenden Graphen gehörigen Auswertungen können dem Anhang entnommen werden.

5.2.3 Energieverlust im Becken - Stufenhöhe c

Das Gefälle hat den größten Einfluss auf das Strömungsfeld in einer Fischaufstiegsanlage. Mit diesem Gefälle korrespondieren der Energieverlust und somit auch die maximale Geschwindigkeit in den einzelnen Becken.

In einer Simulationsreihe wurde unter Beibehaltung der restlichen Geometrieparameter nur der Sohlenversatz c zwischen 5 cm und 40 cm variiert. Bei vollständiger Energiedissipation der entstehenden Schussstrahlen in den einzelnen Becken sollte sich eine maximale Geschwindigkeit einstellen, deren zugehörige Geschwindigkeitshöhe dem Sohlenversatz c entspricht. Die Sohle kann konstruktiv mit horizontal oder mit gleichmäßigem Gefälle ausgeführt sein, was zu unterschiedlichen Strömungszuständen führt. Zur Gegenüberstellung der einzelnen Varianten wurden folgende drei Simulationsreihen ausgewertet:

- a) horizontale Gerinnesohle und Sohlenstufe der Höhe c ;
- b) kontinuierliches Gefälle der Gerinnesohle mit Gefälle $I_S = c / (e + 10 \text{ cm})$, Kote der Oberkante der Prallwand wie bei a);
- c) kontinuierliches Gefälle der Gerinnesohle mit Gefälle $I_S = c / (e + 10 \text{ cm})$, Kote der Oberkante der Prallwand um $c / 2$ niedriger als bei a).

Bei den Varianten a) und b) wurde die Oberkante der Prallwand konstant gehalten, um die beiden Simulationsreihen vergleichen zu können. Bei der dritten Simulationsreihe wurde die Höhe der Prallwand b konstant gehalten, so dass sich die Oberkante der Prallwand im Vergleich zu b) um den Wert $c/2$ nach unten senkt. Das sich einstellende mittlere Geschwindigkeitsfeld in den einzelnen Konfigurationen ist in Abbildung 5.2 dargestellt.

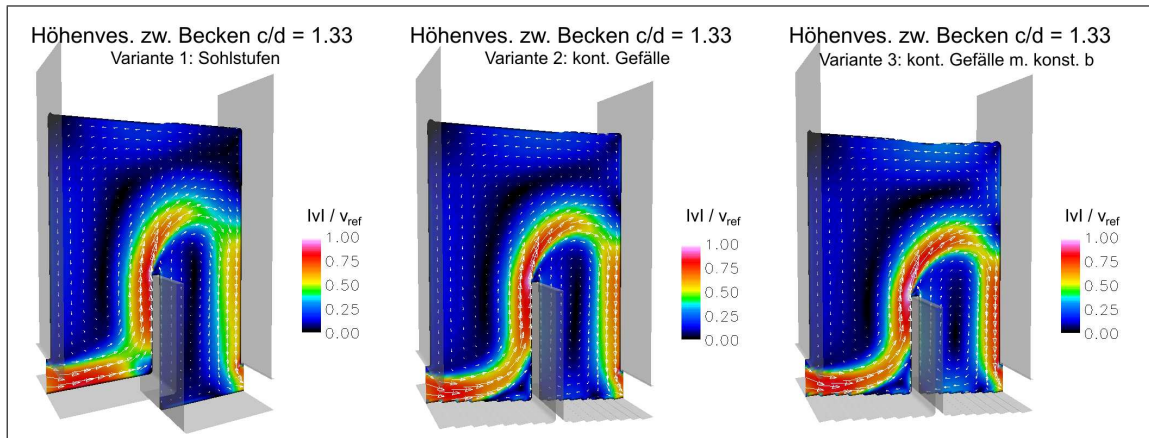


Abbildung 5.2: Mittleres Geschwindigkeitsfeld in unterschiedlichen Konfigurationen bei gleichem Höhenversatz c/d zwischen den Becken.

Links: Variante a) horizontale Sohle

Mitte: Variante b) kont. Gefälle, Oberkante der Prallwand wie in a)

Rechts: Variante c) kont. Gefälle, Prallwandhöhe b/d wie in a)

Für die Auswertung der sich ergebenden maximalen Geschwindigkeiten im Becken wurde zunächst eine Referenzgeschwindigkeit v_{ref} errechnet, die sich ergibt, wenn der gesamte Potentialunterschied c in kinetische Energie des Schussstrahls umgewandelt wird. In einem zweiten Schritt wurde die maximale Geschwindigkeit im Becken mit v_{ref} in Beziehung gesetzt und der Verhältniswert μ errechnet.

$$v_{max} = \mu \cdot v_{ref} = \mu \sqrt{2 \cdot g \cdot c} \quad (5.2.4)$$

Anhand der Werte für μ kann auf die strömungsphysikalischen Vorgänge in den Becken geschlossen werden. Bei Werten von $\mu = 1$ wird der Potentialunterschied c komplett in kinetische Energie des Schützstrahls umgesetzt und die kinetische Energie des Schussstrahls anschließend im Becken dissipiert. Wenn die Werte von μ kleiner als 1 werden, so kommt es in der Anströmung bereits zu Energieverlusten, so dass die maximale Geschwindigkeit kleiner als v_{ref} ist. Es ist dennoch eine vollständige Energiedissipation des Schussstrahls gewährleistet. Wenn die Werte von μ jedoch größer als 1 werden, ist eine vollständige Energiedissipation der Schussstrahlen nicht mehr gegeben. Es kommt bereits in der Anströmung zur Schützöffnung zu nennenswerten Geschwindigkeiten. Es entwickelt sich mit steigendem μ eine sogenannte hydraulische Kurzschlussströmung.

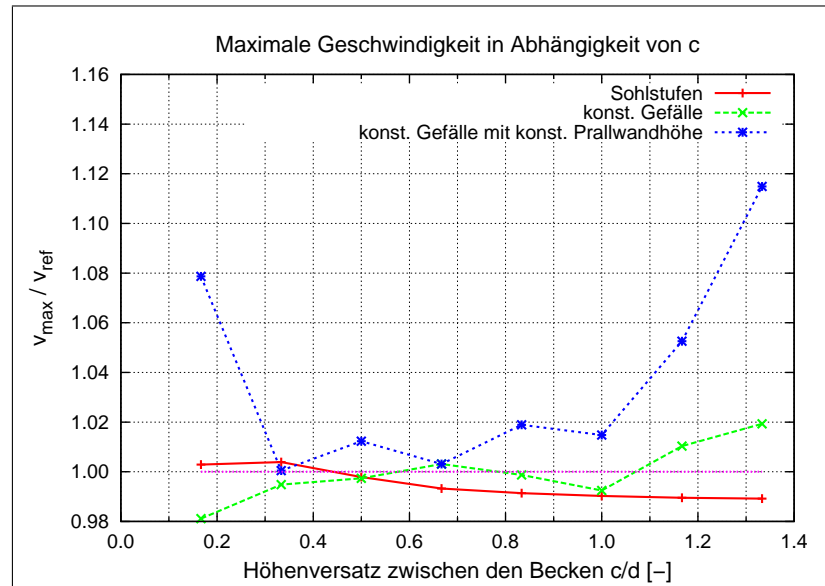


Abbildung 5.3: *Maximalgeschwindigkeit bei unterschiedlichen Energieverlusten $\Delta h = c$ in den Becken ($a, b, d, e, f = \text{const.}$)*

Die sich ergebenden Werte für μ_c sind in 5.3 dargestellt. Für die Varianten a) und b) liegen die ermittelten Verhältniswerte μ_c für Werte c kleiner als 30 cm bzw. $c/d = 1$ bei $1,00 \pm 1\%$. Bei größeren Werten für c ist die maximale Geschwindigkeit bei Variante b) geringfügig größer als bei Variante a), was an der geänderten Strahlführung liegt. Die maximalen Geschwindigkeiten von Variante c) sind ab $c = 24$ cm bzw. $c/d = 0,8$ größer als v_{ref} . Da die Werte von μ_c größer als 1 sind, ist von einer unvollständigen Energiedissipation des Schussstrahls auszugehen. Es sei hier auf die Diskussion des Einflusses der Prallwandhöhe b auf das Strömungsfeld in Abschnitt 5.2.5 verwiesen.

Neben den maximalen Geschwindigkeiten wurde auch der Durchfluss unter den Schützen ausgewertet und graphisch dargestellt (Abb. 5.4). Der ermittelte Durchfluss wird von Variante a) über Variante b) zu Variante c) jeweils kleiner. Diese Reduktion kann durch das geänderte Strömungsfeld und die unterschiedliche Strahlkontraktion erklärt werden. Während bei Variante a) der Kontraktionswert ψ bei steigendem c noch leicht ansteigt (Abb. 5.5), ist dieser bei Variante b) fast konstant. Durch die Reduktion der Prallwandhöhe in Variante c) wird der Schussstrahl nicht so stark in die Vertikale gelenkt wie bei Variante b). Der Wandstrahl kann sich vor dem kompletten Einmischen mit einer nennenswerten restlichen Geschwindigkeit an der Schützwand

anlegen. Die höhere Geschwindigkeit im Zustrom der Schützöffnung führt zu einer größeren Strahlkontraktion (kleineres ψ) und damit zu einem geringeren Durchfluss Q , sowie zu einem kleineren Verlustbeiwert ζ (Abb. 5.6).

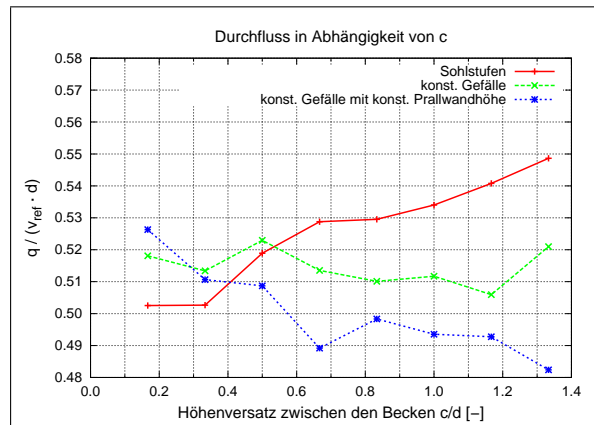


Abbildung 5.4: Durchfluss q bei unterschiedlichen Energieverlusten $\Delta h = c$ in den Becken ($y, b, d, e, f = \text{const.}$)

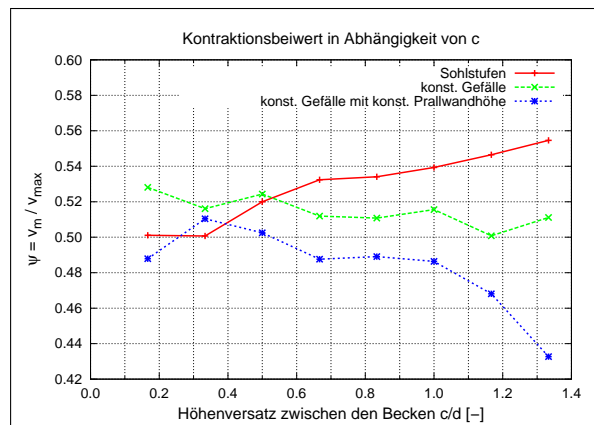


Abbildung 5.5: Kontraktionswert ψ bei unterschiedlichen Energieverlusten $\Delta h = c$ in den Becken ($y, b, d, e, f = \text{const.}$)

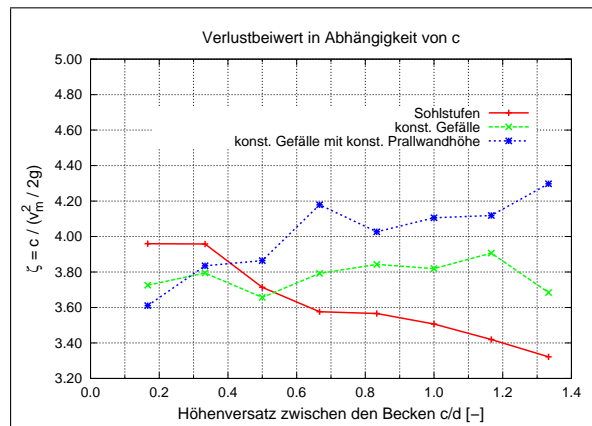


Abbildung 5.6: Verlustbeiwert ζ bei unterschiedlichen Energieverlusten $\Delta h = c$ in den Becken ($y, b, d, e, f = \text{const.}$)

5.2.4 Fließtiefe y im Becken

Als nächster Parameter für die Untersuchungen wurde der Einfluss der Fließtiefe y im Becken untersucht. Die Strömungsverhältnisse bei zwei verschiedenen Fließtiefen sind beispielhaft in Abbildung 5.7 dargestellt. Aus den Laborexperimenten ist bekannt, dass sich die Strömungsbedingungen bei steigenden Fließtiefen y vergleichmäßigen. Die Schwankungen des Wasserspiegels nehmen ab und die Gefahr des Lufteintrags aufgrund von Oberflächenwirbeln wird reduziert. In Abbildung 5.8 ist die Entwicklung der maximalen Geschwindigkeit v_{max} im Becken dargestellt.

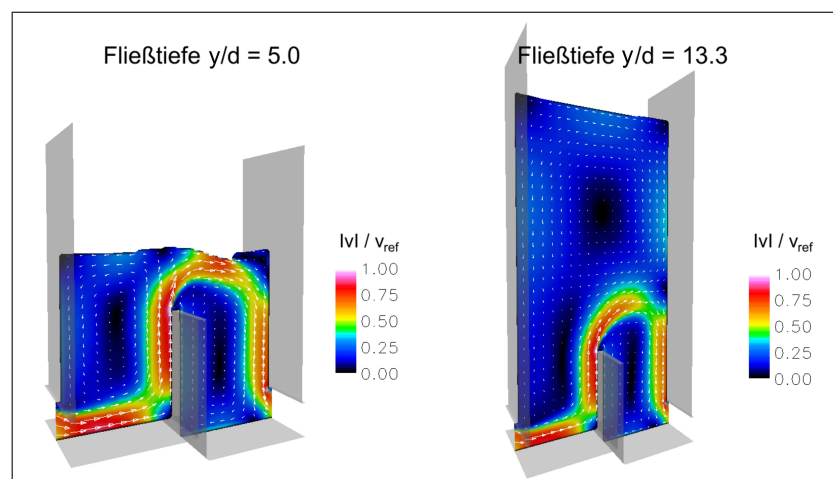


Abbildung 5.7: Mittleres Geschwindigkeitsfeld im Becken bei unterschiedlichen Fließtiefen a im Becken.

Links: Fließtiefe $y = 150$ cm bzw. $y/d = 5,0$

Rechts: Fließtiefe $y = 400$ cm bzw. $y/d = 13,3$

Die maximale Geschwindigkeit im Becken ist bei variabler Wassertiefe bei einer Variation um 1% weitgehend konstant. Die vollständige Energiedissipation des Schützstrahls ist unabhängig von y .

Die Veränderung des Durchflusses bei Variation des Parameters y ist in Abbildung 5.9 aufgetragen. Da sich bei konstanter Maximalgeschwindigkeit ein linearer Zusammenhang zwischen dem Durchfluss Q und der Kontraktionsziffer ψ (Abb. 5.10) ergibt, ist die Ursache für die Durchflussänderung die Veränderung der Einschnürung des Strahls unter dem Schütz. Analog dieser Argumentation verhält sich der Verlustbeiwert ζ (Abb. 5.11) reziprok linear zu ψ .

Bei einer Fließtiefe von $y = 150$ cm bzw. $y/d = 5,0$ und einer Prallwandhöhe von $b = 100$ cm bzw. $b/d = 3,33$ entwickelt sich ein stark durch die Wasseroberfläche begrenzter Strahl oberhalb der Prallwand. Der Strahl wird gut an die rechte Beckenberandung geführt, wo er sich an die Berandung anlegen kann. Die Kontraktion des Freistrahls ist deswegen sehr groß und der Durchfluss entsprechend klein. Steigt nun die Fließtiefe im Becken, wird die Strahlführung vermindert. Es kommt zu einem Anstieg des Durchflusses. Steigt die Fließtiefe weiter, nimmt die Strahlreflexion an der Wasseroberfläche ab, und der Freistrahл kann sich wieder besser an der rechten Berandung anlegen, was zu einem sinkenden Durchfluss führt. Ab einer Fließtiefe von etwa $y = 300$ cm bzw. $b/d = 10,0$ sinkt der Einfluss der Wasseroberfläche derart, dass sich im Becken von der Fließtiefe unbeeinflusste Strömungsverhältnisse einstellen. Eine weitere Erhöhung des Wasserspiegels führt zu keiner weiteren nennenswerten Änderung der Strahlkontraktion und damit des Durchflusses.

Es konnte gezeigt werden, dass die Fließtiefe nur einen geringen Einfluss auf die Größe der maximalen Geschwindigkeit hat. Bei der Konstruktion sollte jedoch auf eine ausreichende Mindestfließtiefe geachtet werden, da der Unterschied zwischen den Durchflüssen immerhin immerhin etwa 20% beträgt.

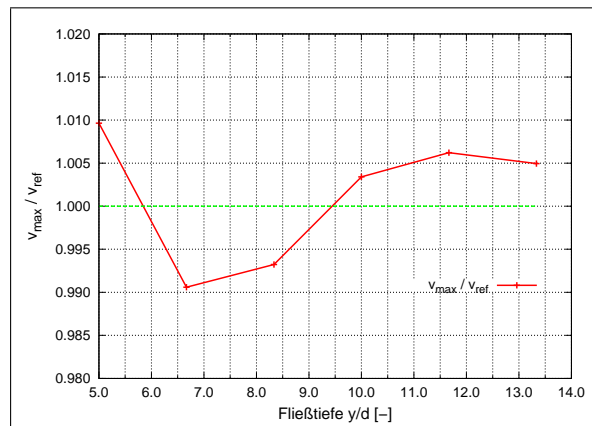


Abbildung 5.8: Maximalgeschwindigkeit bei unterschiedlichen Fließtiefen y in den Becken ($b, c, d, e, f = \text{const.}$)

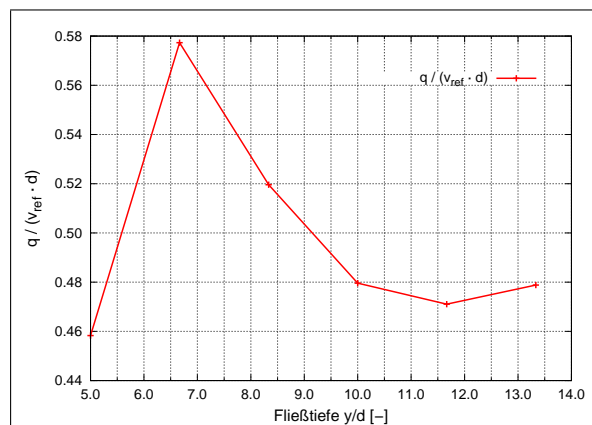


Abbildung 5.9: Durchfluss q bei unterschiedlichen Fließtiefen y in den Becken ($b, c, d, e, f = \text{const.}$)

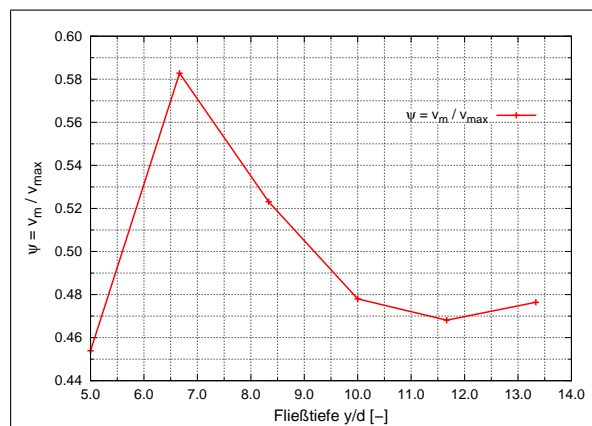


Abbildung 5.10: Kontraktionswert ψ bei unterschiedlichen Fließtiefen y in den Becken ($b, c, d, e, f = \text{const.}$)

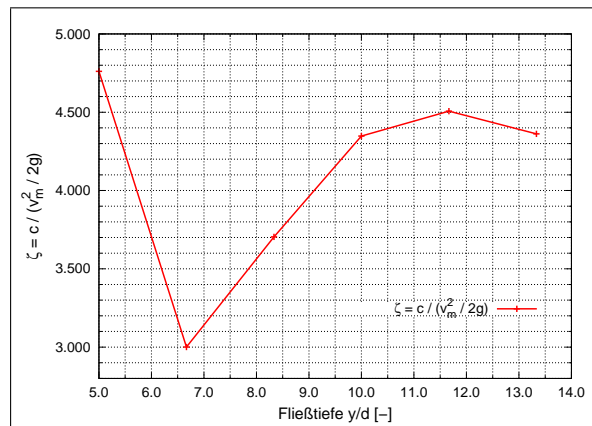


Abbildung 5.11: Verlustbeiwert ζ bei unterschiedlichen Fließtiefen y in den Becken ($b, c, d, e, f = \text{const.}$)

Vergleicht man die Ergebnisse aus der RANS und die Ergebnisse der Labormessungen aus Kapitel 4 in den Abbildungen 5.12 und 5.13, so sieht man, dass die Auswertungen stark voneinander abweichen. Die Verläufe der Kurven sind zwar ähnlich, jedoch innerhalb der Graphen verschoben. Dies liegt an unterschiedlichen Referenzgrößen. Die Fließtiefe wurde in den Simulationen direkt unterstrom des Schützes gemessen, wohingegen in den Laborexperimenten aufgrund der unterschiedlichen Strömungsverhältnisse in den Becken der Energieverlust Δy zwischen den Becken auf die mittlere Fließtiefe zwischen den Becken bezogen wurde. Ein direkter Vergleich der Messungen mit der RANS ist somit nicht möglich. Des weiteren war die Sohle in den Laborversuchen im Gegensatz zu den Simulationen horizontal. Eine vergleichende Simulation zu den Laborergebnissen erbrachte hingegen eine gute Übereinstimmung der einzelnen Ergebnisse.

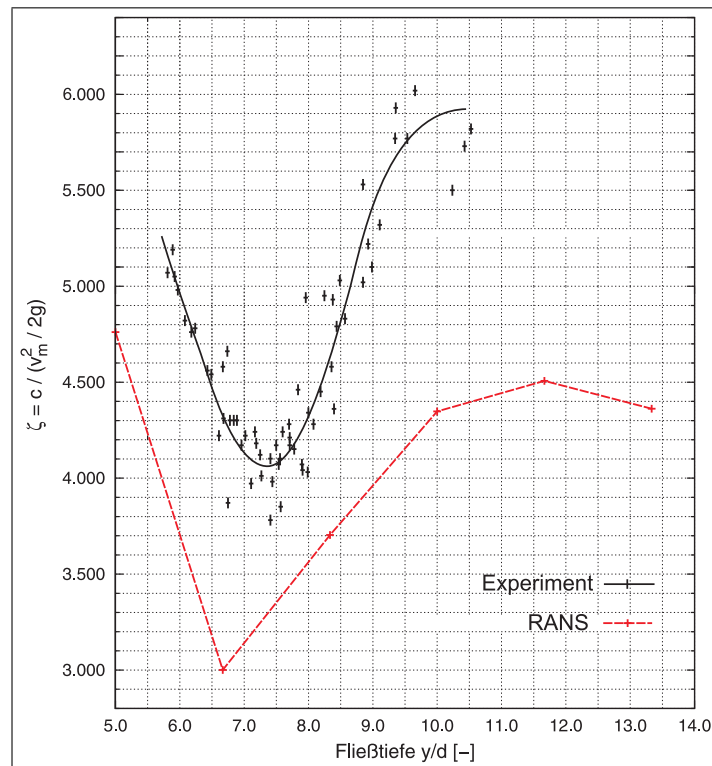


Abbildung 5.12: Verlustbeiwert ζ bei unterschiedlichen Fließtiefen y in der RANS und in den Laborexperimenten

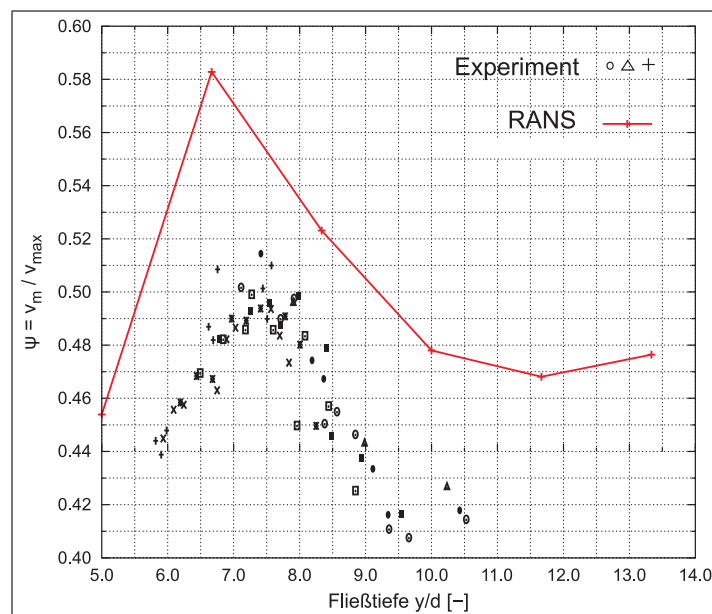


Abbildung 5.13: Kontraktionswert ψ bei unterschiedlichen Fließtiefen y in der RANS und in den Laborexperimenten

5.2.5 Höhe b der Prallwand

Ein entscheidendes Kriterium für die Funktionsfähigkeit des vorgestellten Systems ist die hydraulische Unabhängigkeit der einzelnen Schütze. Um die einzelnen Schütze hydraulisch zu entkoppeln, wird zwischen ihnen eine Prallwand eingefügt. Die Energie des entstehenden Schussstrahls soll vollständig dissipiert werden und so nicht in den direkten Einflussbereich des nächsten Schützes gelangen.

Zur Bestimmung der notwendigen Höhe der Prallwand b wurden Simulationen mit unterschiedlichen Prallwandhöhen b ausgeführt und ausgewertet. Wie aus Abbildung 5.14 ersichtlich ist, kommt es bei Fehlen dieser Prallwand zu einem hydraulischen Kurzschluss der einzelnen Schütze, wie bereits besprochen wurde. Es kommt in den einzelnen Becken zu einer ungenügenden Energieumwandlung des Schützstrahls.

Die Erhöhung der Prallwand geht einher mit der Reduzierung der maximalen Geschwindigkeit (Abb. 5.15). Ab einer Höhe b von etwa 50 cm bzw. $b/d = 3,33$ kommt es zu einer vollständigen Dissipation der Energie des Schussstrahls.

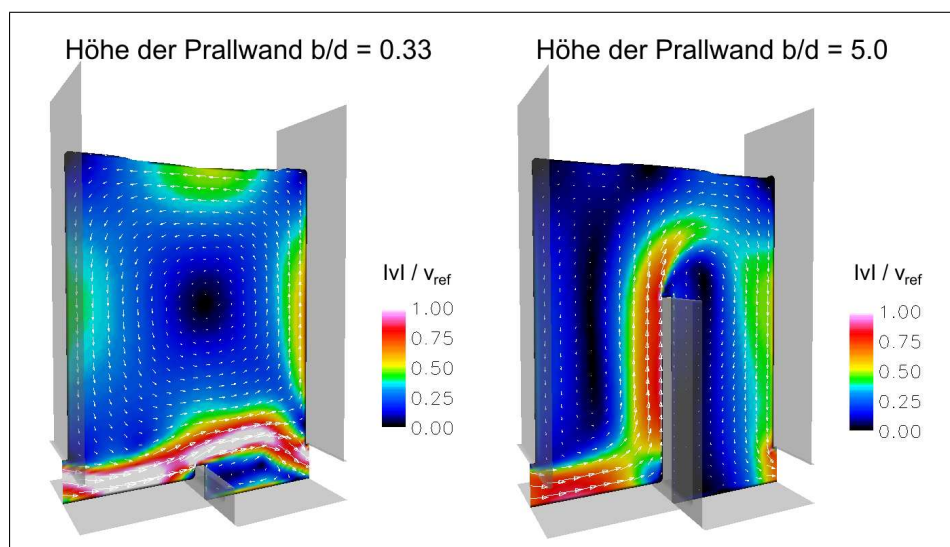


Abbildung 5.14: Mittleres Geschwindigkeitsfeld im Becken bei unterschiedlichen Prallwandhöhen b im Becken.

Links: Prallwandhöhe $b = 10$ cm bzw. $a/d = 0,33$

Rechts: Prallwandhöhe $b = 150$ cm bzw. $b/d = 5,0$

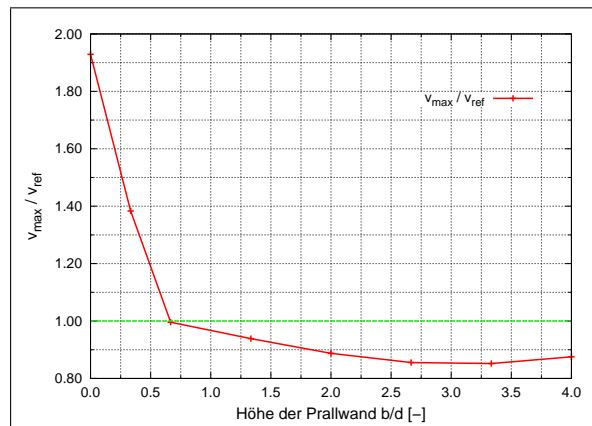


Abbildung 5.15: *Maximalgeschwindigkeit bei unterschiedlichen Prallwandhöhen b in den Becken ($y, c, d, e, f = \text{const.}$)*

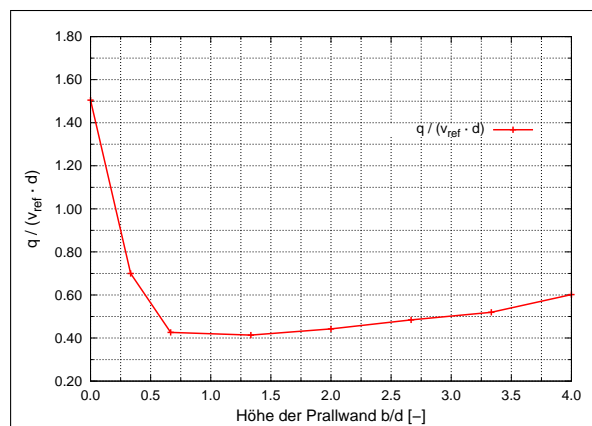


Abbildung 5.16: *Durchfluss q bei unterschiedlichen Prallwandhöhen b in den Becken ($y, c, d, e, f = \text{const.}$)*

Im Gegensatz zur maximalen Geschwindigkeit stellt sich bei Erhöhung der Prallwand kein konstanter Durchfluss ein. Dies liegt in der Veränderung der Strahlführung im Becken. In Abbildung 5.16 ist zu erkennen, dass sich der Durchfluss in den Becken bei Erhöhung der Prallwand von $b = 0$ cm bzw. $b/d = 0$ auf $b = 20$ cm bzw. $b/d = 0,66$ stark verringert. Zwischen $b/d = 0,66$ und $b/d = 1,33$ kommt es zur größten Strahlkontraktion und somit auch zum kleinsten Durchfluss. Dies liegt daran, dass der Schussstrahl an die Oberstromseite des Schützes gelenkt wird und sich dort anlegt. In Folge erhöht sich beim Zuströmen an die Schützöffnung die Umlenkung, was zu einer starken Strahlkontraktion führt. Die graphischen Auswertungen der Kontraktionswerte ψ und der Verlustbeiwerte ζ können dem Anhang entnommen

werden.

Wird die Prallwand weiter erhöht, so wird der sich entwickelnde Schussstrahl durch die Prallwand immer weiter nach oben abgelenkt. Durch diese Auslenkung vermindert sich das Anlegen des Strahls an der Zustromseite des Schussstrahls. Das Wasser strömt freier zur Strahlöffnung, was zu einer Verminderung der Strahlkontraktion führt. Letztlich führt dies auch zu einer Erhöhung des Durchflusses. In den Laborversuchen wurde eine Prallwandhöhe von $b = 100$ cm bzw. $b/d = 3,33$ gewählt. Dies hatte zum einen den Grund, die hydraulische Entkopplung der Schütze auch bei kleineren Durchflüssen zu garantieren. Zum anderen sind bei dieser Größe die Rezirkulationszonen für die Fische ausreichend groß. Fische finden in diesen Zonen wichtigen Raum für die Regeneration.

5.2.6 Position f der Prallwand

Die Geometrie der Becken hat eine zentrale Bedeutung für die ökologische Durchgängigkeit für Fische und andere Lebewesen. Da die Geometrie neben der Beckenlänge und -breite maßgeblich von der Position der Prallwand bestimmt ist, wurde der Einfluss von f auf das Strömungsfeld mit mehreren Simulationen untersucht (Abb. 5.17). Die Position f markiert dabei den lichten Abstand zwischen der unterstrom liegenden Seite der Schützwand und der Prallwand. In der Simulationsreihe wurden Prallwandpositionen zwischen $f = 40$ cm bzw. $f/d = 1,33$ und $f = 160$ cm bzw. $f/d = 5,33$ untersucht. Bei kleineren und größeren Abständen zwischen der Prallwand und dem Schütz könnten die Fischen aufgrund des sich einstellenden Strömungsfeldes nicht in den Spalt einschwimmen.

Bei Analyse der sich einstellenden maximalen Geschwindigkeiten (Abb. 5.18) fällt auf, dass sich ab einem Mindestabstand von etwa $f = 60$ cm bzw. $f/d = 2,0$ eine vollständige Umsetzung der Energiehöhe c in die Geschwindigkeitshöhe des Schützstrahls ergibt. Ist f/d kleiner als 2,0, wird der Schützstrahl kurz nach dem Unterströmen des Schützstrahls nach oben abgelenkt und dort an der Oberfläche reflektiert. Der resultierende Strahl gerät in den Einflussbereich des nächsten Schützes, so dass eine vollständige Energieumwandlung nicht gegeben ist.

Während die maximale Geschwindigkeit für $f/d \geq 2,0$ konstant bleibt, wird der Durchfluss (Abb. 5.19) mit steigendem f kontinuierlich kleiner. Dies liegt daran, dass

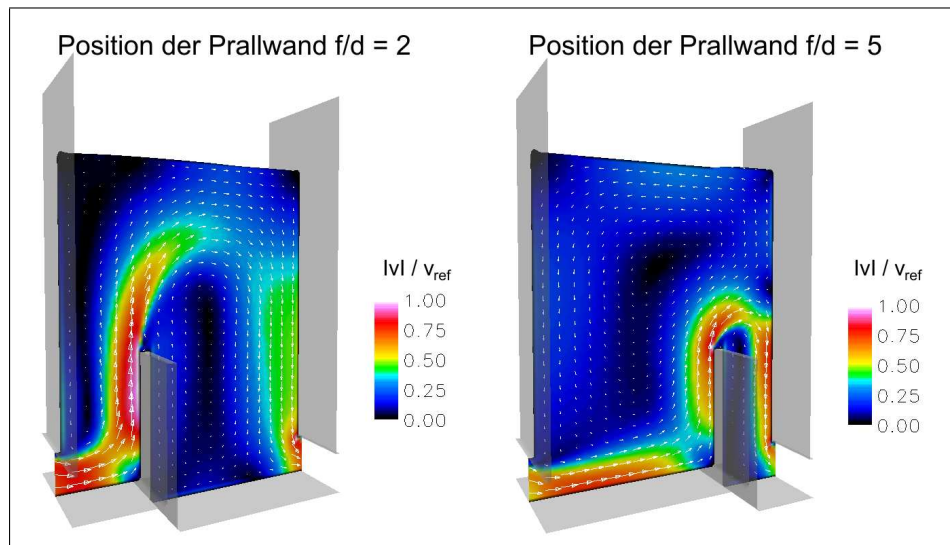


Abbildung 5.17: *Mittleres Geschwindigkeitsfeld im Becken bei unterschiedlichen Prallwandpositionen f im Becken.*

Prallwandposition $f = 60$ cm bzw. $f/d = 2,0$

Rechts: Prallwandposition $f = 150$ cm bzw. $f/d = 5,0$

die Hauptrichtung der Zuströmung zur Schützöffnung mit steigendem f eine immer größere Vertikalkomponente aufweist. Der Umlenkwinkel in die Horizontale unter dem Schütz wird dadurch größer und damit auch die Strahlkontraktion. Die graphischen Auswertungen der Kontraktionswerte ψ und der Verlustbeiwerte ζ können dem Anhang entnommen werden.

In den Laborexperimenten wurde die Prallwand in der Mitte des Beckens angebracht. Dies garantiert zum einen eine ausreichende Größe aller Rezirkulationszonen, und zum anderen eine maximale Bewegungsfreiheit für Fische. Das Unterschwimmen wird durch einen zu geringen Abstand zwischen der Prallwand und der Schützwand nicht zusätzlich erschwert. Bei ausreichend Platz und kleinen Fischen sollte jedoch die Prallwand möglichst weit in Richtung unterstrom gelegt werden, da sich dadurch der Durchfluss signifikant verringert.

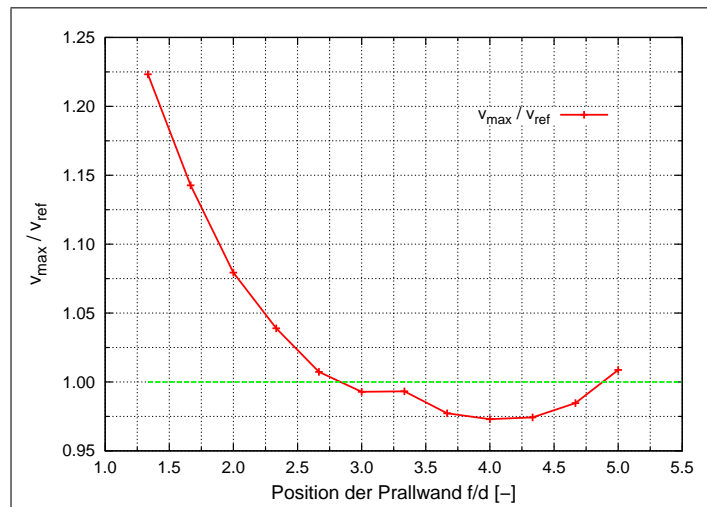


Abbildung 5.18: *Maximalgeschwindigkeit bei unterschiedlichen Prallwandpositionen f in den Becken ($y, b, c, d, e = \text{const.}$)*

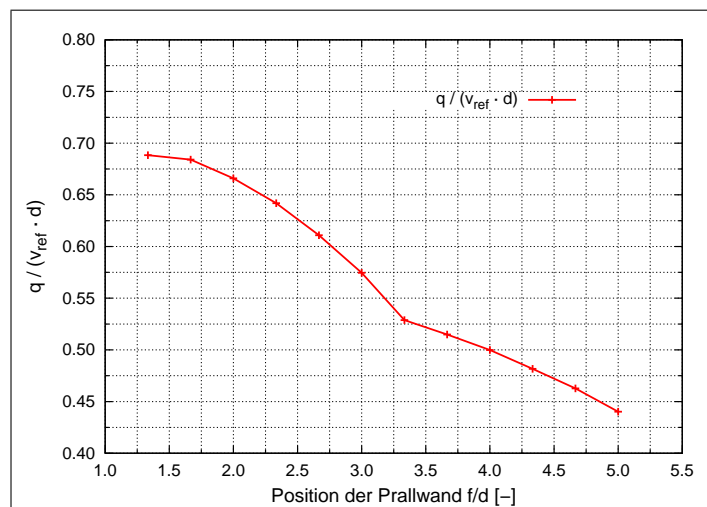


Abbildung 5.19: *Durchfluss q bei unterschiedlichen Prallwandpositionen f in den Becken ($y, b, c, d, e = \text{const.}$)*

5.2.7 Länge e des Beckens

Die Länge des Beckens e bestimmt zusammen mit dem Höhenunterschied zwischen den Becken c das Gefälle einer Fischaufstiegsanlage. Um den Einfluss von e auf das Strömungsfeld zu untersuchen, wurden mehrere Simulationen mit Variationen von e zwischen $e = 210$ cm bzw. $e/d = 7,0$ und $e = 410$ cm bzw. $e/d = 13,7$ ausgewertet (Abb. 5.20). Der Parameter e bezieht sich auf den lichten Abstand zwischen den Schütztafeln. Da ein minimaler Abstand für Fische von 1,0 m zwischen den Schützen

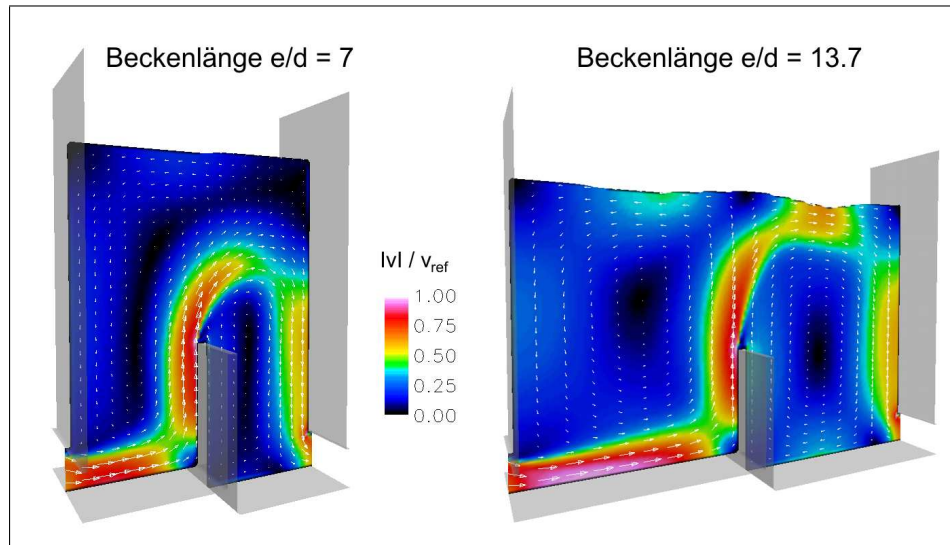


Abbildung 5.20: *Mittleres Geschwindigkeitsfeld im Becken bei unterschiedlichen Beckenlängen e .*

Links: Beckenlänge $e = 210$ cm bzw. $f/d = 7,0$

Rechts: Beckenlänge $e = 410$ cm bzw. $f/d = 13,7$

und der Prallwand definiert wurde, ergibt sich der kleinste Wert von e als $2 \cdot 100$ cm zzgl. 10 cm Prallwandstärke gleich 210 cm. In den Simulationen befand sich die Prallwand jeweils in der Mitte des Beckens, so dass sich der Parameter f bei Änderung von e entsprechend änderte.

Die sich ergebenden maximalen Geschwindigkeiten v_{max} (Abb. 5.21) liegen in einem Bereich von etwa v_{ref} , was auf eine vollständige Energiedissipation des Schützstrahls hinweist. Durch die geänderten Prallwandabstände f ergeben sich unterschiedliche Strömungszustände, die die leicht zunehmenden Geschwindigkeiten v_{max} bei steigendem Parameter e erklären.

Wird die Länge des Beckens vergrößert, ist anzunehmen, dass sich der Durchfluss asymptotisch dem Grenzfall des freien Zuströmens zur Schützöffnung nähert. Ab $e/d = 10,3$ ergibt sich ein konstanter Durchfluss Q . Die graphischen Auswertungen der Kontraktionswerte ψ und der Verlustbeiwerte ζ können dem Anhang entnommen werden.

Für die ingenieurmäßige Bemessung der Becken sollte zur Minimierung des Durchflusses ein möglichst kleines e gewählt werden. In der Grundabmessung wurde ein Wert für e dementsprechend von $e = 210$ cm bzw. $e/d = 7,0$ gewählt. Dieser

Wert maximiert das Gefälle der Fischaufstiegsanlage und minimiert gleichzeitig den Durchfluss. Auf diese Weise werden sowohl die Herstellungskosten als auch die laufenden Kosten der Fischaufstiegsanlage reduziert.

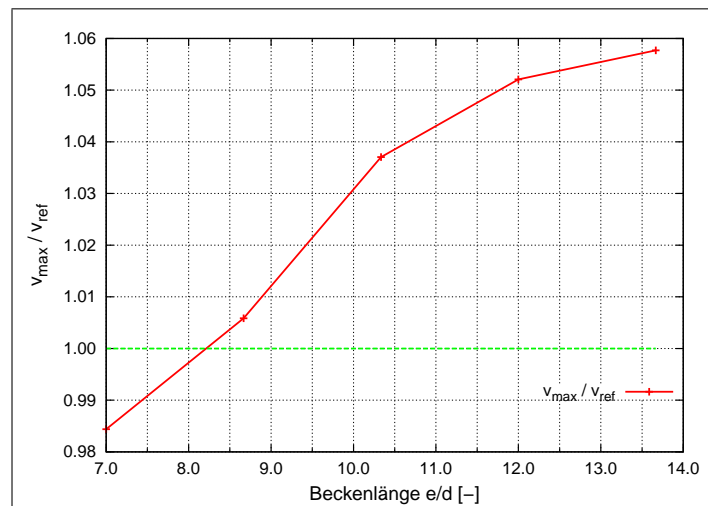


Abbildung 5.21: *Maximalgeschwindigkeit bei unterschiedlichen unterschiedlichen Beckenlängen e ($y, b, c, d, f = \text{const.}$)*

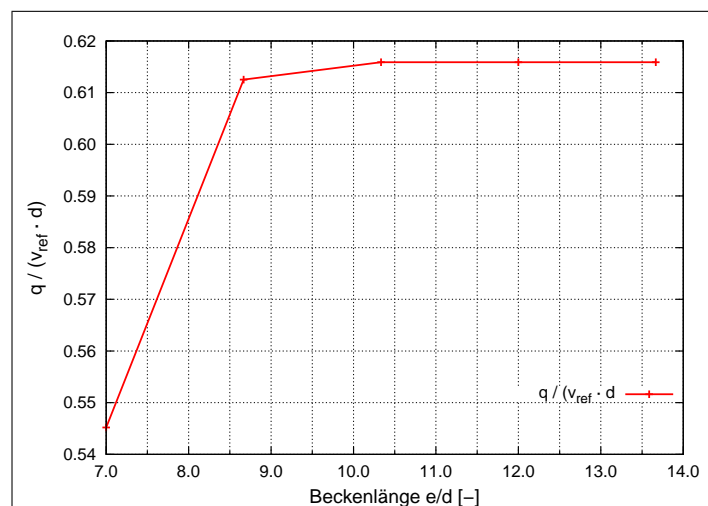


Abbildung 5.22: *Durchfluss q bei unterschiedlichen unterschiedlichen Beckenlängen e ($y, b, c, d, f = \text{const.}$)*

5.2.8 Abhängigkeit von der Reynoldszahl Re

Wie bereits in den vorherigen Abschnitten beschrieben wurde, hängen die strömungsphysikalischen Größen nach dem Π -Theorem von Buckingham von drei dimensionsbehafteten Größen und einer Reihe dimensionsloser Größen ab.

$$Q = Q \left(d, \rho, v_m, \frac{y}{d}, \frac{b}{d}, \frac{c}{d}, \frac{e}{d}, \frac{f}{d}, Re = \frac{v_m \cdot d}{\mu/\rho}, Fr = \frac{v_m}{\sqrt{g \cdot d}} \right) \quad (5.2.5)$$

In den bisherigen Betrachtungen in der RANS-Simulationsstudie wurden bereits bei Beibehaltung der Eigenschaften des Fluides ρ und ν und des Öffnungsgrades d einzelne geometrische Abmessungen geändert und deren Auswirkungen auf die Strömungsvorgänge im betrachteten Becken interpretiert.

In einer abschließenden Gegenüberstellung sollen die Strömungsbedingungen, die sich aufgrund einer Skalierung der Schützhöhe d einstellen, untersucht werden. In der folgenden Tabelle sind die geometrischen Abmessungen des Beckens zusammengefasst:

Öffnungshöhe d	15 cm, 30 cm, 60 cm
Fließtiefe y/d	8,33
Energieverlust zwischen den Becken c/d	0,66
Länge des Beckens e/d	7,00
Position der Prallwand f/d	3,33

Tabelle 5.2: Geometrische Parameter im Becken bei der Untersuchung der Abhängigkeit von der Reynoldszahl

Wie man in Abbildung 5.2.8 sehen kann, sind die Verläufe der einzelnen Strömungsparameter bei Variation der Prallwandhöhe b/d nahezu identisch. Die Strömungsverhältnisse sind unabhängig von der Reynoldszahl Re .

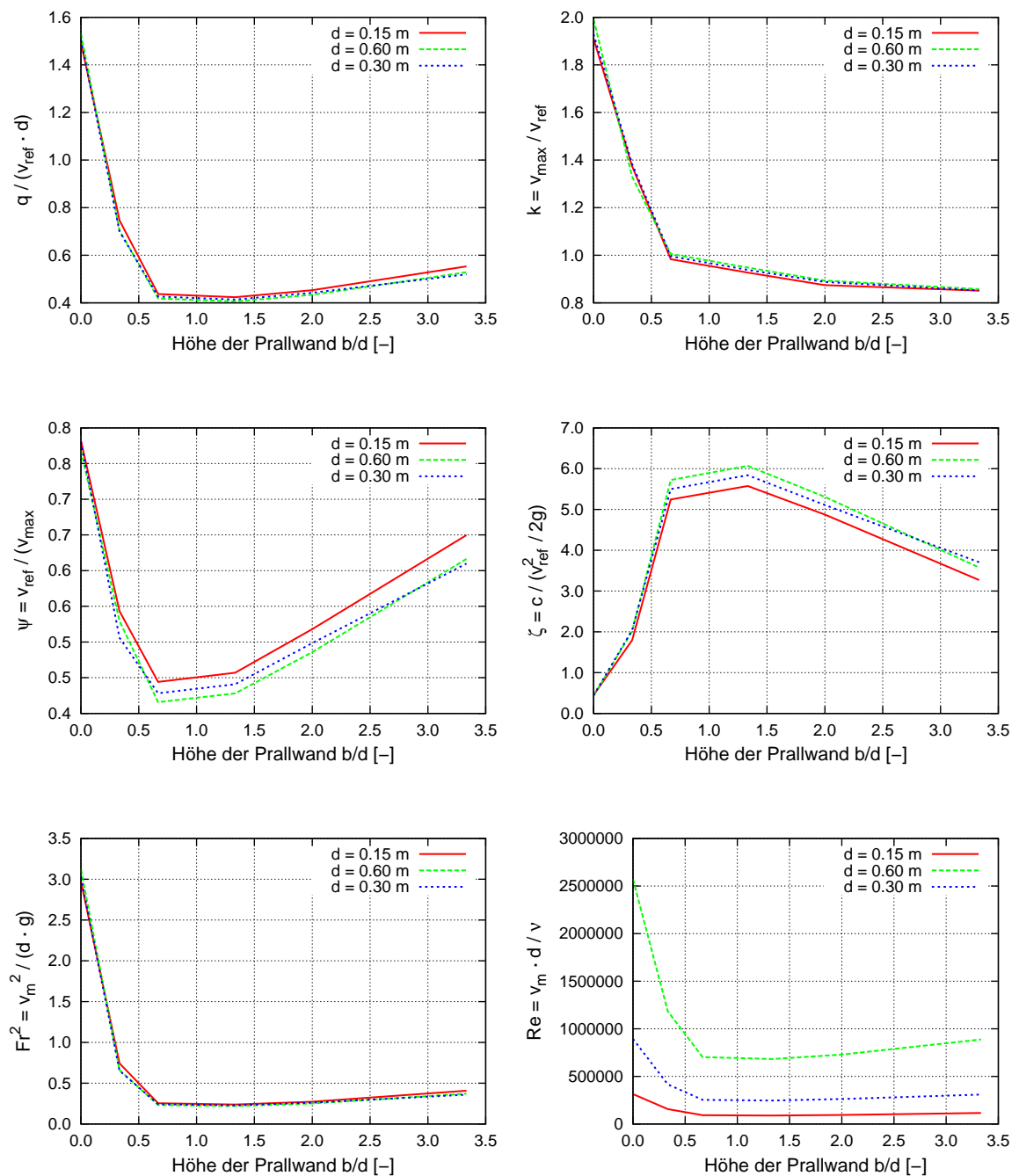


Abbildung 5.23: Verlauf von unterschiedlichen Strömungsparametern bei Variation der Schützhöhe d und der Prallwandhöhe b (y/d , c/d , e/d , $f/d = const.$).

Links oben: Durchfluss q ,

Rechts oben: Maximalgeschwindigkeit v_{max} ,

Links mitte: Kontraktionswert ψ ,

Rechts mitte: Verlustbeiwert ζ ,

Links unten: Froude-Zahl Fr ,

Rechts unten: Reynolds-Zahl Re .

5.2.9 Zusammenfassung der RANS-Parameterstudie

Mit Hilfe einer Reihe von RANS-Simulationen wurden die Auswirkungen der Änderung einzelner geometrischer Maße auf das Strömungsfeld untersucht. Die Energiehöhe der gefundenen maximalen Geschwindigkeit entspricht bei vollständiger Energieumwandlung des Schussstrahls in den Becken dem Höhenunterschied c zwischen den Becken und ist im Wesentlichen unabhängig von anderen geometrischen Randbedingungen wie Fließtiefe oder Beckenlänge. Für eine hydraulische Entkopplung der Schütze muss die dazwischen liegende Prallwand eine Mindesthöhe $b/d = 1,66$ aufweisen.

Der Durchfluss in der Anlage ist abhängig von der Strahlführung und der damit zusammenhängenden Strahlkontraktion. Die Abhängigkeit des Durchflusses von einzelnen geometrischen Abmessungen wurde diskutiert. Die durch die Simulationsreihen gefundenen Gesetzmäßigkeiten sind Grundlage für eine Dimensionierungsvorschrift, die in Abschnitt 6.2 zusammenfasst werden.

In den einzelnen Untersuchungen wurde jeweils nur ein Geometrieparameter ausgehend von einem Referenzdesign geändert und ausgewertet. Aufgrund der Linearisierung können die einzelnen Parameter bei kleinen Änderungen als unabhängig voneinander betrachtet werden. Wenn diese Änderungen größer werden, ist bei gleichzeitiger Änderung von mehreren Parametern von Fehlern in der Prognose des Durchflusses oder der maximalen Geschwindigkeiten auszugehen.

5.3 LES-Simulation

Im folgenden Abschnitt wird eine alternative Methode der Simulation, die Large Eddy Simulation vorgestellt. Nach einer Beschreibung der Grundlagen der LES werden die Ergebnisse des mittleren Strömungsfeldes diskutiert. Die Analyse von turbulenten Schwankungsgrößen erlaubt einen Rückschluss auf die Verteilung der dreidimensionalen Dissipationsvorgänge in der Strömung. Es können Aussagen über die Güte der Simulation getroffen werden. Zur Identifikation von kohärenten Strukturen in der Strömung wurden sowohl turbulente Druckschwankungen als auch das so genannte Q-Kriterium ausgewertet.

5.3.1 Allgemeines

Die Grobstruktursimulation oder auch Large Eddy Simulation (LES) berechnet im Gegensatz zu den RANS-Simulationen die instationären und nicht die mittleren Strömungsfelder. Nach der Theorie der LES werden große Wirbel direkt berechnet, die kleinen Wirbel, die hauptsächlich für die Energiedissipation zuständig sind, werden hingegen ähnlich wie in der RANS, mit einem Wirbelviskositätsmodell repräsentiert.

Um zu unterscheiden, wo die Grenze zwischen dem Bereich der direkten Berechnung und der Modellierung liegt, wird in der Theorie eine räumliche Filterfunktion auf das Strömungsfeld angewendet. In der Realität wird diese Filterung implizit durch die numerische räumliche Diskretisierung vorgenommen. Man kann sich bildlich vorstellen, dass man für die räumliche Darstellung eines Wirbels eine Mindestanzahl von Zellen benötigt. Je gröber die Auflösung des Gitters ist, desto größer sind die Wirbel, die durch das Gitter gerade noch beschreibbar sind. Im weiteren Verlauf der Arbeit werden die räumlich gefilterten Geschwindigkeiten mit einer Tilde \widetilde{u}_i gekennzeichnet.

In den Navier-Stokes-Gleichungen wird der sich ergebende Spannungstensor in einen isotropen und einen anisotropen Anteil zerlegt:

$$\widetilde{u}_i \widetilde{u}_j - \widetilde{u}_i \widetilde{u}_i = \frac{2}{3} k^R \delta_{ij} + \tau_{ij}^r \quad (5.3.1)$$

wobei $k^R = \frac{1}{2} (\widetilde{u_k u_k} - \widetilde{u_k} \widetilde{u_k})$ die kinetische Energie der modellierten Wirbel darstellt. Der anisotrope Anteil τ_{ij}^r wird ähnlich wie in der RANS-Modellierung mit Hilfe einer Wirbelviskosität ν_T modelliert:

$$\tau_{ij}^r = -2\nu_T \tilde{S}_{ij} \quad (5.3.2)$$

\tilde{S}_{ij} stellt den symmetrischen Anteil des Gradiententensors der räumlich gefilterten Geschwindigkeiten \tilde{U}_i dar:

$$\tilde{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \tilde{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{U}_j}{\partial x_i} \right). \quad (5.3.3)$$

Im verwendeten Code *Flow3D* wird auf das Standard-Smagorinsky-Modell zurückgegriffen. Hierbei wird zuerst das geometrische Mittel der Zelldimension ausgerechnet:

$$L = (\Delta x \Delta y \Delta z)^{\frac{1}{3}} \quad (5.3.4)$$

Kleinere Wirbel werden wie bereits angesprochen mit einer Wirbelviskosität ν_T dargestellt. Die in *Flow3D* implementierte Gleichung lautet [23]:

$$\nu_T = (C_S L)^2 \cdot \sqrt{2 \cdot \tilde{S}_{ij} \tilde{S}_{ij}}, \quad (5.3.5)$$

wobei C_S die so genannte Smagorinsky-Konstante darstellt, die zwischen 0,1 und 0,2 liegen sollte. In *Flow3D* ist diese auf den Wert $C_S = 0,1$ gesetzt.

Die LES-Methode führt durch die Berechnung der großen Wirbel zu einem einfacheren numerischen Modell als dies bei den RANS Simulationen der Fall ist. Es sind im Gegensatz zu einem k- ε -Modell keine zusätzlichen Transportgleichungen zu lösen, was den Modellierungsaufwand und die Rechenzeit pro Zeitschritt reduziert. Wie ebenfalls bei der Analyse von Gleichung 5.3.5 zu erkennen ist, wird bei zunehmender Gitterverfeinerung der Anteil der modellierten Wirbel immer kleiner. Im Grenzfall können alle Wirbel und Fluktuationen im Strömungsfeld berechnet werden. Man spricht dann von einer Direkten Numerischen Simulation (DNS).

In der LES werden die instationären Strömungsfelder berechnet, im Gegensatz zur

RANS, in der zeitlich gemittelte Strömungsfelder betrachtet werden. Im Allgemeinen kann gefolgert werden, dass bei den RANS Turbulenzmodellen die Berechnungszeit der einzelnen Zeitschritte länger ist, die LES jedoch ein Vielfaches an zu berechnenden Zeitschritten benötigt.

5.3.2 Konfiguration der Simulation und Vorgehen

Die LES wurde auf einem äquidistanten kartesischen Gitter mit $160 \cdot 50 \cdot 259$ Gitterpunkten mit $\Delta x = 1,38$ cm, $\Delta y = 2,0$ cm und $\Delta z = 1,42$ cm gerechnet. Als Randbedingungen wurden an den seitlichen Begrenzungen in y -Richtung des Strömungsgebietes *Free-Slip* Wandrandbedingungen gewählt. Ähnlich wie in den bereits beschriebenen RANS-Simulationen wurden in Hauptströmungsrichtung sog. *periodische Randbedingungen* benutzt, so dass sich aufgrund des Potentialunterschiedes von $\Delta h = 0,20$ m bzw. $\Delta h/d = 0,667$ zwischen den Rändern in Hauptströmungsrichtung die Strömung in einem repräsentativen Becken einer längeren Fischtreppe entwickelte. Die mittlere Fließtiefe im betrachteten Becken wurde mit Hilfe der Initialisierung mit $y = 250$ cm definiert.

Nach der Simulationszeit von 120 Sekunden, zu der sich ein statistisch stationärer Strömungszustand eingestellt hatte, wurden die Ergebnisse der Simulation in einem Zeitraum von 15 Sekunden ausgewertet, was etwa 3 Durchläufen entspricht. Die Berechnung wurde auf einem Doppel-Prozessorsystem mit zwei Intel Pentium IV 3GHz Prozessoren ausgeführt und beanspruchte etwa 3.000 CPU Stunden.

Die Berechnung der mittleren Druck- und Geschwindigkeitsfelder erfolgte zu jedem Zeitschritt. Somit wurden bei einem mittleren Zeitschritt von $5 \cdot 10^{-4}$ s etwa 30.000 Zeitschritte gemittelt. Für die Berechnung der Turbulenzgrößen wurden die Ergebnisse alle 100 ms ausgegeben. Danach wurden die sich ergebenden 151 Momentanfelder ausgewertet. Dieser Zeitraum reichte für die Konvergenz von Momenten 1. Ordnung aus, d. h. für die mittleren Geschwindigkeits- und Druckfelder. Die Analyse der Statistik von Momenten 2. Ordnung ergab, dass die Zeitreihe für in y -Richtung gänzlich symmetrische Ergebnisse nicht ausreichte. Die Unterschiede sind jedoch gering, so dass die im Folgenden getroffenen Schlussfolgerungen als aussagekräftig betrachtet werden können.

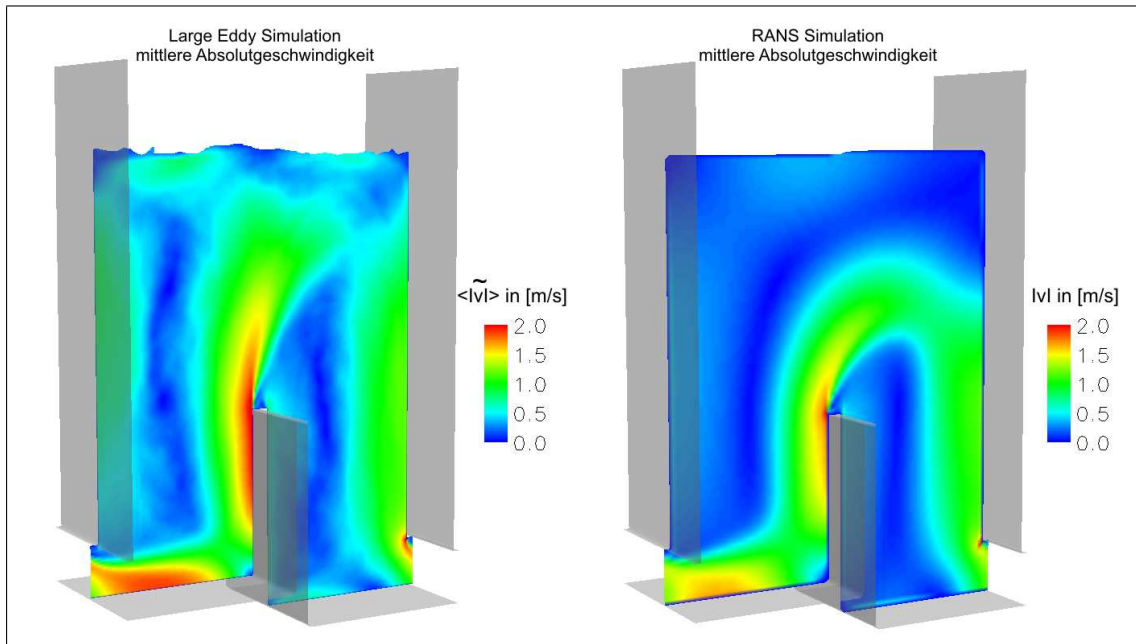


Abbildung 5.24: Vergleich der Beträge der mittleren Geschwindigkeitsfelder von LES (links) und RANS (rechts)

5.3.3 Analyse des mittleren Strömungsfeldes

Im vorliegenden Unterkapitel werden die Ergebnisse des zeitlich gemittelten Strömungsfeldes vorgestellt. Nach einer Diskussion der sich ergebenden mittleren Geschwindigkeiten wird auf das mittlere Druckfeld näher eingegangen.

Analyse des mittleren Geschwindigkeitsfeldes

Zu Beginn der Diskussion der Simulationsergebnisse der LES sollen die mittleren Geschwindigkeitsfelder untersucht werden. Der Betrag der zeitlich gemittelten Geschwindigkeit errechnet sich zu

$$\langle \tilde{U} \rangle = \sqrt{\langle \tilde{U}_i \rangle \langle \tilde{U}_i \rangle}. \quad (5.3.6)$$

Der grundlegende Unterschied zwischen der RANS und der LES ist die unterschiedliche Berechnung der zeitlich gemittelten Ergebnisse. In der RANS werden die Navier-Stokes-Gleichungen direkt mit den mittleren Geschwindigkeiten gelöst. Es wird ein mittlerer Wasserspiegel und eine mittlere Labyrinthströmung berechnet. Wie im Ergebnis der RANS in Abbildung 5.24 zu sehen ist, resultiert daraus ein homogener

	RANS	LES
Geschwindigkeit v_{max}	1,97m/s	2,27m/s
Durchfluss Q	0,308m ³ /s	0,313m ³ /s
$\psi = v_m/v_{max}$	0,521	0,460
$\zeta = c/(v_m^2/2g)$	3,721	3,605

Tabelle 5.3: Gegenüberstellung der Ergebnisse der LES und der RANS, Konfiguration gemäß Tabelle 5.1.

Verlauf der Labyrinthströmung mit sehr kleinen Strömungsgeschwindigkeiten in den Rezirkulationsströmungen. Es sind in Oberflächennähe sehr kleine Geschwindigkeiten zu beobachten. Ebenso fällt auf, dass die Geschwindigkeiten in den Wandstrahlen in der LES geringfügig größer sind (vgl. Tab. 5.3). Die numerisch ermittelten Durchflüsse stimmen jedoch sehr gut überein. In der LES wurden die mittleren Strömungsfelder durch die Mittelung von über 30000 momentanen Geschwindigkeitsfeldern errechnet. Es werden demzufolge im Gegensatz zur RANS sowohl die Wasserspiegelschwankungen berücksichtigt als auch kohärente Wirbelstrukturen, die in der RANS aufgrund der Betrachtung von mittleren Geschwindigkeitsfeldern nicht auftreten. Im Simulationsergebnis der LES treten demzufolge höhere Geschwindigkeiten in Nähe der Oberfläche und in den Rezirkulationsgebieten auf. Der größte Unterschied zwischen den beiden Methoden liegt jedoch in der Strahlablösung oberhalb der Prallwand. Die signifikant größeren Geschwindigkeiten in der LES resultieren durch die zeitliche Auflösung der Scherschicht und der sich entwickelnden Wirbel aufgrund der Einmischung des Strahls.

In der LES wurde das Strömungsgebiet in y-Richtung durch Wände begrenzt. Da die Wirbelstrukturen maßgeblich durch diese Randbedingungen beeinflusst werden, sind die Geschwindigkeiten wie in den Querschnitten von Abbildung 5.25 zu sehen ist, nicht zweidimensional, sondern in der Achse des Kanals höher als in Wandnähe. Dies hat einen erheblichen Einfluss auf die turbulenten Größen sowie auf die räumliche Verteilung der Wirbel im Strömungsfeld. Das Geschwindigkeitsprofil unter den Schützen ist dagegen homogen in y-Richtung, wodurch das Berechnen des Durchflusses bezüglich einer geänderten Breite problemlos möglich wird.

Abschließend kann aus den Simulationsergebnissen gefolgert werden, dass die

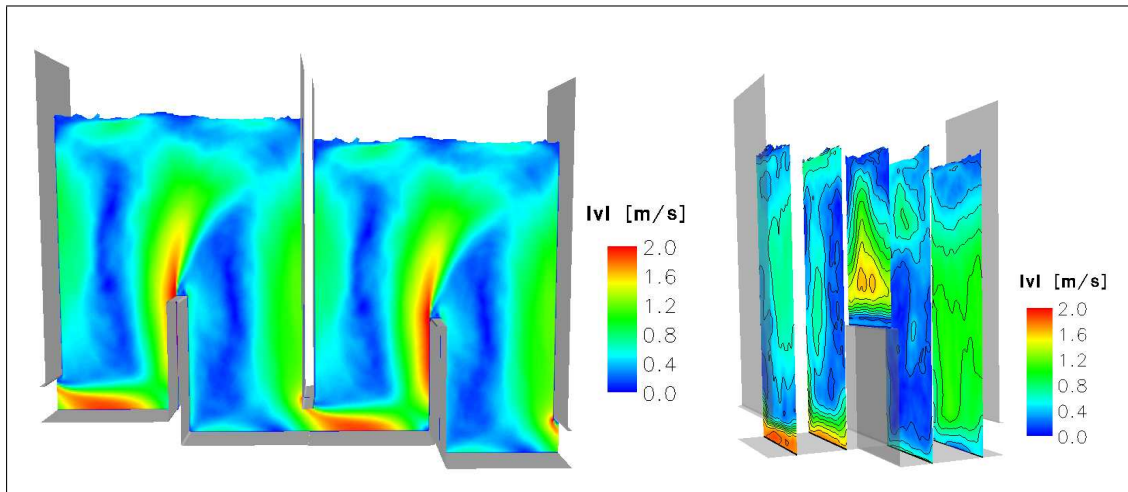


Abbildung 5.25: Verteilung der Beträge der mittleren Geschwindigkeiten im Fischpass

Ergebnisse der RANS und der LES bei der Bestimmung der maximalen Geschwindigkeit und dem Durchfluss gut übereinstimmen. Die RANS kann dementsprechend für eine relativ schnelle Berechnung dieser Strömungsgrößen eingesetzt werden. Sind jedoch die Verteilungen der Geschwindigkeiten von größeren Interesse oder treten großräumige Wirbelstrukturen in Regionen geringer mittlerer Geschwindigkeit auf, so ist die Berechnung mit der LES-Methode zu bevorzugen. Weiterhin können mit Hilfe der LES turbulente Strömungsgrößen untersucht werden, da im Gegensatz zur RANS die momentanen Geschwindigkeitsfelder ausgewertet werden können. Die Berechnung mit der LES benötigt im Vergleich zur RANS wesentlich längere Berechnungszeiten. Wo die Rechenzeiten bei Verwendung von RANS Modellen im Rahmen von wenigen Stunden liegen, muss man bei vergleichbarer Gitterauflösung bei der LES mit mehreren Wochen rechnen. Es sollte daher der Einsatz der einzelnen Berechnungsmethoden im Einzelfall abgewogen werden.

Analyse des Druckfeldes

In den Impulsgleichungen nach Navier-Stokes, die in *Flow3D* gelöst werden, wird die Körperkraft infolge der Erdbeschleunigung g in negativer z -Richtung berücksichtigt. Dadurch ist es möglich, Systeme mit freier Oberfläche, die durch die Schwerkraft getrieben werden, zu berechnen. Das sich ergebende Druckfeld stellt den absoluten Druck im System da, der den hydrostatischen Druck enthält. Im Rahmen der

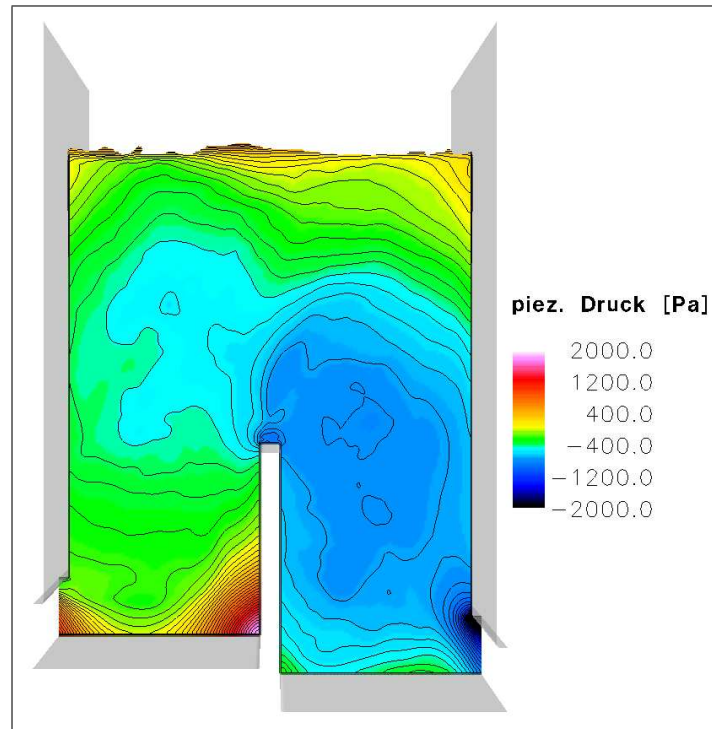


Abbildung 5.26: *Piezometrischer Druck des mittleren Strömungsfeldes im Fischpass*

Berechnung eines Beckens mit zwei baugleichen Schützen in x-Richtung muss der Druck unter den Schützen jeweils gleich groß sein. In den Simulationen stimmen die Profile des Druckes im Ein- und Auslauf deshalb überein.

Um den Druck, der sich aufgrund der Strömung im Becken ergibt, aus dem sich aus der Simulation ergebenden Druckfeld zu bestimmen, kann man bezogen auf eine Kote z_0 eine konstante hydrostatische Druckverteilung addieren. Es ergibt sich auf diese Weise der so genannte piezometrische Druck in der Strömung:

$$\langle \tilde{p}_{piezo} \rangle = \langle \tilde{p} \rangle + \rho \cdot g(z - z_0) \quad (5.3.7)$$

Das Ergebnis dieser Berechnung, bei der z_0 der Lage des Wasserspiegels entspricht, ist in Abbildung 5.26 aufgetragen. Kurz nach Unterströmen der Schütze fällt der Druck ab, der mit der Kontraktion und damit Beschleunigung des sich ergebenden Wandstrahls in Verbindung steht. Bei der Umlenkung dieses Wandstrahls durch die Prallwand in die Vertikale bildet sich ein Staudruck, der in Abbildung klar zu erkennen ist. Die Einmischung des Wandstrahls und die damit verbundene Geschwindigkeitsreduzierung führt zu einem Druckanstieg nahe der Oberfläche. Die Bildung und

geringe Beschleunigung eines Wandstrahls nach unten führt auf der Rückseite des Schützes zu einer Druckreduzierung. Ferner ist sowohl am Boden, wo der Strahl in Richtung der Schützöffnung umgelenkt wird, als auch in der unteren Ecke der Prallwand die Bildung von Staudruckbereichen zu erkennen.

5.3.4 Analyse der turbulenten Größen

Die Analyse der mittleren Geschwindigkeitsfelder und der mittleren Energiedissipation stellt die Grundlage für die Bemessung von Fischaufstiegsanlagen dar. Aufgrund ihrer Physiologie können Fische nur Bereiche mit einer gewissen Maximalgeschwindigkeit überwinden. Da für diese Restriktion die mittlere Geschwindigkeit nur beschränkt aussagekräftig ist, sollen im Folgenden auch die turbulenten Schwankungsgrößen näher untersucht werden. Durch eine Untersuchung der Enstrophie, der mittleren quadratischen Wirbelintensität des Strömungsfeldes, können Rückschlüsse auf Wirbelstrukturen im Strömungsfeld gezogen werden, die Fische im System der periodischen Schütze vorfinden.

Mit den in der Arbeit enthaltenen Analysen soll gezeigt werden, dass die Diskussion der mittleren Strömungsfelder ein nicht hinreichendes Argument für die Funktionstüchtigkeit von Fischaufstiegsanlagen ist. Eine dreidimensionale Analyse von turbulenten Größen wie den turbulenten Schwankungsgrößen oder den Energiedissipationsraten kann eine entscheidende Hilfe für die Diskussion der Akzeptanz von Fischaufstiegsanlagen durch Fische und so folglich der Funktionsfähigkeit von Fischaufstiegsanlagen sein.

Analyse der turbulenten kinetischen Energie k

Die Momentangeschwindigkeit \tilde{U}_i eines Strömungsfeldes kann im Allgemeinen in eine Summe aus mittlerer Geschwindigkeit $\langle \tilde{U}_i \rangle$ und turbulenter Schwankungsgeschwindigkeit \tilde{U}'_i zerlegt werden:

$$\tilde{U}'_i = \tilde{U}_i - \langle \tilde{U}_i \rangle \quad (5.3.8)$$

Da der Mittelwert dieser Schwankungen gleich null ist, muss für die Auswertung von \tilde{U}'_i auf den Mittelwert der quadratischen Werte zurückgegriffen werden, die turbulente kinetische Energie k :

$$k = \frac{1}{2} \langle \tilde{U}'_i \tilde{U}'_i \rangle. \quad (5.3.9)$$

In Abbildung 5.27 ist k in mehreren Schnitten aufgetragen. Es fällt auf, dass k , wie auch die mittleren Strömungsgrößen keine zweidimensionale Verteilung aufweist. Durch den Einfluss der Seitenwände kommt es sowohl kurz nach Unterströmen des Schützes als auch nach Ablösen des Strahls von der Prallwand zu Bereichen großer turbulenter kinetischer Energie in der Nähe der Seitenwände. Der Einfluss der Seitenwände auf die Energiedissipation im Becken ist demnach sehr groß.

In den Scherzonen der Wandstrahlen kommt es ebenfalls zu Bereichen mit großem k . Das Einmischen des Kernbereichs des Wandstrahls ist deutlich erkennbar. Nach der Schützwand sowie an der Prallwand kann innerhalb des angelegten Wandstrahls in Wandnähe eine Reduzierung von k beobachtet werden. Dies liegt an der durch die Wand erzeugten Dämpfung der Schwankungsbewegungen normal zur Wand.

Vergleicht man die Verteilung der mittleren Geschwindigkeit (Abb. 5.25) mit der Verteilung von k , kann der Bereich der Einmischung des abgelösten Strahls gut erkannt werden. Ebenso sind in den Rezirkulationsgebieten teilweise große Geschwindigkeitschwankungen erkennbar. Letztere erhärten die Argumentation, dass die Diskussion von mittleren Geschwindigkeiten in Fischaufstiegsanlagen bei ihrer Dimensionierung nicht hinreichend ist. Es können in Bereichen mit sehr kleinen mittleren Geschwindigkeiten durchaus Zonen mit hoher Energiedissipation liegen. Fische müssen sich auf Grund der dort auftretenden Wirbel durch Schwimmbewegungen stabilisieren und können sich nicht regenerieren. Ein Rückschluss von den zeitlich gemittelten Geschwindigkeitsfeldern auf Regenerationsbereiche im Becken ist somit nicht möglich.

Analyse der Enstrophie

Die Enstrophie stellt den zeitlichen Mittelwert der quadratischen Wirbelstärke dar. Sie ist ein Maß für die mittlere Wirbelintensität im Becken, ohne Berücksichtigung der Drehrichtung. Die Enstrophie wird wie folgt berechnet:

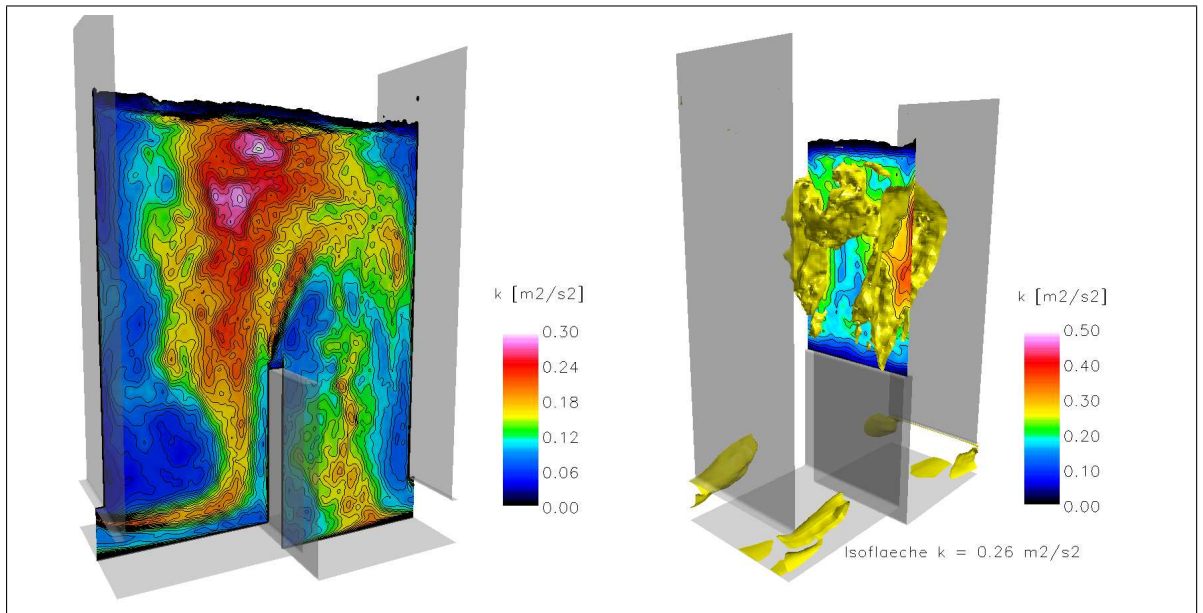


Abbildung 5.27: *Turbulente kinetische Energie k .*

Links: Längsschnitt in Beckenachse.

Rechts: Isofläche für $k = 0,26$ m²/s².

$$\langle \tilde{\omega}^2 \rangle = \langle \tilde{\omega}_i \tilde{\omega}_i \rangle. \quad (5.3.10)$$

In Abbildung 5.28 ist die Enstrophie entlang eines Längsschnittes in Beckenmitte abgebildet. Es ist zu sehen, dass die Enstrophie im gegebenen Becken in Bereichen großer Scherung erwartungsgemäß äußerst groß ist. Die Maxima werden an der freien Scherfläche des Schützstrahls sowie im Freistrahл nach Ablösen von der Prallwand erreicht. Die rosafarbenen Bereiche in der Nähe der Oberfläche sind numerische Fehler, die aufgrund der Mittelung der Oberflächenschwankungen entstehen. Durch die Schwankungen sind die Geschwindigkeitsgradienten lokal sehr groß, was zu falschen Ergebnissen führt. In der Abbildung kann man den Wandstrahl sowie die Bereiche seiner Einmischung gut erkennen. In den Zentren der Rezirkulationsgebiete fallen Bereiche mit starker Enstrophie auf. Es handelt sich hierbei um Regionen mit stehenden Wirbeln. An den Außenseiten der Rezirkulationszonen ist die Enstrophie sehr klein, was auf eine geradlinige parallele Strömung hinweist. Die Parallelströmung gelangt bei Unterströmen des Schützes in den Kern des sich entwickelnden Strahls. Die Kernzone des Strahls und deren Einmischung kann gut beobachtet werden.

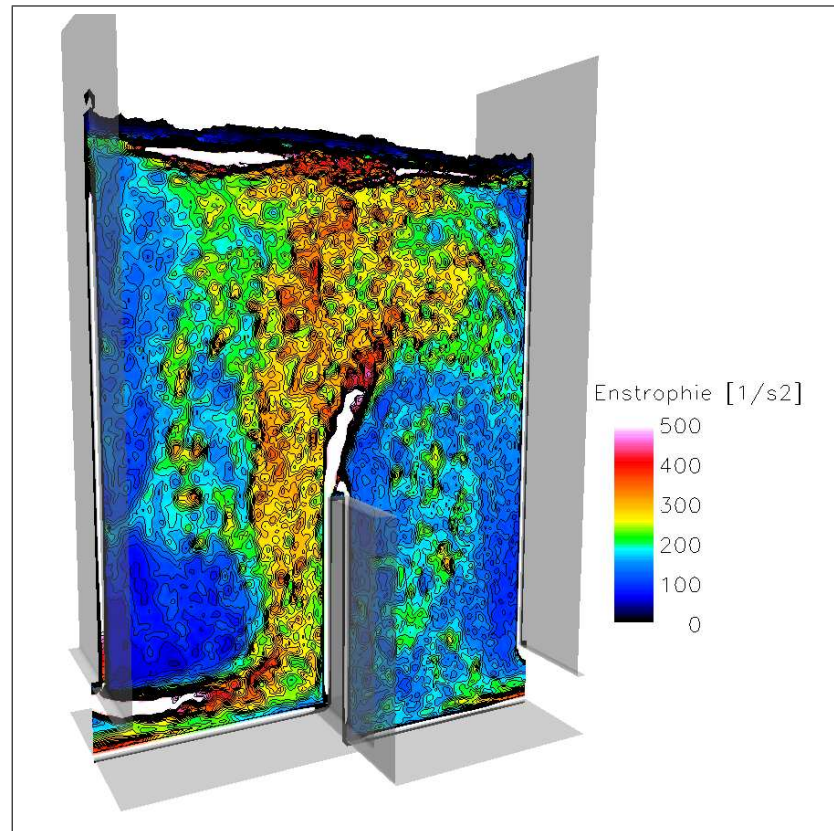


Abbildung 5.28: *Enstrophie im Fischpass*

Die mittlere Wirbelintensität ist für Fische von entscheidender Bedeutung. Es ist aufgrund der Abbildung ersichtlich, dass in den Rezirkulationszonen zwar sehr kleine Geschwindigkeiten herrschen, sich die Fische jedoch in diesen Bereichen gegen Einfluss der Wirbel stabilisieren müssen. Diese Stabilisierung erfolgt meist durch die Seitenflossen der Fische. Aufgrund dieses Stabilisierungsaufwandes kann es dazu kommen, dass sich Fische nicht regenerieren können, obwohl die mittleren Geschwindigkeitsfelder dies suggerieren.

Analyse der Güte der LES

Wie bereits mehrfach angesprochen werden in der LES nur Wirbel größer als Δx_i direkt berechnet. In einem Strömungsfeld wird dabei die Energie der Wirbel von den großen Wirbeln an immer kleinere Wirbel weitergegeben, was als Wirbelkaskade bezeichnet wird. Rechnet man die Größe der Wirbel in einem Strömungsfeld in die so genannte Wellenzahl κ um

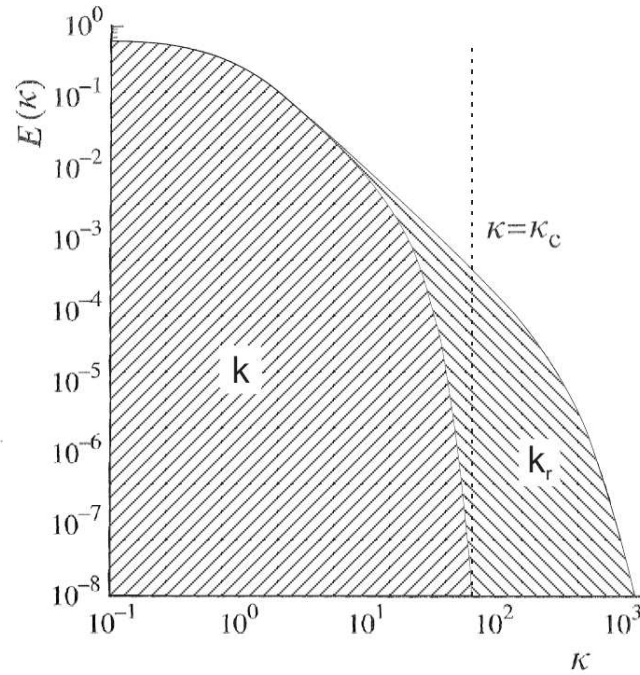


Abbildung 5.29: *Qualitatives Energiespektrums $E(\kappa)$ über die Wellenzahl κ und eines mit einem Gauss-Filter erhaltenen Energiespektrums $\tilde{E}(\kappa)$ über die Wellenzahl κ , nach [43]*

$$\kappa = \frac{2\pi}{L}, \quad (5.3.11)$$

und betrachtet eine Fourieranalyse über die verschiedenen Wellenzahlen, so kann man die Energie $E(\kappa)$ der Wirbel in einem Energiespektrum darstellen, wie dies in Abbildung 5.29 qualitativ dargestellt ist. Im Rahmen der DNS werden alle Wirbel aufgelöst, so dass die turbulente kinetische Energie dem Integral des Energiespektrums entspricht:

$$k_{DNS} = \int_{\kappa=0}^{\infty} E(\kappa) d\kappa \quad (5.3.12)$$

Bei der LES können nur Wirbel bis zu einer Wellenzahl κ_C aufgelöst werden. Dem entspricht eine turbulente kinetische Energie k . Die nicht aufgelösten Wirbel werden mit einem Wirbelviskositätsmodell modelliert. Diese enthalten die restliche turbulente kinetische Energie k_r .

Für die Evaluierung der Güte einer LES wird von Pope [43] das Verhältnis von

k zu k_r zu verwendet. In einer guten LES sollen mindestens 80% der kinetischen Energie direkt modelliert werden, was einem Verhältnis von k zu k_r von mehr als 4 : 1 entspricht. Für Berechnung von k_r kann man dabei entweder $E(\kappa)$ durch eine Funktion annähern und diese von κ_c bis ∞ integrieren [43]:

$$k_r = \int_{\kappa=\kappa_c}^{\infty} E(\kappa) d\kappa \quad (5.3.13)$$

oder k_r über eine Analyse der Feinstrukturfluktuationen des Wirbelviskositätsmodells abschätzen [51]

$$k_r = \frac{\langle \nu_T^2 \rangle}{(0.094 \cdot L)^2}. \quad (5.3.14)$$

Für die Berechnung der Wirbelviskosität ν_T wird aus einer Zeitreihe räumlich gefilterter Geschwindigkeiten zunächst ein Maß für die charakteristische gefilterte Scherrate \tilde{S} berechnet:

$$\tilde{S} = \left(2\tilde{S}_{ij}\tilde{S}_{ij} \right)^{0.5} = \sqrt{\tilde{S}^2} \quad (5.3.15)$$

$$\tilde{S}^2 = 2\frac{\partial\tilde{u}^2}{\partial x^2} + \left(\frac{\partial\tilde{v}}{\partial x} + \frac{\partial\tilde{u}}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial\tilde{w}}{\partial x} + \frac{\partial\tilde{u}}{\partial z} \right)^2 + 2\frac{\partial\tilde{v}^2}{\partial y^2} + \left(\frac{\partial\tilde{w}}{\partial y} + \frac{\partial\tilde{v}}{\partial z} \right)^2 + 2\frac{\partial\tilde{w}^2}{\partial z^2} \quad (5.3.16)$$

Mit Hilfe von \tilde{S} kann nun die instantane Wirbelviskosität ν_T berechnet werden.

$$\nu_T = (C_S L)^2 \cdot \tilde{S}. \quad (5.3.17)$$

Diese wird dann gemittelt um ein Maß für den mittleren Betrag der Wirbelviskosität zu erhalten. Die graphische Auswertung von $\langle \nu_T \rangle$ ist in Abbildung 5.30 dargestellt. Das Maximum von $\langle \nu_T \rangle$ liegt in den Scherzonen des Strömungsfeldes. Das Verhältnis von $\langle \nu_T \rangle$ zu ν liegt in den Rezirkulationszonen zwischen 30 (linke Rezirkulationszone) und 70 (rechte Rezirkulationszone). Die Einmischung des Freistrahls nach Ablösen von der Prallwand ist sehr gut sichtbar. $\langle \nu_T \rangle / \nu_T$ liegt hier in einem Bereich von über 140. Außerhalb des Einmischungsbereiches fällt $\langle \nu_T \rangle / \nu_T$ auf Werte unter 80. Die hohen Werte von $\langle \nu_T \rangle / \nu_T$ an der Wasseroberfläche sind mit Vorsicht zu betrachten. Aufgrund der Schwankung der freien Oberfläche kommt es zu großen Gradienten an der Grenzfläche Luft-Wasser was numerische Fehler in diesem Bereich erzeugt.

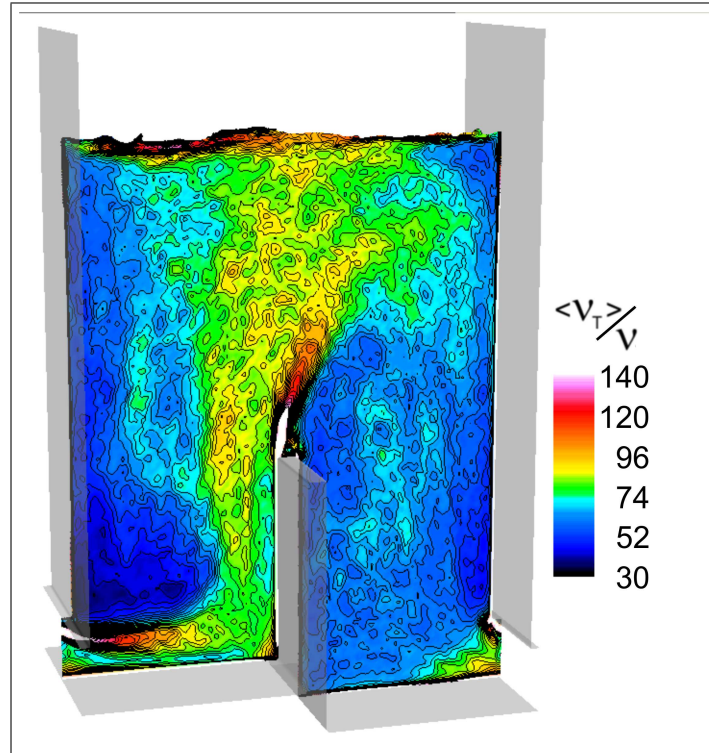


Abbildung 5.30: Mittlere Wirbelviskosität $\langle \nu_T \rangle$ im Fischpass

Mit Hilfe der instantanen Werte ν_T kann die mittlere Energiedissipation ε im Strömungsfeld abgeschätzt werden:

$$\varepsilon = \langle (\nu + \nu_T) \tilde{S}^2 \rangle \quad (5.3.18)$$

$$= \nu \langle \tilde{S}^2 \rangle + (C_S L)^2 \cdot \langle \tilde{S} \cdot \tilde{S}^2 \rangle \quad (5.3.19)$$

$$= \nu \langle \tilde{S}^2 \rangle + (C_S L)^2 \cdot \langle \tilde{S}^3 \rangle \quad (5.3.20)$$

Die Summe aus kinematischer Viskosität des Fluides und Wirbelviskosität geht in die Berechnung von ε ein. Zur Berechnung der Güte der LES müssen die turbulenten kinetischen Energien k und k_r bestimmt werden. Das durch die LES aufgelöste k wurde in diesem Kapitel bereits ausführlich vorgestellt und analysiert. Für die Berechnung des nicht aufgelösten k_r kann nach Pope [43] unter Annahme eines Kolmogorov-Spektrums und Filterung mit einem scharfen Frequenzfilters folgende Abschätzung verwendet werden:

$$\langle k_r \rangle = \int_{\kappa_C}^{\infty} E(\kappa) d(\kappa) \approx \frac{3}{2} C \left(\frac{\varepsilon L}{\pi} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (5.3.21)$$

Die Variable C ist eine Universalkonstante und kann unter Annahme eines Kolmogorov-Spektrums und Filterung mit einem scharfen Frequenzfilters über folgende Bedingung abgeschätzt werden [43]:

$$C_s = \frac{1}{\pi} \left(\frac{2}{3C} \right)^{\frac{3}{4}} \quad (5.3.22)$$

Bei einem gewählten $C_s = 0,1$ kann für C ein Wert von 3,12 bestimmt werden.

Mit diesen Konstanten wurde für die gegebene LES k_r sowohl mit Gl. 5.3.14 nach Werner [51] als auch mit Gl.5.3.21 nach Pope [43] berechnet, wobei die Ergebnisse sehr gut übereinstimmten, und dem bereits berechneten k gegenübergestellt. Die graphische Auswertung ist in Abbildung 5.31 zu sehen. Im Großteil des Simulationsgebietes außer in der ersten Zelle an den Wänden ist die turbulente kinetische Energie zu mehr als 98% aufgelöst. Lediglich in den großen Scherzonen liegt die räumliche Auflösung darunter. Für eine gute LES sollen wie bereits gesagt mehr als 80% von k berechnet werden. Dieser Grenzwert wird in der Scherzone direkt nach Ablösung von der Prallwand unterschritten. Die betroffene Region hat eine Größe von etwa $X \cdot Z = 5 \cdot 5$ Zellen. Im Rahmen der Rechengenauigkeit und dem Hauptinteresse an der Strömung in der Beckenmitte, die die Fische beeinflusst, kann gefolgert werden, dass die Auflösung des Strömungsgebietes für die LES ausreicht.

Um abschließend zu klären, wie fein das Netz sein müsste, um alle Wirbel zu berechnen, kann das so genannte Kolmogorov-Maß η bestimmt werden. Dieses Maß stellt im Energiespektrum die kleinste Wellenzahl κ dar, bei der noch ein nennenswertes $E(\kappa)$ vorhanden ist. Die Berechnung des Effektivwertes von η erfolgt nach:

$$\eta = \left(\frac{\nu^3}{\varepsilon} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (5.3.23)$$

Das berechnete Kolmogorov-Maß und dessen Verhältnis zur Gittergröße L ist in Abbildung 5.32 dargestellt. Der benötigte Verfeinerungsfaktor des Netzes liegt zwischen etwa 800 in den Rezirkulationszonen und über 2000 in den Scherzonen. Die

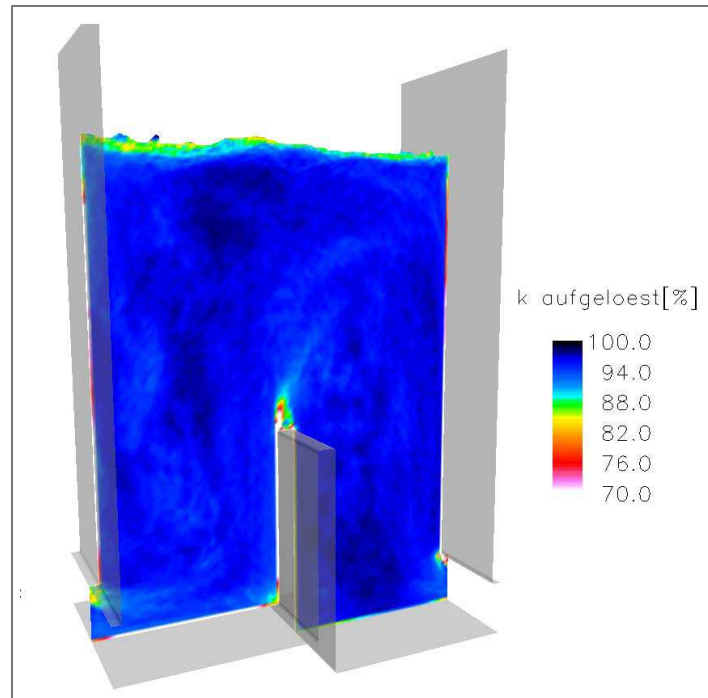


Abbildung 5.31: Anteil der turbulenten kinetischen Energie, die in der LES direkt berechnet wird. (nach [51])

Gitterweiten reichen demnach aus, um den überwiegenden Teil der turbulenten kinetischen Energie sehr genau mit Hilfe einer LES zu berechnen. Für eine DNS zur Berechnung aller Wirbel wären etwa 1500^3 mehr Zellen im Strömungsgebiet erforderlich, was ein Vielfaches an Rechenkapazität bedeutet.

Analyse der Energiedissipation

In den Bemessungsvorschriften für Fischaufstiegsanlagen, die in Kapitel 2 eingehend vorgestellt wurden, wird ein Nachweis der mittleren Energiedissipation in den einzelnen Becken gefordert. Diese errechnet sich in der simulierten Konfiguration zu:

$$\begin{aligned}
 E &= \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot \Delta h}{V} & (5.3.24) \\
 &= \frac{1000 \cdot 9,81 \cdot 0,367 \cdot 0,2}{5,78} \\
 &= 124,6 \text{ W/m}^3 < 150 \text{ W/m}^3
 \end{aligned}$$

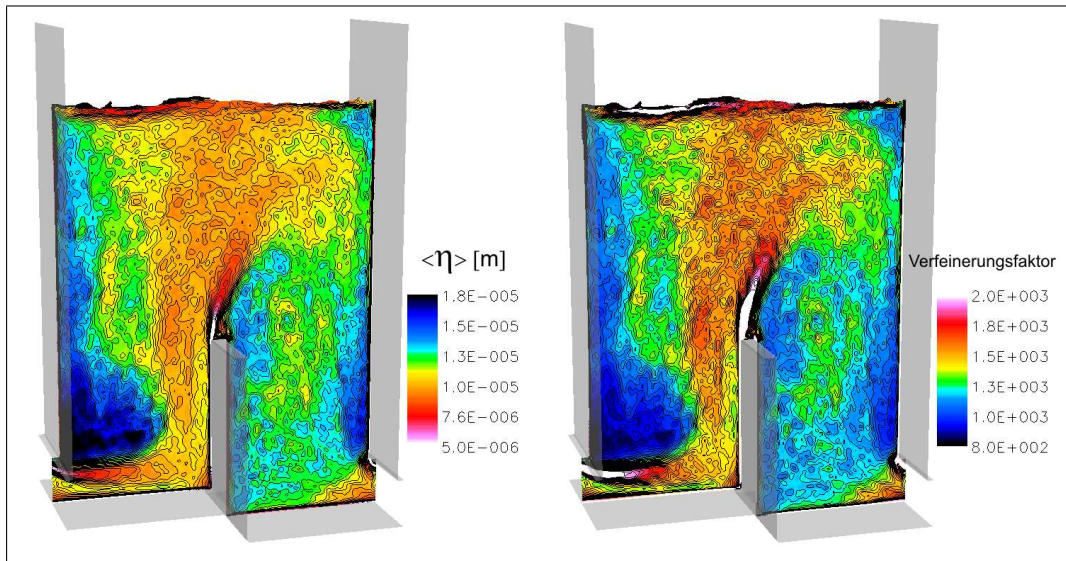


Abbildung 5.32: Kolmogorov-Maß $\bar{\eta}$.

Links: Längsschnitt in Beckenmitte.

Rechts: Verhältnis zwischen Gittergröße L und $\bar{\eta}$.

Im untersuchten System ist die mittlere Energiedissipation von etwa 125 W/m^3 kleiner als der geforderte Grenzwert von 150 W/m^3 bei Beckenpässen, was hauptsächlich an der großen mittleren Fließtiefe von $2,50 \text{ m}$ liegt. Da dieser Wert jedoch die Dissipationsvorgänge räumlich mittelt, soll im Folgenden die Verteilung von E im Becken näher untersucht werden. Aus der Energiedissipationsrate ε kann die mittlere Energiedissipation errechnet werden:

$$E = \frac{1}{V} \cdot \int \rho \cdot \varepsilon dV \quad (5.3.25)$$

Das Berechnungsergebnis entlang eines Längsschnittes in Beckenmitte ist in Abbildung 5.33 dargestellt. Der flächenbezogene Mittelwert von $\rho\varepsilon$ beträgt 150 W/m^3 , was von den nach Gleichung 5.3.25 ermittelten 125 W/m^3 abweicht. Da bei der Berechnung von ε jedoch mehrere Abschätzungen benutzt wurden, ist die Übereinstimmung der beiden Werte von E sehr gut und eine Diskussion der räumlichen Verteilung möglich. $\rho\varepsilon$ variiert zwischen 0 und über 200 W/m^3 . Die größten Werte für $\rho\varepsilon$ werden in den beiden bereits angesprochenen Scherzonen erreicht. In diesen Zonen herrschen mehr als 200 W/m^3 . Die Analyse der Verteilung von $\rho\varepsilon$ ergibt, dass in den Rezirkulationsbereichen sowie im gesamten Bereich nach der Prallwand weniger als 40 W/m^3 dissipiert

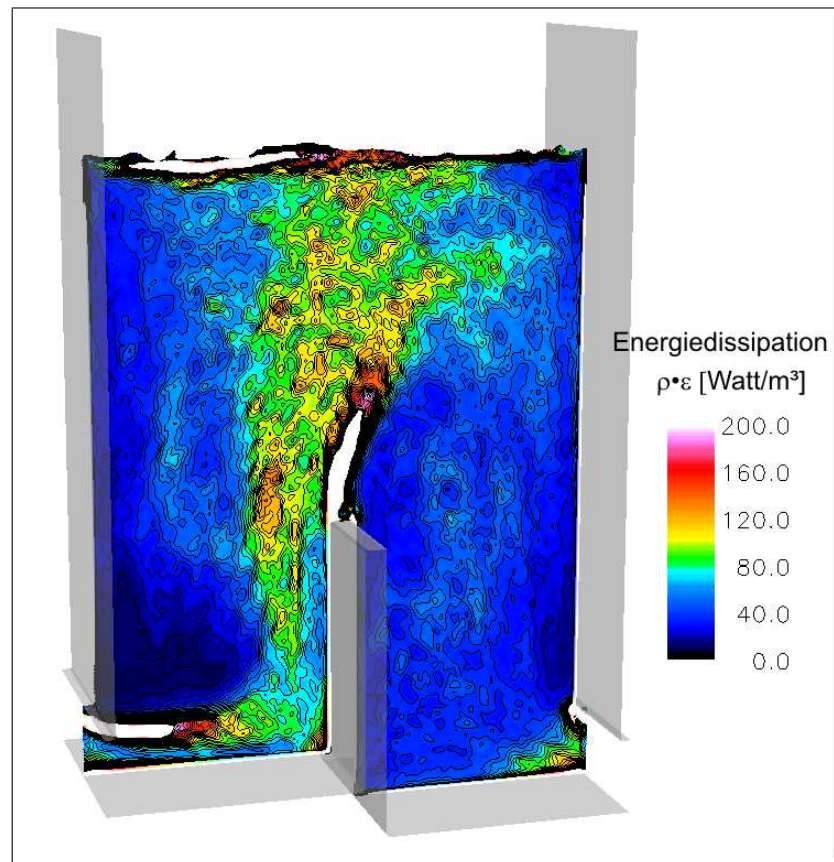


Abbildung 5.33: *Energiedissipation $\rho \epsilon$ im Fischpass*

werden. Dies unterschreitet den Grenzwert für Regenerationsbecken bei Denil-Pässen von 50 W/m^3 [20]. Das den Fischen angebotene Strömungsfeld weist demnach große Gebiete mit sehr geringem $\rho \epsilon$ und geringen Strömungsgeschwindigkeiten auf. Nach Vorgabe der technischen Richtlinien [5][20] müssen demnach keine weiteren Beruhigungsbecken in der Mitte des Fischpasses eingeplant werden.

Aufgrund der Bewegung des Wasserspiegels kommt es in Oberflächennähe bei der Berechnung von [20] aus den Geschwindigkeitsfeldern zu numerischen Fehlern, wie die in Abbildung 5.29 erkennbaren großen Werte für $\rho \epsilon$ an der Oberfläche zeigen.

Die dreidimensionale Darstellung und Analyse von $\rho \epsilon$ ermöglicht eine differenziertere Diskussion der Strömungsfelder in den Fischpässen. Die größere Anschaulichkeit aufgrund der graphischen Darstellung ermöglicht es auch strömungstechnischen Laien, an der Diskussion teilzunehmen. Der hieraus entstehende interdisziplinäre Dialog verspricht weitaus bessere Funktionsweise und Akzeptanz von Fischaufstiegsanlagen als die strikte Anwendung der eindimensionalen Bemessungsregeln.

5.3.5 Analyse von kohärenten Strukturen

Nach Wilczak [52] sind kohärente Strukturen deutlich ausgeprägte großskalige Fluktuationenmuster. Diese treten mit kleinskaligen Fluktuationen in Wechselwirkung, können aber trotzdem über einen längeren Zeitraum ihre charakteristische Form beibehalten. Eine kohärente Struktur kann demnach als eine Struktur in einer turbulenten Strömung angesehen werden, die lange Zeit besteht und immer wiederkehrt.

Im folgenden Unterkapitel soll die Strömung in den Becken nach eben diesen Strukturen untersucht werden. Mit Hilfe der turbulenten Druckgradienten und des Q-Kriteriums können Wirbel in der Strömung gefunden werden, die das Strömungsfeld für im Becken schwimmende Fische maßgeblich prägen, da sie sich darin durch Schwimmbewegungen stabilisieren müssen.

Analyse der turbulenten Druckschwankungen

Wie bereits in diesem Kapitel beschrieben, können momentane Geschwindigkeits- oder Druckfelder mathematisch in einen Mittelwert und einen Schwankungswert zerlegt werden. Für den Druck in der Strömung lautet die Gleichung demnach:

$$\tilde{p}' = \tilde{p} - \langle \tilde{p} \rangle. \quad (5.3.26)$$

Wertet man die Werte des turbulenten Drucks aus, so sieht man, dass \tilde{p}' im Innern eines Wirbels negativ ist. Druckminima des turbulenten Druckes zeigen Kerne von großskaligen Wirbeln an. Die Isoflächen zu unterschiedlichen Werten für \tilde{p}' sind in Abbildung 5.34 dargestellt.

Es sind drei horizontale parallel zur y-Achse liegende Wirbelrollen zu erkennen. Diese Wirbel bilden sich in der Scherschicht des Schützstrahls und rollen entlang der Scherschicht zwischen Wandstrahl und Rezirkulationszone. Mit zunehmender Lauflänge nimmt der Druck im Innern der Wirbelrolle zu. Das kommt daher, dass sich der Durchmesser des Wirbels vergrößert und die Amplitude abnimmt.

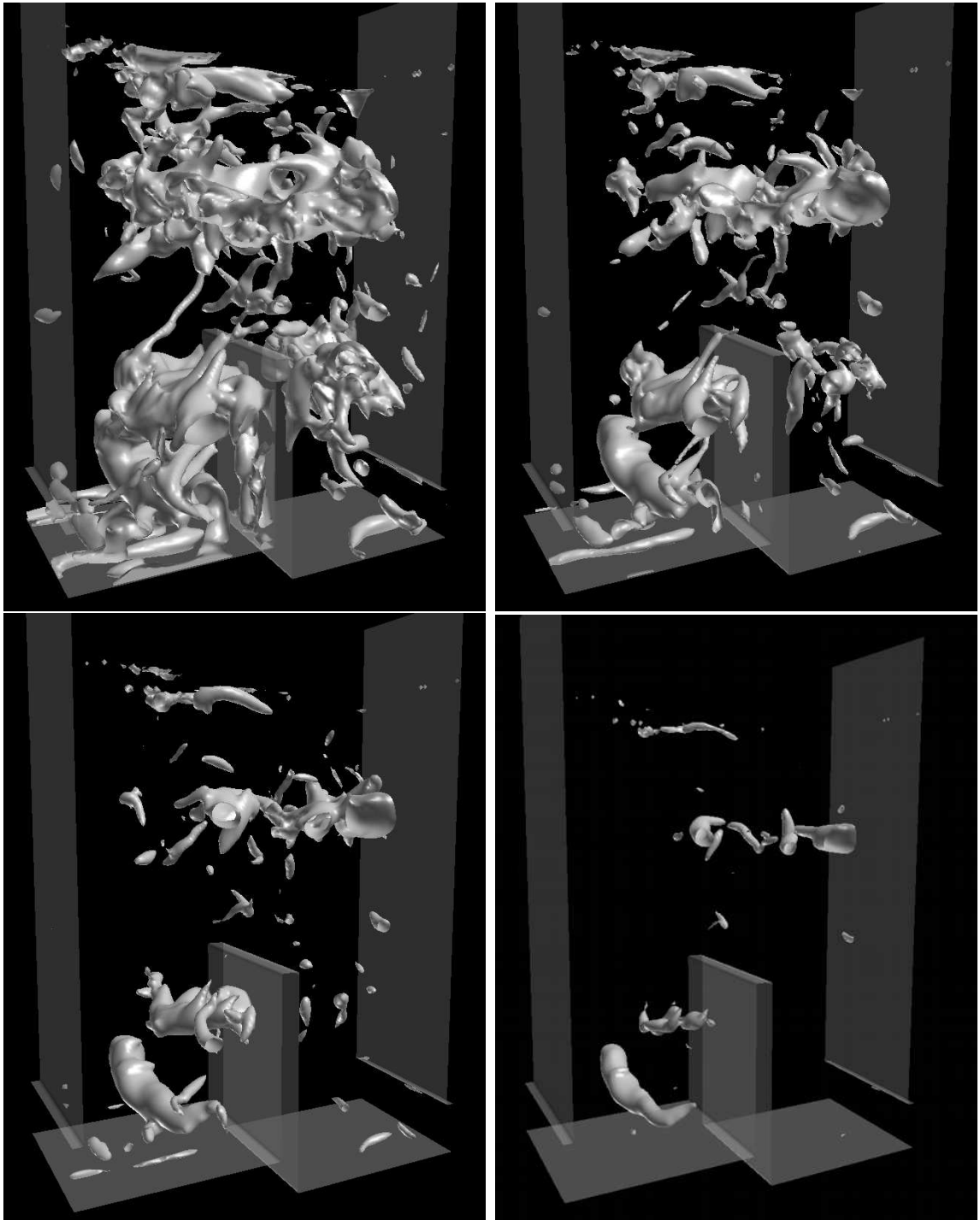


Abbildung 5.34: Turbulente Druckschwankungen \tilde{p}' in der Strömung.

Links oben: Isofläche für $\tilde{p}' = -250$ Pa,

Rechts oben: Isofläche für $\tilde{p}' = -375$ Pa,

Links unten: Isofläche für $\tilde{p}' = -500$ Pa,

Rechts unten: Isofläche für $\tilde{p}' = -750$ Pa.

Die Auswertung des turbulenten Drucks ist bei Freispiegelströmungen in Bezug auf kohärente Wirbelstrukturen schwierig. Es sind selten Wirbelrollen in der vorgestellten Klarheit nachzuweisen. Dies liegt im Allgemeinen an den Wasserspiegelschwankungen und den daraus folgenden Schwankungen des Druckfeldes in der gesamten Strömung. Diese welleninduzierten Druckschwankungen mit der Wellenlänge k werden mit zunehmender Tiefe gedämpft, wobei der Betrag der Druckschwankungen exponentiell mit der Wassertiefe z abnimmt $p' \sim e^{-kz}$ [37]. Bei der Auswertung der turbulenten Druckschwankungen wurde das mittlere Druckfeld ohne Berücksichtigung der welleninduzierten Druckschwankungen nach Gleichung 5.3.26 abgezogen. Aufgrund der nicht berücksichtigten welleninduzierten Druckschwankungen kommt es in Oberflächennähe zu numerischen Fehlern. Ursprünglich in der Strömung befindliche kohärente Wirbelstrukturen können in der Strömung nicht mehr nachgewiesen werden.

Die nachgewiesenen in y -Richtung liegenden Wirbelrollen sollten Fische im Becken nur in geringem Masse beeinflussen. Zum einen ist die Scherzone in der Nähe der Prallwand nicht im Hauptaufenthaltsgebiet der Fische, die sich vor Überwinden der Schützwand an deren Rückseite in den Rezirkulationsgebieten aufhalten. Zum anderen verläuft die Drehachse der Wirbel quer zur Schwimmrichtung der Fische. Die Hauptrichtung der Geschwindigkeiten an der Wirbeloberfläche verläuft parallel zur x -Achse und somit parallel zur Schwimmrichtung der Fische. Für die Lagestabilisierung gegen den Einfluss der großskaligen Wirbel können die Schwanzflossen benutzt werden.

Analyse des Q-Kriteriums

Neben den turbulenten Druckschwankungen soll im Folgenden eine weitere Größe zum Nachweis von kohärenten Strukturen untersucht werden, das so genannte Q-Kriterium. Dubrief et al. [19] und Hunt et al. [32] diskutieren in ihren Beiträgen Möglichkeiten, Wirbelstrukturen in Simulationsergebnissen nachzuweisen. Sie vergleichen Isoflächen des Druckes, der Wirbelstärke und des Q-Kriteriums. Das Q-Kriterium errechnet sich nach:

$$Q = \frac{1}{2}(\tilde{\Omega}_{ij}\tilde{\Omega}_{ij} - \tilde{S}_{ij}\tilde{S}_{ij}) = \frac{1}{2\rho}\nabla^2 p \quad (5.3.27)$$

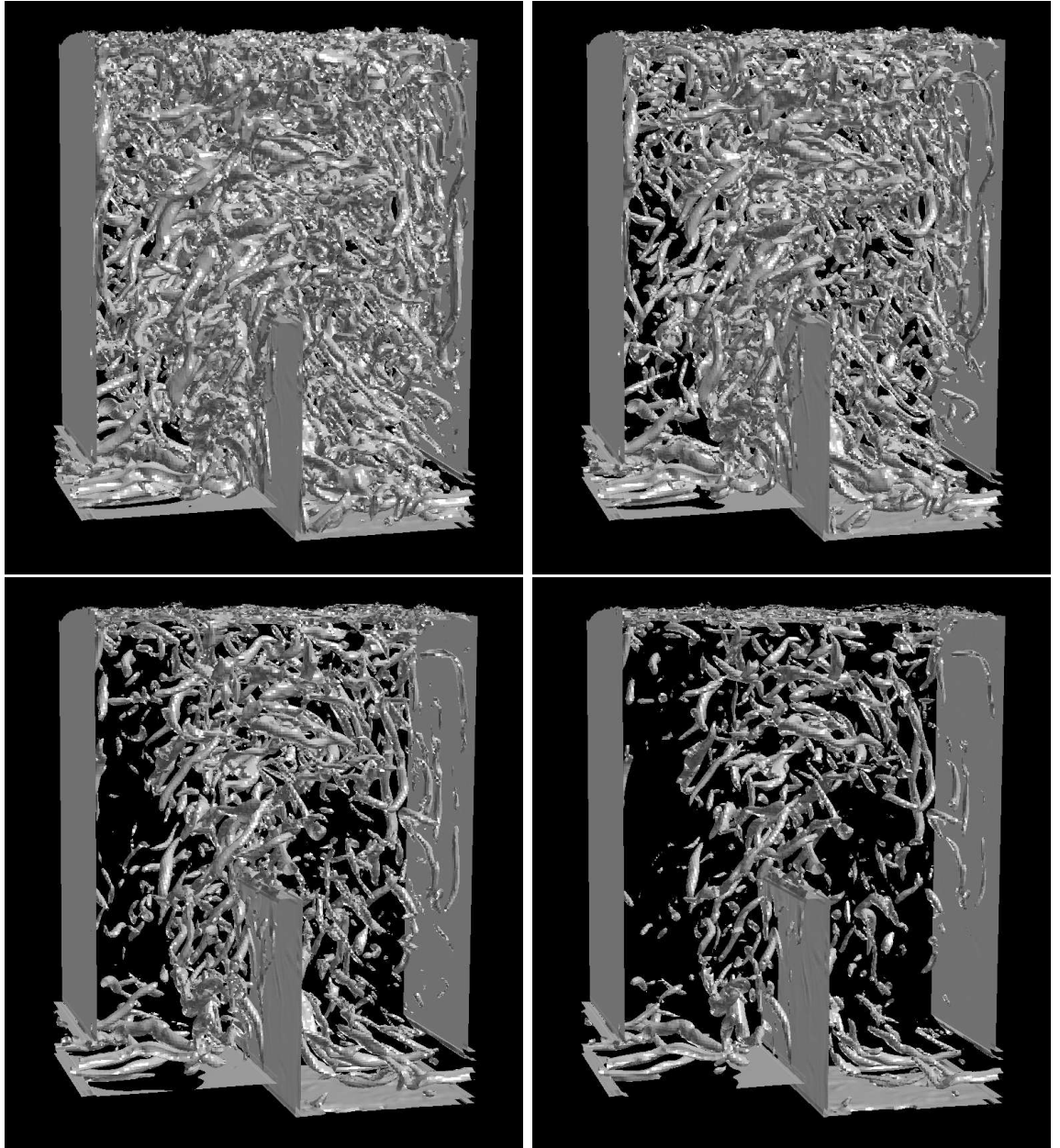


Abbildung 5.35: Q -Kriterium \tilde{Q} in der Strömung.

Links oben: Isofläche für $\tilde{Q} = 25 \text{ s}^{-2}$,

Rechts oben: Isofläche für $\tilde{Q} = 50 \text{ s}^{-2}$,

Links unten: Isofläche für $\tilde{Q} = 100 \text{ s}^{-2}$,

Rechts unten: Isofläche für $\tilde{Q} = 150 \text{ s}^{-2}$.

In der Gleichung werden mit $\tilde{\Omega}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \tilde{U}_i}{\partial x_j} - \frac{\partial \tilde{U}_j}{\partial x_i} \right)$ und $\tilde{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \tilde{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{U}_j}{\partial x_i} \right)$ der asymmetrische bzw. der symmetrische Anteil des Gradiententensors der räumlich gefilterten Geschwindigkeiten mit der Divergenz des Druckgradienten in Beziehung gesetzt. Die linke Seite der Gleichung untersucht, ob der Betrag der Rotation oder der Scherung im Strömungsfeld überwiegt. Die Gleichung kann im Rahmen der Eigenwertanalyse des Geschwindigkeitsgradiententensors hergeleitet werden. In Abbildung 5.35 sind mehrere Isoflächen zur Auswertung des Q-Kriteriums in der Strömung dargestellt. Es können mit dem Q-Kriterium kleinskalige Wirbelfäden parallel zur Hauptstromrichtung nachgewiesen werden. Für die Auswertung des Q-Kriteriums ist die freie Oberfläche im Gegensatz zur Auswertung der turbulenten Druckschwankungen nicht von Einfluss, da die lineare hydrostatische Druckverteilung bei der Berechnung von $\nabla^2 p$ nicht berücksichtigt wird. Die durch die Neigung der Oberfläche in x- und y-Richtung entstehenden Druckgradienten sind zu klein, um große Auswirkungen zu haben. Die nachgewiesenen Wirbel weisen erneut darauf hin, dass die Strömung durch das verwendete Netz gut aufgelöst ist, und die LES die meisten Wirbelstrukturen direkt berechnet hat.

Die gefundenen Wirbelfäden dürften für kleinere Fische durchaus ein Problem darstellen. Da die Achse der Wirbel parallel zur Achse der Fische verläuft, müssen sich Fische bei Durchschwimmen gegen Drehung um ihre Hauptachse mit den Seitenflossen stabilisieren. Da diese Flossen jedoch meist sehr klein sind, erfordern die Wirbel einen kontinuierlich hohen Stabilisierungsaufwand. Die Mehrzahl der Wirbel befindet sich in den Wandstrahlen und in den Bereichen hoher Energiedissipation, wo sich Fische selten aufhalten. Es ist gut zu erkennen, dass in den Rezirkulationszonen wenig Aktivität von Wirbeln vorhanden ist. Dies ermöglicht Fischen die Regeneration vor der Passage ins nächste Becken.

Für die Quantifizierung des Zusammenhangs zwischen den kleinskaligen Wirbeln und dem Stabilisierungsaufwand für Fische sind weitergehende Versuche und Vergleiche unterschiedlicher Konfigurationen notwendig.

5.4 Bewertung der Simulationen

Numerische Simulationen können heute als Werkzeug für die Bemessung von Bauwerken und für die detaillierte Untersuchung von Strömungsbedingungen genutzt werden. Nach einer Vorstellung der Werkzeuge wurden anhand von RANS-Simulationen durch die Berechnung der mittleren Geschwindigkeitsfelder strömungsphysikalische Zusammenhänge abgeleitet. Es konnten die Abhängigkeiten der maximalen Geschwindigkeiten und der Durchflüsse von einzelnen geometrischen Parametern des vorgestellten Fischpasses untersucht und erklärt werden.

Für detailliertere Untersuchungen der momentanen strömungsphysikalischen Bedingungen und turbulenten Strukturen im Becken kann eine aufwändigere numerische Methode, die Large Eddy Simulation (LES), benutzt werden. Neben der Diskussion mehrerer strömungsphysikalischer Größen wurde die Güte der Simulation untersucht und nachgewiesen. Analysen von turbulenten kohärenten Strukturen wie z. B. den turbulenten Druckschwankungen oder des Q-Kriteriums ermöglichen es, Verhaltensweisen von Fischen und Anforderungen an Fische beim Passieren des Strömungsfeldes im Vorfeld des Baus zu diskutieren.

Ein Vergleich von RANS und LES zeigte die Anwendungsmöglichkeit der RANS für die schnelle Berechnung von gemittelten Strömungsgrößen wie mittlere maximale Absolutgeschwindigkeit und Durchfluss. Es wurde jedoch auch gezeigt, dass die RANS in Bezug auf die Verteilung der Strömungsgrößen Defizite aufweist, und hierfür detailliertere Berechnungsmethoden wie die LES notwendig sind.

Sowohl die Geschwindigkeitsfelder als auch die Energiedissipation im Becken stellen dreidimensionale strömungsphysikalische Phänomene dar, die es zu erörtern gilt. Die eindimensionalen Berechnungsvorschriften für die Dimensionierung einer Fischaufstiegsanlage, bei der die maximalen Geschwindigkeiten und die mittlere Energiedissipation nachgewiesen werden, stellen ein häufig nicht hinreichendes Kriterium für eine Garantie der Funktionsfähigkeit dar. Durch die Anschaulichkeit der Ergebnisse ermöglichen dreidimensionale Simulationen eine breite Diskussion der biologischen und physikalischen Zusammenhänge in Fischaufstiegsanlagen. Diese Diskussion schafft interdisziplinäres Verständnis und Wissen, was dem Zweck, dem Bau von qualitativ hochwertigen Anlagen, dienen kann.

Kapitel 6

Aspekte für die Anwendung

Der Lebensraum Fluss ist durch seine Einzigartigkeit in Dynamik und Vielfalt der Lebewesen gekennzeichnet. Wenn man sich bei der Betrachtung der Lebewesen auf diejenigen Organismen beschränkt, die im Wasser leben, reicht der Artenreichtum von Kleinstlebewesen über Larven, Krebsen bis zu hinauf zu den Fischen. Da die humane Wassernutzung den Lebensraum Fluss drastisch verändert, sollen mit Fischaufstiegs- und Fischabstiegsanlagen nicht nur Fische auf ihrem Weg durch den Fluss unterstützt werden. Vielmehr dienen derartige Anlagen dazu, allen im Fluss lebenden Organismen eine Möglichkeit geben, die Querbauwerke zu überwinden.

Im diesem Abschnitt wird das vorgestellte Prinzip auf die Bedürfnisse und Anforderungen der einzelnen Organismen überprüft. Mit Hilfe einer geometrischen Erweiterung ist es möglich, auch kleinsten Lebewesen eine Hilfe für den Auf- oder Abstieg anzubieten. Abschließend werden die Erkenntnisse aus den Laborexperimenten und den zahlreichen Simulationen zusammengeführt. Anhand einer Dimensionierungshilfe sollen Ingenieure in die Lage versetzt werden, die Strömungsverhältnisse in der Anlage bereits in der Planungsphase mit hoher Genauigkeit vorherzusagen und an die biologischen Anforderungen der einzelnen Lebewesen anzupassen. Die unbeabsichtigte Selektivität kann auf diese Art und Weise in einem hohem Maße reduziert werden. Aufgrund der Vielfalt der Spezies und deren physischen Möglichkeiten ist es nicht möglich, auch wenn dieses aus biologischer Sicht das wünschenswerte Ziel darstellt, allen Organismen einen optimalen auf ihre Bedürfnisse zugeschnittenen Fischpass zu konstruieren. Man sollte jedoch versuchen, diesem Optimum so nah wie möglich zu kommen.

6.1 Geometrievariation für den Aufstieg von Makrozoobenthos

In vielen Diskussionen mit Biologen wurde bemängelt, dass bei der Konstruktion der Aufstiegsanlage zu wenig auf die einzelnen Lebensräume der im Fluss lebenden Organismen eingegangen wurde, und diese deshalb sehr selektiv sei.

Fische und kleinere Organismen leben in völlig unterschiedlichen Bereichen im Lebensraum Fluss. Im Hinblick auf die Klärung der Selektivität der Anlage soll der Lebensraum Fluss in drei unterschiedliche Bereiche unterteilt und diese analysiert werden.

Für in Oberflächennähe lebende Fische stellt die Anlage ein geringeres Hindernis dar. Diese Art von Fischen lebt sowohl in seitlichen Bereichen mit geringer Fließtiefe als auch in der Mitte des Flusses. Ihr natürliches Verhalten beinhaltet sowohl das zuschwimmen auf die Oberfläche als auch das Fressen am Boden. Wie bereits in den Laborversuchen mit Fischen gezeigt wurde, orientieren sich die Fische beim Unterschwimmen des Schützes an der Leitströmung und passieren die Leitwand ohne größere Probleme. Oberstrom der Schütztafel schwimmen sie entlang der Prallwand in Richtung der Oberfläche.

Die zweite Gruppe von Fischen ist die Gruppe der in der Mitte der Wassersäule schwimmenden Fische. Auch diese Fische überwinden wie gezeigt den Fischpass. Der Einfluss der Oberfläche auf das Überwinden der Prallwand muss jedoch noch weiter untersucht werden. Fische meiden wenn möglich [5] die Nähe der freien Oberfläche aufgrund des dort vorherrschenden höheren Fraßdrucks durch Vögel. Um diese Art von Fischen deshalb beim Aufstieg zu unterstützen, sollte die Fliesstiefe in den Becken nicht zu gering gehalten werden. Mit Steigerung dieser Fließtiefe vergleichmäßigen sich die Strömungsverhältnisse, was die Überwindbarkeit zusätzlich positiv beeinflussen dürfte.

Der letzte zu untersuchende Bereich stellt zugleich den problematischsten dar. Eine Vielzahl von Fischen und Kleinstlebewesen lebt in Bodennähe. Vor allem diese Kleinstlebewesen, zu denen wirbellose Organismen wie Larven, Schnecken oder Krebse, die so genannten Makrozoobenthos, gehören, haben eine enorme Bedeutung für die Fauna im Lebensraum Fluss. Kleine Fische und die Makrozoobenthos nutzen

die Grenzschicht des Sohlenmaterials für ihre Wanderungen. Diese Lebewesen können wie von vielen Biologen gemutmaßt nicht die Prallwand in der Mitte der einzelnen Becken hochschwimmen. Die Anlage würde deren Wanderungen verhindern und wäre somit stark selektiv.

Um den Anforderungen dieser Arten gerecht zu werden, wurde die Grundkonstruktion um eine Aufstiegshilfe speziell für diese Arten erweitert. Wie in Abbildung 6.1 und 6.2 zu sehen ist, wurde der ursprünglichen Geometrie ein Rampenbereich der Breite 30 cm hinzugefügt, der für einen Niveaueausgleich zwischen den beiden Beckenhälften sorgt.

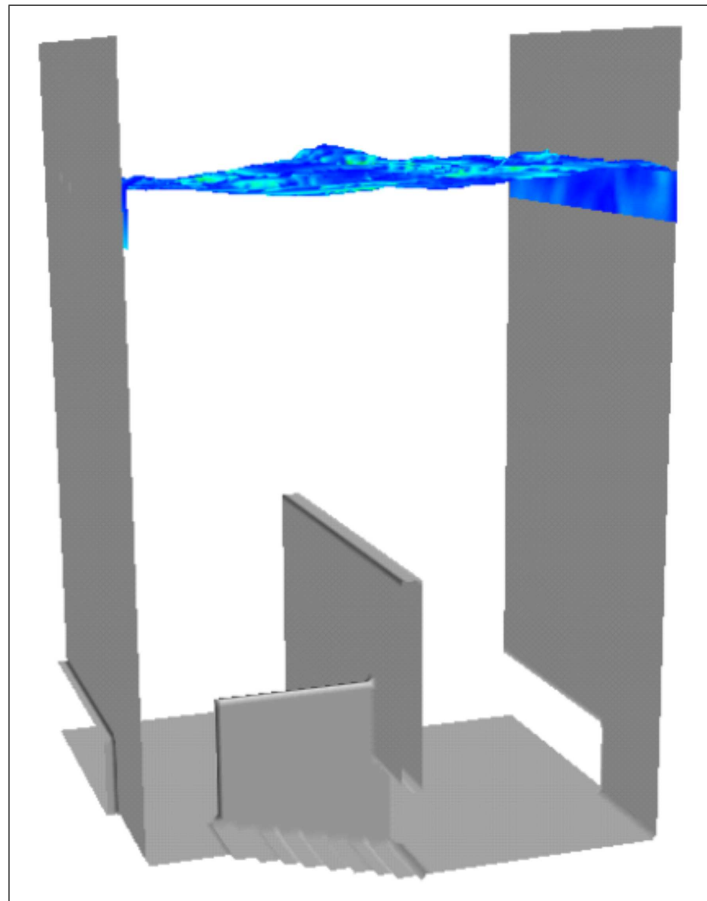


Abbildung 6.1: *Geometrie des Fischpasses mit einer Erweiterung. Der Rampenbereich, von der Hauptströmung getrennt durch eine Leitwand, ermöglicht den Aufstieg von kleinen Fischen und dem Makrozoobenthos*

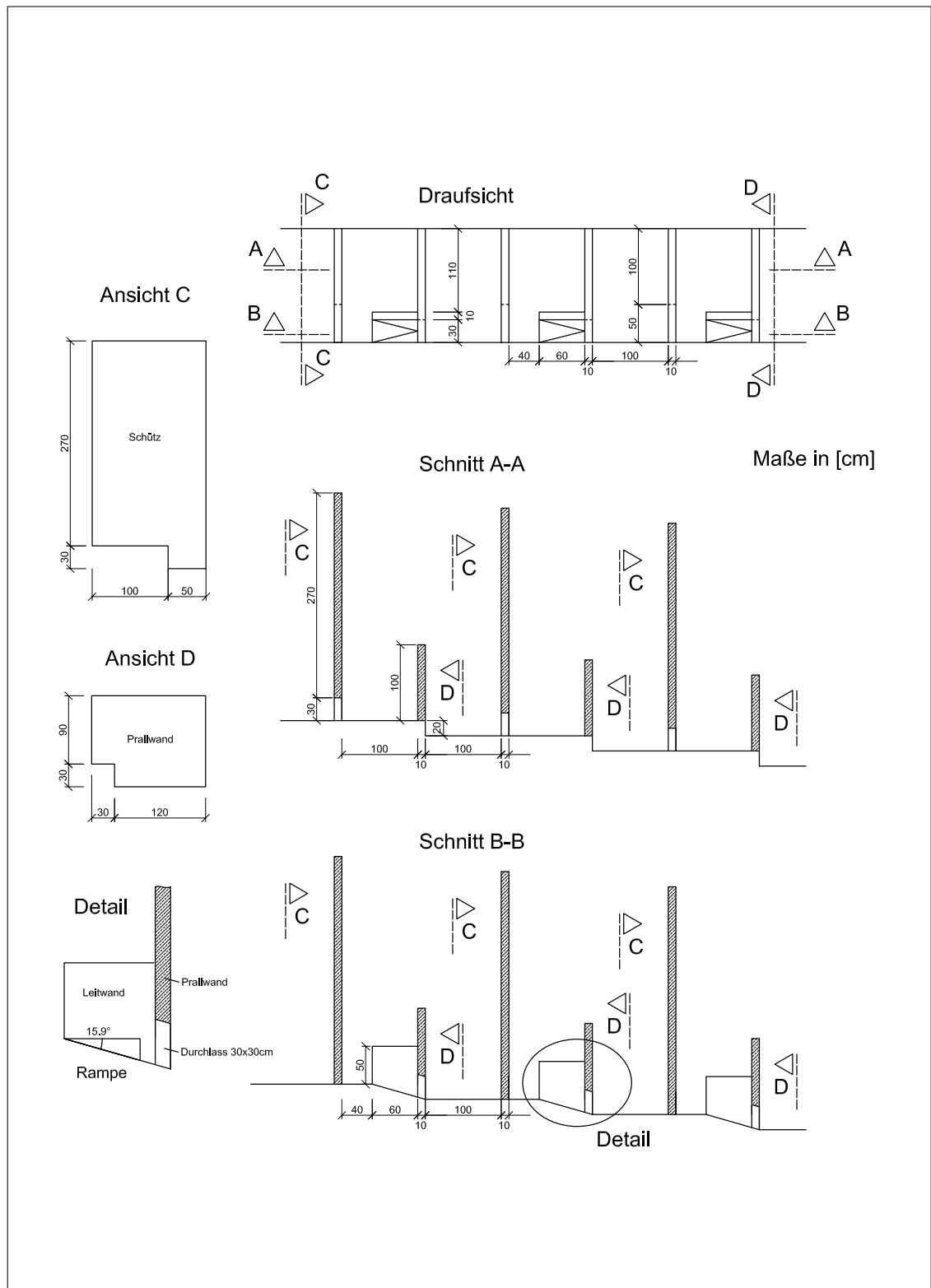


Abbildung 6.2: Schnitte und Dimensionen der Geometrierweiterung

Der Bereich der Rampe ist von der Hauptströmung durch eine Leitwand der Höhe 50 cm getrennt. Die Länge der Leitwand beträgt 60 cm. Es verbleiben zwischen dem Ende der Leitwand und der Schützwand 40 cm. Dieser Abstand genügt, um kleineren Lebewesen die Passage zwischen dem Rampenbereich und dem Bereich der Hauptströmung zu ermöglichen. In der Prallwand ist eine Öffnung mit den Abmessungen 30 x 30 cm zu erkennen. Diese Öffnungsgröße wird in den einschlägigen Vorschriften ([5],[20]) als ausreichend für die Konstruktion von Bodenöffnungen in Beckenpässen erachtet.

In der Hauptströmung bildet sich die in den vorherigen Kapiteln ausführlich beschriebene Labyrinthströmung. Die hohen Geschwindigkeiten (Abb. 6.3 und Abb. 6.4) treten in gewohnter Weise auf. Die Geschwindigkeiten im Rampenbereich des Beckens hingegen sind sehr niedrig und liegen im Bereich von 20 cm/s. Dies liegt nicht zuletzt daran, dass die Neigung des Wasserspiegels sehr gering ist und deswegen wenig Potentialdifferenz vorliegt, die einen die Strömung antreibenden Druckgradienten zur Folge hätte.

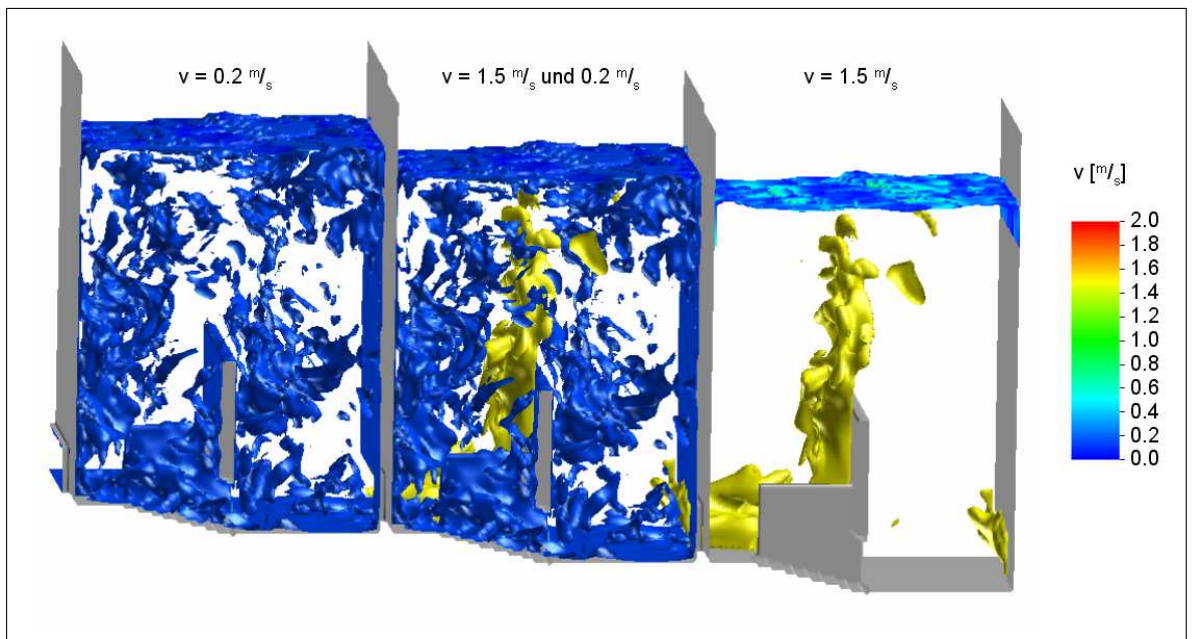


Abbildung 6.3: Isoflächen der resultierenden Geschwindigkeit

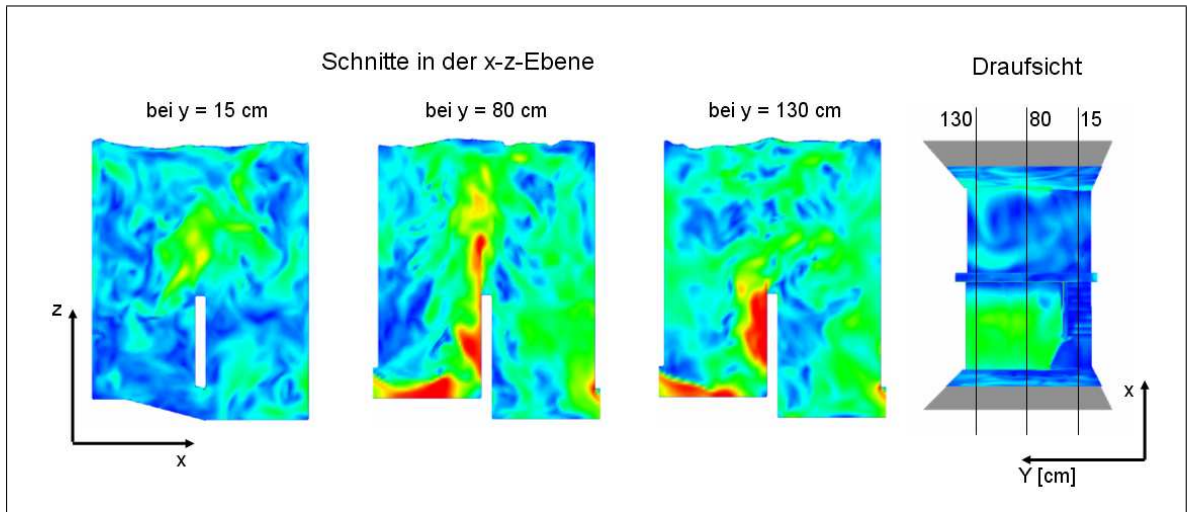


Abbildung 6.4: *Momentane Geschwindigkeitsfelder an unterschiedlichen Schnitten*

In Abbildung 6.5 sind die Wandschubspannungen auf den Boden dargestellt. Mit Hilfe dieser Wandschubspannungen ist es möglich, das Becken für am Boden lebende Organismen in unterschiedliche Strömungsbereiche zu unterteilen, und deren physischen Aufwand bei den Wanderungen zu diskutieren.

Kleine Fische werden auf ihrem Weg durch die Anlage auf das Hindernis *Prallwand* stoßen (Abb. 6.5, Bereich 2). Da sie diese nicht überwinden können, werden sie diese auf der Suche nach einer Passage absuchen und die Öffnung in der Prallwand finden (Abb. 6.5, Bereich 3). Da sich auf der Rückseite der Prallwand eine Rezirkulationsströmung mit niedrigen Geschwindigkeiten ausbildet, werden die Fische keine großen Anstrengungen für diese Suche aufwenden müssen. Vielmehr befindet sich in der Ecke zwischen dem Boden und der Prallwand ein Bereich sehr geringer Strömungsgeschwindigkeit, der von der Richtungsänderung der Rezirkulationsströmung herrührt. In Abbildung 6.4 (rechts, Draufsicht) ist auf der Unterstromseite der Prallwand ein Wirbel zu erkennen, der entgegen dem Uhrzeigersinn dreht. Dieser Wirbel bildet sich aufgrund der Geometrierweiterung und unterstützt das Auffinden des Rampenbereiches zusätzlich.

Haben die Lebewesen den Rampenbereich passiert, so müssen sie zur Überwindung der Anlage wieder in den Bereich der Hauptströmung wandern (Abb. 6.5, Bereich 1). Da wie in den einzelnen Simulationen bereits gezeigt wurde die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten aufgrund der Strahlkontraktion in einem Abstand von etwa

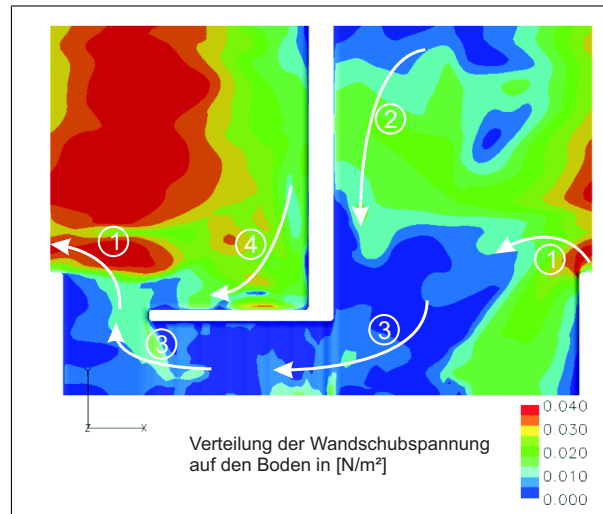


Abbildung 6.5: *Verteilung der Wandschubspannung auf den Boden des Beckens und Einteilung des Beckens in unterschiedliche Aufenthaltszonen für kleine Fische und die Makrozoobenthos. 1 Unterschwimmen des Schützes, 2 Orientation entlang der Prallwand, 3 Auffinden und Passieren des Rampenbereiches, 4 Bereich der Umlenkung des Schützstrahls an der Prallwand*

30 - 50 cm nach der Schützwand auftreten, herrschen direkt unter der Schützwand Geschwindigkeiten, die in etwa der Hälfte der maximal auftretenden Geschwindigkeit entsprechen. Kleine Fische werden sich vom Rampenbereich entlang der Rückseite der Schützwand bewegen und dort direkt unter der Schützwand die Öffnung passieren. Sie werden deshalb aufgrund ihres Weges durch die Anlage von den Bereichen hoher Geschwindigkeiten und Wandschubspannungen ferngehalten, was die Passage positiv beeinflusst. Raue Sohlenmaterialien verringern die Strömungsgeschwindigkeiten und Wandschubspannungen am Boden zusätzlich.

In Abb. 6.5 kann im Bereich 4 der Bereich der Umlenkung des Schützstrahls an der Prallwand deutlich erkannt werden. Da das Becken im Bereich 4 etwas breiter als die Öffnung der Schützwand im Bereich 1 ist, kommt es in der Nähe der Leitwand zu einem Bereich geringerer Wandschubspannung. Dies führt dazu, dass die Lebewesen, die in diesen Bereich an der Prallwand geraten, eine Möglichkeit zum Verlassen des Bereiches entlang der Leitwand auffinden und sie nicht durch die Strömung gefangen werden.

Ein weiterer positiver Aspekt der geometrischen Erweiterung ist die Verringerung

des Fraßdruckes auf kleinere Organismen durch andere Fische. Wie Almeida [3] gezeigt hat, gibt es einzelne Raubfische, die die Fischaufstiegsanlagen als Lebensraum nutzen. Die geringe Breite des Rampenbereiches erschwert die Richtungsänderungen für größere Fische. Da dadurch das Jagdverhalten erschwert wird, verringert sich der Fraßdruck und vergrößern sich die Aufstiegschancen.

Zusammenfassend kann bemerkt werden, dass durch die Erweiterung der Grundgeometrie durch einen Rampenbereich die Selektivität des Fischpasses stark reduziert werden könnte. Es wurden bei der Entwicklung des Fischpasses sowohl die technischen Erfordernisse des Ingenieurwesens, wie z. B. die Gefällemaximierung, als auch die physischen Leistungsparameter von kleinen Fischen und Kleinstlebewesen berücksichtigt und für beide Gebiete, die Biologie und das Ingenieurwesen angepasste Verhältnisse geschaffen.

6.2 Dimensionierungsvorschrift für die Anlage

In diesem Abschnitt soll analog den Dimensionierungsregeln der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) [20] Ingenieuren eine Bemessungshilfe an die Hand gegeben werden, um die zu planenden Anlagen optimal an das Anforderungsprofil anzupassen. Zu diesem Zweck wurden die Ergebnisse der RANS-Simulationsreihe aus Abschnitt 5.2 zusammengestellt.

Ausgangspunkt für die Dimensionierung einer Fischaufstiegsanlage mit periodischen Schützen ist die Bestimmung des Oberwasserstandes z_{OW} und des Unterwasserstandes z_{UW} . Aus diesen Randbedingung kann der gesamte Höhenunterschied h_{ges} bestimmt werden, der mit der Fischaufstiegsanlage zu überwinden ist.

$$h_{ges} = z_{OW} - z_{UW} \quad (6.2.1)$$

Zwischen diesen beiden Randbedingungen werden in einem Kanal eine Anzahl von n baugleichen Becken eingebaut (Abb. 6.6), so dass es zwischen allen Becken zum selben Fließtiefenunterschied Δh kommt.

$$n = \frac{h_{ges}}{\Delta h} \quad (6.2.2)$$

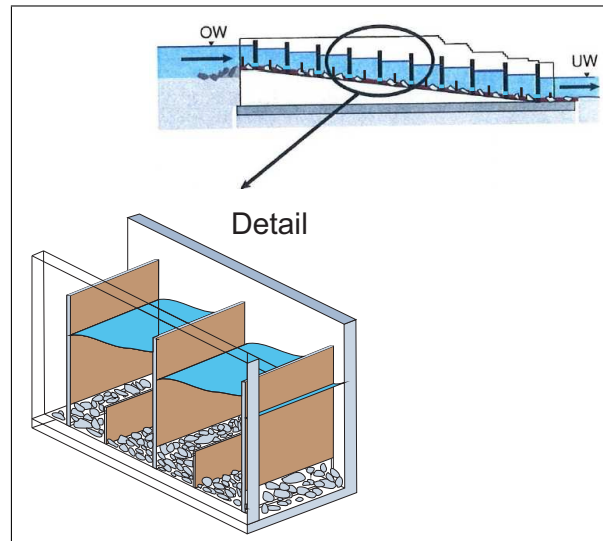


Abbildung 6.6: Überwindung des Höhenunterschiedes zwischen Ober- und Unterwasser in einem Kanal mit baugleichen Becken.

Die Sohle sollte kann dabei kontinuierlich mit einem konstanten Gefälle oder horizontal mit Sohlstufen ausgeführt werden.

Der Höhenunterschied Δh zwischen den einzelnen Becken steht mit der maximalen Geschwindigkeit in den Becken in Beziehung. Unter der Annahme einer vernachlässigbar kleinen mittleren Geschwindigkeit in den Becken und der vollständigen Energiedissipation der sich entwickelnden Schussstrahlen wird der Potentialunterschied Δh zwischen den Becken vollständig in die fiktive kinetische Energie der Schussstrahlen $v_{ref}^2/2g$ umgewandelt und diese anschließend in den Becken dissipiert. In einem weitergehenden Schritt wird diese theoretische Geschwindigkeit v_{ref} später mit der tatsächlich auftretenden maximalen Geschwindigkeit v_{max} verglichen. Die Geschwindigkeit v_{ref} in den Schussstrahlen errechnet sich zu:

$$\Delta h = \frac{v_{ref}^2}{2g} \quad (6.2.3)$$

Für die Bemessung des Durchflusses Q und für den Nachweis der maximalen Geschwindigkeit v_{max} in den Becken wurde eine Referenzgeometrie entwickelt, wie sie in Abbildung 6.7 abgebildet ist.

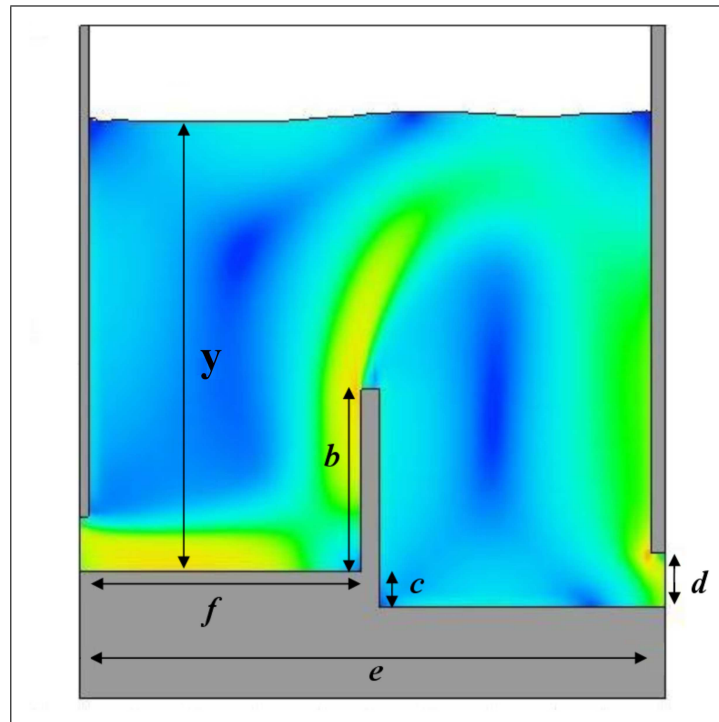


Abbildung 6.7: Geometrie des Referenzbeckens

Fließtiefe y im Becken	250 cm
Höhe b der Prallwand	100 cm
Stufenhöhe c / Wasserspiegelunterschied Δh zwischen den Becken	20 cm
Höhe des Durchlasses d	30 cm
Länge des Beckens e	210 cm
Position f der Prallwand	100 cm

Tabelle 6.1: Geometrische Abmessungen des Referenzbeckens

Die geometrischen Abmessungen des Referenzbeckens sind in Tabelle 6.1 angegeben. Für die Bemessung wurde von einem festen Wert für den Schützenshub $d = 0.30$ cm ausgegangen, da dieser Wert in den allgemeinen Vorschriften [20] als Mindestmaß für Durchlässe gilt.

Ein entscheidender Faktor für die hydraulische Funktion der Fischeufstiegsanlage ist die Bestimmung der maximalen Geschwindigkeit v_{max} in den Schussstrahlen. Die Ergebnisse der RANS-Simulationen ergaben, dass der Unterschied zwischen v_{max} und v_{ref} unter Einhaltung der folgenden Bedingungen kleiner als 5% beträgt:

Höhe b/d der Prallwand	>	0,67
Position f/d der Prallwand	>	2,3
Länge des Beckens e/d	<	12

Die erste Bedingung definiert eine Mindesthöhe der Prallwände zwischen den Schützen, die für eine hydraulische Entkopplung der einzelnen Schütze sorgen. Die beiden anderen Bedingungen sind der Vollständigkeit angegeben, haben jedoch in der Praxis eine untergeordnete Bedeutung. Da die Prallwände im Allgemeinen in der Mitte des Beckens positioniert werden, ist die zweite Bedingung bereits erfüllt. Des Weiteren werden die Becken im Zuge einer Sohlenneigungsmaximierung möglichst kurz gehalten, so dass die dritte Bedingung im Allgemeinen ebenfalls erfüllt ist.

Unter Einhaltung der obigen Bedingungen erhält man:

$$\Delta h = \frac{v_{ref}^2}{2g} \approx \frac{v_{max}^2}{2g} \quad (6.2.4)$$

Da die meisten Fischaufstiegsanlagen auf eine maximale Geschwindigkeit von 2 m/s ausgelegt werden [20], ergibt sich ein maximales Δh von 0,20 m. Im vorherigen Abschnitt 6.1 wurde jedoch gezeigt, dass die Fische in den Becken mit dem neuartigen Anlagendesign von den Zonen der maximalen Geschwindigkeit ferngehalten werden können. Es können deshalb Strömungsverhältnisse mit größeren Maximalgeschwindigkeiten von $v_{max} = 2,44 \text{ m/s}$ oder $2,65 \text{ m/s}$ ohne weiteres realisiert werden, was Wasserspiegelunterschieden c von 0,30 m oder 0,35 m entspricht.

Der Durchfluss in den Becken berechnet sich zu:

$$Q = k \cdot d \cdot b \cdot \sqrt{2g\Delta h} \quad (6.2.5)$$

wobei d der Schützenhub und b die Breite des Schlitzes sind. Der Abminderungsfaktor k berücksichtigt hierbei sowohl die Einflüsse der unterschiedlichen geometrischen Parameter auf die Kontraktion des Schützstrahls als auch die Abweichung zwischen v_{ref} und v_{max} . Die Berechnung von k erfolgt demnach über das Produkt der Einzeleinflüsse k_x nach:

$$k = \prod k_x = k_y \cdot k_b \cdot k_c \cdot k_e \cdot k_f \quad (6.2.6)$$

Die einzelnen Werte k_x wurden dabei aus den in der RANS-Parameterstudie gefundenen funktionalen Zusammenhängen zwischen der Größe x/d und dem sich ergebenden Durchfluss q_x und einer Normierung mit dem Durchfluss q_{norm} mit dem geometrischen Parametern nach Tabelle 6.1 erhalten:

$$k_x = q_x/q_{norm} \quad (6.2.7)$$

In den Laborexperimenten konnte gezeigt werden, dass die Strömungszustände in den Becken unabhängig von der Reynoldszahl sind. Ferner wird angenommen, dass die einzelnen Einflussparameter voneinander unabhängig sind. Die jeweiligen Werte sind den Abbildungen 6.8 bis 6.12 zu entnehmen.

Für die bauliche Ausführung sollte darauf geachtet werden, dass die Sohle naturnah gestaltet wird. Dies führt dazu, dass aufgrund der kleineren Sohlschubspannung die Benthosorganismen leichter die Fischaufstiegsanlage überwinden können. Ebenso sollte darauf geachtet werden, dass die Kanten der Schütztafeln und der Prallwand so abgerundet werden, dass die Gefahr einer Verletzung der Fische minimiert wird.

Abschließend soll die Gefahr einer Verschmutzung der Anlage durch Treibgut oder Geschiebe beurteilt werden. Das Treibgut wurde in Laborversuchen durch das erste Schütz zurückgehalten. In der Praxis sollte dafür gesorgt werden, dass größeres Treibgut nicht in die Anlage fällt. Dieses muss händisch entfernt werden.

In Laborversuchen konnte ferner nachgewiesen werden, dass aufgrund der ersten Prallwand das Geschiebe zurückgehalten wird, und kein Geschiebe von oberwasser in die Fischaufstiegsanlage gelangt. In der Mitte der Anlage zugegebener Sand und kleinere Steine wurden in den Laborversuchen durch die Anlage transportiert. Auf der Unterwasserseite der Anlage setzen sich diese Partikel schließlich aufgrund der Geschwindigkeitsreduzierung beim Einmischen in den Fluss ab. Für eine Reinigung der Anlage ist es dennoch ratsam, die Prallwände nicht fest zu installieren, sondern in Revisionsschlitz in den Seitenwänden zu befestigen. Durch Ziehen einzelner Prallwände kann die einsetzende Strömung zur Reinigung der Anlage benutzt werden.

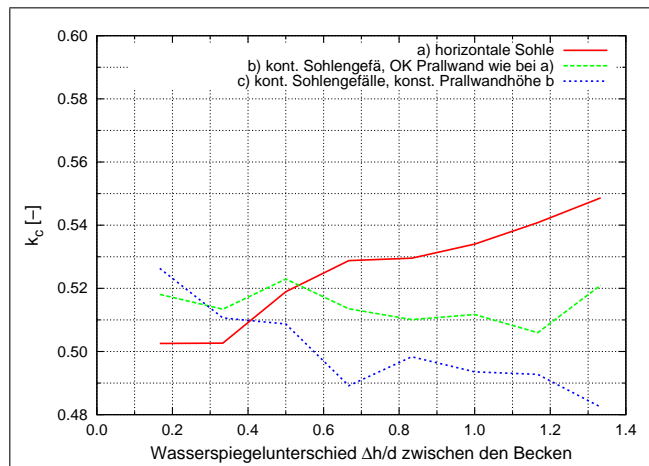


Abbildung 6.8: Einflussparameter des Wasserspiegelunterschiedes Δh zwischen den Becken bzw. der Sohlstufe c im Becken k_c

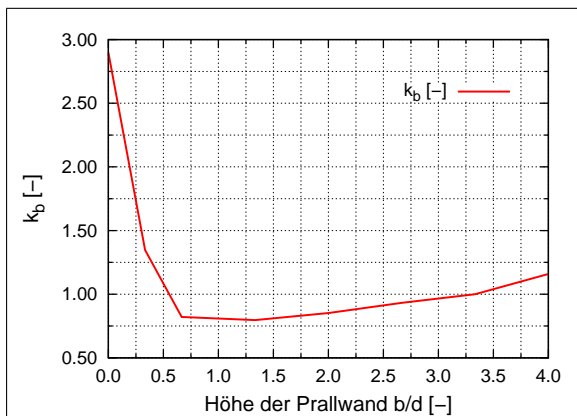


Abbildung 6.9: Einflussparameter k_b der Höhe der Prallwand

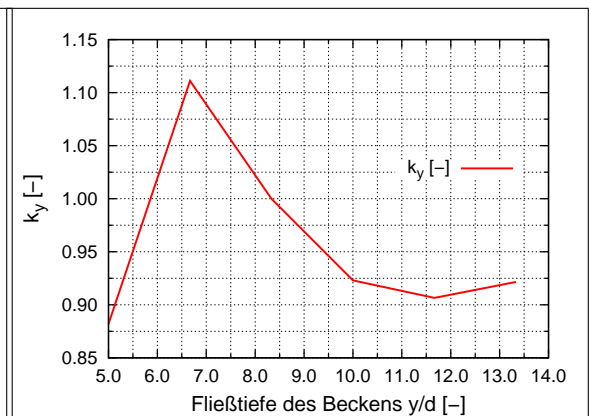


Abbildung 6.10: Einflussparameter k_y der Fließtiefe im Becken

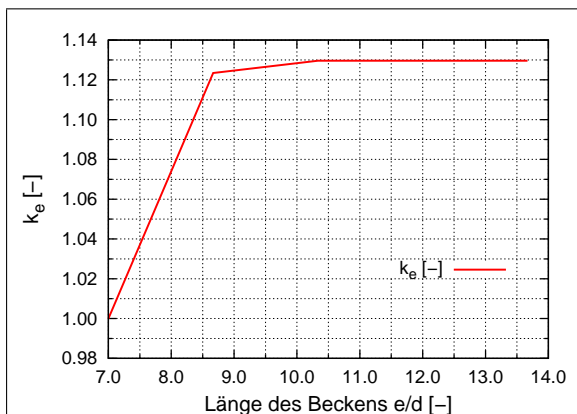


Abbildung 6.11: Einflussparameter k_e der Länge der Becken

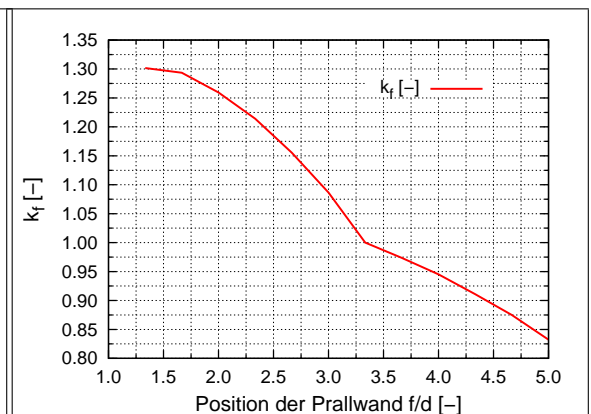


Abbildung 6.12: Einflussparameter k_f der Position der Prallwand

Kapitel 7

Zusammenfassung der Arbeit

Nachdem in den vorhergehenden Abschnitten eine Vielzahl von Ergebnissen und Experimenten präsentiert wurden soll die Arbeit abschließend anhand der in Kapitel 2.2 gestellten Fragestellungen zusammengefasst werden.

In der vorliegenden Arbeit wurde ein neuer Typ einer Fischaufstiegsanlage vorgestellt. Durch die Kombination von mehreren rückgestauten Schützen mit zwischenliegenden Prallwänden konnte ein Anlagendesign entwickelt werden, der eine vollständige Energieumwandlung ohne Lufteintrag und somit ohne Entstehung von Schall zulässt. Die Vermeidung der Schallentstehung über- und unterwasser ist dabei die grundlegende Idee der Arbeit. Der Reduzierung bzw. Vermeidung von Luftschall kommt im Rahmen von gesetzlichen Vorschriften (z. B. [2]) eine zentrale Rolle zu. Die Wechselwirkung des Wasserschalls mit dem Verhalten von Fischen ist dagegen weitgehend unerforscht. Es ist zwar bekannt, dass sich Fische anhand von Schall im Strömungsfeld orientieren, zur Angabe von quantitativen Aussagen besteht jedoch Forschungsbedarf.

Das neue Prinzip wurde in Modellversuchen im Maßstab 1 : 5 sowohl hydraulisch untersucht als auch das Verhalten von eingesetzten kleinen Fischen im Tierversuch analysiert. In den Versuchen mit Fischen hat sich herausgestellt, dass kleine Fische das Strömungsfeld im Testgeinne sehr gut kontrollieren können. Sie konnten sich frei in der Anlage bewegen und passierten die Anlage in beide Stromrichtungen. Anhand von numerischen Simulationen und Laborexperimenten konnte die Abhängigkeit der Strömung in den einzelnen Becken in Abhängigkeit von unterschiedlichen geometrischen

Parametern wie der Beckengeometrie oder der Fließtiefe in den Becken untersucht werden. Auf Grundlage dieser Experimente konnte abschließend eine Dimensionierungsvorschrift entwickelt werden, die eine Prognose der Strömungszustände anhand der Geometrieparameter ermöglicht.

Um dem Durchgang des Fischpasses für kleinere Fische und Kleinstlebewesen Rechnung zu tragen, kann im Nebenschluss der Hauptströmung ein Rampenbereich hinzugefügt werden. Die dort vorliegenden niedrigen Geschwindigkeiten bieten diesen Lebewesen eine Möglichkeit, die Bereiche hoher Geschwindigkeiten zu meiden und dennoch die Anlage zu überwinden.

In den bisherigen numerischen Simulationen von Fischaufstiegsanlagen wurde meist das mittlere Strömungsfeld (RANS) der Anlagen betrachtet (z. B. [28]). Um die Strömung numerisch genauer zu untersuchen, wurden diesen Ergebnissen das Ergebnis einer Large Eddy Simulation gegenübergestellt. Es konnten Erkenntnisse über kohärente Strukturen in der Strömung sowie die geometrische Verteilung der Energie-dissipation gewonnen und diskutiert werden. Durch die getrennte Untersuchung des mittleren Geschwindigkeitsfeldes und des Feldes der Geschwindigkeitsschwankungen konnte gezeigt werden, dass neben den mittleren Geschwindigkeiten weitere Kriterien für die Dimensionierung einer Fischaufstiegsanlage von Bedeutung sind. Simulationsergebnisse aus der LES können die Analyse und die Planung derartiger Anlagen bereichern. Es können bereits im Vorfeld des Baus einer Fischaufstiegsanlage die Strömungsfelder mit hydraulischen Laien diskutiert werden. Die Erarbeitung von Kompromisslösungen für die im Kapitel 2.2 angesprochenen Zielkonflikte zwischen Ingenieuren und z. B. Biologen wird deutlich vereinfacht.

Mit den Normen zur Auslegung einer Fischtreppe ([5], [20]), die auf einer breiten Basis von hydraulischen Versuchen begründet sind, kann heute eine Vielzahl von Standardbauformen hydraulisch geplant und gebaut werden. Bei Abweichungen von diesen Bauformen wie z. B. bei Richtungsänderungen oder bei unbekanntem Bauformen wie der in dieser Arbeit vorgestellten Bauform können die aktuellen numerischen Methoden eine kostengünstige Alternative zu Laborexperimenten darstellen.

Literaturverzeichnis

- [1] *Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik*
- [2] *Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm, Erlassen aufgrund von § 48 BImSchG vom 1. November 1998*
- [3] ALMEIDA, Deusimar Augusto A: *Avaliação da eficiência do sistema para transposição de peixes da usina hidroelétrica Luís Eduardo Magalhães - TO*, Universidade Federal do Tocantins, Diplomarbeit, 2006
- [4] ALVES, C.B.M.; POMPEU, P.S.: Historical changes in the Rio das Velhas fish fauna - Brazil. In: RINNE, J.N. (Hrsg.); HUGHES, R.M. (Hrsg.); B.CALAMUSSO (Hrsg.); American Fisheries Society (Veranst.): *Historical changes in large river fish assemblages of the Americas. Symposium 45*. Bethesda, Maryland, 2005, S. 587–602
- [5] ATV-DVWK: *Fischschutz- und Fischabstiegsanlagen - Bemessung, Gestaltung, Funktionskontrolle*. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef, 2004
- [6] BITTENCOURT, M. M; COX-FERNANDES, C.: Peixes migradores sustentam pesca comercial. In: *Ciência Hoje* 11 (1990), Nr. 64, S. 20–24
- [7] BIZERRIL, C. R. S. F; PRIMO, P. B. S: *Peixes de águas interiores do Estado do Rio de Janeiro*. Rio de Janeiro : GTZ/SEMADS, 2001

-
- [8] BIZZOTTO, Paula M: *Trânsito de peixes na escada da UHE-Igarapava, Rio Grande, Alto Paraná*, PUC Minas, Belo Horizonte, Brasilien, Diss., 2007
- [9] BOES, Robert; ÖTZBRUGGER, Gottfried: Bemessung eines getreppten Gabionenwehres zur Verringerung von Luftschallemissionen bei Überströmung. In: *WASSERWIRTSCHAFT* 94 (2004), Nr. 6, S. 9–14
- [10] BOLLRICH, G.: Hydraulisches Versuchswesen. In: BOLLRICH, G. (Hrsg.): *Technische Hydromechanik 2*. Verlag für Bauwesen, 1989
- [11] BOLLRICH, Gerhard: *Technische Hydromechanik*. Bd. 5. Berlin : Verl. Bauwesen, 2000
- [12] BONE, Q.; MARSHALL, N.B.; NIEHAUS-OSTERLOH, M. (Hrsg.): *Biologie der Fische*. Stuttgart, New York : Gustav Fischer Verlag, 1985
- [13] BOSCH, Karl: *Basiswissen Statistik*. Oldenbourg, 2007
- [14] BRETT, J. R: The respiratory metabolism and swimming performance of young sockeye salmon. In: *J. Fish. Res. Bd Can* 21 (1964), S. 1183–226
- [15] BRETT, J. R: Swimming performance of sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*) in relation to fatigue time and temperature. In: *J. Fish. Res. Bd Can* 24 (1967), S. 1731–41
- [16] CHANSON, Hubert: *Air Bubble Entrainment in Free-Surface Turbulent Shear Flows*. San Diego : Academic Press, 1996
- [17] DEANE, G.B.; STOKES, M.D.: Scale dependence of bubble creation mechanisms in breaking waves. In: *Nature* 418 (2002), S. 839–844
- [18] DENTON, E.J; GRAY, J.A.B.: The analysis of sound by teh sprat ear. In: *Nature* 282 (1979), S. 406–407
- [19] DUBRIEF, Yves; DELCAYRE, Frank: On Coherent-vortex identification in turbulence. In: *Journal of Turbulence* 1 (2000), S. 1–22
- [20] DVWK: *Fischaufstiegsanlagen: Bemessung, Gestaltung, Funktionskontrolle*. Bonn : Wirtschafts- und Verl. Ges. Gas und Wasser, 1996

- [21] EVANS, David H: *The Physiology of Fishes*. CRC Press, 1993
- [22] EVANS, David H; CLAIBORNE, James B: *The Physiology of Fishes*. CRC Press, 2005, ed. 3
- [23] FLOW SCIENCE INC.: *Flow-3D[®], User´s Manual*. Santa Fe, 2004
- [24] FRANKE, Paul-Gerhard: *Hydraulik für Bauingenieure*. Berlin : Walter de Gruyter & Co., 1974
- [25] GODINHO, A.L.: E os peixes de Minas em 2010? In: *Ciência Hoje* 16 (1993), Nr. 91, S. 44–49
- [26] GOULDING, M.: *Ecologia da pesca do rio Madeira*. Manaus : CNPq/INPA, 1979
- [27] HAFNER, Edzard: Naturnahe Gestaltung von Fischaufstiegsanlagen. In: *Wasserwirtschaft* 85 (1995), Nr. 12, S. 616–618
- [28] HEIMERL; HAGMEIER; ECHELER: Numerische Strömungssimulation von beckenartigen Fischaufstiegsanlagen - Werkzeug bei der Beurteilung der Durchgängigkeit. In: HEIGERTH, Günther v. (Hrsg.): *Wasserbausymposium Graz 2006*. Verlag d. Technischen Universität Graz, 2006
- [29] HEINEMANN, E.: *Hydraulik für Bauingenieure*. Teubner, 2003
- [30] HIRT, C. W: Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries. In: *Journal of Computational Physics* 39 (1981), S. 201–225
- [31] HIRT, C. W; SICILIAN, J. M: A Porosity Technique for the Definition of Obstacles in Rectangular Cell Meshes. In: *Fourth International Conference on Ship Hydrodynamics, Washington, DC, September* (1985)
- [32] HUNT, J.C.R.; WRAY, A.A.; MOIN, P.: Eddies, streams, and convergence zones in turbulent flows. In: *CTR-S88* (1988), S. 193–208
- [33] HUTTER, Kolumban: *Fluid- und Thermodynamik. Eine Einführung*. Berlin : Springer, 2002
- [34] JENS, G.: *Der Bau von Fischwegen*. Parey, 1982

- [35] KAPOOR, B.G.: *Ichthyology Handbook*. Springer-Verlag, 2004
- [36] KRAATZ, W.: Flüssigkeitsstrahlen. In: BOLLRICH, G. (Hrsg.): *Technische Hydromechanik 2*. Verlag für Bauwesen, 1989
- [37] KUNDU, Pijush K; COHEN, Ira M: *Fluid Mechanics*. San Diego : Elsevier Academic Press, 2004
- [38] LARINIER, M.: Passes a bassins successifs, prebarrages et rivieres artificielles. In: *Bull. Fr. Preche Piscic.* 326/327 (1992), S. 45–72
- [39] LARINIER, M.; TRAVADE, F.; PORCHER, J.P.: *Fishways: biological basis, design criteria and monitoring*. Bull.Fr.Pêche Piscic., 364
- [40] LOWE-MCCONNELL, R. L: *Fish communities in tropical freshwaters*. London and New York : Longman, 1975
- [41] MARMULLA, G. (Hrsg.): *Dams, fish and fisheries. Opportunities, challenges and conflict resolution*. FAO Fisheries Technical Paper (FAO), no. 419 / FAO, Rome (Italy). Fisheries Dept., 2001
- [42] MOTZET, Katrin: *Abflussabschätzung am unvollkommenen Überfall*. München, TU München, Mitteilungen des Fachgebiets Hydromechanik, 2004. – Nr. 72
- [43] POPE, Stephan: *Turbulent Flows*. 1. Cambridge : Cambridge University Press, 2000
- [44] REIS, R.E.; KULLANDER, S.O.; FERRARIS JR., C.J.: *Check list f the freshwater fishes of South and Central America*. Porto Alegre : EDIPUCRS, 2003
- [45] SANTOS, Hersilia de Antrate e: *A Influência da Capacidade Natatória de Peixes Neotropicais no Projeto Hidráulico de Mecanismos de Transposição*, Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte, Brasil, Diss., 2007
- [46] SANTOS POMPEU, Paulo dos; MARTINEZ, Carlos B: Efficiency and selectivity of a trap and truck fish passage system in Brazil. In: *Neotropical Ichthyology* 5 (2007), Nr. 2, S. 169–176

-
- [47] SPURK, Joseph H: *Dimensionsanalyse in der Strömungslehre*. Berlin : Springer, 1999
- [48] VALENTIN, F.: *Einfluss des Unterwasserstandes auf die Strömungsverhältnisse beim Ausfluß unter einer Schütze*. Institut für Hydraulik und Gewässerkunde, Mitteilungen, Heft 1, TH München, 1968
- [49] VEIT, Ivar: *Flüssigkeitsschall*. 1. Würzburg : Vogel, 1979
- [50] VIANA, Edna Maria de F: *Mapeamento do Campo de Velocidades em Mecanismos de Transposição de Peixes do Tipo ranhura vertical em diferentes Escalas*. Belo Horizonte, Brazil, Universidade Federal de Minas Gerais, Dissertação, 2005
- [51] WERNER, Heinrich: *Grobstruktursimulation der turbulenten Strömung über eine querliegende Rippe in einem Plattenkanal bei hoher Reynoldszahl*, TU München, Diss., 1991
- [52] WILCZAK, J. M: Large-scale eddies in the unstably stratified atmospheric surface layer. Part I: Velocity and temperature structure. In: *J. Atmos. Sci.* 41 (1984), S. 3537–3550
- [53] YAKHOT, V.; ORSZAG, S.A.; THANGAM, S.; GATSKI, T.B.; SPEZIALE, C.G.: Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique. In: *Physics of Fluids A* 4 (1992), Nr. 7, S. 1510–1520

Anhang

Anhang A - Konvergenzanalyse der Messungen zur Bestimmung des Abbruchzeitpunktes

Für die Datenaufnahme und -auswertung wurde ein halbautomatisches Messsystem mit der Programmiersprache *LabVIEW* entwickelt. Nach dem Start der Messungen musste der Abbruchzeitpunkt so gewählt werden, dass von statistisch unabhängigen und reproduzierbaren Messergebnissen ausgegangen werden konnte. Dieser Abbruchzeitpunkt wurde numerisch durch Konvergenzanalyse der Messwerte ermittelt.

Für eine Zeitreihe von Messwerten $y_i(n)$ kann der Mittelwert $\bar{y}_{i,n}$ (Gl. A.1) und die Varianz $\sigma_{i,n}^2$ (Gl. A.2) berechnet werden.

$$\bar{y}_{i,n} = \frac{1}{n} \sum_{i=0} y_i(n) \quad (\text{A.1})$$

$$\sigma_{i,n}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=0} (y_i(n) - \bar{y}_{i,n})^2 \quad (\text{A.2})$$

Wenn man die Zeitreihe mit n Messwerten um einen Messwert erweitert, kann man für die entstehende Messreihe mit $n+1$ Werten die Werte $\bar{y}_{i,n+1}$ und $\sigma_{i,n+1}^2$ berechnen. Berechnet man aus den gewonnenen Daten die relativen Differenzen $\varepsilon_{\bar{y}_{i,n}}$ und $\varepsilon_{\sigma_n^2}$, so sieht man, dass diese mit steigendem n nach Gl. A.4 und Gl. A.6 gegen null streben.

$$\varepsilon_{\bar{y}_{i,n}} = \frac{\bar{y}_{i,n+1} - \bar{y}_{i,n}}{\bar{y}_{i,n}} \quad (\text{A.3})$$

$$\varepsilon_{\bar{y}_{i,n \rightarrow \infty}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{\bar{y}_{i,n+1} - \bar{y}_{i,n}}{\bar{y}_{i,n}} \right) = 0 \quad (\text{A.4})$$

$$\varepsilon_{\sigma_{i,n}^2} = \frac{\sigma_{i,n+1}^2 - \sigma_{i,n}^2}{\sigma_{i,n}^2} \quad (\text{A.5})$$

$$\varepsilon_{\sigma_{i,n \rightarrow \infty}^2} = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{\sigma_{i,n+1}^2 - \sigma_{i,n}^2}{\sigma_{i,n}^2} \right) = 0 \quad (\text{A.6})$$

Für die analysierten Messreihen der Fließtiefenmessungen hat sich ergeben, dass die Differenzreihe der Mittelwerte $\varepsilon_{\bar{y}_{i,n}}$ sehr viel schneller gegen null konvergiert als die Differenzreihe der Varianzen $\varepsilon_{\sigma_{i,n}^2}$. Um von einem statistisch unabhängigen und reproduzierbaren Ergebnis ausgehen zu können, wurde das Abbruchkriterium ε_{Grenz} auf $\varepsilon_{\sigma_{i,n}^2}$ bezogen. Da nicht auszuschließen war, dass der Messwert $y_{i,n+1}$ sehr nah am Mittelwert liegt und deshalb $\varepsilon_{\sigma_{i,n}^2}$ null ist, wurde für den Abbruch der Messungen weiterhin zur Bedingung gesetzt, dass kein in den letzten 10 Sekunden der Messungen errechnetes $\varepsilon_{\sigma_{i,n}^2}$ größer $\varepsilon_{Grenz} = 5 \cdot 10^{-4}$ ist. Durch Anwendung der beschriebenen Abbruchkriterien ergaben sich Messintervalle von 20 Sekunden an Orten kleiner Fließtiefenschwankungen bis hin zu mehr als 120 Sekunden an Orten starker Fließtiefenschwankungen.

Anhang B - Abschätzung des Verlustes einer Strah- lenkung mit Hilfe der Rohrhydraulik

Eine Richtungsänderung kann in der Rohrhydraulik über Kniestücke, Krümmer oder Segmentkrümmer vorgenommen werden (Abb. B.1). Zur Abschätzung des Strömungsverlustes soll die Strömung in einem Krümmer mit $\delta = 90^\circ$ untersucht werden, da dieser am ehesten mit der im Bereich II des Beckens herrschenden Strömungsgeometrie übereinstimmt.

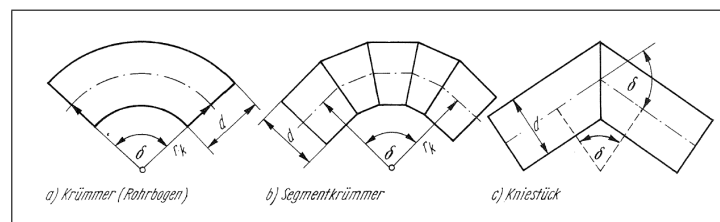


Abbildung B.1: Richtungsänderung bei Rohren, aus [11]

Die plötzliche Richtungsänderung in einem Kniestück würde an der Innenkante zu Ablösungen führen, die nicht zu beobachten sind. Durch die beiden Eckwirbel wird die Ecke durch die Strömung gleichsam ausgerundet. Die Dimensionen der Umlenkung sind in Abbildung B.2 dargestellt.

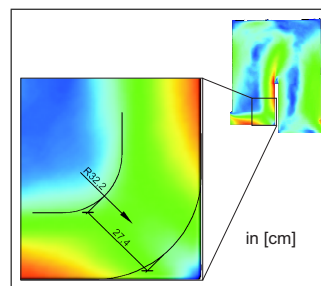


Abbildung B.2: Geometrie der Richtungsänderung in der Strömung

Nach Bollrich [11] kann der Krümmerverlust Δe_k mit Hilfe eines auf die Geschwindigkeitshöhe bezogenen Verlustbeiwertes ζ_k abgeschätzt werden

$$\Delta e = \zeta_k \cdot \frac{v^2}{2g}, \quad (\text{B.7})$$

wobei sich ζ_k nach Gleichung B.8 aus dem Umlenkverlust ζ_u und dem Reibungsverlust ζ_r infolge Wandreibung und innerer Reibung zusammen setzt.

$$\zeta_k = \zeta_u + \zeta_r \quad (\text{B.8})$$

Der Reibungsverlust wird über den Krümmerradius r_k , den Rohrdurchmesser d , den Umlenkwinkel δ° und dem Rohrreibungsbeiwert λ berechnet:

$$\zeta_r = 0,0175 \cdot \lambda \cdot \frac{r_k}{d} \cdot \delta^\circ \quad (\text{B.9})$$

Im vorliegenden Fall muss der Rohrdurchmesser über den hydraulischen Radius des Strahles, d. h. über das Verhältnis aus Querschnitts- und Mantelfläche bestimmt werden.

$$d_{hy} = 4 \cdot r_{hy} = 4 \cdot \frac{b \cdot a}{2a + 2b} = 4 \cdot \frac{100 \cdot 27,4}{200 + 54,8} = 43,0 \text{ cm} \quad (\text{B.10})$$

Bei einem gewählten Reibungsbeiwert von $\lambda = 0,02$ ergibt sich ein ζ_r -Beiwert von:

$$\zeta_r = 0,0175 \cdot \lambda \cdot \frac{r_k}{d} \cdot \delta^\circ = 0,0175 \cdot 0,02 \cdot \frac{32,2}{43,0} \cdot 90^\circ = 0,024 \quad (\text{B.11})$$

Der Reibungsverlust bezogen auf die Geschwindigkeitshöhe des Strahles beträgt etwa 2,4%. Da dieser Wert sehr klein ist und sich auch bei Variation der eingesetzten Parameter nicht maßgeblich ändert, kann der Reibungsverlust bei einer Richtungsänderung als nicht dominant für den Krümmerverlust angesehen werden.

Der Krümmerverlust setzt sich nach Gleichung B.8 aus dem Reibungsverlust und dem Umlenkverlust zusammen. Der Beiwert ζ_u des Umlenkverlustes wird dabei wie folgt berechnet:

$$\zeta_u = k_\delta \cdot k_A \cdot k_{Re} \cdot k_{Kr} \cdot k_\varepsilon \quad (\text{B.12})$$

Die Größe des Umlenk winkels δ wird mit k_δ berücksichtigt. Für eine 90° -Umlenkung nimmt k_δ den Wert 1 an.

Der Wert k_A berücksichtigt die Form des Querschnittes und kann mit Abbildung B.1 bestimmt werden. Für die gewählte Geometrie beträgt das Verhältnis $a/b = 100/27,4 = 3,65$. Es ergibt sich ein Wert für k_A von 0,87.

Der Einfluss der Reynoldszahl Re -Zahl auf den Umlenkverlust wird mit k_{Re} bestimmt. Im vorliegende Fall ist das Verhältnis von $r_k/d = 0,75$. Für die Berechnung

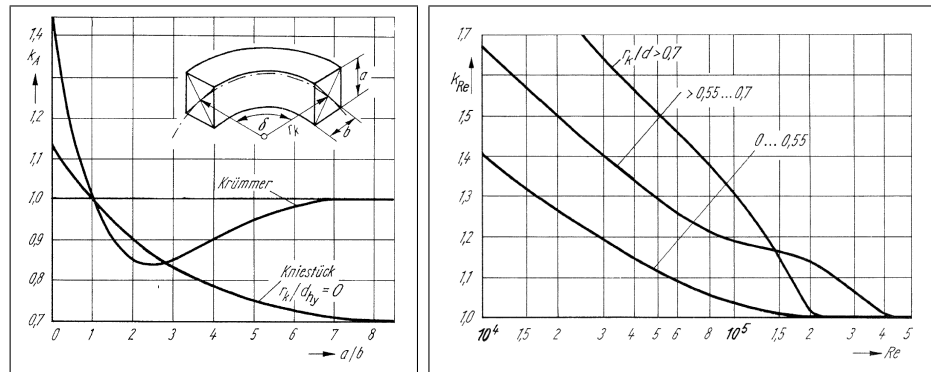


Abbildung B.3: Beiwerte zur Korrektur von ζ_u aus [11]:

Links: $k_A = f(a/b)$, Rechts: $k_{Re} = f(Re, r_k/d)$

von Re wird der Volumenstrom über die Fläche gemittelt. Es ergibt sich:

$$Re = \frac{v_m \cdot d_{hy}}{\nu} = \frac{0,99 \cdot 0,43}{1 \cdot 10^{-6}} \approx 420.000 \quad (B.13)$$

Bei einer Re -Zahl von 420.000 ergibt sich für den Faktor k_{Re} der Wert 1.

Der Faktor k_{Kr} beschreibt den Einfluss des Krümmungsverhältnisses r_k/d . Im Bereich zwischen $0,5 \leq r_k/d \leq 1$ lässt sich der Faktor k_{Kr} wie folgt berechnen:

$$k_{Kr} = \frac{0,21}{r_k/d^{2,5}} \quad (B.14)$$

Bei gegebener Geometrie beträgt k_{Kr} etwa 0,43.

Abschließend wird durch den Wert k_ε die relative Wandrauheit $\varepsilon = k/d$ berücksichtigt. Da im vorliegenden Fall keine Wände vorliegen, sondern die Eckwirbel die Strahlumlenkung auslösen, kann kein Wert für k angegeben werden. Der Wert k_ε wird deshalb 1,0. Es ergibt sich zusammenfassend für ζ_u ein Wert von:

$$\zeta_u = k_{delta} \cdot k_A \cdot k_{Re} \cdot k_{Kr} \cdot k_\varepsilon = 1 \cdot 1 \cdot 0,87 \cdot 1 \cdot 0,43 \cdot 1 = 0,375 \quad (B.15)$$

Zusammen mit dem Wert ζ_r ergeben sich Verlustbeiwerte in der Größenordnung von etwa 0,40, d. h. bei der gegebenen Strahlumlenkung werden bereits 40% der kinetischen Energie des Schützstrahls umgewandelt. Dieser Wert für den Energieverlust stellt jedoch nur eine grobe Abschätzung dar.

Anhang C - Ergebnisse der Labormessungen

Im Laborversuch wurden bei unterschiedlichen Durchflüssen und Wehrhöhen die Fließtiefen an 16 unterschiedlichen Orten gemessen (Abb. C.1). Der Unterwasserstand wurde durch ein Wehr mit veränderlicher Höhe w eingestellt.

Zur Messung der Fließtiefen wurde ein Ultraschallmesssystem der Firma *General Acoustics* verwendet. In den einzelnen Becken fanden dabei jeweils drei Messungen statt (Abbildung C.2), oberstrom der Anlage eine Messung und unterstrom der Anlage drei Messungen. Zwischen den Messpunkten 14, 15 und 16 waren jeweils 19,5 cm Abstand.

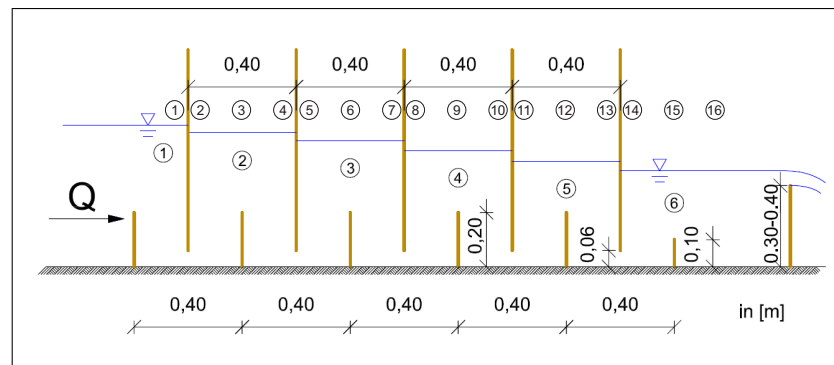


Abbildung C.1: *Prinzipische Skizze des Modellaufbaus*

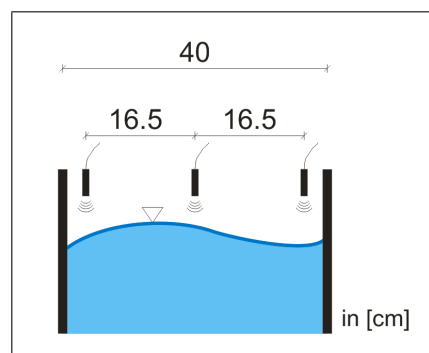


Abbildung C.2: *Ultraschallfließtiefenmessung in den Becken*

In den folgenden Tabellen sind die gemessenen Werte zusammengestellt.

Q [l/s]	w [cm]	y_1 [cm]	y_2 [cm]	y_3 [cm]	y_4 [cm]	y_5 [cm]	y_6 [cm]	y_7 [cm]	y_8 [cm]	y_9 [cm]	y_{10} [cm]	y_{11} [cm]	y_{12} [cm]	y_{13} [cm]	y_{14} [cm]	y_{15} [cm]	y_{16} [cm]
1,5	30	34,81	34,59	34,58	34,64	34,41	34,32	34,35	34,12	34,12	34,11	33,87	33,84	33,85	33,59	33,54	33,43
2,5	30	36,45	36,04	36,09	36,14	35,57	35,60	35,63	35,07	35,10	35,10	34,57	34,63	34,58	33,98	34,05	33,85
3,5	30	38,51	37,73	37,94	37,95	36,83	37,03	37,00	35,90	36,11	36,06	34,93	35,15	35,06	34,00	34,19	33,78
4,5	30	41,85	40,57	40,83	40,90	39,15	39,42	39,34	37,66	38,00	37,90	36,15	36,53	36,34	34,64	35,02	34,30
5,5	30	45,58	43,76	44,12	44,28	41,81	42,16	42,15	39,74	40,16	40,08	37,60	38,05	37,85	35,34	35,95	34,94
6,5	30	49,85	47,49	47,55	47,96	44,53	45,09	44,99	41,73	42,41	42,27	38,96	39,57	39,31	36,05	36,94	35,41
7,5	30	55,52	52,33	52,06	52,97	47,72	48,26	48,30	44,04	44,64	44,54	40,43	41,32	40,93	36,42	37,60	35,62
8,5	30	61,58	57,80	57,15	58,14	51,39	51,69	51,87	46,19	46,79	46,81	41,80	42,69	42,41	36,94	38,31	35,77
9,5	30	70,36	65,75	64,40	65,90	57,59	57,01	58,02	49,97	50,38	50,56	43,97	45,10	44,51	38,08	39,41	36,51
Q [l/s]	w [cm]	y_1 [cm]	y_2 [cm]	y_3 [cm]	y_4 [cm]	y_5 [cm]	y_6 [cm]	y_7 [cm]	y_8 [cm]	y_9 [cm]	y_{10} [cm]	y_{11} [cm]	y_{12} [cm]	y_{13} [cm]	y_{14} [cm]	y_{15} [cm]	y_{16} [cm]
1,5	35	39,40	39,21	39,26	39,29	39,01	39,06	39,10	38,86	38,88	38,84	38,65	38,63	38,64	38,40	38,41	38,36
2,5	35	40,99	40,62	40,67	40,77	40,27	40,30	40,35	39,85	39,89	39,92	39,44	39,48	39,49	38,96	39,01	38,86
3,5	35	43,22	42,45	42,53	42,65	41,66	41,75	41,79	40,83	40,93	40,95	39,93	40,05	40,03	39,06	39,21	38,90
4,5	35	46,17	44,93	45,08	45,24	43,64	43,82	43,88	42,31	42,51	42,52	40,98	41,21	41,17	39,61	39,84	39,37

Tabelle C.1: Gemessene Fließstiefen y_i bei unterschiedlichen Durchflüssen Q und Wehrhöhen w .

Q [l/s]	w [cm]	y_1 [cm]	y_2 [cm]	y_3 [cm]	y_4 [cm]	y_5 [cm]	y_6 [cm]	y_7 [cm]	y_8 [cm]	y_9 [cm]	y_{10} [cm]	y_{11} [cm]	y_{12} [cm]	y_{13} [cm]	y_{14} [cm]	y_{15} [cm]	y_{16} [cm]
5,5	35	50,63	48,86	48,79	49,15	46,43	46,61	46,70	44,41	44,61	44,67	42,45	42,76	42,75	40,40	40,76	40,01
6,5	35	54,85	52,45	52,37	52,96	49,02	49,39	49,35	46,27	46,72	46,74	43,64	43,99	43,98	41,01	41,60	40,46
7,5	35	61,67	58,54	58,84	58,96	53,37	53,41	53,84	48,90	49,39	49,48	45,37	45,91	45,78	41,65	42,39	40,99
8,5	35	69,94	66,15	65,14	66,31	59,26	58,82	59,97	52,63	52,70	53,04	47,09	47,88	47,79	42,46	43,27	41,60
9,5	35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Q [l/s]	w [cm]	y_1 [cm]	y_2 [cm]	y_3 [cm]	y_4 [cm]	y_5 [cm]	y_6 [cm]	y_7 [cm]	y_8 [cm]	y_9 [cm]	y_{10} [cm]	y_{11} [cm]	y_{12} [cm]	y_{13} [cm]	y_{14} [cm]	y_{15} [cm]	y_{16} [cm]
1,5	40	44,30	44,13	44,14	44,20	43,97	43,98	44,03	43,80	43,81	43,82	43,61	43,61	43,64	43,43	43,44	43,40
2,5	40	45,91	45,56	45,58	45,69	45,19	45,22	45,29	44,78	44,82	44,87	44,42	44,42	44,46	43,98	44,00	43,89
3,5	40	48,11	47,39	47,38	47,57	46,52	46,58	46,67	45,72	45,75	45,82	44,94	44,99	44,99	44,12	44,17	43,96
4,5	40	51,43	50,25	50,14	50,48	48,62	48,73	48,79	47,25	47,33	47,42	45,92	46,06	46,05	44,61	44,76	44,41
5,5	40	56,12	54,40	54,19	54,63	51,67	51,75	51,90	49,30	49,48	49,71	47,25	47,56	47,57	45,29	45,57	45,01
6,5	40	61,43	59,21	58,85	59,44	55,20	55,15	55,65	51,71	51,80	52,07	48,72	49,07	49,08	45,92	46,38	45,54
7,5	40	68,85	65,91	65,31	66,12	60,64	60,14	61,11	55,16	55,17	55,59	50,63	50,87	51,09	46,62	47,25	46,04
8,5	40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9,5	40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabelle C.2: Gemessene Fließstiefen y_i bei unterschiedlichen Durchflüssen Q und Wehrhöhen w .

Q [l/s]	w [cm]	σ_1 [cm]	σ_2 [cm]	σ_3 [cm]	σ_4 [cm]	σ_5 [cm]	σ_6 [cm]	σ_7 [cm]	σ_8 [cm]	σ_9 [cm]	σ_{10} [cm]	σ_{11} [cm]	y_{12} [cm]	σ_{13} [cm]	σ_{14} [cm]	σ_{15} [cm]	σ_{16} [cm]
1,5	30	0,001	0,001	0,003	0,002	0,001	0,004	0,002	0,001	0,003	0,002	0,001	0,004	0,001	0,001	0,004	0,001
2,5	30	0,001	0,002	0,008	0,004	0,003	0,008	0,005	0,003	0,009	0,004	0,003	0,009	0,006	0,002	0,007	0,003
3,5	30	0,002	0,005	0,018	0,009	0,010	0,026	0,010	0,009	0,030	0,012	0,010	0,029	0,011	0,006	0,018	0,007
4,5	30	0,004	0,010	0,032	0,016	0,017	0,055	0,022	0,018	0,063	0,027	0,021	0,067	0,029	0,012	0,036	0,012
5,5	30	0,005	0,016	0,055	0,032	0,027	0,101	0,043	0,032	0,101	0,045	0,036	0,128	0,056	0,026	0,073	0,021
6,5	30	0,006	0,176	0,046	0,220	0,044	0,116	0,067	0,053	0,148	0,080	0,057	0,182	0,087	0,041	0,096	0,038
7,5	30	0,006	0,067	0,038	0,068	0,109	0,181	0,109	0,090	0,238	0,120	0,089	0,245	0,144	0,083	0,226	0,074
8,5	30	0,008	0,028	0,034	0,051	0,156	0,199	0,169	0,173	0,275	0,170	0,146	0,347	0,221	0,117	0,232	0,087
9,5	30	0,009	0,038	0,030	0,058	0,094	0,118	0,133	0,327	0,286	0,293	0,197	0,461	0,327	0,143	0,397	0,137
Q [l/s]	w [cm]	σ_1 [cm]	σ_2 [cm]	σ_3 [cm]	σ_4 [cm]	σ_5 [cm]	σ_6 [cm]	σ_7 [cm]	σ_8 [cm]	σ_9 [cm]	σ_{10} [cm]	σ_{11} [cm]	y_{12} [cm]	σ_{13} [cm]	σ_{14} [cm]	σ_{15} [cm]	σ_{16} [cm]
1,5	35	0,000	0,001	0,002	0,001	0,001	0,003	0,001	0,001	0,002	0,002	0,000	0,002	0,001	0,000	0,003	0,001
2,5	35	0,001	0,001	0,005	0,002	0,002	0,008	0,002	0,002	0,006	0,003	0,002	0,007	0,002	0,002	0,005	0,002
3,5	35	0,002	0,005	0,012	0,007	0,006	0,018	0,007	0,006	0,019	0,007	0,007	0,021	0,008	0,005	0,011	0,006
4,5	35	0,003	0,010	0,019	0,013	0,012	0,029	0,016	0,011	0,031	0,015	0,011	0,041	0,017	0,009	0,026	0,008

Tabelle C.3: Gemessene Varianzen σ_i bei unterschiedlichen Durchflüssen Q und Wehrhöhen w .

Q [l/s]	w [cm]	σ_1 [cm]	σ_2 [cm]	σ_3 [cm]	σ_4 [cm]	σ_5 [cm]	σ_6 [cm]	σ_7 [cm]	σ_8 [cm]	σ_9 [cm]	σ_{10} [cm]	σ_{11} [cm]	y_{12} [cm]	σ_{13} [cm]	σ_{14} [cm]	σ_{15} [cm]	σ_{16} [cm]
5,5	35	0,004	0,027	0,015	0,027	0,027	0,069	0,033	0,024	0,057	0,031	0,023	0,092	0,092	0,015	0,066	0,014
6,5	35	0,006	0,138	0,030	0,107	0,051	0,100	0,058	0,046	0,105	0,054	0,056	0,109	0,062	0,028	0,092	0,021
7,5	35	0,005	0,025	0,019	0,037	0,062	0,090	0,076	0,106	0,177	0,109	0,092	0,215	0,098	0,050	0,170	0,049
8,5	35	0,005	0,024	0,029	0,036	0,075	0,068	0,102	0,172	0,167	0,186	0,221	0,293	0,189	0,091	0,248	0,086
9,5	35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1,5	40	0,000	0,000	0,002	0,000	0,000	0,001	0,001	0,000	0,002	0,001	0,000	0,002	0,001	0,001	0,002	0,000
2,5	40	0,001	0,001	0,004	0,001	0,001	0,004	0,002	0,003	0,004	0,002	0,001	0,005	0,002	0,001	0,004	0,002
3,5	40	0,002	0,003	0,005	0,006	0,006	0,013	0,006	0,005	0,009	0,007	0,004	0,014	0,006	0,003	0,010	0,005
4,5	40	0,003	0,007	0,006	0,010	0,012	0,020	0,016	0,011	0,021	0,013	0,012	0,027	0,013	0,005	0,016	0,006
5,5	40	0,003	0,023	0,012	0,037	0,023	0,039	0,031	0,029	0,035	0,029	0,023	0,062	0,034	0,010	0,047	0,011
6,5	40	0,006	0,012	0,018	0,018	0,026	0,036	0,041	0,053	0,058	0,069	0,053	0,106	0,062	0,020	0,064	0,019
7,5	40	0,005	0,012	0,013	0,023	0,033	0,041	0,065	0,065	0,077	0,127	0,112	0,132	0,133	0,038	0,124	0,042
8,5	40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9,5	40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabelle C.4: Gemessene Varianzen σ_i bei unterschiedlichen Durchflüssen Q und Wehrhöhen w .

Anhang D - Ergebnisse der RANS - Parameterstudie

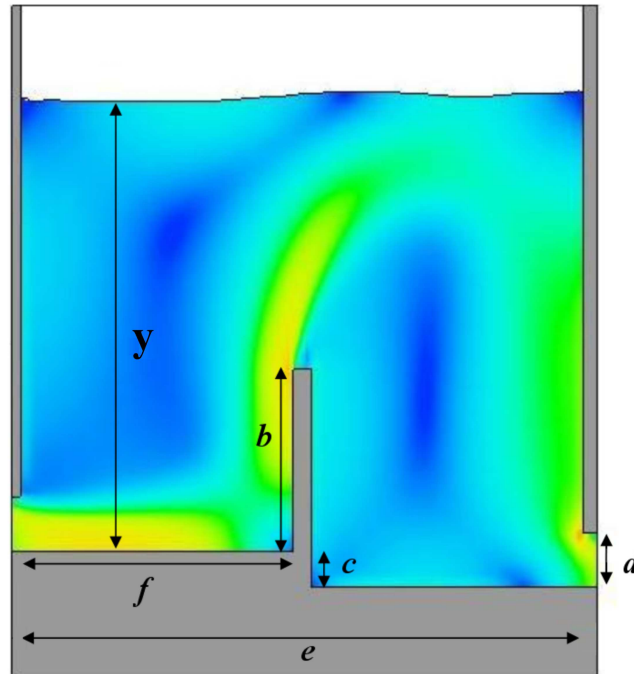


Abbildung D.1: Geometrie des untersuchten Beckens

Ausgehend von einem Referenzbecken mit dem geometrischen Parametern nach Tabelle D.1 wurde jeweils ein Parameter geändert. Im Folgenden sind die Simulationsergebnisse zusammengestellt.

Fließtiefe y im Becken	250 cm
Höhe b der Prallwand	100 cm
Stufenhöhe c / Energieverlust im Becken in [m]	20 cm
Höhe des Durchlasses d	30 cm
Länge des Beckens e	210 cm
Position f der Prallwand	100 cm

Tabelle D.1: Geometrische Abmessungen des Referenzbeckens

Energieverlust c im Becken

horizontale Sohle mit Stufe					
c/d	$q/v_{ref}/d$	v_{max}/v_{ref}	v_m	$\zeta = c/(v_m^2/2g)$	$\psi = v_m/v_{max}$
0,17	0,50	1,00	0,50	3,96	0,50
0,33	0,50	1,00	0,70	3,96	0,50
0,50	0,52	1,00	0,89	3,71	0,52
0,67	0,53	0,99	1,05	3,58	0,53
0,83	0,53	0,99	1,17	3,57	0,53
1,00	0,53	0,99	1,30	3,51	0,54
1,17	0,54	0,99	1,42	3,42	0,55
1,33	0,55	0,99	1,54	3,32	0,55

Tabelle D.2: *Simulationsergebnisse bei Variation der Sohlstufen c
(Sohle horizontal; y,b,d,e,f nach Tab. D.1)*

kontinuierliches Gefälle bei gleichbleibender Kote der Prallwandoberkante					
c/d	$q/v_{ref}/d$	v_{max}/v_{ref}	v_m	$\zeta = c/(v_m^2/2g)$	$\psi = v_m/v_{max}$
0,17	0,52	0,98	0,51	3,73	0,53
0,33	0,51	0,99	0,72	3,79	0,52
0,50	0,52	1,00	0,90	3,66	0,52
0,67	0,51	1,00	1,02	3,79	0,51
0,83	0,51	1,00	1,13	3,84	0,51
1,00	0,51	0,99	1,24	3,82	0,52
1,17	0,51	1,01	1,33	3,91	0,50
1,33	0,52	1,02	1,46	3,68	0,51

Tabelle D.3: *Simulationsergebnisse bei Variation der Sohlstufen c
(Sohle hatte ein kontinuierliches Gefälle bei gleichbleibender Kote der Prallwandoberkante; y,b,d,e,f nach Tab. D.1)*

kontinuierliches Gefälle bei gleichbleibender Prallwandhöhe					
c/d	$q/v_{ref}/d$	v_{max}/v_{ref}	v_m	$\zeta = c/(v_m^2/2g)$	$\psi = v_m/v_{max}$
0,17	0,53	1,08	0,52	3,61	0,49
0,33	0,51	1,00	0,72	3,84	0,51
0,50	0,51	1,01	0,87	3,86	0,50
0,67	0,49	1,00	0,97	4,18	0,49
0,83	0,50	1,02	1,10	4,03	0,49
1,00	0,49	1,01	1,20	4,11	0,49
1,17	0,49	1,05	1,29	4,12	0,47
1,33	0,48	1,11	1,35	4,30	0,43

Tabelle D.4: *Simulationsergebnisse bei Variation der Sohlstufen c*

(Sohle hatte ein kontinuierliches Gefälle bei gleichbleibender Prallwandhöhe;
 y, b, d, e, f nach Tab. D.1)

Höhe der Prallwand b

b/d	$q/v_{ref}/d$	v_{max}/v_{ref}	v_m	$\zeta = c/(v_m^2/2g)$	$\psi = v_m/v_{max}$
0,00	1,51	1,93	2,98	0,44	0,78
0,33	0,70	1,38	1,39	2,04	0,51
0,67	0,43	1,00	0,84	5,50	0,43
1,33	0,41	0,94	0,82	5,84	0,44
2,00	0,44	0,89	0,88	5,11	0,50
2,67	0,48	0,86	0,96	4,27	0,57
3,33	0,52	0,85	1,03	3,71	0,61
4,00	0,60	0,88	1,19	2,76	0,69

Tabelle D.5: *Simulationsergebnisse bei Variation der Höhe der Prallwand b*

(y, c, d, e, f nach Tab. D.1)

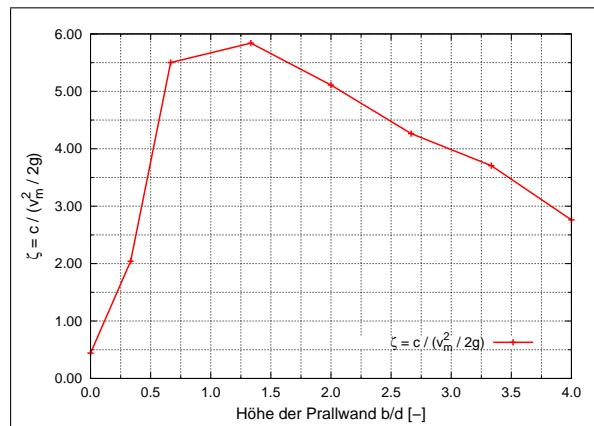


Abbildung D.2: Verlustbeiwert ζ bei unterschiedlichen Prallwandhöhen b in den Becken ($a, c, d, e, f = \text{const.}$)

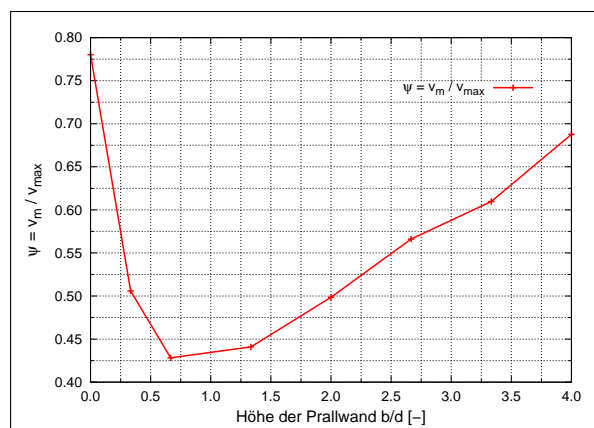


Abbildung D.3: Kontraktionswert ψ bei unterschiedlichen Prallwandhöhen b in den Becken ($a, c, d, e, f = \text{const.}$)

Fließtiefe y im Becken

y/d	$q/v_{ref}/d$	v_{max}/v_{ref}	v_m	$\zeta = c/(v_m^2/2g)$	$\psi = v_m/v_{max}$
5,00	0,46	1,01	0,91	4,76	0,45
6,67	0,58	0,99	1,14	3,00	0,58
8,33	0,52	0,99	1,03	3,70	0,52
10,00	0,48	1,00	0,95	4,35	0,48
11,67	0,47	1,01	0,93	4,51	0,47
13,33	0,48	1,00	0,95	4,36	0,48

Tabelle D.6: Simulationsergebnisse bei Variation der Fließtiefe a (b, c, d, e, f nach Tab. D.1)

Länge des Beckens e

e/d	$q/v_{ref}/d$	v_{max}/v_{ref}	v_m	$\zeta = c/(v_m^2/2g)$	$\psi = v_m/v_{max}$
7,00	0,55	0,98	1,08	3,36	0,55
8,67	0,61	1,01	1,21	2,67	0,61
10,33	0,62	1,04	1,22	2,64	0,59
12,00	0,62	1,05	1,22	2,64	0,59
13,67	0,62	1,06	1,22	2,64	0,58

Tabelle D.7: Simulationsergebnisse bei Variation der Beckenlänge e
 (y, b, c, d, f nach Tab. D.1)

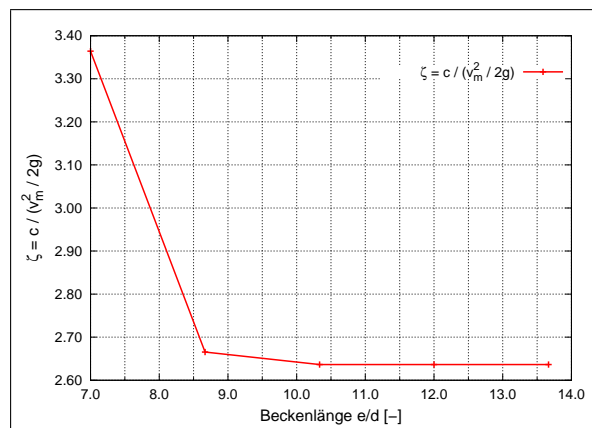


Abbildung D.4: Verlustbeiwert ζ bei unterschiedlichen unterschiedlichen Beckenlängen e
 ($y, b, c, d, f = \text{const.}$)

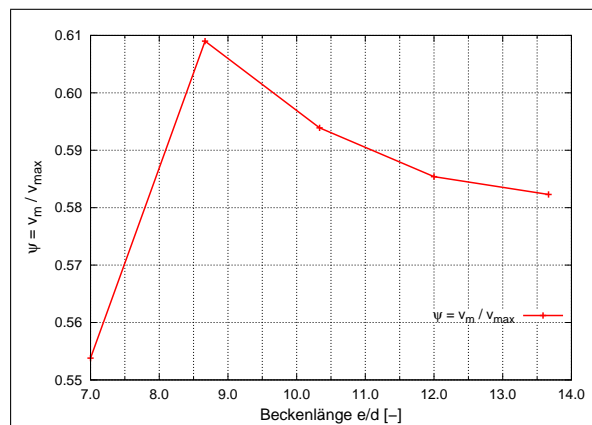


Abbildung D.5: Kontraktionswert ψ bei unterschiedlichen unterschiedlichen
 Beckenlängen e ($y, b, c, d, f = \text{const.}$)

Position der Prallwand f

f/d	$q/v_{ref}/d$	v_{max}/v_{ref}	v_m	$\zeta = c/(v_m^2/2g)$	$\psi = v_m/v_{max}$
1,33	0,69	1,22	1,36	2,11	0,56
1,67	0,68	1,14	1,36	2,14	0,60
2,00	0,67	1,08	1,32	2,25	0,62
2,33	0,64	1,04	1,27	2,43	0,62
2,67	0,61	1,01	1,21	2,68	0,61
3,00	0,57	0,99	1,14	3,03	0,58
3,33	0,53	0,99	1,05	3,58	0,53
3,67	0,51	0,98	1,02	3,77	0,53
4,00	0,50	0,97	0,99	4,00	0,51
4,33	0,48	0,97	0,95	4,31	0,49
4,67	0,46	0,98	0,92	4,67	0,47
5,00	0,44	1,01	0,87	5,16	0,44

Tabelle D.8: *Simulationsergebnisse bei Variation der Prallwandposition f (y, b, c, d, e nach Tab. D.1)*

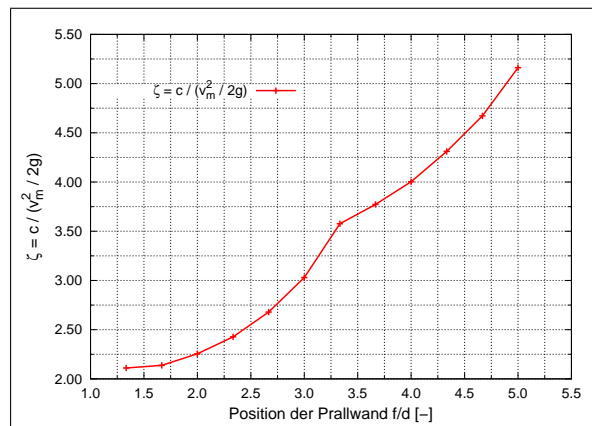


Abbildung D.6: *Verlustbeiwert ζ bei unterschiedlichen Prallwandpositionen f in den Becken ($a, b, c, d, e = \text{const.}$)*

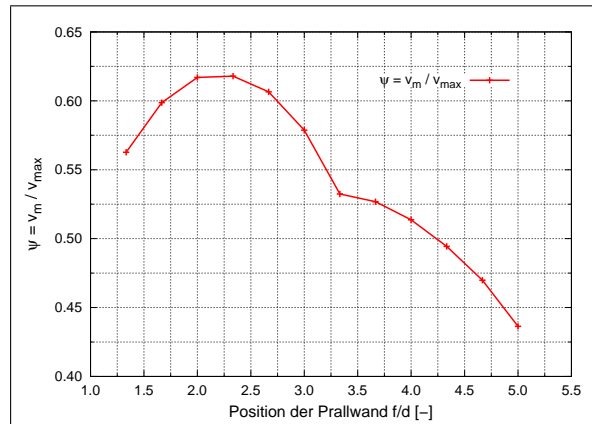


Abbildung D.7: Kontraktionswert ψ bei unterschiedlichen Prallwandpositionen f in den Becken ($a, b, c, d, e = \text{const.}$)

Abhängigkeit von der Reynoldszahl Re

b/d	$q/v_{ref}/d$	v_{max}/v_{ref}	v_m	$\zeta = c/(v_m^2/2g)$	$\psi = v_m/v_{max}$	Fr	Re
0,00	1,51	1,93	2,98	0,44	0,78	3,02	894477
0,33	0,70	1,38	1,39	2,04	0,51	0,65	415815
0,67	0,43	1,00	0,84	5,50	0,43	0,24	253375
1,33	0,41	0,94	0,82	5,84	0,44	0,23	245931
2,00	0,44	0,89	0,88	5,11	0,50	0,26	262909
3,33	0,52	0,85	1,03	3,71	0,61	0,36	308701

Tabelle D.9: Simulationsergebnisse bei Variation der Höhe der Prallwand b ($d = 0,30$ m; y, c, d, e, f nach Tab. D.1)

b/d	$q/v_{ref}/d$	v_{max}/v_{ref}	v_m	$\zeta = c/(v_m^2/2g)$	$\psi = v_m/v_{max}$	Fr	Re
0,00	1,53	1,99	4,29	0,43	0,77	3,12	2571640
0,33	0,70	1,33	1,97	2,02	0,53	0,66	1183240
0,67	0,42	1,01	1,17	5,72	0,42	0,23	702640
1,33	0,41	0,95	1,14	6,07	0,43	0,22	682256
2,00	0,43	0,89	1,22	5,31	0,49	0,25	729519
3,33	0,53	0,86	1,48	3,58	0,62	0,37	888485

Tabelle D.10: Simulationsergebnisse bei Variation der Höhe der Prallwand b ($d = 0,60$ m; y, c, d, e, f nach Tab. D.1)

b/d	$q/v_{ref}/d$	v_{max}/v_{ref}	v_m	$\zeta = c/(v_m^2/2g)$	$\psi = v_m/v_{max}$	Fr	Re
0,00	1,49	1,91	2,09	0,45	0,78	2,97	313794
0,33	0,75	1,37	1,05	1,79	0,54	0,74	156826
0,67	0,44	0,98	0,61	5,24	0,44	0,25	91755
1,33	0,42	0,93	0,59	5,58	0,46	0,24	88982
2,00	0,45	0,87	0,63	4,87	0,52	0,27	95177
3,33	0,55	0,85	0,77	3,27	0,65	0,41	116187

Tabelle D.11: *Simulationsergebnisse bei Variation der Höhe der Prallwand b*
($d = 0,15$ m; y, c, d, e, f nach Tab. D.1)