

Technische Universität Graz
Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft

**Messungen im Labor
als Grundlage zur
Optimierung technischer Schlitzpässe**

**Masterarbeit
von
Markus Haslwanter, BSc**

Vorgelegt zur Erlangung des
akademischen Grades eines Masters
der Studienrichtung Bauingenieurwesen

Graz, im Oktober 2020

Betreuer der Masterarbeit:
Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Josef Schneider

.....

Mitbetreuender Assistent:
Dipl.-Ing. Sebastian Gegenleithner, BSc

.....

Eid (Ehrenwörtliche Erklärung)

Ich erkläre an Eides Statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Ich versichere, dass ich dieses Masterarbeitsthema bisher weder im In- noch im Ausland (einer Beurteilerin oder einem Beurteiler) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe.

Graz, im Oktober 2020

.....

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich während der Anfertigung dieser Masterarbeit unterstützt und motiviert haben.

An erster Stelle möchte ich mich bei Herrn Prof. Josef Schneider für die Betreuung und Begutachtung meiner Masterarbeit und die ständige Unterstützung in Entscheidungen, speziell in der Abschlussphase bedanken.

Ein großes Dankeschön geht auch an Herrn DDI Georg Seidl, der mir nicht nur zur Themenwahl verholfen hat, sondern auch während der gesamten Durchführung stets hilfreich zur Seite stand. Zusätzlich hat er mich wie einen Schützling in seinem Ingenieurbüro aufgenommen und mir die Chance gegeben, wertvolle Praxiserfahrungen im Wasserbau zu sammeln, wofür ich äußert dankbar bin.

Auch Herrn DI Dr. Clemens Dorfmann bin ich sehr dankbar für die Möglichkeit an einigen Projekten seines Ingenieurbüros mitwirken zu dürfen und die kompetente Unterstützung in Fragen zur Datenauswertung.

Der Leitung des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft an der TU Graz möchte ich für die Ermöglichung der Arbeit sowie den Mitarbeitern im Wasserbaulabor, allen voran Fritz, Martin und Walter, für die Unterstützung bei der Durchführung der Modellversuche danken.

Ein besonderer Dank gilt auch meiner Familie und meiner Partnerin, die mich während meines Studiums stets unterstützt und zum erfolgreichen Studienabschluss animiert haben.

Kurzfassung

Aus Naturschutzgründen sowie aufgrund rechtlicher Vorschriften durch die Europäische Wasserrahmenrichtlinie ist für flussbauliche, für Fische unpassierbare Querbauwerke die Schaffung der Durchgängigkeit und damit die Wiederherstellung des Flusskontinuums anzustreben. Die vorliegende Arbeit beleuchtet die aktuell gültigen, rechtlichen Rahmenbedingungen sowie die ökologischen Grundlagen, wie die Beweggründe zur Fischmigration oder die Ermittlung der Schwimmkapazitäten und versucht diese in Relation zu den in Schlitzpässen auftretenden hydraulischen Vorgängen zu beschreiben. In weiterer Folge werden sowohl die vom österreichischen Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW) empfohlenen, wie auch alternative, gegenwärtig in der Praxis umgesetzte Bautypen von Fischaufstiegshilfen vorgestellt und dessen Vor- sowie Nachteile diskutiert. Der Hauptteil der Arbeit befasst sich mit der Gegenüberstellung einer innovativen Bauform der Fischaufstiegshilfe, dem Technischen Beckenpass (TB) zum konventionellen, vom BMLFUW empfohlenen Vertical Slot Schlitzpass (VS). Hierfür wurden im Wasserbaulabor der TU Graz maßstabsgetreue Modelle der beiden Systeme mit identen geometrischen sowie hydraulischen Randbedingungen errichtet und die darin auftretenden Fließgeschwindigkeiten sowie Turbulenzen in mehreren Versuchsreihen mittels ‚Acoustic Doppler Velocimetry‘ (ADV-Methode) ermittelt. Die Auswertung und Visualisierung der Messergebnisse zeigte dabei eine um etwa 25% geringere notwendige Dotation des TB, bei gleichzeitiger Etablierung ökologisch günstigerer Strömungsverhältnisse im Vergleich zum VS.

Abstract

For reasons of nature conservation and because of legal regulations by the European Water Framework Directive, there is the necessity to obtain the fish passage ability at river transverse structures and to strive for the recovery of the river continuum. The present thesis covers the currently valid legal framework conditions, the ecological basics like the motivations of fish migration or the determination of swimming capacities and tries to put them in relationship and describe the hydraulic conditions occurring in slot-type fish passes. Furthermore both, the fish pass construction types recommended by the Austrian Federal Ministry for Agriculture, Forestry, Environment and Water Management (BMLFUW), as well as alternative, presently built construction types of fish passes are described and the advantages and disadvantages are discussed. The main part of the thesis deals with the comparison of an innovative construction type, the technical pool and weir fish pass (TB) to the conventional vertical slot fish pass (VS) recommended by the BMLFUW. For this purpose, scale models with identical geometrical and hydraulic boundary conditions for both systems were constructed in the Hydraulic Engineering Laboratory at the TU Graz and the occurring flow velocities and turbulences inside the pools were measured in several series of experiments using the 'Acoustic Doppler Velocimetry' (ADV) method. The evaluation and visualization of the measurement results showed, that there was a reduction by around 25% in the need of water for the TB, while establishing ecological more favorable flow conditions compared to the VS.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Grundlagen	3
2.1 Rechtliche Grundlagen.....	3
2.1.1 EU-Wasserrahmenrichtlinie (WRRL 2000).....	3
2.1.2 Leitfaden zum Bau von Fischaufstiegshilfen (BMLFUW 2012)	5
2.2 Ökologische Grundlagen.....	7
2.2.1 Grundlagen der Fischmigration	7
2.2.2 Schwimmleistung und Bemessungsfischarten	8
2.3 Technische Grundlagen	13
2.3.1 Naturnahe Typen der Fischaufstiegshilfe	15
2.3.2 Technische Typen der Fischaufstiegshilfe	18
2.3.3 Automatisierte Fischaufstiegshilfen	25
2.4 Hydraulische Grundlagen.....	30
2.4.1 Abflusszustand	31
2.4.2 Strömungsdynamik.....	31
2.4.3 Hydraulischer Überfall	33
2.4.4 Hydraulische Dimensionierung von Schlitzpässen.....	35
3. Modellversuche	39
3.1 Dimensionierung und Maßstab	39
3.2 Modellaufbau	43
3.2.1 Vertical Slot Schlitzpass	43
3.2.2 Technischer Beckenpass	48
3.3 Messmethoden.....	52
3.3.1 Geschwindigkeitsmessung ‚Laser Doppler Anemometry‘ (LDA).....	53
3.3.2 Geschwindigkeitsmessung ‚Acoustic Doppler Velocimetry‘ (ADV)	56
3.4 Messraster	59
4. Messungen und Ergebnisse	64
4.1 Durchgeführte Messungen.....	64
4.1.1 Ermittlung der durchschnittlichen Korndurchmesser im Sohlsubstrat... 64	
4.1.2 Pegelmessung zum Rückschluss auf die Überfallbeiwerte.....	65
4.1.3 Kontrolle des Durchflusses während der Messungen	67
4.1.4 Messungen der Fließgeschwindigkeiten	68

4.2	Aufbereitung der Geschwindigkeits-Messergebnisse	69
4.3	Visualisierung der Geschwindigkeits-Messergebnisse	72
4.4	Visualisierung der turbulenten kinetischen Energie (TKE).....	73
4.5	Ergebnisse Vertical Slot Schlitzpass.....	73
4.5.1	Fließgeschwindigkeiten VS (Grundriss Becken 2)	74
4.5.2	Turbulenzen VS (Grundriss Becken 2).....	75
4.6	Ergebnisse Technischer Beckenpass	77
4.6.1	Fließgeschwindigkeiten TB (Grundriss Becken 2)	77
4.6.2	Turbulenzen TB (Grundriss Becken 2).....	79
4.6.3	Fließgeschwindigkeiten TB (Längsschnitt durch Schlitz)	81
4.6.4	Turbulenzen TB (Längsschnitt durch Schlitz).....	82
5.	Diskussion und Erkenntnisse	83
5.1	Erkenntnisse Vertical Slot Schlitzpass	83
5.2	Erkenntnisse Technischer Beckenpass	84
5.3	Erkenntnisse zum Vergleich der beiden Bautypen	85
6.	Zusammenfassung	87
	Literaturverzeichnis	88
	Abbildungsverzeichnis	92
	Tabellenverzeichnis	95

1. Einleitung

Bei der Planung von wasserbautechnischen Anlagen wie Kraftwerken, Wasserfassungen und ähnlichem müssen - besonders in Bezug auf die EU-weit gültige Wasserrahmenrichtlinie - jedenfalls auch die ökologischen Auswirkungen eines solchen Projektes in Betracht gezogen werden. Neben dem sogenannten Verschlechterungsverbot sowie Verbesserungsgebot sieht dieses gesetzlich verankerte Regelblatt ebenfalls den Erhalt bzw. die Wiederherstellung des Flusskontinuums vor, um den im Wasser lebenden Organismen die Migration innerhalb des Lebensraumes 'Fluss' weiterhin zu ermöglichen. Besonders bei Fischen hat sich während ihres gesamten Lebenszyklus eine große Abhängigkeit von Wanderungen herausgestellt. Die Passierbarkeit von künstlichen Querbauwerken wie Wehranlagen wird gegen die Fließrichtung im Allgemeinen durch die Ausführung einer geeigneten Fischaufstiegshilfe gewährleistet. In dem vom österreichischen Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW) im Jahr 2012 herausgegebenen Leitfaden zum Bau von Fischaufstiegshilfen, wird neben der Ausführung von natürlichen oder naturnahen Varianten auch eine technische Variante, der Vertical Slot Schlitzpass (kurz VS), empfohlen. In den letzten Jahren wurde aber auch vermehrt der technische Beckenpass (kurz TB) als funktionale Alternative erfolgreich umgesetzt. Dieser bietet im Gegensatz zum naturnahen Beckenpass den großen Vorteil der exakteren Bauausführung und damit eine erleichterte Kontrolle zur Einhaltung der Querschnittsdimensionen sowie eine Reduktion der erforderlichen Wassermenge und lässt dabei keine negativen Auswirkungen auf die hydraulischen Bedingungen erwarten (Seidl 2018). Im Sinne der Auffindbarkeit sowie Durchwanderbarkeit ist es notwendig, die Fischaufstiegshilfe entsprechend dem fischökologischen Leitbild zu dimensionieren. Hierbei sollte neben den im österreichischen Leitfaden beschriebenen Mindestabmessungen, maximalen Höhendifferenzen sowie Maximalwerte der Energiedissipation auch auf weitere ökohydraulische Aspekte, wie auftretende Fließgeschwindigkeiten und ausreichend strömungsberuhigte Bereiche geachtet werden. Die vorliegende Arbeit befasst sich diesbezüglich mit der Untersuchung der hydraulischen Bedingungen des technischen Beckenpasses sowie des Vertical Slot Schlitzpasses, welche durch Darstellung des Strömungs-

verhaltens aufgrund gemessener Fließgeschwindigkeiten im Modellversuch aufgezeigt werden sollen. Es erfolgt die Gegenüberstellung des Strömungsverhaltens zwischen technischem Beckenpass und Vertical Slot bei vergleichbarer Dimensionierung, um etwaige Differenzen sowie die Vor- und Nachteile in der Ausführung der beiden Bautypen darzulegen. Dieser Vergleich soll die Grundlage zur weiteren bautechnischen, hydraulisch/fischökologischen sowie ökonomischen Optimierung von zukünftigen Projektausführungen des technischen Beckenpasses schaffen. Der Fokus sollte dabei auf Planungsparameter wie Schlitzweite, Wandstärke oder Sohlrauigkeit gelegt werden.

2. Grundlagen

Eine Analyse der Ausgangssituation in der beschriebenen Thematik zeigt die notwendigen umfangreichen Zusammenhänge zwischen den vielen verschiedenen wissenschaftlichen Teilgebieten und deren Komplexität. Neben dem ökologischen Verständnis für die Grundlagen der Fischmigration (Bemessungsfischart und zu erwartendes Artenspektrum) und den hydrologischen Rahmenbedingungen ist es auch notwendig, die hydraulischen Abläufe und Zusammenhänge im Fischpass zu verstehen und beschreiben zu können. Innerhalb des rechtlich vorgegebenen Rahmens muss schlussendlich die effizienteste (bau-)technische Variante der Fischaufstiegshilfe (FAH) gewählt werden, welche sowohl die genannten ökologischen als auch die entsprechenden hydraulischen Anforderungen bestmöglich erfüllt. Nachfolgend werden die rechtlichen, ökologischen, hydraulischen sowie technischen Grundlagen erläutert.

2.1 Rechtliche Grundlagen

Nach aktuellem Stand bietet die Wasserrahmenrichtlinie der europäischen Union aus dem Jahr 2000 (WRRL 2000) die wichtigste rechtliche Grundlage für Oberflächenwasserkörper. Diese wurde durch die österreichische Judikative bereits im Jahr 2003 im nationalen Wasserrechtsgesetz von 1959 (WRG 1959) verankert. Zur Unterstützung bei der Planung von Fischaufstiegshilfen wurde vom Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft im Jahr 2012 der Leitfaden zum Bau von Fischaufstiegshilfen (BMLFUW 2012) herausgegeben.

2.1.1 *EU-Wasserrahmenrichtlinie (WRRL 2000)*

Die Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates wurde im Jahr 2000 mit dem Wortlaut 'zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik' veröffentlicht. Diese Richtlinie sieht eine Betrachtung und Einteilung in sogenannte Flusseinzugsgebiete vor, welche den gesamten Fluss vom Ursprung bis zur Mündung und zusätzlich auch alle seitlichen Zubringerbäche umfassen.

Die Ziele der Richtlinie sind die Erreichung eines guten Zustandes für alle Gewässer (Verbesserungsgebot) sowie die Verhinderung einer Verschlechterung des aktuellen Zustands (Verschlechterungsverbot). Für erheblich veränderte Wasserkörper (HMWB ‚heavily modified water body‘) wird die Erreichung des guten ökologischen Potentials gefordert. Dies ist insbesondere dann maßgebend, wenn die notwendigen Maßnahmen zur Erreichung des guten Zustandes einen signifikanten negativen Einfluss auf die Schifffahrt, die Trinkwasserversorgung oder den Hochwasserschutz hätten oder die Adaption einer bereits bestehenden Nutzung technisch nicht durchführbar oder mit unverhältnismäßig hohen Kosten verbunden wäre.

Nach erfolgreicher Ist-Bestandsanalyse müssen entsprechende Schutz-, Sanierungs- bzw. Verbesserungsmaßnahmen erarbeitet werden, welche die Erreichung der Ziele gewährleisten. Für die Erarbeitung dieser Maßnahmenkonzepte wurde die Frist mit dem Jahr 2009 festgelegt. Vom BMLFUW wurde im Zuge dessen der 1. Nationale Gewässerbewirtschaftungsplan (BMLFUW 2010) erarbeitet und fristgerecht im Jahr 2009 eingeführt. Mit dem Ende der ersten Sanierungsetappe der prioritären Gewässer im Jahr 2015, wurde bereits der 2. Nationale Gewässerbewirtschaftungsplan (BMLFUW 2017) erarbeitet, welcher in der offiziellen Endfassung im Jahr 2017 in Kraft getreten ist. Dieser ist aktuell gültig bis zum Ende der ersten Verlängerungsfrist im Jahr 2021. Anschließend wird es eine zweite Verlängerungsfrist, ebenfalls im 6-Jahres-Zyklus geben, währenddessen die 3. Version des Nationalen Gewässerbewirtschaftungsplans zur Anwendung kommen wird.

Ein wichtiger Punkt der nationalen Gewässerbewirtschaftungspläne betrifft die Durchgängigkeit für Fische in den Gewässern aufgrund nicht passierbarer Querbauwerke. Die erste Erhebung zeigte ein Vorkommen von etwa 30.000, das Fließgewässerkontinuum unterbrechenden, Querbauwerken in den österreichischen Gewässern. Davon waren lediglich etwa 1300 bereits mit Fischaufstiegshilfen versehen. Dies bedeutet, dass fast 60% aller österreichischen Fließgewässer in ihrer Durchgängigkeit unterbrochen waren, wobei rechnerisch auf jeden Kilometer Fließstrecke ein Wanderhindernis folgt. Durch die Umsetzung der Maßnahmen des 1. Nationalen Gewässerbewirtschaftungsplanes wurden bis

2015 bereits mehr als weitere 1000 Wanderhindernisse passierbar gemacht (BMLFUW 2017). Die nächste Erhebung und die damit verbundene Maßnahmenanpassung erfolgt im Zuge der 3. Planungsperiode bis zum Jahr 2021. Bis dorthin sollen 70% aller Gewässer mit einem Einzugsgebiet $> 100 \text{ km}^2$ durchgängig gemacht werden. Bis zum Ende des darauffolgenden 6-Jahres-Zyklus 2027 wird hier ein Wert von 90% angestrebt.

2.1.2 Leitfaden zum Bau von Fischaufstiegshilfen (BMLFUW 2012)

In Anlehnung an die im Wasserrechtsgesetz implementierte Wasserrahmenrichtlinie wurde im Jahr 2012 vom damaligen österreichischen Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW) ein Leitfaden zum Bau von Fischaufstiegshilfen veröffentlicht. Dieser soll eine Unterstützung für die Planung und den Bau von Fischaufstiegshilfen bieten. Neben den biologischen Grundlagen zur Fischwanderung und der Beschreibung der grundlegenden Anforderungen an FAHs stellt der österreichische Leitfaden unter Berücksichtigung der jeweils maßgeblichen Bemessungsfischart auch die erforderlichen Dimensionierungsgrößen und Planungsparameter für verschiedene Bautypen bereit. Bei Einhaltung dieser Empfehlungen ist von der Funktionsfähigkeit für die flussaufwärts gerichtete Fischwanderung auszugehen. Weiterführend werden Methoden und Maßnahmen zur Überprüfung der Funktionsfähigkeit sowie zur Kontrolle und Wartung im regulären Betrieb wie auch im Störfall dargelegt.

Die größenbestimmende Fischart und die Basiswerte derer Abmessungen, (Fisch-)Körperlänge, -höhe sowie -breite, können im österreichischen Leitfaden über eine Tabelle anhand der vorliegenden Fischregion und Mittelwasserführung des Gewässers bestimmt werden. Diese Abmessungen sind für die Dimensionierung der geometrischen Mindestgröße der FAH maßgeblich. So sollte etwa die Beckenlänge die dreifache Körperlänge nicht unterschreiten. Weitere grundlegende Mindestabmessungen anhand der Fischgröße sind wie folgt festgelegt (BMLFUW 2012):

⇒ Lichte Beckenlänge: mindestens 3-fache Körperlänge

- ⇒ Lichte Beckenbreite: mindestens 2-fache Körperlänge
- ⇒ Minimale Schlitzweite: mindestens 3-fache Körperbreite
- ⇒ Wassertiefe im Übergang: mindestens 2,5-fache Körperhöhe

Neben den genannten grundlegenden, geometrischen Mindestabmessungen aufgrund der Fischgröße, werden in Abhängigkeit des gewählten FAH-Bautyps weitere geometrische Anforderungen an die Dimensionierung aufgezeigt. Die hydraulischen Anforderungen, welche im österreichischen Leitfaden beschrieben werden, reichen von Maßnahmen zur Verbesserung der Auffindbarkeit der FAH, wie etwa die Wahl einer geeigneten Leitstromdotations, die orografische Positionierung sowie die optimale Gestaltung der Ein- und Ausstiegsbereiche, bis hin zur hydraulischen Dimensionierung der Becken und Übergänge, welche neben den geometrischen Bedingungen die wichtigsten Aspekte zur Passierbarkeit der FAH darstellen. Hierbei werden besonders die Begrenzung der Wasserspiegeldifferenz bzw. Überfallhöhe und der damit verbundenen, auftretenden Fließgeschwindigkeiten sowie die Verhinderung ausgeprägter Turbulenzen betrachtet. Die Anpassung dieser Parameter erfolgt dabei hauptsächlich bezugnehmend auf die zu erwartenden, maximalen Schwimmleistungen der entsprechenden Bemessungsfischart, welche im nachfolgenden Kapitel 2.2.2 beschrieben werden.

Während für die Wasserspiegeldifferenz und Fließgeschwindigkeit klare, messbare Kontrollwerte definiert werden können und direkte Zusammenhänge mit den Schwimmleistungen für einige Arten bekannt sind, bestehen laut aktueller Literaturrecherche zum Thema Turbulenzen in FAHs und deren Auswirkungen auf die Schwimmkapazitäten weiterhin Unschärfen. Die negative Auswirkung von hohen Turbulenzen auf die Passierbarkeit scheint hierbei unbestritten, genaue Grenzwerte, auf Basis ethohydraulischer Untersuchungen, lassen sich gemäß dem gegenwärtigen Erkenntnisstand nur indirekt über die Leistungsdichte oder die turbulente kinetische Energie festmachen. Im österreichischen Leitfaden wird die sogenannte Energiedissipation als Maß für die zu erwartende Turbulenz festgelegt. Diese beschreibt die Leistungsdichte der Umwandlung der in ein Becken eingebrachten Energie in Bezug zur Beckendimension und wird in W/m^3 angegeben. Die eingebrachte Energie entspricht hierbei der freigesetzten potentiellen

Energie, welche sich aus dem Durchfluss und der Fallhöhe (Wasserspiegeldifferenz) errechnet (siehe Kapitel 2.4.4, Formel (10)). Im Leitfaden werden Grenzwerte der Energiedissipation, je nach Fischregion, zwischen 80 und 160 W/m³ empfohlen (BMLFUW 2012).

Zusätzlich zur Begrenzung der maximalen Fließgeschwindigkeiten ist auch die Etablierung eines ausreichend großen Wanderkorridors notwendig, in dem die empfohlene Mindestfließgeschwindigkeit nicht unterschritten werden darf. Diese Minimalgeschwindigkeit begründet sich in der natürlichen Ausrichtung von rheophilen Fischen nach der Strömung und ermöglicht diesen somit die Passage.

2.2 Ökologische Grundlagen

2.2.1 Grundlagen der Fischmigration

Fische haben ihr gesamtes Leben an die Konnektivität der Gewässer angepasst und sind damit in allen Altersstadien an die Möglichkeiten der Fischwanderung angewiesen (Ward 1989). Die Arten der Fischwanderungen lassen sich nach Gewässer, Distanz sowie Motivation unterteilen. Diese Arbeit legt das Hauptaugenmerk auf potamodrome, also sich auf Süßwasser beschränkte Wanderungen und bezieht sich somit auf den Lebensraum Fluss. Das Hauptaugenmerk wird hierbei auf flussaufwärts gerichtete Wanderungen gelegt, neben denen allerdings auch flussabwärts gerichtete, sowie laterale Wanderungen von Fischen unternommen werden. Fischwanderungen basieren auf den unterschiedlichsten Motivationen und umfassen den gesamten Lebenszyklus eines Fisches. So werden beispielsweise Laichwanderungen zur Reproduktion meist flussaufwärts durchgeführt, während juvenile Fische zur Nahrungssuche und Erkundung neuer Habitate oft wieder flussabwärts wandern. Weiters kommt den Wanderungen auch im Falle von Hochwässern oder Niederwasserperioden eine wichtige Bedeutung zu, um das Überleben der Fische in entsprechend geschützten Flussbereichen zu sichern. Das heute nahezu vollständige Aussterben von Langstreckenwanderer (über 300km/Jahr in eine Richtung) sowie die Gefährdung der meisten Mittelstreckenwanderer (bis 300km/Jahr) und 50% der Kurzstreckenwanderer (bis 30

km/Jahr) der ursprünglichen Fischfauna in Österreich bildet die negativen anthropogenen Einflüsse ab (Zitek et al. 2007).

Das Wanderverhalten unterscheidet sich für unterschiedliche Fischarten. Während rheophile (strömungsliebende) Arten die Richtung der Hauptströmung beziehungsweise Leitströmung bevorzugen, wandern schwimmschwache Kleinfischarten in Sohlnähe im Strömungsschatten von Hindernissen. Dennoch sind fast alle in österreichischen Gewässern heimische Fischarten für die Überwindung von Hindernissen auf das Vorhandensein eines ausreichend großen, das Hindernis überströmenden, Wasserpolsters zum Durchschwimmen angewiesen (BMLFUW 2012). Lediglich einige Salmoniden verfügen über die Fähigkeit Hindernisse ohne Wasserpolster oder mit abgerissenem Überfallstrahl springend zu überwinden. Dies ist allerdings durch eine beschränkte Höhendifferenz und die Notwendigkeit optimaler Unterwasserbedingungen für den richtigen Absprung nur eingeschränkt möglich und wird von den Fischen nur versucht, wenn keine andere Möglichkeit zur Überwindung des Hindernisses gefunden werden kann (Stuart 1962).

2.2.2 Schwimmleistung und Bemessungsfischarten

Neben den geometrischen Anforderungen an die Übergangsbreite und Tiefe des Wasserpolster zur uneingeschränkten Passierbarkeit müssen auch die hydraulischen Fließbedingungen ein Durchschwimmen ermöglichen. Hierfür ist insbesondere die Fließgeschwindigkeit ausschlaggebend. Die limitierenden Faktoren werden hierbei durch die Schwimmleistung der jeweiligen Fischarten gebildet. Diese setzt sich zusammen aus der biologisch möglichen Schwimmgeschwindigkeit und der entsprechend möglichen zeitlichen Ausdauer. Die Definition der Schwimmleistung wird über das Verhältnis der Schwimmgeschwindigkeit zur möglichen Zeit der Aufrechterhaltung in Abbildung 1 dargestellt.



Abbildung 1: Schwimmleistungen von Fischen (Pavlov 1989, verändert)

In der Literatur wird die kritische Sprintgeschwindigkeit als Planungsparameter für die hydraulische Dimensionierung von Fischaufstiegshilfen herangezogen. Diese wird definiert durch die Schwimmgeschwindigkeit, bei der nach einer Ausdauer von 20 Sekunden ein Abtreiben des Fisches erfolgt. Es müssen daher genügend Einstandsmöglichkeiten für das Einlegen von Ruhepausen vorhanden sein, damit die Übergänge einer FAH, an denen im Regelfall die höchsten Fließgeschwindigkeiten auftreten, von den Fischen überwunden werden können. Die Schwimmgeschwindigkeiten von Fischen lassen sich in Abhängigkeit von Fischart, Größe, Muskulatur sowie der Wassertemperatur berechnen und werden meist in Körperlängen pro Sekunde angegeben. Die Vorgaben zu kritischen Sprintgeschwindigkeiten in der Literatur unterliegen einer breiten Schwankung, sowohl in den Zahlenwerten als auch in der zugrundeliegenden Methodik (Seidl 2021). So werden etwa für Kleinfische unter 10 cm Körperlänge Werte zwischen 0,30 m/s und 0,65 m/s genannt (Tudorache et al. 2008), während für größere Salmoniden mit Körperlängen von knapp 60 cm Höchstwerte von mehr als 4 m/s publiziert werden (Katopodis, Gervais 2016). Die maximalen Fließgeschwindigkeiten in FAHs werden im österreichischen Leitfaden auf etwa 1 m/s im Potamal

beziehungsweise maximal 1,5 - 2 m/s im Rhithral beschränkt, wobei für die Passierbarkeit von Klein- und Jungfischen, welche weit geringere Schwimmleistungen aufweisen, die Reduktion der sohnnahen Fließgeschwindigkeiten durch raues Sohlsubstrat vorzusehen ist (BMLFUW 2012).

Zur Bestimmung der Bemessungsfischart für eine FAH erfolgt die Zuordnung des Standorts zur entsprechenden Fischregion. Die in Österreich vorkommenden Fischregionen und limnologischen Gebiete lassen sich nach dem Flusslängsprofil von Oberlauf bis Unterlauf in folgende Zonen einteilen:

- ⇒ Obere Forellenregion – Epirhithral: Bach-Oberlauf
- ⇒ Untere Forellenregion – Metarhithral: Bach-Mittellauf
- ⇒ Äschenregion – Hyporhithral: Bach-Unterlauf
- ⇒ Barbenregion – Epipotamal: Fluss-Oberlauf
- ⇒ Brachsenregion – Metapotamal: Fluss-Mittellauf

Abbildung 2 zeigt die schematische Einteilung der Fischregionen nach den vorherrschenden Gewässereigenschaften sowie die typischen Leitfischarten.

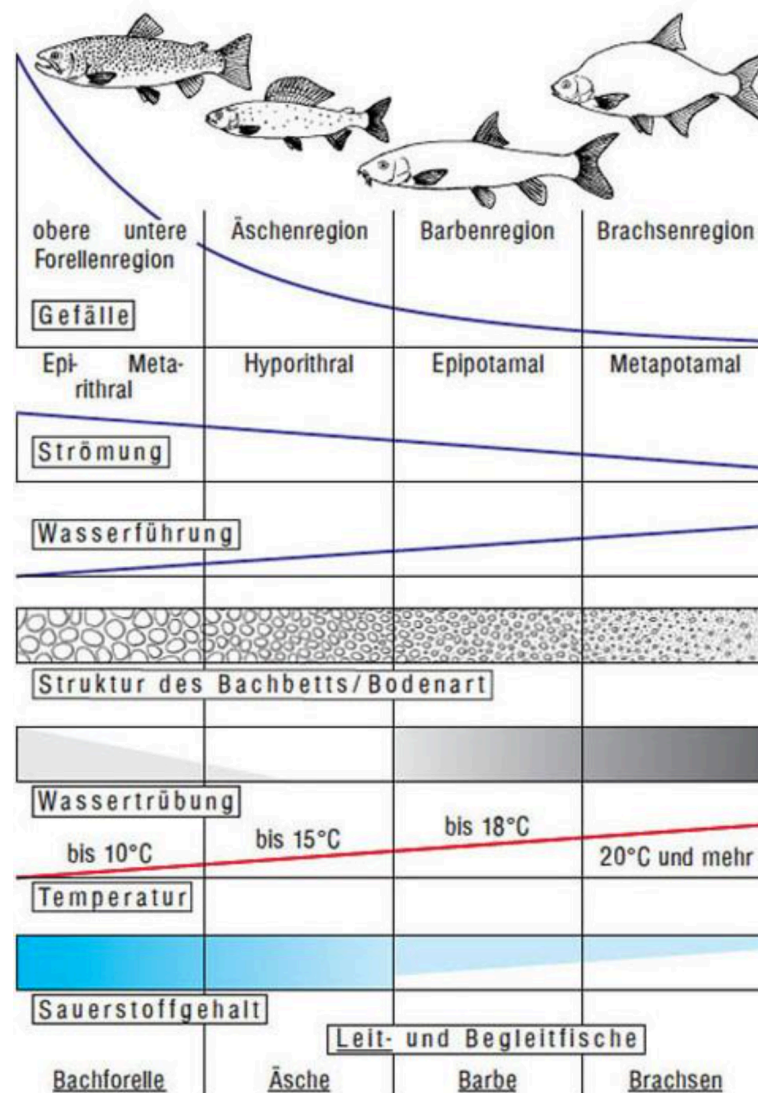


Abbildung 2: Fischregionen mit Leitarten (Kroll 2016, verändert)

Entsprechend der vorherrschenden Fischregion erfolgt im nächsten Schritt die Bestimmung der vorkommenden Fischarten. Hierzu gibt es fischökologische Leitbilder, welche gemäß dem vom BMLFUW herausgegebenen „Leitfaden zur Erhebung der biologischen Qualitätselemente, Teil A1 – Fische“ erhoben wurden und vom Ministerium zur Verfügung gestellt werden (Haunschmid et al. 2010). Diese listen für jede Fischregion und teilweise dessen spezifischen Unterteilungen die dort vorkommenden Fischarten auf. Die genannten Leit- und typischen Begleitarten setzen von Natur aus hohe Vorkommen voraus, während seltene Begleitarten einen zahlenmäßig untergeordneten Anteil am Artenspektrum die-

ser Fischregion verzeichnen. Diese wurden durch Probebefischungen mit anschließender Bewertung aufgrund der Vorkommen und Biomasse ermittelt (Haunschmid et al. 2010).

Aus diesen Leitbildern wurden die größenbestimmenden Fischarten abgeleitet und gemeinsam mit deren zugehörigen Abmessungen, welche für die Dimensionierung von FAHs maßgeblich sind, als empfohlene Planungsparameter im Leitfaden des BMLFUW veröffentlicht. Tabelle 1 zeigt die für österreichische Fischregionen festgelegten maßgebenden Längen und Fischarten.

Tabelle 1: Maßgebende Länge und Fischart je Fischregion (AG-FAH 2011)

FISCHREGION	MAßGEBENDE LÄNGE UND FISCHART
Epirhithral	
Epirhithral < 2 m³/s MQ	30 cm Bachforelle
Epirhithral > 2 m³/s MQ	40 cm Bachforelle
Metarhithral	
Metarhithral, < 2 m³/s MQ	40 cm Bachforelle
Metarhithral, > 2 m³/s MQ	50 cm Bachforelle, Äsche
Hyporhithral	
Hyporhithral, klein (< 2 m³/s MQ)	50 cm Bachforelle, Aitel, Äsche, 60 cm Aalrutte
Hyporhithral, mittel (> 2 m³/s MQ)	60 cm Aalrutte, Barbe
Hyporhithral, mittel (> 2 m³/s und < 20 m³/s MQ) mit Huchen	80 cm Huchen
Hyporhithral, groß (> 20 m³/s MQ), mit Huchen	100 cm Huchen
Epipotamal	
Epipotamal, klein (< 1 m³/s MQ)	60 cm Barbe, 50 cm Aitel, 50 cm Äsche
Epipotamal, mittel ohne Hecht ohne Huchen	60 cm Barbe
Epipotamal, mittel mit Hecht ohne Huchen	90 cm Hecht, 50 cm Brachse
Epipotamal, mittel mit Huchen	90 cm Huchen, 50 cm Brachse
Epipotamal, groß mit Huchen	100 cm Huchen
Epipotamal, groß ohne Huchen mit Wels	120 cm Wels
Epipotamal, groß ohne Huchen ohne Wels	90 cm Hecht, 50 cm Brachse
Schmerlen- und Gründlingsbach	
Schmerlenbach (östl. Flach- und Hügelländer)	40 cm Aitel
Grosse Flüsse	
Donau	150 cm Wels
Alpenrhein	90 cm Seeforelle, Hecht
Drau	100 cm Huchen, 120 cm Wels
Inn	100 cm Huchen, 120 cm Wels (unterer Inn, Oberösterreich)
Salzach	100 cm Huchen (flussab Salzburg, Oberösterreich), 120 cm Wels (Oberösterreich)
Mur	100 cm Huchen; 120 cm Wels (untere Mur)
Enns	100 cm Huchen
Seezubringer und Seeausrinne	
Seezubringer und Seeausrinne	90 cm Seeforelle, 90 cm Hecht, 70 cm Perlfisch, 60 cm Barbe, 50 cm Brachse

In Tabelle 2 werden in weiterer Folge die maßgebenden Körperabmessungen der entsprechenden Fischarten zusammengefasst.

Tabelle 2: Körperabmessungen maßgebender Fischarten (AG-FAH 2011)

Größenbestimmende Fischart	Länge (cm)	Höhe (cm)	Breite* (cm)
Bachforelle	30	6	3
Bachforelle	40	8	4
Bachforelle	50	10	5
Äsche	40	9	5
Äsche	50	11	6
Aitel	40	8	5
Aitel	50	11	6
Aalrutte	50	7	7
Aalrutte	60	8	8
Barbe	60	11	7
Brachse	50	15	5
Hecht	60	8	6
Hecht	90	12	8
Huchen	80	13	10
Huchen	90	14	12
Huchen	100	16	12
Huchen	120	19	14
Seeforelle	90	20	11
Wels	90	14	13
Wels	120	23	22
Wels	150	31	30
Perlfisch	70	13	7
*da die meisten Fische außerhalb der Laichzeit vermessen wurden, sind die Fischbreiten je nach Art zur Laichzeit zumindest ein bis mehrere cm größer anzunehmen.			

2.3 Technische Grundlagen

Im Laufe der Geschichte haben sich viele unterschiedliche Arten von Fischaufstiegsanlagen etabliert. Eine übergeordnete Einteilung der Bautypen erfolgt in die Kategorien ‚Naturnahe‘ und ‚Technische‘ Typen sowie Sonderformen. Die Wahl der am besten geeigneten Bauform unterscheidet sich von Projekt zu Projekt und ist von vielen Faktoren abhängig. Neben der zu überwindenden Höhendifferenz, dem vorhandenen Platzangebot und den vorherrschenden Abflussbedingungen,

spielen auch die ökologischen Erfordernisse, vor allem die Fischregion und das fischökologische Leitbild eine übergeordnete Rolle. Dem gegenüber stehen die wirtschaftlichen Aspekte wie Baukosten, Wartungs- und Instandhaltungsaufwand sowie die technische als auch die rechtliche Durchführbarkeit.

Der Leitfaden des BMLFUW beschränkt sich hierbei auf wenige empfohlene Typen und begründet sich darin, dass sich andere FAH-Typen in der Vergangenheit nicht bewährt hätten, wobei hier speziell der Denilpass, wie auch die im DWA-Merkblatt 509 (DWA 2010) beschriebene Variante des konventionellen Beckenpasses als Beispiele angeführt werden. Die zukünftige Aufnahme von aktuellen oder neuen Entwicklungen sowie von Sonderformen für spezielle Gewässertypen wird unter der Voraussetzung des Nachweises der Funktionsfähigkeit für möglich befunden. Die derzeit vom österreichischen Leitfaden als aktueller Stand der Technik empfohlenen Bautypen sind folgende (BMLFUW 2012):

- ⇒ Gewässertypisches Umgehungsgerinne
- ⇒ Naturnaher Beckenpass
- ⇒ Vertical Slot Schlitzpass
- ⇒ Aufgelöste Sohlrampe oder Teilsohlrampe

Unabhängig davon wird an anderer Stelle aber auch der Planung und der Ausführung von anderen Bautypen ausdrücklich nicht widersprochen:

„Der Leitfaden schließt individuelle Lösungen in Abhängigkeit von den lokalen Gegebenheiten nicht aus, sofern die grundsätzlichen Ziele und Anforderungen bzgl. Funktionsfähigkeit [...] beachtet werden.“ (BMLFUW 2012)

Für die Etablierung von alternativen Bautypen sind positive Funktionsnachweise an mehreren Standorten erforderlich. Gegenwärtig befinden sich unterschiedliche Bautypen (Fischaufstiegsschnecke, Lift- und Schleusensysteme sowie modifizierte Denilvarianten) in Beprobung. Nachfolgend erfolgt jeweils eine kurze Beschreibung einiger gebräuchlicher FAH-Bautypen, wie sie in aktueller Literatur und bereits umgesetzten Projekten zu finden sind. Die Praxis zeigt, dass häufig

abgewandelte Varianten eines Bautyps oder vorwiegend auch Kombinationen aus verschiedenen Bautypen umgesetzt werden.

2.3.1 *Naturnahe Typen der Fischaufstiegshilfe*

Bei diesen Bautypen liegt der Fokus auf einer möglichst natürlichen oder naturnahen Gestaltung. So werden vorwiegend Baumaterialien verwendet, die auch im unberührten Gewässer zu finden sind. Zusätzlich wird etwa bei der Sohlgestaltung die Bildung von Kolken und Furten nachempfunden oder gewässertypische Habitate durch entsprechende Vegetation geschaffen und somit das ökologische Erscheinungsbild der Fischaufstiegshilfe an die in der Natur vorherrschenden Gegebenheiten angelehnt. Im österreichischen Leitfaden werden die folgenden drei naturnahen Bautypen empfohlen (BMLFUW 2012):

a) Gewässertypisches Umgehungsgerinne:

Im Gegensatz zu den meisten anderen Bautypen, weist das Umgehungsgerinne keine klar erkennbaren Beckenstrukturen auf, sondern wird als eine Art Seitenarm des Gewässers um das bestehende Querbauwerk herumgeführt. Da das Umgehungsgerinne nicht nur zur Herstellung der Durchgängigkeit dient, sondern im Optimalfall zusätzlich als neu geschaffener Lebensraum für verschiedene Arten Habitate und Laichplätze bietet, soll die Gestaltung möglichst naturnahe erfolgen (BMLFUW 2012). So ist neben der Vegetationsgestaltung auch die Ausbildung von Kolken und Furten vorzusehen und das Ausgleichsgefälle möglichst an die vorhandene Sohlneigung im bestehenden Gewässer anzugleichen. Durch diese, im Verhältnis zu anderen FAH-Typen, sehr gering geneigte Bauform und die naturnahe Gestaltung des Laufes, etwa in mäandrierender Form, benötigt dieser Bautyp entsprechend große Lauflängen, um die Höhendifferenzen abzubauen. Dies erfordert einen erheblichen Platzbedarf, welcher zugleich den größten Nachteil dieser Bauform darstellt und in vielen beengten Projektgebieten die Ausführung schlichtweg unmöglich macht. Abbildung 3 zeigt ein Ausführungsbeispiel eines gewässertypischen Umgehungsgerinnes an der Tauber bei Igersheim in Deutschland.



Abbildung 3: Umgehungsgerinne an der Tauber (Walter+Partner GbR 2004)

b) Aufgelöste Sohlrampe oder Teilsohlrampe:

Die sogenannte aufgelöste Sohlrampe besteht aus aufeinanderfolgend angeordneten Querriegeln mit dazwischenliegenden Kolkausbildungen, wobei die kontinuierliche Aneinanderreihung dieser Elemente eine Beckenstruktur bildet und damit strömungsberuhigte Bereiche für flussaufwärts wandernde Fische schafft. Die Querriegel, welche meist mit Wasserbausteinen hergestellt werden, weisen teils mehrere Übergänge mit Sohlanschluss auf und müssen so ausgelegt werden, dass auch bei Niedrigwasser ein entsprechend großer Wanderkorridor zur Verfügung steht. Aufgrund der über die gesamte Flussbreite reichenden Querriegel und der damit verbundenen Tatsache, dass sowohl Hochwässer als auch Treibgut über die Sohlrampe abgeführt werden müssen, wird vom österreichischen Leitfaden zum Bau von FAHs empfohlen, die Querriegel zu den Ufern hin ansteigend auszubilden, um auch im Hochwasserfall die Passierbarkeit zu gewährleisten. Zur Vermeidung von Verlegungen der Becken durch Geschiebeeintrag werden die Kolke bereits im Vorhinein mit entsprechend tiefer liegender Sohle ausgebildet (BMLFUW 2012).

Die Teilsohlrampe unterscheidet sich darin, dass sie nicht über die gesamte Flussbreite reicht, sondern nur einen Teilbereich überspannt. Dadurch ist es möglich, Hochwässer, Treibgut sowie Geschiebe über den oder die verbleibenden Bereiche abzuführen, wodurch die Teilsohlrampe von dieser Dynamik unabhängig betrieben werden kann. Sie wird mit einer entsprechenden Mindestdotations beaufschlagt und die Übergänge sowie Beckendimensionen auf diese hin bemessen. Abbildung 4 zeigt ein Ausführungsbeispiel einer aufgelösten Sohlrampe mit zu den Ufern hin ansteigenden Querriegeln.



Abbildung 4: Ausführungsbeispiel Aufgelöste Sohlrampe (AG-FAH 2011)

c) Naturnaher Beckenpass (‘Tümpelpass’):

Das Funktionsprinzip des naturnahen Beckenpasses ähnelt dem der aufgelösten Sohlrampe. Auch hier entsteht eine Beckenstruktur durch die Aufeinanderfolge von Querriegeln und Kolken. Der Beckenpass erstreckt sich allerdings nicht wie die Sohlrampe über die Breite des Gewässers selbst, sondern wird im Nebenschluss zur Barriere (Wehranlage, Absturzbauwerk oder ähnliches) errichtet. Bei der Dimensionierung sind neben den erforderlichen Beckenabmessungen wie Länge, Breite und Tiefe, vor allem auch die Beckenübergänge so zu bemessen, dass ein ausreichend großer Wasserpolster gegeben ist. Die Übergänge sollen möglichst trapezförmig ausgeführt werden, wobei im untersten Bereich jedenfalls die Mindestschlitzweite eingehalten werden muss. Um den Sohlanschluss sicherzustellen, wird die Sohle an den

Beckenübergängen angehoben, was gleichzeitig die Unterscheidung zu einem Schlitzpass darstellt. (BMLFUW 2012). Im Vergleich zum Technischen Beckenpass unterscheidet sich die naturnahe Variante meist nur durch die Wahl von natürlichen Baustoffen, diese bietet aber praktisch kaum Vorteile in der Habitatqualität. Nachteil dieser Bauform sind dagegen die möglichen Ungenauigkeiten in der Ausbildung der Beckenübergänge aufgrund der nicht exakt geformten Wasserbausteine, welche zu einer erschwerten Einhaltung der Mindestabmessung bei der baulichen Umsetzung, verbunden mit eventuellen Beeinträchtigungen der Passierbarkeit, führen können (Seidl 2018). Abbildung 5 zeigt ein Ausführungsbeispiel eines naturnahen Beckenpasses mit Querriegeln aus Wasserbausteinen am Ketzerbach in Deutschland.



Abbildung 5: Naturnaher Beckenpass am Ketzerbach/DE (Handrick 2016)

2.3.2 Technische Typen der Fischaufstiegshilfe

Bei den technischen Typen rückt das naturnahe Erscheinungsbild in den Hintergrund. Die Priorität wird hier hauptsächlich auf die Funktionalität sowie ökonomische Aspekte gelegt. Die Schaffung von Habitaten wird hierbei nicht angestrebt, der Zweck der Fischmigration soll jedoch bestmöglich erfüllt und diese beispielsweise durch optimiertes Strömungsverhalten attraktiviert werden. Aus den häufig

verwendeten Baumaterialien Beton oder Stahl sind entsprechende Fischaufstiege aus teils andernorts vorgefertigten Elementen schnell und exakt herzustellen. Der österreichische Leitfaden nennt ausschließlich den Schlitzpass als empfohlenen Bautyp und verweist auf die eingeschränkte Funktionalität anderer technischer Bautypen.

d) Vertical Slot Schlitzpass (VS):

Beim Schlitzpass werden die Zwischenwände durch zwei voneinander getrennte Elemente definiert. Dadurch entsteht ein einseitiger, über die gesamte Höhe definierter Schlitz, der die Funktionalität auch bei unterschiedlichen Wasserführungen sicherstellen soll. Die Gestaltung, Dimensionierung und Positionierung des Hakenelementes auf der einen, sowie des Umlenkblocks auf der anderen Seite des Schlitzes sind ausschlaggebend für das Strömungsverhalten. Ziel ist hierbei eine Umlenkung der Hauptströmungsrichtung hin zur Beckenmitte, um die Energieumwandlung im gesamten Beckeninhalt zu gewährleisten. Im österreichischen Leitfaden finden sich jedoch keinerlei Bemessungsvorschläge für die funktionale Dimensionierung dieser maßgebenden Elemente, welche notwendig ist, um den hydraulischen Kurzschluss zu vermeiden. Da die Sohle des Schlitzpasses, im Gegensatz zu beckenartigen Bautypen, grundsätzlich ein Einheitsgefälle aufweist, besteht im Falle der Notdotation ein letales Risiko für große Fische aufgrund zu gering verbleibender Wassertiefen im Schlitzpass. Weiters ist für die erleichterte Migration von bodennahen Wanderern oder schwimmschwachen Fischen jedenfalls die Einbringung von rauem Sohlsubstrat zur Senkung der sohnahen Fließgeschwindigkeiten vorzusehen (BMLFUW 2012). Abbildung 6 zeigt eine Fischaufstiegshilfe als Vertical Slot Schlitzpass an der Mur in Kalsdorf bei Graz. Gut zu erkennen ist hierbei der funktionierende Umlenkeffekt der Strömung.



Abbildung 6: Vertical Slot Schlitzpass an der Mur (eigene Aufnahme)

e) Konventioneller Beckenpass:

Der konventionelle Beckenpass ist einer der ältesten Konstruktionstypen und überwiegend im deutschen Raum zu finden. Das Gerinne wird hier analog zum Schlitzpass meist in Betonbauweise gefertigt, auch die Sohle weist ein Einheitsgefälle auf und muss mit rauem Sohlsubstrat bedeckt werden. Die

Trennwände werden aus Beton oder Holzeinbauten hergestellt und verfügen über einen Kronenausschnitt, welcher über den Wasserspiegel hinausragt, sowie ein tieferlegendes Schlupfloch, welches bis auf Sohlniveau reichen soll, um auch bodennahen Wanderern die Passage zu ermöglichen. Zur Energie-dissipation im Beckeninhalt werden die Schlupflöcher alternierend angeordnet. Aufgrund der geringen Abmessungen der Schlupflöcher und der damit verbundenen niedrigen Abflussleistung, ist oft eine Bypassleitung zur Erreichung der notwendigen Leitstromdotation erforderlich. Weiters besteht ein großer Nachteil dieses Bautyps in der erhöhten Verklausungsgefahr der Öffnungen, wodurch ein hoher Wartungsaufwand und eine eingeschränkte Funktionsfähigkeit hervorgehen kann (DWA 2010). In Abbildung 7 wird die Bauweise des konventionellen Beckenpasses inklusive Hauptströmung und möglicher Wanderwege dargestellt. Die wichtigsten Erkennungsmerkmale sind hierbei das einheitliche Sohlgefälle sowie Schlupflöcher in den Trennwänden.

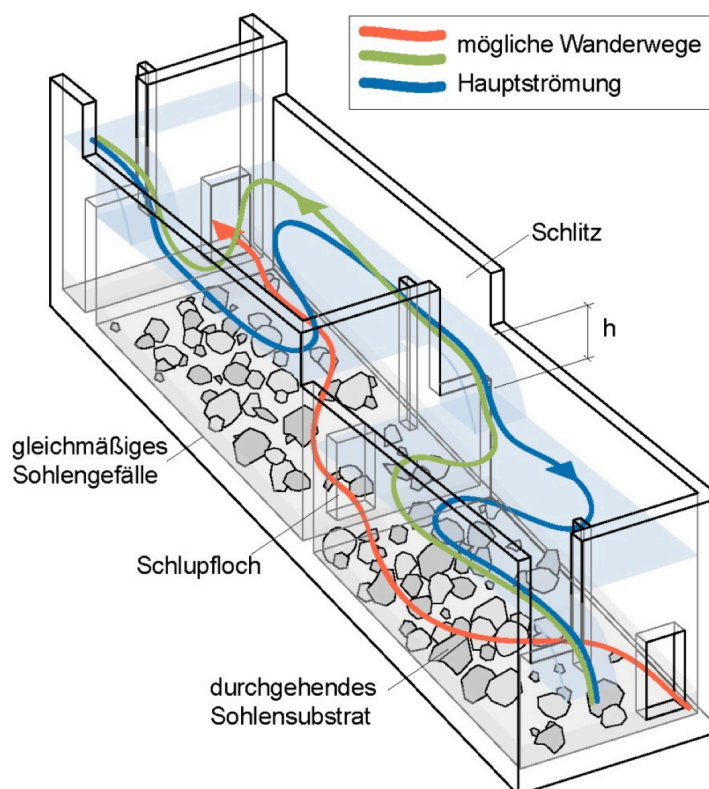


Abbildung 7: Konventioneller Beckenpass, schematisch (DWA 2010)

f) Technischer Beckenpass (TB):

Der Beckenpass weicht von den anderen technischen Bautypen in mehreren Punkten erheblich ab. Die Sohle wird hierbei nicht im Einheitsgefälle hergestellt, sondern analog zum naturnahen Beckenpass durch Ausbildung von Tiefstellen (Becken) gestaltet. Dies kann auch dazu beitragen, das Überleben von sich in der Fischaufstiegshilfe befindlichen Fischen bei einer Unterbindung der Wasserzufuhr zu sichern (Seidl 2018). In einem betonierten Gerinne ist jedenfalls auch auf die Beckenstruktur und die Bildung von Kolk-tiefen, durch Einbringung von rauem Sohlsubstrat zu achten. Die technische Variante unterscheidet sich vom naturnahen Beckenpass hauptsächlich in der Ausführung der Beckenübergänge. Dessen Schlitze werden ebenfalls, wie beim naturnahen Beckenpass, alternierend angeordnet und stellen somit eine deutliche Unterscheidung zum Schlitzpass dar. Durch die durchgängigen Vertikalschlitze werden auch die Nachteile des konventionellen Beckenpasses entschärft. Die in der naturnahen Ausführung möglicherweise auftretenden Ungenauigkeiten in den Übergängen aufgrund der unregelmäßigen geometrischen Formen der verwendeten Wasserbausteine werden durch die exakte Ausführung des Beckenüberganges zum Beispiel in Beton- oder Stahlbauweise vermieden. So kann etwa die Einhaltung der geforderten Mindestschlitzweite konkret kontrolliert und gewährleistet werden. Die im österreichischen Leitfaden angeführte Schlitzweite für den naturnahen Beckenpass bzw. das Trapez mit der dreifachen Fischbreite unten und der sechsfachen Fischbreite oben, resultiert aus den zu erwartenden Bauungenauigkeiten beim Manipulieren mit Wasserbausteinen. Diesen materialbedingten Unregelmäßigkeiten im Zuge der Ausführung, wird durch die betonierte Bauweise weitestgehend entgegengewirkt und eine genaue Ausführung analog zur Schlitzweite beim Schlitzpass gewährleistet. Die technische Ausführung der Übergänge bietet zudem die Möglichkeit einer verringerten Dotation bei deutlich moderateren Strömungsverhältnissen (Seidl 2018). Durch die verschiedenen Möglichkeiten in der Ausführung, etwa mit Wasserbausteinen oder in natürlichen Gerinnen, gibt es eine Vielzahl unterschiedlicher Varianten mit fließendem Übergang zum naturnahen Beckenpass. Ausführungsbeispiele für unterschiedliche Varianten in einem Betongerinne beziehungsweise in einem natürlichem Gerinne werden in Abbildung 8 und Abbildung 9 dargestellt. Gut erkennbar ist die Strömungslenkung aufgrund der alternierenden Schlitze.



Abbildung 8: TB, Betongerinne an der Feistritz (eigene Aufnahme)



Abbildung 9: TB, naturnahes Gerinne am Lobenbach (flusslauf e.U. 2017)

g) Denil Fischpass:

Eine weitere technische Variante bildet der Denil Fischpass. Dieser wurde bereits zu Beginn des 20. Jahrhunderts vorwiegend zum Zweck der Migration von großwüchsigen Salmoniden entwickelt. Da die Passierbarkeit heutzutage allerdings auch für andere Arten gewährleistet werden muss, wurde eine modifizierte Variante des Denilpasses mit Sohlsubstrateintrag entwickelt, womit hydraulische Störfelder entschärft und bereits nachweisliche Ergebnisse für den Aufstieg von sohlorientierten Kleinfischen erzielt werden konnten (Zach 2018). Das Funktionsprinzip unterscheidet sich hierbei generell von den bisher erwähnten FAH-Typen. Statt der sonst üblichen Beckenstruktur, basiert der Denilpass auf einem geradlinigen Kanal mit Querwänden in kurzen Abständen, zwischen denen sich Rückströmungen bilden und somit die Fließgeschwindigkeiten im sohl nahen Bereich bremsen. Dies verleiht ihm auch die geläufige Bezeichnung ‚Gegenstrompass‘ (DWA 2010). Die Ausführung kann in Stahl, Holz, Kunststoff oder Beton erfolgen. Durch die steile Ausführung und den damit geringen Platzbedarf sowie die Möglichkeit zur Vorfertigung der Elemente ergeben sich die Vorteile einer platzsparenden, kostengünstigen und schnellen Errichtung. Abbildung 10 zeigt einen modifizierten Denilpass am Hirschbach bei Ratten. Direkt danebenliegend wurde hier ein Technischer Beckenpass in Stahlbauweise umgesetzt, um die beiden Bautypen mittels Ergebnissen aus biologischen Monitorings vergleichen zu können.



Abbildung 10: Modifizierter Denilpass (links) neben einem TB (rechts) am Hirschbach/Ratten (eigene Aufnahme)

2.3.3 Automatisierte Fischaufstiegshilfen

Weiters ist in Fällen beengter Platzverhältnisse oder anderer schwieriger Rahmenbedingungen die Ausführung von technischen Sonderformen denkbar. Automatisierte Bautypen sind mit einer Steuerung versehen und verhelfen aufstiegswilligen Fischen durch mechanische Unterstützung ins Oberwasser. Zusätzlich kommt es bei Liften und Schnecken zum Aufstiegszwang, d.h. sobald der Fisch in das System einschwimmt und die Aufstiegsphase beginnt, hat er keine Möglichkeit mehr umzukehren. Auch die Möglichkeit des Fischabstiegs ist bei einigen dieser Systeme im Regelfall nicht oder nur eingeschränkt gegeben. Der Vorteil dieser Systeme ist der geringe Platzbedarf durch teilweise senkrechte Anordnung. Diese Sonderformen sind im Allgemeinen allerdings mit einem erhöhten Betriebs- sowie Wartungsaufwand verbunden.

h) Fischaufstiegsschnecke (FAS):

Die Fischaufstiegsschnecke beruht auf dem Funktionsprinzip der archimedischen Schraube und besteht aus einer einfachen Förderschnecke, welche mit dem Mantelrohr fest verbunden ist, um Verletzungen der darin gehobenen Fische zu vermeiden. Die Variante der Doppelrohrschnecke bietet zusätzlich die Möglichkeit des Fischabstiegs, wurde derzeit allerdings nur vereinzelt umgesetzt. Die Fischaufstiegsschnecke bedarf damit allerdings auch externer Energie um Wasser und Fische fördern zu können (Ratschan et al. 2017). Somit ist jedenfalls für das Antriebssystem ein entsprechender Betriebs- und Wartungsaufwand notwendig. Der Vorteil dieses Systems liegt in der platzsparenden Ausführung mit großer Steigung. Abbildung 11 zeigt den schematischen Aufbau einer FAS.

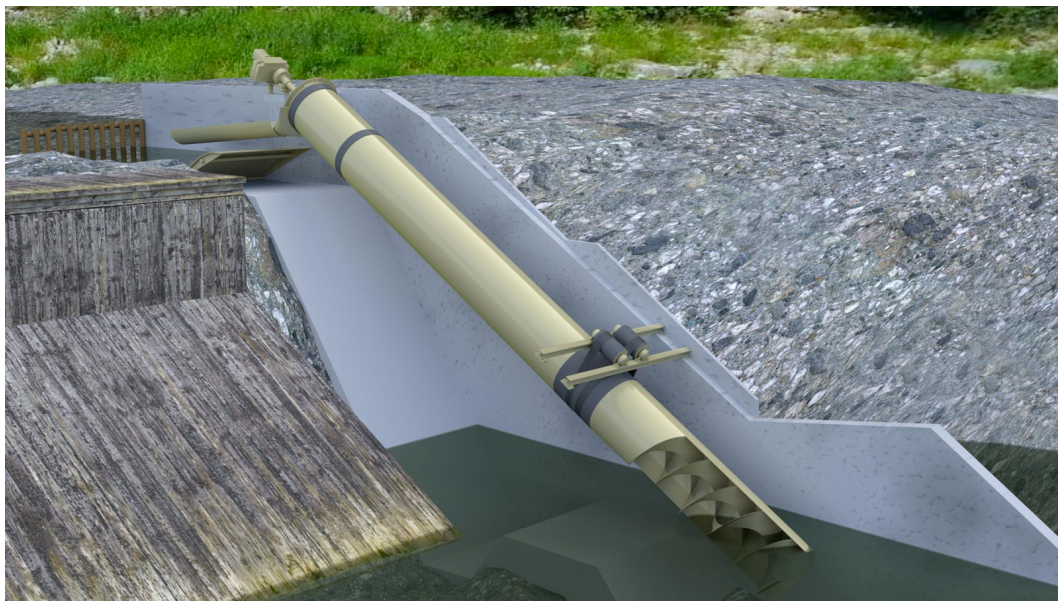


Abbildung 11: Schema Fischaufstiegsschnecke (Hydro-Connect GmbH 2017)

Die Umsetzung einer entsprechenden Lockstromdotations, die ein Einschwimmen in die Fischaufstiegsschnecke attraktivieren soll, kann sich je nach verwendetem System als schwierig erweisen. Abbildung 12 zeigt den Einstiegsbereich einer FAS an der Feistritz mit zusätzlicher Lockstromdotations über ein Kanalgrundrohr.



Abbildung 12: Einstieg einer FAS an der Feistritz mit zusätzlicher Leitstromdotation (KG-Rohr)
(eigene Aufnahme)

i) Fischeschleuse:

Die Fischeschleuse bietet aufgrund einer möglichen senkrechten Anordnung einen großen Vorteil im Platzbedarf. Der Aufstiegsschacht besteht aus einer oder mehreren Schleusenammern und reicht vom Unterwasser zum Oberwasser. Analog zum Funktionsprinzip einer Schiffsschleuse ist dieses System in der sogenannten Einschwimmphase nur mit dem Unterwasser verbunden und vom Oberwasser getrennt. In der darauffolgenden Aufstiegsphase wird die Verbindung zum Unterwasser geschlossen und die Kammer durch eine Zuleitung bis auf Oberwasserniveau gefüllt. Die Verbindung zum Oberwasser

wird geöffnet, die Fische können das System verlassen und anschließend wird der Wasserstand in der Schleuse wieder abgesenkt um den nächsten Zyklus im voreingestellten Intervall zu starten. Je nach Intervalldauer ist auch ein Fischabstieg im Zuge der Absenkphase möglich (Sackel 2014). Weitere alternative Schleusensysteme mit vergleichbarem Funktionsprinzip bilden etwa die ‚FISHCON‘-Schleuse (Ausführungsbeispiel siehe Abbildung 14), die Druckkammerfischschleuse oder die zirkulierende Fischschleuse. Abbildung 13 zeigt das Funktionsprinzip einer Fischschleuse mit den für den Aufstieg erforderlichen Ablaufzyklen.

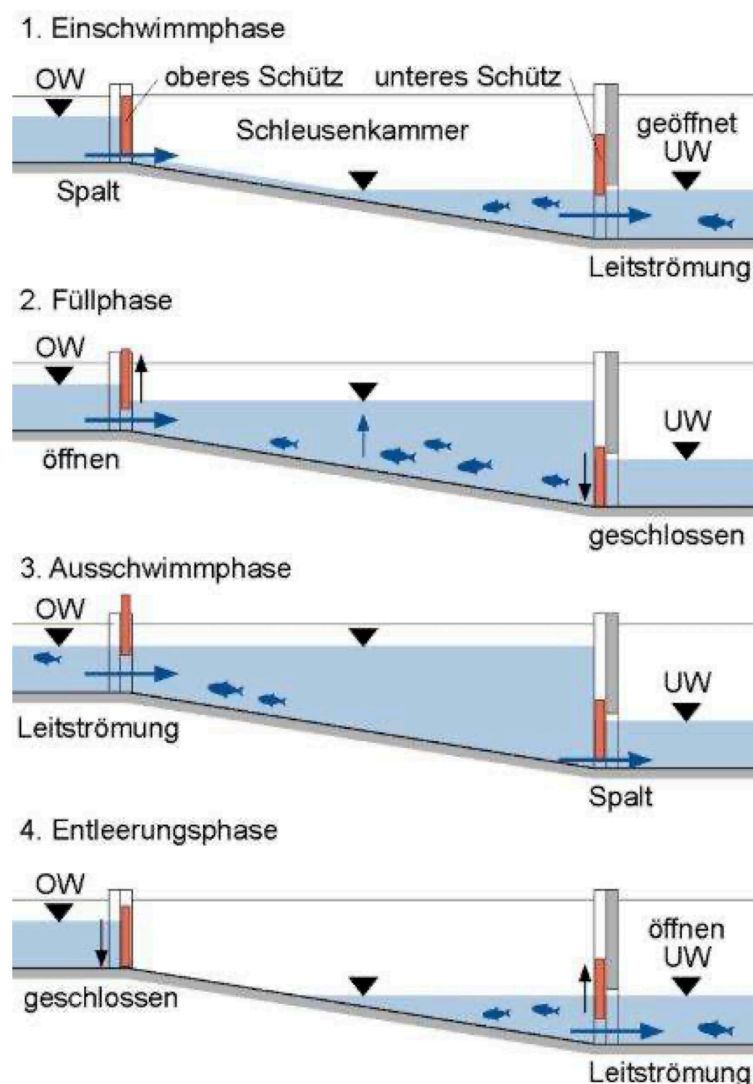


Abbildung 13: Ablaufzyklen einer Fischschleuse (DWA 2010)



Abbildung 14: Ausführung ‚FISHCON‘-Schleuse (FISHCON GmbH 2019)

j) Fischlift:

Auch der Fischlift besteht aus einem vertikalen Schacht, der Ober- und Unterwasser miteinander verbindet. Das Funktionsprinzip ist ähnlich dem der Fischschleuse und umfasst die gleichen Ablaufzyklen. Im Unterschied zur Fischschleuse besteht hier ein Aufstiegszwang durch eine Reusenordnung und ein Transportelement im Vertikalschacht. Die Fische werden im zyklischen Ablauf in einem Sammelkorb konzentriert, in diesem automatisch nach oben befördert und ins Oberwasser entlassen. In der Absenkphase, in der (z.B. beim kombinierten Fischliftsystem) gleichzeitig ein Fischabstieg möglich ist, wird der Sammelkorb im Liftschacht wieder abgesenkt und auf Höhe des Unterwasserspiegels durch Öffnen des Unterwasserschützes wieder entleert (Seidl, Parthl 2018). Das Heben und Senken des mit Schwimmkörpern ausgestatteten Sammelkorbs kann in der Regel durch Befüllen des Liftschachts beziehungsweise durch Absenken des Wasserspiegels erfolgen. Bei geringem Platzbedarf ist dieses System auch für die Überwindung großer Höhendifferenzen geeignet. Abbildung 15 zeigt einen Fischlift am Safenbach in Bad Blumau mit den zugehörigen Bauteilen wie etwa dem Transportkorb.

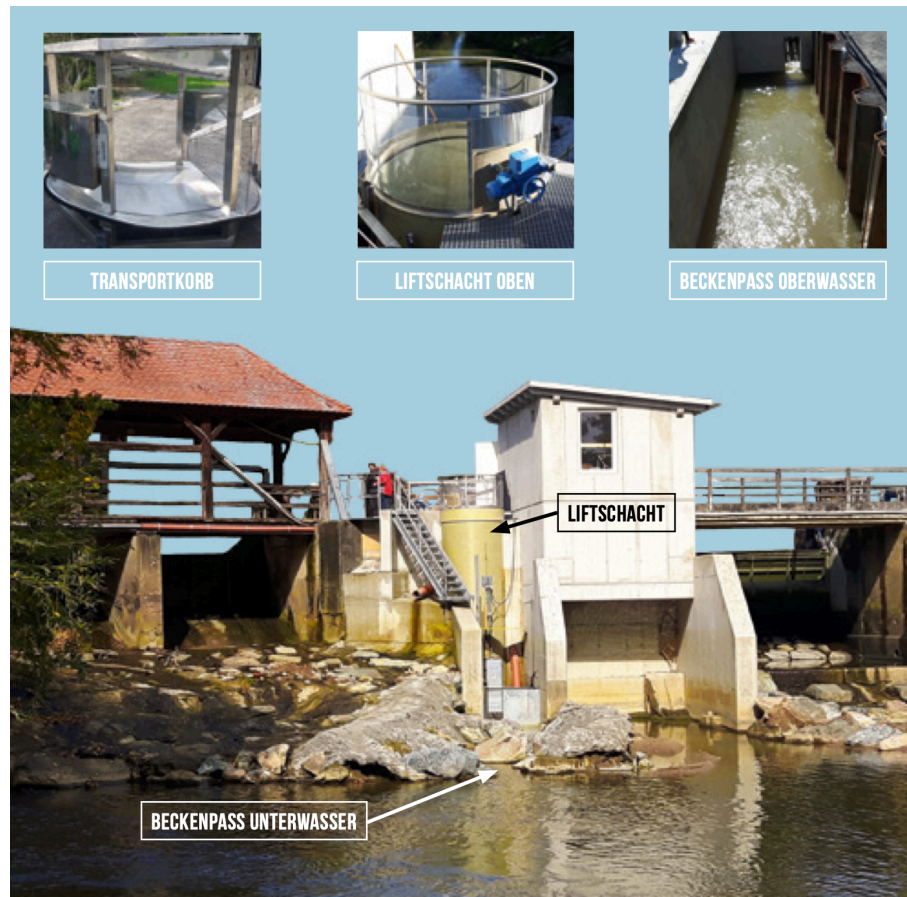


Abbildung 15: Fischlift am Safenbach (Bad Blumau) (Seidl, Parthl 2018)

2.4 Hydraulische Grundlagen

Wie bereits erläutert ist die Funktionsfähigkeit einer Fischeaufstiegshilfe maßgeblich von den hydraulischen Bedingungen abhängig. So dürfen etwa die Fließgeschwindigkeiten nur so stark ausgeprägt sein, dass auch schwimmschwache Fische diese Bereiche passieren können. Zudem ist aber auch darauf zu achten, dass, speziell für rheophile Fischarten, eine ausreichende Lockströmung vorherrscht, um den Einstieg in die Fischeaufstiegshilfe auffindbar zu machen. Die hydraulischen Bedingungen innerhalb der Fischeaufstiegshilfe können durch deren bauliche Gestaltung beeinflusst werden. So kommt also der optimalen Dimensionierung der Schlitze, der Beckenübergänge, wie auch der Beckengröße an sich große Bedeutung zu. Grundvoraussetzung hierfür ist das Verständnis für die verschiedenen hydraulischen Vorgänge und deren Abhängigkeit zu den baulichen Gegebenheiten sowie die Auswirkungen eventueller Adaptionen.

2.4.1 Abflusszustand

Einen wichtigen Anhaltspunkt zur Beurteilung des hydraulischen Abflusszustands liefert die Froude'sche Zahl (Fr). Diese Verhältniszahl wird über die Fließgeschwindigkeit (v), die Fließtiefe (h) und die Erdbeschleunigung (g) definiert mit:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g * h}} \quad (1)$$

Hierbei bildet eine Froude'sche Zahl von 1,0 genau den Grenzwert zwischen den beiden hydraulischen Fließzuständen. Während ein Wert über 1,0 den Zustand ‚Schießen‘ abbildet, wird in Schlitzpässen eine Froude'sche Zahl unter 1,0 und damit der Zustand ‚Strömen‘ erwartet. Dieser wird dadurch definiert, dass die Fließgeschwindigkeit geringer ist als die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Oberflächenwellen. Die Froude'sche Zahl kann damit als erster Anhaltspunkt zum Vergleich von unterschiedlichen Abflusssituationen herangezogen werden. Hierbei entspricht ein niedrigerer Wert grundsätzlich moderateren Fließgeschwindigkeiten in der Fischaufstiegshilfe. Zusätzlich sind aber auch weitere Parameter zur vollständigen Beurteilung der hydraulischen Strömungsverhältnisse zu beachten.

2.4.2 Strömungsdynamik

Die räumliche Dynamik einer Strömung lässt sich mithilfe von Geschwindigkeitskomponenten möglichst einfach dreidimensional darstellen. Die X-Komponente entspricht hierbei der Fließgeschwindigkeit in Richtung der Hauptströmung, im Falle von Schlitzpässen also entlang der Gerinneachse. Die Y-Komponente wird orthogonal dazu, also quer zum Gerinne gemessen, während die Z-Komponente die vertikale Geschwindigkeit in Tiefenrichtung darstellt. Aus diesen drei Werten ergeben sich dreidimensionale Geschwindigkeitsfelder in jedem Betrachtungspunkt. Dadurch lassen sich die jeweiligen Geschwindigkeitskomponenten V_x , V_y sowie V_z zwischen unterschiedlichen Modellvarianten anschaulich vergleichen und geben einen weiteren Anhaltspunkt zur Bewertung der hydraulischen Verhältnisse.

Zur Beurteilung des vollständigen Geschwindigkeitsfeldes, ist die Bildung eines resultierenden Geschwindigkeitsvektors erforderlich. Dieser wird aus der Vektorsumme der drei Geschwindigkeitskomponenten ermittelt. Hierbei gibt es zwei unterschiedliche Herangehensweisen, welche sich letztlich in der Mittelung der Messdaten unterscheiden. Die Resultierende V_{Mag} wird für jeden einzelnen Messdatensatz ($i = 1, 2, \dots, n$) aus den gemessenen Komponenten (V_x, V_y, V_z) ermittelt und anschließend das arithmetische Mittel aus allen Ergebnissen gebildet:

$$V_{Mag} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sqrt{V_{x_i}^2 + V_{y_i}^2 + V_{z_i}^2} \quad (2)$$

Die Resultierende V_{Avg} hingegen wird aus den bereits zuvor aus allen Messdatensätzen ($i = 1, 2, \dots, n$) gemittelten Geschwindigkeitskomponenten (V_x, V_y, V_z) gebildet. Durch die Mittelung der einzelnen Komponenten wird eine höhere Genauigkeit erreicht, weshalb diese Variante der Resultierendenbildung bevorzugt zur Anwendung kommt:

$$V_{Avg} = \sqrt{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_{x_i}\right)^2 + \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_{y_i}\right)^2 + \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_{z_i}\right)^2} \quad (3)$$

Neben der Etablierung moderater Fließgeschwindigkeiten ist auch die Vermeidung von turbulenten Strömungen zur verbesserten Passierbarkeit anzustreben. Diese werden meist über die turbulente kinetische Energie (TKE) oder über die vorhandene Leistungsdichte der Energiedissipation in den Becken abgeschätzt. Im Merkblatt DWA-M 509 (DWA 2010), welches unter anderem als Grundlage für die Entwicklung des österreichischen Leitfadens diente, wird der Turbulenzgrad über die spezifische Leistungsdichte abgebildet. Diese entspricht dem Energieeintrag des Zuflusses - ermittelt aus dem Produkt des Durchflusses (Q), der Wasserspiegeldifferenz (Δh), der Erdbeschleunigung (g) sowie der Dichte des Wassers (ρ_w) - im Verhältnis zum Wasservolumen des jeweiligen Beckens (V), in

welchem die Energie möglichst vollständig abgebaut werden sollte, um einen zusätzlichen Energieeintrag in das nachfolgende Becken zu verhindern. Die Leistungsdichte sollte aber ein je nach Fischregion festgelegtes Maß nicht übersteigen, um die Orientierung und die Passierbarkeit für Fische nicht zu erschweren (DWA 2010). Die Berechnung der Leistungsdichte erfolgt für beckenartige Fischaufstiegshilfen nach dem DWA-Regelwerk mit folgender Formel:

$$p_D = \rho_w * g * Q * \frac{\Delta h}{V} \quad (4)$$

Eine weitere gewählte Variante zur Darstellung der Turbulenz liegt in der Ermittlung der turbulenten kinetischen Energie (TKE), welche für jeden Messpunkt separat berechnet und dargestellt werden kann. So ist im Gegensatz zur Abschätzung über die Leistungsdichte im gesamten Becken, auch eine räumliche Darstellung von Turbulenzen innerhalb des Beckens möglich. Die Berechnung erfolgt hierbei zuerst über die Bildung der quadratischen Mittelwerte („root-mean-square“) aus allen Messdatensätze ($i = 1, 2, \dots, n$), für die einzelnen Geschwindigkeitskomponenten ($V_{x_{RMS}}', V_{y_{RMS}}', V_{z_{RMS}}'$), jeweils wie folgt (Baki et al. 2015):

$$V_{x_{RMS}}' = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_{x_i}^2}; V_{y_{RMS}}' = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_{y_i}^2}; V_{z_{RMS}}' = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_{z_i}^2} \quad (5)$$

Die somit erhaltenen RMS-Werte der drei Geschwindigkeitskomponenten werden anschließend jeweils quadriert, summiert und durch zwei geteilt, um den Wert der turbulenten kinetischen Energie (K) zu erhalten (Baki et al. 2015):

$$K (TKE) = \frac{1}{2} \left[(V_{x_{RMS}}')^2 + (V_{y_{RMS}}')^2 + (V_{z_{RMS}}')^2 \right] \quad (6)$$

2.4.3 Hydraulischer Überfall

Neben der Untersuchung der Geschwindigkeitsverteilungen und Turbulenzen in den einzelnen Becken, kommt auch den Übergängen an sich höchste Bedeutung

zu, da die Dimensionierung der Beckenübergänge sowohl die Fließgeschwindigkeiten als auch den Energieeintrag und die Turbulenz stark beeinflusst. Die Übergänge stellen aufgrund des verringerten Querschnitts im Schlitz grundsätzlich die Bereiche mit den höchsten auftretenden Fließgeschwindigkeiten in Schlitzpässen dar und sind somit maßgebend für die Funktionsfähigkeit der gesamten Fischaufstiegshilfe. Durch die Notwendigkeit zur Überwindung der Wasserspiegeldifferenz bildet sich der Übergang zwischen den Becken in Form eines hydraulischen Überfalls aus. Dieser hydraulische Vorgang kann, je nach vorherrschenden Absturzbedingungen, grundsätzlich in zwei Arten unterteilt werden.

Der vollkommene Überfall wird über das Erreichen der Grenztiefe im Überfall und den damit verbundenen Fließwechsel definiert. Dies ist gleichzusetzen mit einer Froude'schen Zahl von 1,0 an dieser Stelle und damit dem Erreichen des Grenzzustandes zwischen strömendem und schießendem Abfluss (Bollrich 2007). In diesem Fall bleibt das Oberwasser unbeeinflusst vom Unterwasser, wodurch auch die Abflussberechnung nur von der oberwasserseitigen Überfallhöhe (H) sowie geometrischen Faktoren (Überfallbreite B und Überfallbeiwert μ) abhängig ist. Der Überfallbeiwert kann je nach Form mit verschiedenen Berechnungsansätzen abgeschätzt oder über Formtabellen aus Modellversuchen abgeleitet werden. Die Berechnung des Abflusses (Q) erfolgt anschließend mittels der Formel von Poleni:

$$Q = \frac{2}{3} * \mu * B * \sqrt{2 * g} * H^{3/2} \quad (7)$$

Der unvollkommene Überfall, wie er auch in Schlitz- und Beckenpässen auftritt, weist hingegen keinen Fließwechsel auf. Der strömende Abfluss setzt sich vom Oberwasser über den Überfall bis ins Unterwasser fort. Dies zeigt sich in einer größeren Wassertiefe im Übergang sowie einer Froude'schen Zahl von weniger als 1,0. Das Oberwasser wird hierbei vom Unterwasserzustand beeinflusst, weshalb auch die Unterwassertiefe in die Berechnung mit einfließt. Nach DWA (2010) erfolgt deshalb die Abflussberechnung eines Überfalls in Schlitzpässen ebenso mithilfe der Formel von Poleni, allerdings unter Berücksichtigung eines abgeminderten, rückstaubeinflussten Abflussbeiwertes (μ_r), welcher aufgrund des Verhältnisses der unterwasserseitigen (h_u) zur oberwasserseitigen Wassertiefe (h_o) mithilfe eines Diagrammes ermittelt werden kann (Abbildung 16).

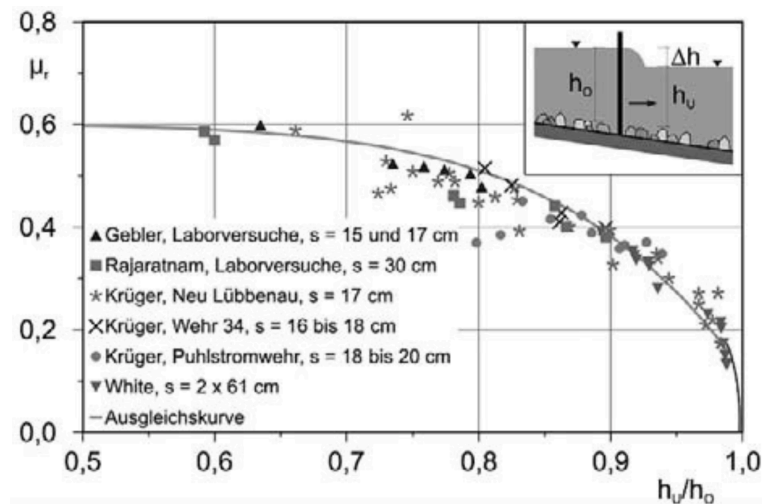


Abbildung 16: Rückstaubeinflusste Abflussbeiwerte für den VS (DWA 2010)

Die in Abbildung 16 abgebildeten Werte stammen aus Ergebnissen von Laborversuchen sowie aus Messungen an bestehenden Fischaufstiegsanlagen. Über die Ausgleichskurve, kann der rückstaubeinflusste Abflussbeiwert (μ_r) auch rechnerisch mithilfe der folgenden Formel ermittelt werden (DWA 2010):

$$\mu_r = 0,6 * \left[1 - 0,8 * \left(\frac{h_u}{h_o} \right)^{7,5} \right] \quad (8)$$

2.4.4 Hydraulische Dimensionierung von Schlitzpässen

Neben den in Kapitel 2.1.2 beschriebenen geometrischen Mindestabmessungen aufgrund der in der Fischregion vorkommenden größenbestimmenden Fischart, bestehen auch hydraulische Anforderungen an die Dimensionierung von Schlitzpässen. So werden im Leitfaden des BMLFUW primär maximale Wasserspiegeldifferenzen, ebenfalls in Abhängigkeit der Fischregion und der maßgebenden vorkommenden Fischart, im Bereich von 10 bis 20 cm festgelegt. Diese begründen sich in den Fließgeschwindigkeiten in Abstimmung mit den Schwimmkapazitäten der Fische (BMLFUW 2012). Aufgrund der gegebenen maximalen Wasserspiegeldifferenz (Δh) lässt sich aus dem zu überwindenden Gesamthöhenunterschied (h_{ges}) die erforderliche Anzahl an Becken (n) berechnen (DWA 2010):

$$n = \frac{h_{ges}}{\Delta h} - 1 \quad (9)$$

Da in den Beckenübergängen die potentielle Energie des Absturzes (ΔE_{pot}) direkt in kinetische Energie (E_{kin}) der Wassermasse (m) umgewandelt wird, lässt sich durch Gleichsetzen der beiden Energieformeln, die daraus resultierende Fließgeschwindigkeit (v) wie folgt berechnen:

$$\Delta E_{pot} = m * g * \Delta h \rightarrow E_{kin} = m * \frac{v^2}{2}$$

$$\Delta E_{pot} = E_{kin} \rightarrow m * g * \Delta h = m * \frac{v^2}{2}$$

$$v = \sqrt{2 * g * \Delta h} \quad (10)$$

Durch die Limitierung der Wasserspiegeldifferenz im Leitfaden des BMLFUW auf 10 cm, 13 cm, 15 cm oder 20 cm, ergeben sich daraus maximale Fließgeschwindigkeiten von 1,4 m/s, 1,6 m/s, 1,7 m/s und 2,0 m/s, welche allerdings zumeist erst in einem Abstand vom Schlitz von ungefähr Δh bis $2 * \Delta h$ (DWA 2010) auftreten und somit für die Fischpassage keinen negativen Einfluss haben, da diese Bereiche nicht zwangsläufig durchquert werden müssen (BMLFUW 2012).

Zur Dimensionierung des Hakenelements und des Umlenkblocks im Übergang des Vertical Slot Schlitzpasses, welche das hydraulische Strömungsbild sowie den Wirkungsgrad der Energiedissipation maßgeblich beeinflussen, gibt es im österreichischen Leitfaden keinerlei Anhaltspunkte. Hier werden lediglich Mindestwerte für die Schlitzweite angeführt, welche aus der geforderten 3-fachen Fischbreite errechnet wurden. Durch Rundung der errechneten Werte auf ganze 5 cm Schritte, ergeben sich daraus für gewisse Fischregionen höhere Anforderungen an die Schlitzweite, während etwa für das ‚Epipotamal groß‘ (Huchen mit 100 cm) auch ein Wert knapp unter der, an anderer Stelle geforderten, 3-fachen Fischbreite als zulässig deklariert wird (BMLFUW 2012).

Für die optimale geometrische Gestaltung des Hakenelementes und des Umlenkblockes liefert das DWA Merkblatt 509 einen Dimensionierungsvorschlag basierend auf Messungen in Modell- und Naturversuchen. Aus der Schlitzweite (s) und einem jeweiligen Faktor (x) (Abbildung 17) können die einzelnen Abmessungen der Einbauten errechnet werden, welche zur Ausbildung einer geschwungenen Hauptströmung und damit verbundenen turbulenzarmen Energieumwandlung über das gesamte Beckenvolumen führen und eine von Schlitz zu Schlitz geradlinig durchgehende Kurzschlussströmung verhindern sollen (DWA 2010).

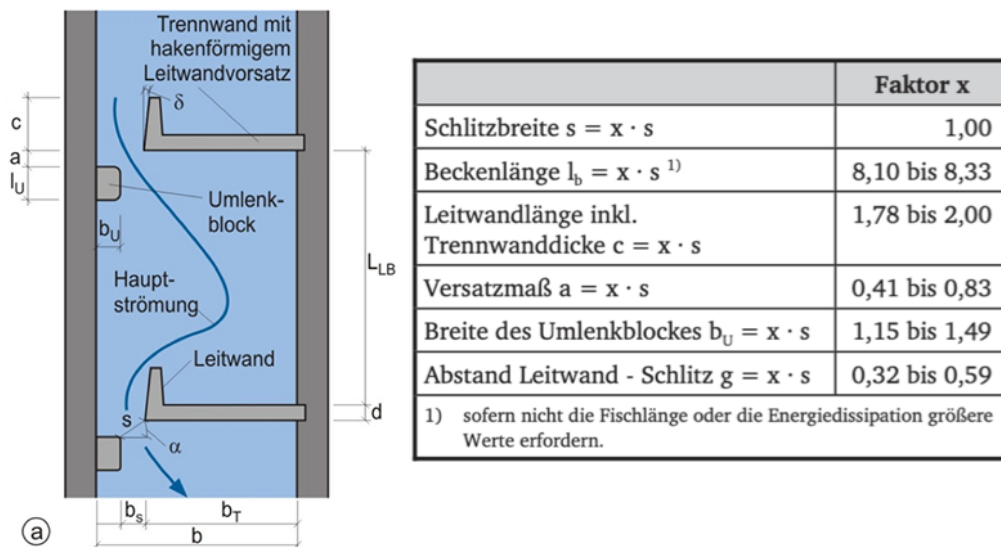


Abbildung 17: Dimensionierung eines VS (DWA 2010, verändert)

Die Abflusskapazität bzw. Dotation (Q) für den Schlitzpass kann mittels der laut österreichischem Leitfaden geforderten minimalen Wassertiefe unterwasserseitig (h_u) sowie der, sich aus der Wasserspiegeldifferenz ergebenden, oberwasserseitigen Wassertiefe (h_o), und des resultierenden rückstaubeinflussten Abflussbeiwertes (μ_r) mit der festgelegten Schlitzweite (s) über folgende abgewandelte Poleni-Formel errechnet werden:

$$Q = \frac{2}{3} * \mu_r * s * \sqrt{2 * g} * h_o^{3/2} \quad (11)$$

Aufgrund der geforderten Mindestbeckenabmessungen und zur Sicherstellung einer ausreichenden Leitströmung zur Auffindbarkeit, werden im Leitfaden des

BMLFUW Mindestdotationsmengen genannt, welche hierbei nicht unterschritten werden dürfen (BMLFUW 2012).

Zusätzlich zur Einhaltung dieser Mindestwerte wird die Dotation indirekt über die maximal zulässige Leistungsdichte auch nach oben hin begrenzt. Diese stellt ein Maß für die Turbulenz aufgrund der Energiedissipation in den Becken dar und sollte nicht überschritten werden, um die Passierbarkeit von Fischen durch Orientierungsverlust oder Erschöpfung nicht zu gefährden und mögliche Verletzungen wie Schuppenverlust zu verhindern (BMLFUW 2012). Die Berechnung der Leistungsdichte erfolgt hierbei nach DWA Merkblatt 509, über den Energieeintrag aus Dotation (Q) und Wasserspiegeldifferenz (Δh), im Verhältnis zum Beckenvolumen (siehe Kapitel 2.4.2, Formel (4)). Das Beckenvolumen errechnet sich hierbei aus den lichten Beckenabmessungen (Innenlänge l_b und Innenbreite B) multipliziert mit der mittleren Wassertiefe im Becken (h_m):

$$p_D = \rho_w * g * Q * \frac{\Delta h}{V} = \frac{\rho_w * g * Q * \Delta h}{l_b * b * h_m} \quad (12)$$

Die errechnete Leistungsdichte darf dabei die im österreichischen Leitfaden, je nach Fischregion, definierten Maximalwerte nicht übersteigen. Diese reichen von 100 W/m³ im Epipotamal bis hin zu 160 W/m³ im Epirhithral (BMLFUW 2012).

3. Modellversuche

Die beiden im Labor umgesetzten Modellaufbauten weisen die identen geometrischen Beckenabmessungen sowie vergleichbare hydraulische Randbedingungen durch gleiche Wasserspiegeldifferenzen und Wassertiefen im Übergang auf. Die Bemessung der beiden Bautypen orientiert sich hierbei am Standort eines realen Wasserkraft-Projektes im Epipotamal. Hier gab es eine bewusste Entscheidung der Projektleitung für die Umsetzung eines technischen Beckenpasses aufgrund der prognostizierten, günstigen hydraulischen Bedingungen und des großen Vorteils der Beckenstruktur, die auch im Falle einer Unterbrechung der Wasserzufuhr das Überleben von sich in der Fischaufstiegshilfe befindlichen Großfischen ermöglicht (Seidl 2018). Die Dimensionierung erfolgte in Anlehnung an die geltenden Kriterien des österreichischen Leitfadens und stellt den Aufstieg für das gesamte Artenspektrum des Flusses sicher. Dieses reicht von schwimm-schwachen Kleinfischen bis hin zum Großsalmoniden Huchen, der im Projektgebiet mit einer Körperlänge von 100 cm die maßgebende Bemessungsfischart für die Dimensionierung darstellt.

3.1 Dimensionierung und Maßstab

Bei der Dimensionierung der Fischaufstiegshilfe für das ‚Epipotamal groß‘ gemäß den erforderlichen Mindestkriterien des österreichischen Leitfadens (Tabelle 3) wurden für den Vertical Slot Schlitzpass folgende Abmessungen festgelegt:

⇒ Lichte Beckenlänge: 3,10 m > 3-fache Körperlänge (3,00 m)

⇒ Lichte Beckenbreite: 2,10 m > 2-fache Körperlänge (2,00 m)

Zusätzlich wurde ein Technischer Beckenpass mit den gleichen Beckenabmessungen dimensioniert und anschließend im Modell umgesetzt. Abweichend zu den allgemeinen Vorgaben der 3-fachen Fischbreite (siehe Kapitel 2.1.2) wurde bei der Dimensionierung die laut österreichischem Leitfaden für Schlitzpässe zulässige Mindestschlitzweite von 0,35 m (siehe Tabelle 3) berücksichtigt. In Anlehnung daran soll im Modellversuch auch für den technischen Beckenpass eine Variante mit einer Schlitzweite von 0,35 m untersucht werden. Um die Analysen

zu erleichtern wurden entgegen den Vorgaben des österreichischen Leitfadens für das ‚Epipotmal groß‘ verschärfte hydraulische Bedingungen durch erhöhte Wasserspiegeldifferenzen herangezogen.

Tabelle 3: Mindestbemessungswerte für den VS (BMLFUW 2012, verändert)

Fischregion	Maßgebende Fischart	Fisch-Länge (cm):	Maximale Spiegel-differenz zwischen Becken (cm)	Energie-dissipation (W/m³)	Schlitz-weite (cm)	Hydraulische Mindesttiefe uh. Trennwand (cm)	Min. lichte Becken-länge ¹ (cm)	Min. lichte Breite ¹ (cm)	Dotation auf Basis der Mindest-bemessungs-werte ² (l/s)
Epirhithral, MQ < 2 m³/s	Bachforelle (BF)	30	20	160	15	50	210	140	140
Epirhithral, MQ > 2 m³/s	Bachforelle	40	20	160	15	65	210	140	180
Metarhithral, MQ < 2 m³/s	Bachforelle	40	18	140	15	55	200	130	140
Metarhithral, MQ > 2 m³/s	Äsche, Bachforelle	50	18	130	20	70	250	170	240
Hyporhithral, MQ < 2 m³/s	BF, Aitel, Äsche, Aalrutte	50	15	120	20	60	230	150	190
Hyporhithral, MQ > 2 m³/s	Aalrutte, Barbe	60	15	120	25	75	250	170	290
Hyporhithral, 2 < MQ < 20 m³/s	Huchen	80	15	120	30	85	280	190	400
Hyporhithral, MQ > 20 m³/s	Huchen	100	15	120	35	100	310	210	550
Epipotamal mittel	Barbe	60	13	100	25	75	250	170	270
Epipotamal mittel	Hecht	90	13	100	27	75	270 ³	180 ³	290
Epipotamal mittel	Huchen	90	13	100	32	90	290	190	420
Epipotamal groß	Huchen	100	13	100	35	105	310	210	550
Epipotamal groß	Wels	120	13	100	50	120	370	250	910
Seezubringer, -ausrinn	Seeforelle	90	13	100	35	105	310	210	550
Gründlings- und Schmerlenbach	Aitel	40	10	100	15	60	160	110	110
Donau	Wels	150	10	100	60	160	450 ³	300 ³	1430

¹ aus Bemessungswerten berechneter Wert (siehe Anhang)

² aus Bemessungswerten berechnete Dotation für Passierbarkeit, eventuell erhöhte (Zusatz-)dotation für Sicherstellung Leitströmung (Auffindbarkeit) erforderlich (vgl. Kap. 4)

³ Bemessungswert aus Fischlänge d. größtenbestimmenden Fischart

Der Modellaufbau erfolgte in einem vorhandenen Glasgerinne im Wasserbaulabor der TU Graz. Durch den über einen Absperrschieber einstellbaren Durchfluss bildet dieses die ideale Grundlage für die Umsetzung und erfordert lediglich den Einbau der entsprechenden Querbauwerke und die Ausführung der Sohle im Einheitsgefälle beziehungsweise als Beckenstruktur. Die vorhandene lichte Weite des Glasgerinnes stellte sich hierbei als der größtenbegrenzende Parameter für die Maßstabsberechnung heraus. Abbildung 18 zeigt die Struktur des leeren Glasgerinnes und dessen Abmessungen im Grundriss sowie die Position des Wasserzulaufs mit Absperrschieber.

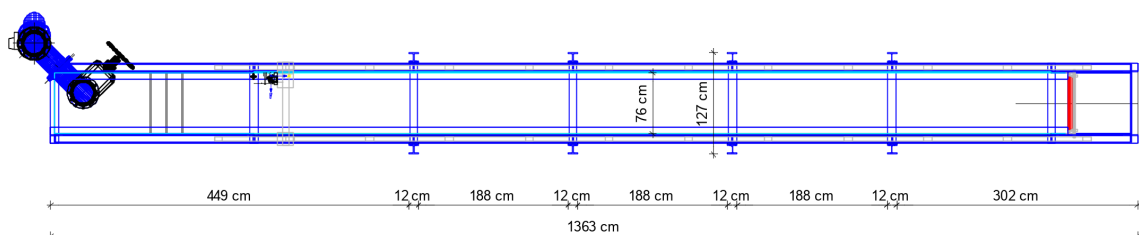


Abbildung 18: Draufsicht auf Glasgerinne im Wasserbaulabor der TU Graz

Aufgrund der vorgegebenen Breite des Gerinnes und der in der Natur vorhandenen lichten Beckenbreite lässt sich der Modellmaßstab der Längendimension (M_L) über das Verhältnis der Längenmaße (L) in Natur und Modell bestimmen:

$$M_L = \frac{L_{Natur}}{L_{Modell}} = \frac{Breite_{Fischaufstieg}}{Breite_{Glasgerinne}} = \frac{2,10 \text{ m}}{0,76 \text{ m}} \cong 2,76 \quad (13)$$

Da bei diesem Modell neben der Trägheit des Wassers vor allem die Schwerkraft als dominierende Komponente wirkt, erfolgt die Anwendung des Froude'schen Modellgesetzes, wie dies bei wasserbaulichen Versuchen sehr häufig der Fall ist. Dies setzt voraus, dass das Verhältnis der im Modell auftretenden Trägheits- und Schwerkraft mit dem in der Natur gleich ist (Strobl, Zunic 2006). Dieses Verhältnis wird dargestellt durch die Froude'sche Zahl (Fr) (siehe Kapitel 2.4.1, Formel (1)). Aus der Annahme der gleichen auftretenden Froude'schen Zahlen und der Tatsache der identischen Erdbeschleunigung in Modell und Natur ergibt sich:

$$\begin{aligned} Fr_{Natur} &= Fr_{Modell} \\ \frac{v_{Natur}}{\sqrt{g \cdot h_{Natur}}} &= \frac{v_{Modell}}{\sqrt{g \cdot h_{Modell}}} \\ \frac{v_{Natur}}{\sqrt{h_{Natur}}} &= \frac{v_{Modell}}{\sqrt{h_{Modell}}} \end{aligned} \quad (14)$$

Durch Ausdrücken der Fließtiefe im Modell durch den zuvor bestimmten Längenmaßstab, lässt sich nun der Zeitmaßstab wie folgt herleiten:

$$\begin{aligned} M_L = \frac{h_{Natur}}{h_{Modell}} \rightarrow h_{Modell} &= \frac{h_{Natur}}{M_L} \rightarrow \frac{v_{Natur}}{\sqrt{h_{Natur}}} = \frac{v_{Modell}}{\sqrt{\frac{h_{Natur}}{M_L}}} \\ M_t = \frac{v_{Natur}}{v_{Modell}} &= \sqrt{M_L} = \sqrt{2,76} \cong 1,66 \end{aligned} \quad (15)$$

Analog dazu lassen sich auch die weiteren Maßstäbe für die Parameter Geschwindigkeit, Durchfluss sowie Kräfte ableiten. Dies ergibt für das beschriebene Modell folgende Maßstäbe:

$$\Rightarrow M_L \text{ (Längenmaßstab)} \cong 2,76$$

$$\Rightarrow M_t \text{ (Zeitmaßstab)} = \sqrt{M_L} \cong 1,66$$

$$\Rightarrow M_v \text{ (Geschwindigkeitsmaßstab)} = M_L / M_t = M_L / M_L^{1/2} = M_L^{1/2} \cong 1,66$$

$$\Rightarrow M_Q \text{ (Durchflussmaßstab)} = M_L^3 / M_t = M_L^3 / M_L^{1/2} = M_L^{5/2} \cong 12,66$$

$$\Rightarrow M_F \text{ (Kräftemaßstab)} = M_\rho \cdot M_L^4 / M_t^2 = M_L^4 / M_L = M_L^3 \cong 21,02$$

Dies bedeutet, dass sämtliche zeitlichen Vorgänge im Modell um den Faktor 1,66 schneller ablaufen als in der Natur. Die in der Natur vorkommenden Fließgeschwindigkeiten entsprechen dem 1,66-fachen der gemessenen Fließgeschwindigkeiten im Modell. Auftretende Kräfte, welche allerdings im Zuge dieser Laborversuche nicht untersucht werden, würden in der Natur um das 21,02-fache verstärkt wirken. Der Durchfluss in der Natur muss durch 12,66 dividiert werden, um die korrekte Dotation für das Modell zu erhalten.

Die durch die Bemessung in der Natur gegebenen Mindestdotation aus den Vorgaben des österreichischen Leitfadens liegt für den Vertical Slot Schlitzpass bei 550 l/s. Nach der Umrechnung mit dem Durchflussmaßstab ergibt sich die erforderliche Wassermenge von gerundet 44 l/s für das Schlitzpassmodell.

Zur Vergleichbarkeit der beiden Modelle, wurde das Modell des Technischen Beckenpasses so dotiert, dass sich in den Übergängen die gleichen Wassertiefen einstellen, welche für den Vertical Slot gefordert werden. Dies ergab eine Dotation von 33 l/s (ca. 420 l/s in der Natur) und entspricht bei identischen Bedingungen einer reduzierten Wasseraufnahme von etwa 25% im Vergleich zum Vertical Slot Schlitzpass.

Der Betrieb der Modelle erfolgte bewusst mit erhöhten Wasserspiegeldifferenzen im Vergleich zu den Vorgaben aus dem österreichischen Leitfaden. Dadurch sollen sich höhere Fließgeschwindigkeiten ausbilden und sich das Strömungsbild deutlicher abbilden lassen. Dies soll eine bessere Vergleichbarkeit für die Analyse und Interpretation liefern.

3.2 Modellaufbau

Der Modellaufbau erfolgte im Glasgerinne im Wasserbaulabor der TU Graz, welches über einen Hochbehälter gespeist wird. Beide Modelle wurden zeitlich hintereinander so konstruiert, dass die Seitenwände des Glasgerinnes als seitliche Beckenbegrenzung genutzt wurden und somit die Abgrenzung nur noch in Längsrichtung durch den Einbau vorgefertigter Elemente hergestellt werden musste. Diese Elemente bilden die Trennwände am Beckenübergang und wurden aus Kunststoff gefertigt und durch Verschrauben und Verkleben im Gerinne befestigt.

3.2.1 Vertical Slot Schlitzpass

Abbildung 19 und Abbildung 20 zeigen eine 3D-Darstellung sowie die fertigestellte Ausführung des Vertical Slot Modellaufbaus im Glasgerinne.

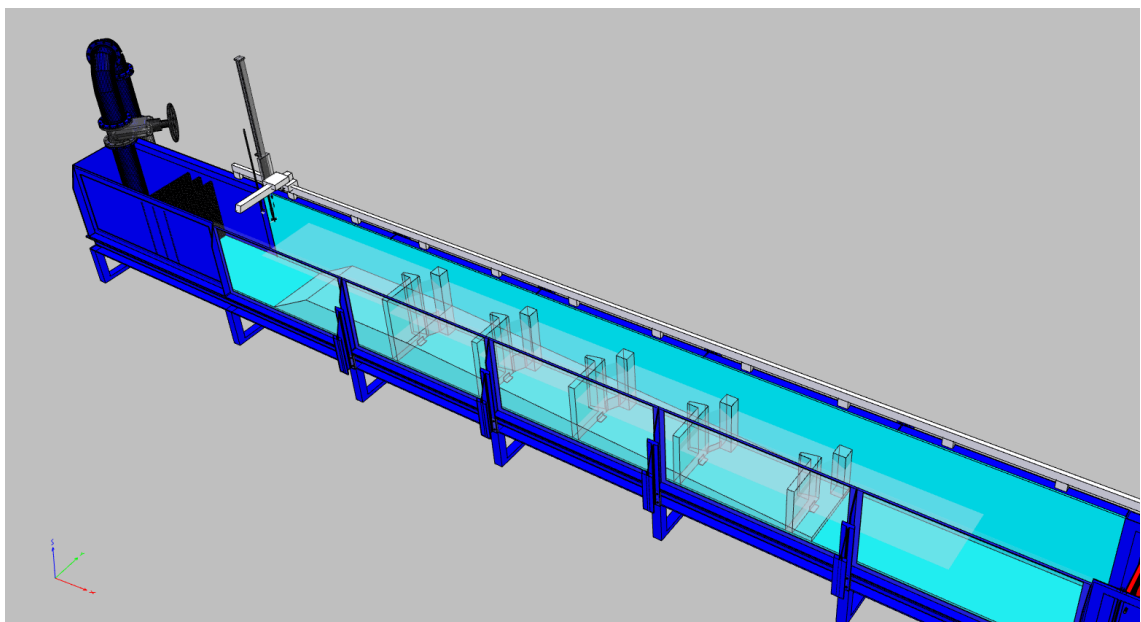


Abbildung 19: 3D-Darstellung des Vertical Slot Modellaufbaus



Abbildung 20: Modellaufbau Vertical Slot Schlitzpass im Glasgerinne

Beim Vertical Slot Schlitzpass Modell wurde das Querbauwerk im Beckenübergang durch das Haken- und Umlenkelement auf der orografisch rechten Seite und den Umlenkelement auf der orografisch linken Seite gebildet (siehe Abbildung 21). Diese beiden Elemente wurden mithilfe von Setzschablonen in das Gerinne eingebaut, um die korrekte Schlitzweite und die exakte Positionierung des Umlenkelementes sicherzustellen. Die Dimensionierung erfolgte hierbei in Übereinstimmung mit den Vorgaben des DWA Merkblatts 509 (siehe Kapitel 2.4.4).



Abbildung 21: Trennwand im Vertical Slot Modellaufbau

Abbildung 22 zeigt die Abmessungen des Vertical Slot Modellaufbaus in der Draufsicht sowie im Längenschnitt und ein Detail der Einbauelemente im Bereich des Schlitzes.

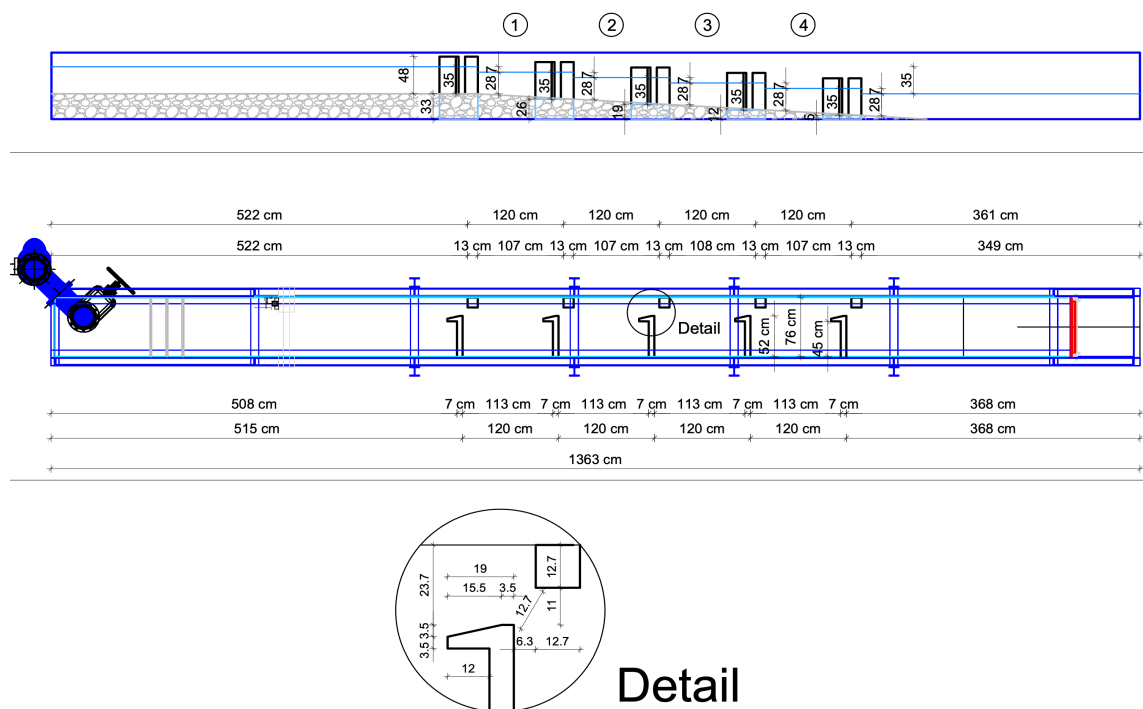


Abbildung 22: Abmessungen des Vertical Slot Modellaufbaus

In weiterer Folge wurde durch die Einbringung von Schotter ein entsprechendes Einheitsgefälle hergestellt. Durch das Aufbringen einer Abdichtungsfolie wird die Betonsohle im natürlichen Gerinne simuliert und somit sichergestellt, dass kein Durchströmen des Schotteraufbaus stattfindet. Darauf aufbauend wurde dann eine weitere Schicht Schotter aufgebracht, welche die eigentliche Funktion des vorgeschriebenen rauen Sohlsubstrats erfüllt. Abbildung 23 zeigt den Aufbau der Sohle mit rauem Sohlsubstrat und die Lage der Abdichtungsfolie im Einheitsgefälle.



Abbildung 23: Sohlsubstrat VS mit Abdichtungsfolie (blaue Strichlinie)

Abbildung 24 zeigt das Modell des Vertical Slot Schlitzpasses mit dem bereits zuvor für die Durchführung der Geschwindigkeitsmessungen festgelegten Durchfluss von 44 l/s (siehe Kapitel 3.1). Abbildung 25 zeigt den Beckenübergang im Vertical Slot Modell während des Füllvorganges.

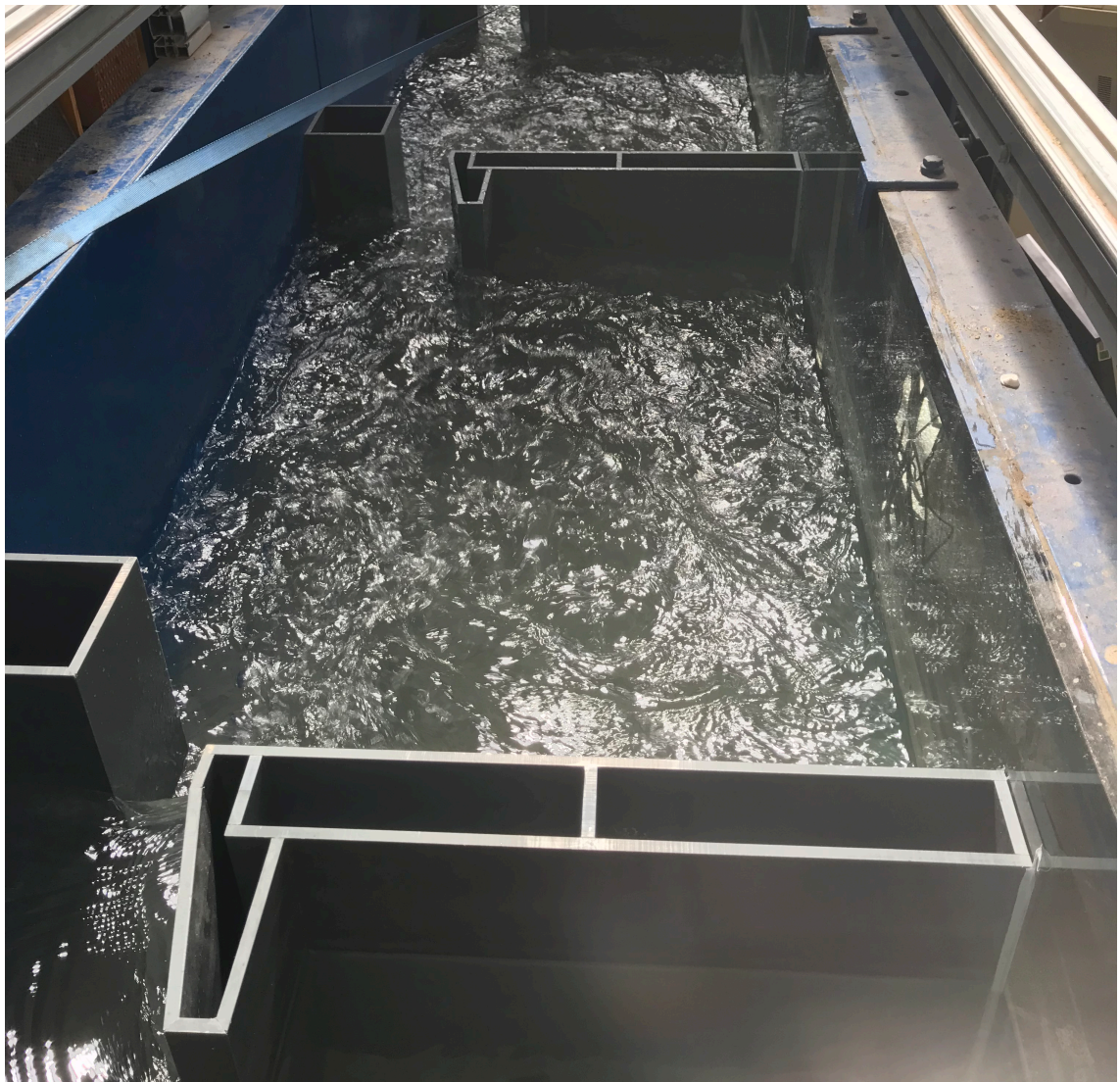


Abbildung 24: Betrieb VS Modell mit Bemessungsdotation (44 l/s)



Abbildung 25: Beckenübergang VS während Füllvorgang

3.2.2 Technischer Beckenpass

Abbildung 26 und Abbildung 27 zeigen eine 3D-Darstellung sowie die fertiggestellte Ausführung des Modellaufbaus für den Technischen Beckenpass.

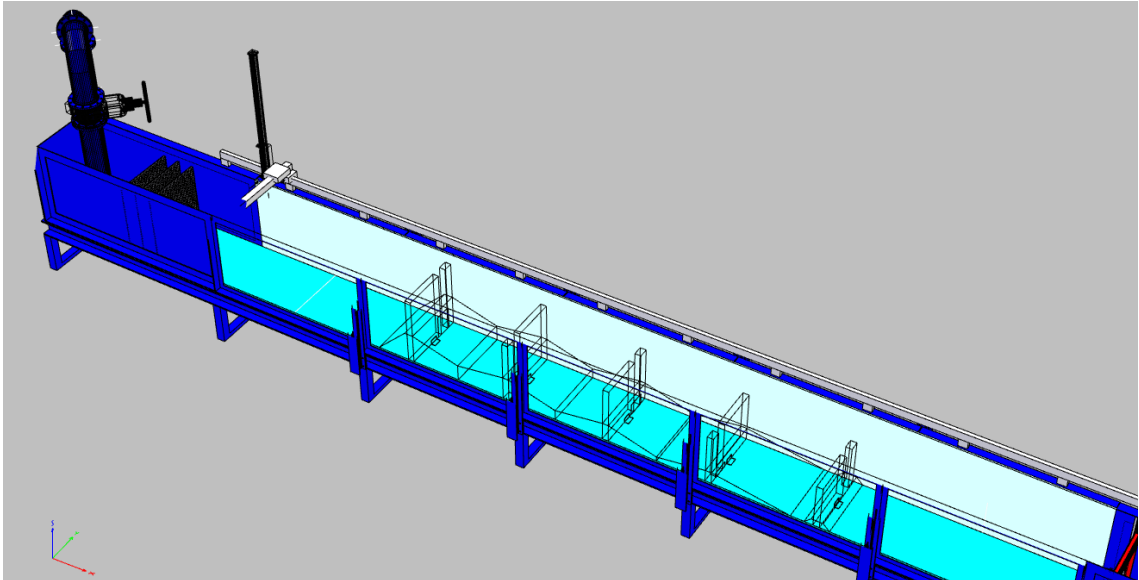


Abbildung 26: 3D-Darstellung des Technischen Beckenpass Modellaufbaus



Abbildung 27: Modellaufbau Technischer Beckenpass im Glasgerinne

Auch das Modell des technischen Beckenpasses wurde in ähnlicher Bauweise umgesetzt. Der längere Teil der Trennwand wurde aus den bereits im Schlitzpass verwendeten Elementen durch Abtrennen des Hakens hergestellt (Abbildung 28). Zur Erreichung der alternierenden Anordnung der Schlitze im Beckenpass wurde jedes zweite Element gedreht, anschließend der verbleibende Teil der Trennwand eingebaut und im Bereich unter der Sohle miteinander verbunden. So kann auch hier ein Durchströmen unter der Sohle verhindert werden, wie es auch in der Natur nicht der Fall ist.



Abbildung 28: Trennwand im Technischen Beckenpass Modellaufbau

Abbildung 29 zeigt die Abmessungen des Modellaufbaus des Technischen Beckenpasses in der Draufsicht sowie im Längenschnitt und ein Detail der Trennwand im Bereich des Schlitzes.

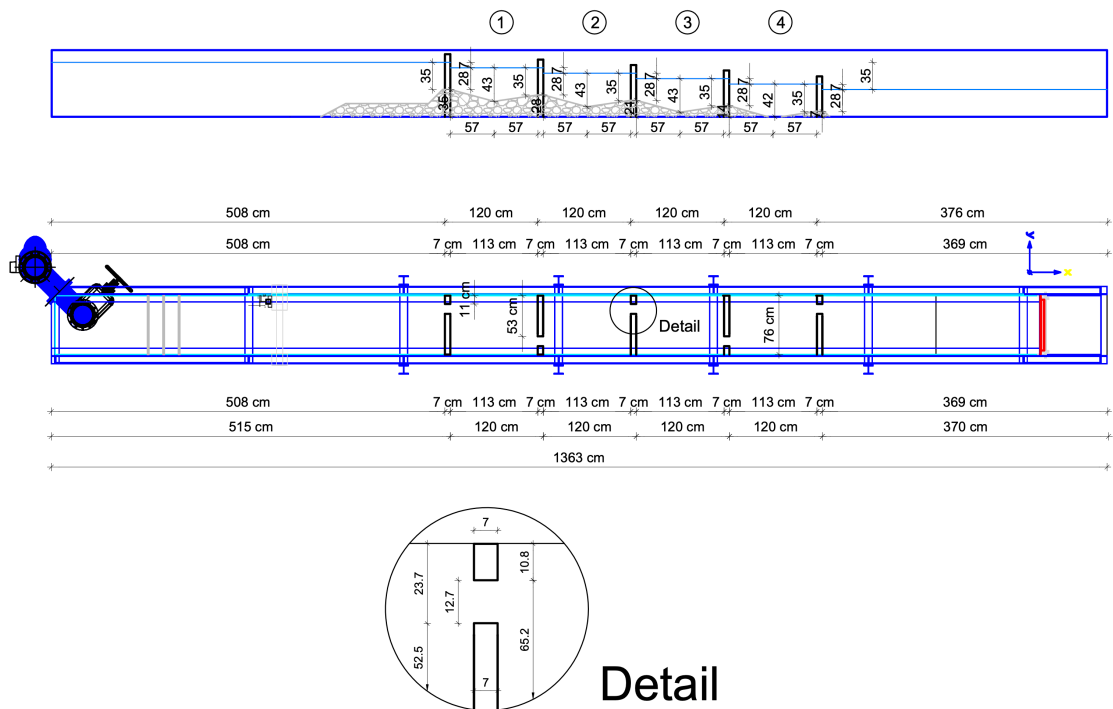


Abbildung 29: Abmessungen des Technischen Beckenpass Modellaufbaus

Abschließend wurde das raue Sohlsubstrat eingebracht und damit die Beckensohle mit entsprechender Kolkbildung ausgeformt. Dies ist anhand der roten Linie an der Glaswand in Abbildung 30 ersichtlich.



Abbildung 30: Sohlsubstrat TB mit fiktivem Einheitsgefälle (blaue Strichlinie)

Abbildung 31 zeigt den Betrieb des Technischen Beckenpass Modells mit der festgelegten Dotation von 33 l/s (siehe Kapitel 3.1). Abbildung 32 zeigt den Beckenübergang im Technischen Beckenpass Modell während des Füllvorganges.



Abbildung 31: Betrieb TB Modell mit Bemessungsdotation (33 l/s)



Abbildung 32: Beckenübergang TB während Füllvorgang

3.3 Messmethoden

Während der Durchführung der Laborversuche wurden zur Messung unterschiedlicher Parameter verschiedene Messmethoden angewandt. Die Messungen zur Kontrolle der Wasserstände sowie Wasserspiegeldifferenzen wurden mittels an den Glaswänden des Gerinnes angebrachten Maßbändern sowie mithilfe eines Stechpegels durchgeführt. Die Genauigkeit bei der Ablesung mit diesem Messinstrument liegt hierbei bei leicht bewegter Wasseroberfläche etwa bei $\pm 0,2 - 0,3 \text{ mm}$ (Hentschel 2015). Im stark strömungsbeeinflussten Bereich ist eine Messung aufgrund des schwankenden Wasserstandes nur mit großer Ungenauigkeit möglich, weshalb die Messungen an Punkten mit möglichst beruhigter Wasseroberfläche durchgeführt wurden. Einige Eindrücke zu den begleitenden Stechpegelmessungen sind in Abbildung 33 zusammengefasst dargestellt.



Abbildung 33: Begleitende Kontrollen mittels Stechpegelmessungen

Der Durchfluss wurde mittels Absperrschieber und angeschlossenem induktivem Durchflusszähler (Abbildung 34) im Zuleitungsrohr eingestellt und während der durchgeführten Geschwindigkeitsmessungen elektronisch mitprotokolliert. Zur Überprüfung der Genauigkeit des Durchflusszählers wurde eine initiale Kontrollmessung des Durchflusses mittels Geschwindigkeitsauswertung im Zulaufprofil und anschließender Rückrechnung über die Kontinuitätsgleichung durchgeführt.



Abbildung 34: Protokollschreiber (links) an induktivem Durchflusszähler

Zur Bestimmung der geeigneten Methoden für die Fließgeschwindigkeitsmessungen wurden unterschiedliche Messprinzipien miteinander verglichen:

3.3.1 Geschwindigkeitsmessung ‚Laser Doppler Anemometry‘ (LDA)

Diese optische Methode funktioniert über die Aussendung zweier Laserstrahlen, die sich im Messpunkt kreuzen und ein Interferenzstreifenmuster ausbilden. Die Ermittlung der Fließgeschwindigkeit geschieht durch die Auswertung des Streulichts von Partikeln in der Strömung und beruht auf dem Doppler Effekt (Dantec

Dynamics 2020). Das vereinfachte Funktionsprinzip ist in Abbildung 35 dargestellt.

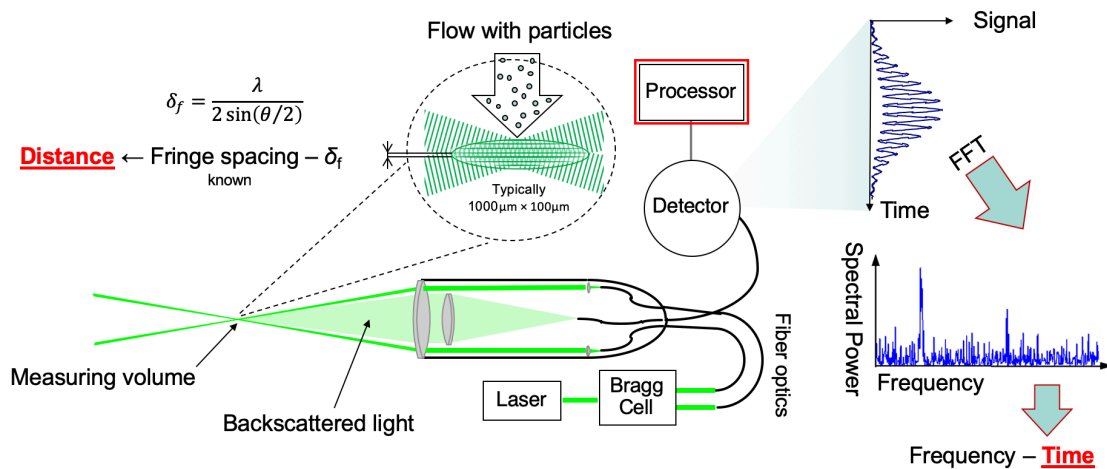


Abbildung 35: Funktionsprinzip LDA (Dantec Dynamics 2020)

Zum Einsatz kam hierfür eine Sonde der Firma ‚Dantec‘ mit zugehörigem Equipment zur Steuerung des Lasers und Auswertung der Ergebnisse. Die vorhandene Sonde kann nur für eindimensionale Geschwindigkeitsmessungen eingesetzt werden, deshalb musste die Sonde mehrmals umpositioniert werden, um die dreidimensionale Fließgeschwindigkeit erfassen zu können. Dies resultierte in einer gewissen Ungenauigkeit in der räumlichen Detektion des exakten Messpunktes nach der Umpositionierung und der damit verbundenen Zeitdifferenz zwischen den einzelnen Messungen. So war neben einer exakten Lokalisierung des Messpunktes auch das Erfassen des momentanen dreidimensionalen Geschwindigkeitsfeldes nicht möglich. Ebenso traten aufgrund der unterschiedlichen Positionierungen der Sonde, teils seitlich durch das Glas des Gerinnes zur Messung der vertikalen Geschwindigkeit, teils von oben in das Wasser eingetaucht zur Messung der horizontalen Fließgeschwindigkeiten, unterschiedliche Kombinationen des Lichtbrechungsindex auf. Zusätzlich wurde die Strömung durch das Eintauchen der Sonde mit einem Durchmesser von 60 mm über eine Tiefe von teilweise mehreren Zentimetern nicht unwesentlich beeinflusst. Die Summe dieser Umstände führte zum Entschluss, den Einsatz dieser Messmethode nach anfänglichen Probemessungen wieder zu verwerfen und die Geschwindigkeitsmessungen mittels einer akustischen, der dreidimensionalen ADV-Methode durchzuführen. Die Abbildung 36 und Abbildung 37 zeigen den

Aufbau der Messinstrumente sowie die Durchführung einer Messung mittels LDA-Methode.



Abbildung 36: Laser Doppler Anemometry (LDA) Messinstrumente



Abbildung 37: Geschwindigkeitsmessung mittels LDA-Methode

3.3.2 Geschwindigkeitsmessung ‚Acoustic Doppler Velocimetry‘ (ADV)

Auch bei der ADV-Methode erfolgt die Ermittlung der Fließgeschwindigkeiten mithilfe des Doppler Effektes. Im Gegensatz zum LDA handelt es sich hierbei nicht um eine optische, sondern um eine akustische Messmethode. Über einen Sender werden zwei zeitlich versetzte, akustische Schallwellen in das Messvolumen ausgesendet. Das von Partikeln im Wasser reflektierte Signal wird von mehreren Empfängern aufgenommen. Mithilfe von Phasenverschiebung zwischen ausgesendetem und empfangenem Impuls wird die Fließgeschwindigkeit errechnet (Nortek AS 2018). Abbildung 38 zeigt das vereinfachte Funktionsprinzip.

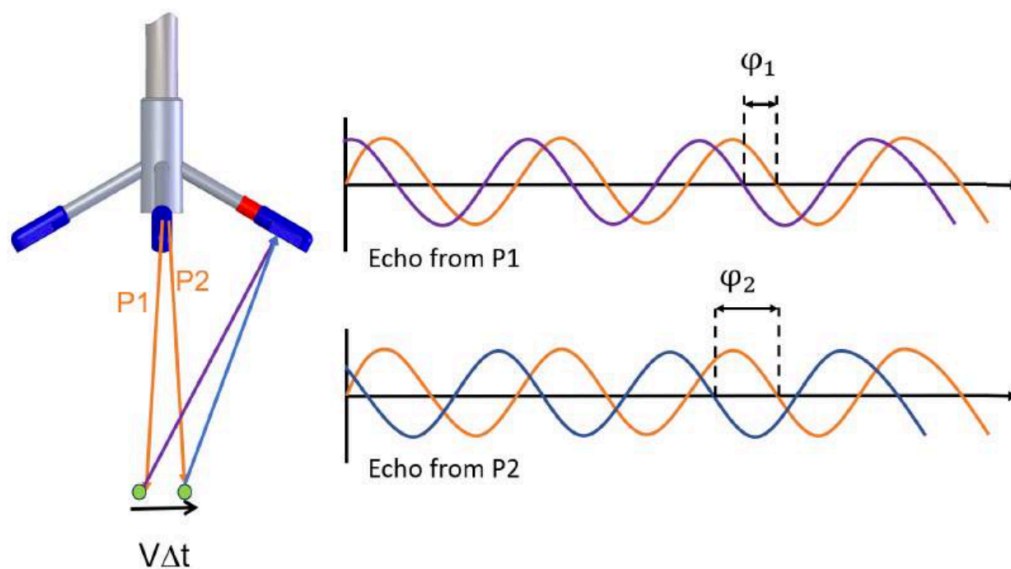


Abbildung 38: Funktionsprinzip ADV (Nortek AS 2018)

Zum Einsatz kamen zwei unterschiedliche Messsonden des Modells ‚Vectrino‘ der Firma ‚Nortek‘ (Abbildung 39). Beide Sonden sind in der Lage die dreidimensionalen Fließgeschwindigkeiten mit einer Frequenz von bis zu 200 Hertz zu messen. Der Unterschied der beiden Sonden liegt ausschließlich in der Anordnung und Ausrichtung der Messarme. Während die ‚Downlooking‘-Sonde optimal zur Messung im sohlennahen Bereich verwendet werden kann, ist es mit der ‚Sideloooking‘-Sonde möglich, nah an Beckenwände heran zu messen. Je nach Anwendungsbereich wurde die optimale Sonde gewählt. Zum Vergleich der Ergebnisse der beiden Sonden, wurde anfangs eine Vergleichsmessung durchgeführt, während der beide Sonden zeitgleich die Geschwindigkeit im selben Messpunkt

aufnehmen konnten. Abbildung 39 zeigt die beiden ‚Vectrino‘-Varianten, die ‚Sideloooking‘-Sonde (oben) mit flexiblem Anschluss sowie die ‚Downlooking‘-Sonde (unten) mit starrem Messgestänge.

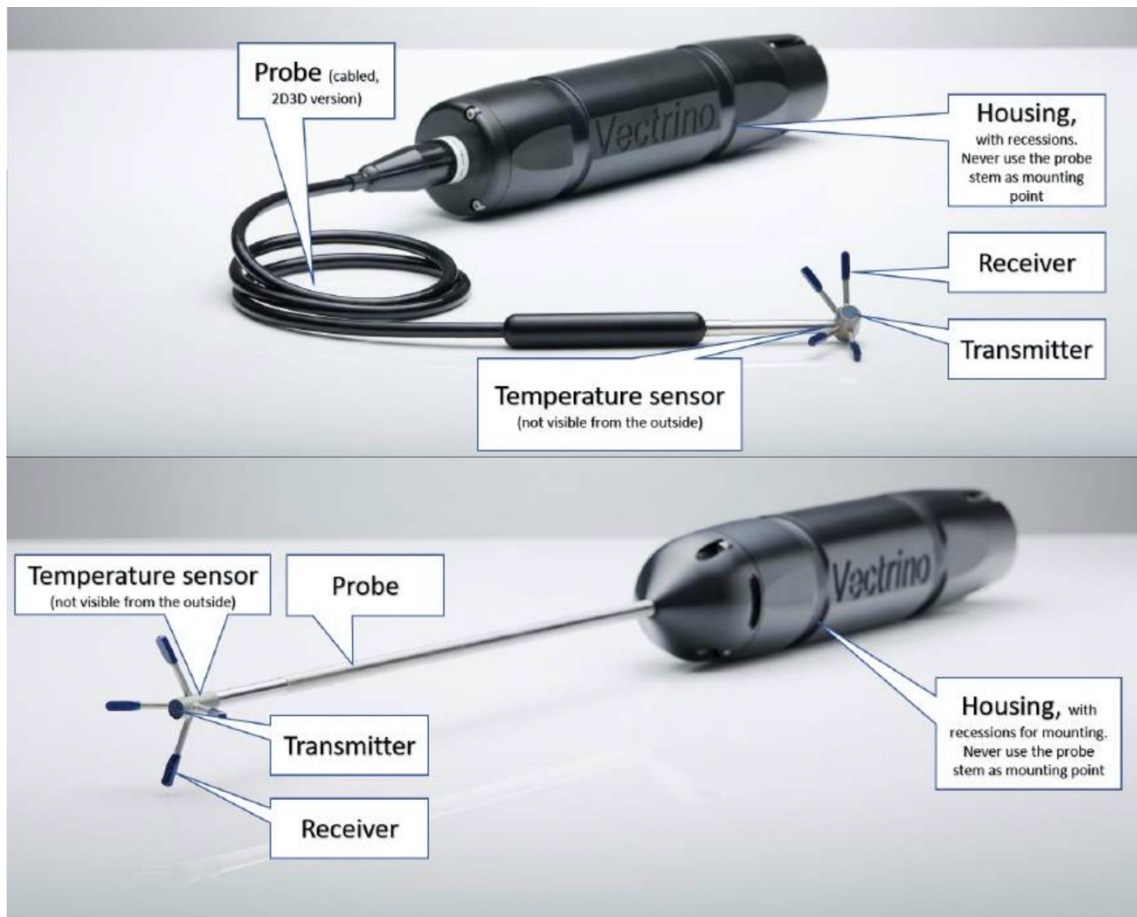


Abbildung 39: Varianten der ‚Vectrino‘-Sonde (Nortek AS 2018)

Zur Aufzeichnung der Messergebnisse diente die zur Sonde zugehörige Bediensoftware ‚Vectrino+‘, welche die Rohdaten der Messung als .vno- beziehungsweise .vna-Datei speichert und zusätzlich die Möglichkeit zur Konvertierung der Messdaten in .adv-Dateien für die weitere Datenaufbereitung mittels Filtersoftware bietet (siehe Kapitel 4.2). Die Einstellungen zur Messung wurden gemäß der Empfehlung des Herstellers aufgrund der zu erwartenden Messwerte eingerichtet (Abbildung 40). Die Wahl des Parameters ‚Nominal Velocity Range‘ ist hierbei ausschlaggebend für den Erhalt hochqualitativer Messergebnisse. Dieser soll sich nach den erwarteten Geschwindigkeiten richten und diese in der vertikalen sowie horizontalen Richtung abdecken (Nortek AS 2018). Durch anfängliche Probemessungen konnte dieser Parameter mit dem passenden Wert

eingestellt werden. Die Wahl der Parameter ‚Sampling volume‘ und ‚Transmit length‘ sind in der Praxis nicht notwendig um eine Verbesserung der Qualität zu erzielen (Nortek AS 2018). Ungeachtet dessen, wurden unterschiedliche Einstellungen getestet und aus diesen Ergebnissen die optimale Kombination ausgewählt. Die Schallausbreitungsgeschwindigkeit im Wasser wurde auf der Voreinstellung zur automatischen Berechnung aufgrund der Wassertemperatur während der Messung belassen. Abbildung 40 zeigt die gewählten Einstellungen.

The screenshot displays the Vectrino software settings interface, organized into several panels:

- Setup:**
 - Sampling rate (Hz): 20
 - Nominal velocity range (m/s): ± 2.50
 - ☐ Field probe
 - Transmit length (mm): 2.4
 - Sampling vol. (mm): 6.1
 - Power level: HIGH
 - Coordinate system: XYZ
- Speed of sound:**
 - ☒ Measured
 - Salinity (ppt): 0
 - ☐ Fixed (m/s): 1525
- Output Sync:**
 - ☒ for Vectrino
 - ☐ for other sensor
 - ☒ Master
- Input Sync:**
 - ☐ Start on sync
 - ☐ Sample on sync
- Configuration:**
 - Vertical vel. range (m/s): 0.94
 - Horiz. vel. range (m/s): 3.28
 - Data output (Byte/s): 440
 - ☐ Data recording
 - Path: C:\Users\koch_admin\Desktop
 - ☒ Max: 60 seconds
 - ☐ Create new file
 - ☐ Append
 - ☒ Stop recording
 - ☐ Mark
 - ☐ Analog outputs
 - Full range (0 - 5V): ± 0.30 m/s

Abbildung 40: Einstellungen in der Vectrino Software zur ADV-Messung

Zur Feststellung der notwendigen Messdauer für den Erhalt konstanter Messergebnisse wurde vorab mehrere Initialmessung durchgeführt. Bei diesen Langzeitmessungen an einem Messpunkt lag die Messdauer bei drei Minuten. Dies ist notwendig um festzustellen, wie lange die Messung dauern muss, um einen konstanten Mittelwert zu erreichen. Dafür wird ein gleitendes Mittel der Messwerte gebildet (siehe Abbildung 41). Die Auswertung der Messergebnisse zeigte, dass der Mittelwert der Geschwindigkeiten bereits nach etwa 60 Sekunden konstant bleibt, weshalb auch die Dauer für alle nachfolgenden Messungen mit einer Minute festgelegt wurde. Abbildung 41 zeigt die beiden durchgeführten Langzeitmessung mit den daraus gebildeten gleitenden Mittelwerten.

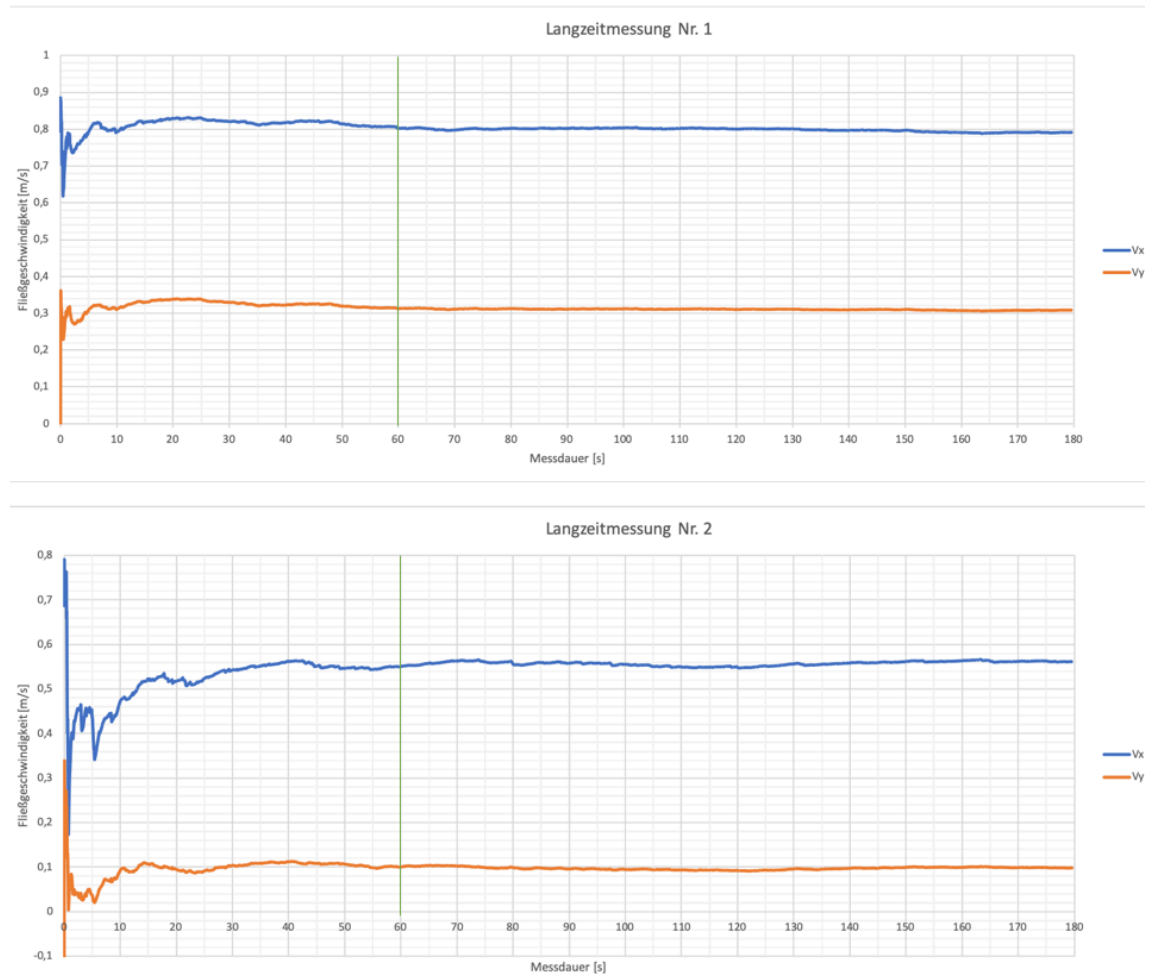


Abbildung 41: Gleitende Mittelwerte V_x und V_y in Langzeitmessungen

3.4 Messraster

Die Montage der Messsonde erfolgte an der am Glasgerinne angebrachten Transversierung, welche über eine SPS-Steuerung mithilfe eines Koordinatensystems mit einer Genauigkeit von einem Millimeter angesteuert werden kann. Aufgrund der Notwendigkeit zur Messung mehrerer hundert Messpunkte wurde neben der Möglichkeit zur Einzeleingabe der Koordinaten die Programmierung eines Ablaufprogrammes zur automatischen Ansteuerung einer Punktliste in Auftrag gegeben. Über eine Schnittstelle mit einem ‚Arduino‘-Mikrokontroller kann auch der Start der Messung sowie die Speicherung der Daten für jeden Messpunkt automatisch übergeben werden. Dies erfordert für die automatisierte Messung des vordefinierten Messrasters im Becken nur die einmalige Durchführung der Einstellungen in der Messsoftware sowie die Vorbereitung und das Einlesen einer Datei mit den Koordinaten der Messpunkte in der zu verarbeitenden Reihenfolge.

Die Messpunkte für die Beckenmessung liegen im Grundriss in einem Raster von 6 x 6 cm, in den Bereichen vor und nach den Beckenübergängen erfolgt die Messung in einem verdichteten Messraster von 3 x 3 cm. Dies ergibt beispielsweise für den Schlitzpass eine Gesamtzahl von 433 Messpunkten je gemessener Ebene. Durch die geometrischen Gegebenheiten ist beim Messen mit der ‚Sidelooking‘-Sonde eine Drehung der Sonde erforderlich, um die Messpunkte nah an beiden Seitenwänden erfassen zu können. Deshalb erfolgt eine Aufteilung der Messpunkte in zwei Teilbereiche, bezeichnet mit den Präfixen ‚N‘ für Nord sowie ‚S‘ für Süd. So ist es möglich, sowohl die Messpunkte nah an der orografisch linken Seitenwand im Zuge der Messphase ‚Nord‘, als auch die Messpunkte nahe an der orografisch rechten Seite - nach Drehung der Sonde – im Zuge der Messphase ‚Süd‘ zu erfassen. Zur Verifizierung der Messergebnisse, wird ein identischer Kontrollpunkt während beider Messphasen aufgenommen. Abbildung 42 zeigt den Raster mit den Messpunkten im Vertical Slot in Becken 1+2 im Grundriss. Zusätzlich sind die kritischen Abstände der ‚Weak Spots‘ (siehe Kapitel 4.2) als Strichlinien in der Farbe Cyan gekennzeichnet.

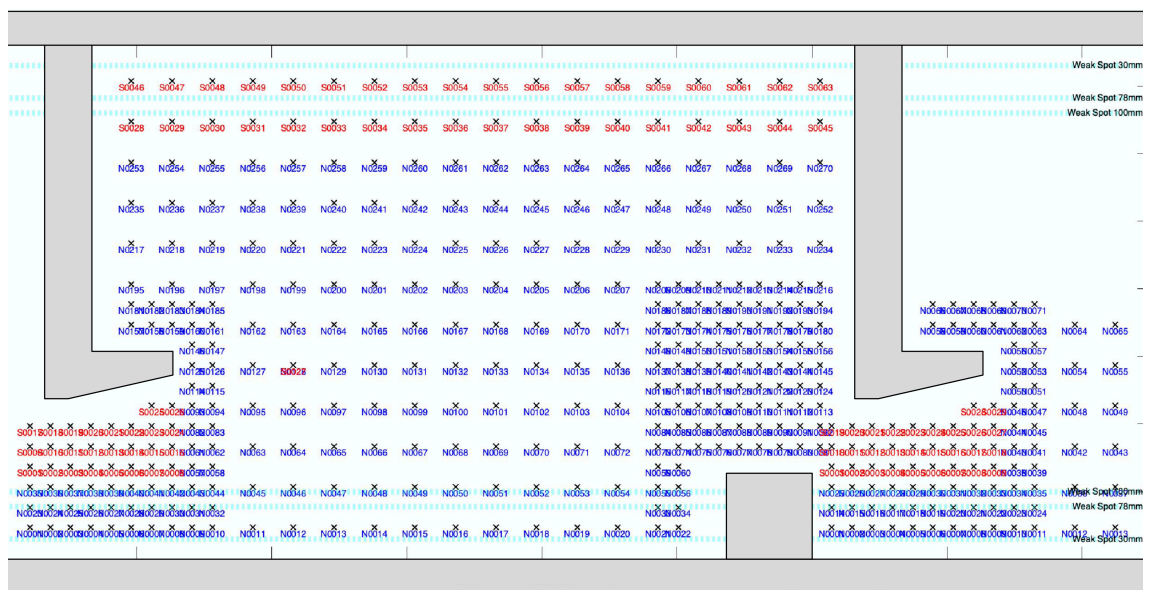


Abbildung 42: Messraster im Grundriss (Becken 1+2) im Vertical Slot

In vertikaler Richtung werden drei Messebenen pro Becken definiert. Diese werden im Schlitzpass parallel zu Sohle ausgerichtet und über die Wassertiefe verteilt, um sowohl die sohnnahen Geschwindigkeiten, als auch die Geschwindigkei-

ten in mittleren Tiefen zu erfassen und damit das dreidimensionale Strömungsbild möglichst detailliert abbilden zu können. Abbildung 43 zeigt im Längsschnitt durch Becken 1+2 die Lage der Messebenen im Vertical Slot sowie die entsprechenden Abstände von der Sohle im Einheitsgefälle.

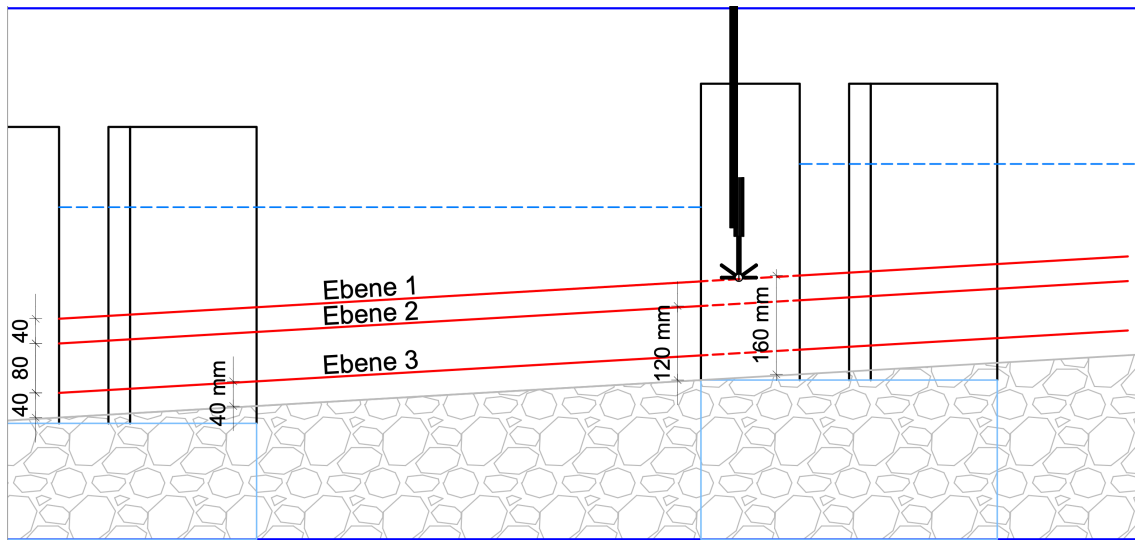


Abbildung 43: Messebenen Schnitt (Becken 1+2) im Vertical Slot

Das Messraster für den Technischen Beckenpass wurde im Becken 2 analog zum Vertical Slot in einem Raster von 6 x 6 cm angelegt. Auch hier erfolgte eine Verdichtung auf 3 x 3 cm in den Bereichen vor bzw. nach den Beckenübergängen für eine genauere Auflösung der Messergebnisse. Die Aufteilung der 396 Messpunkte in eine Teilmessung ‚Nord‘ sowie eine Teilmessung ‚Süd‘ erfolgte ebenso aufgrund der geometrischen Notwendigkeit durch den Einsatz der ‚Sidelooking‘-Sonde. Abbildung 44 zeigt den Raster mit den Messpunkten im Technischen Beckenpass im Becken 2 im Grundriss. Zusätzlich sind auch hier die kritischen Abstände der ‚Weak Spots‘ (siehe Kapitel 4.2) gekennzeichnet.

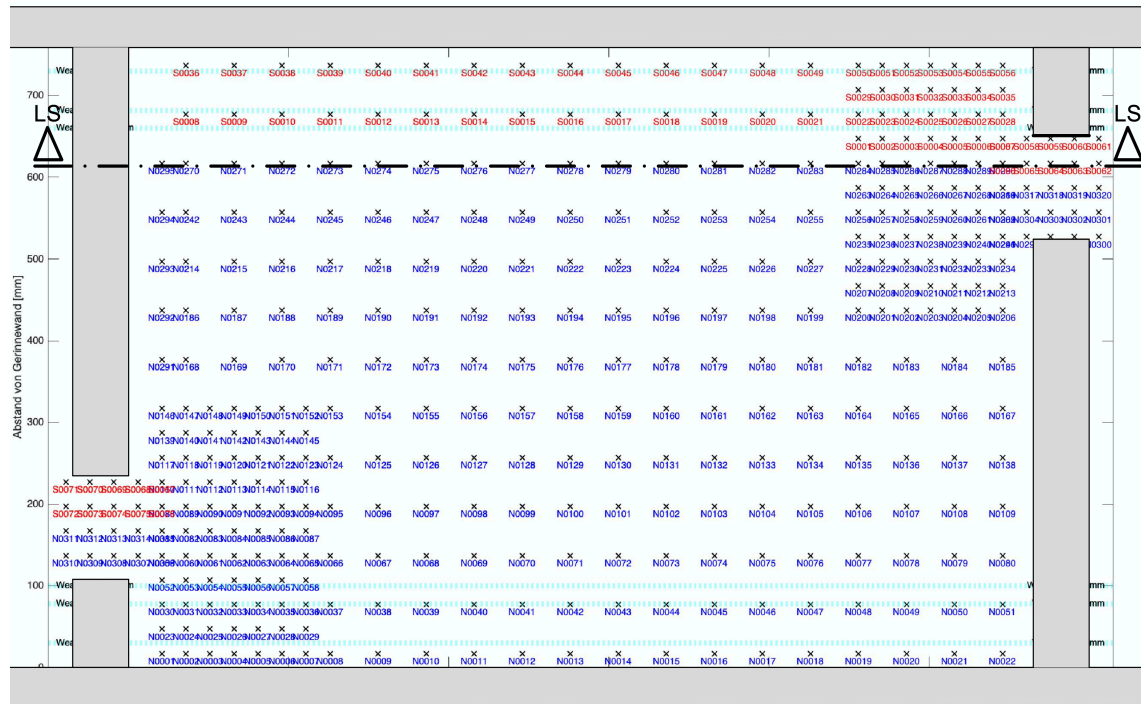


Abbildung 44: Messraster Grundriss (Becken 2) im Technischen Beckenpass

Zur Vergleichbarkeit erfolgte auch in vertikaler Richtung die Anordnung der Messebenen parallel zur fiktiven Sohle im Einheitsgefälle. Wie in Abbildung 45 ersichtlich, wurde zusätzlich zu den 3 Messebenen des Vertical Slots eine vierte, oberflächennahe Ebene 0 für den Technischen Beckenpass eingefügt.

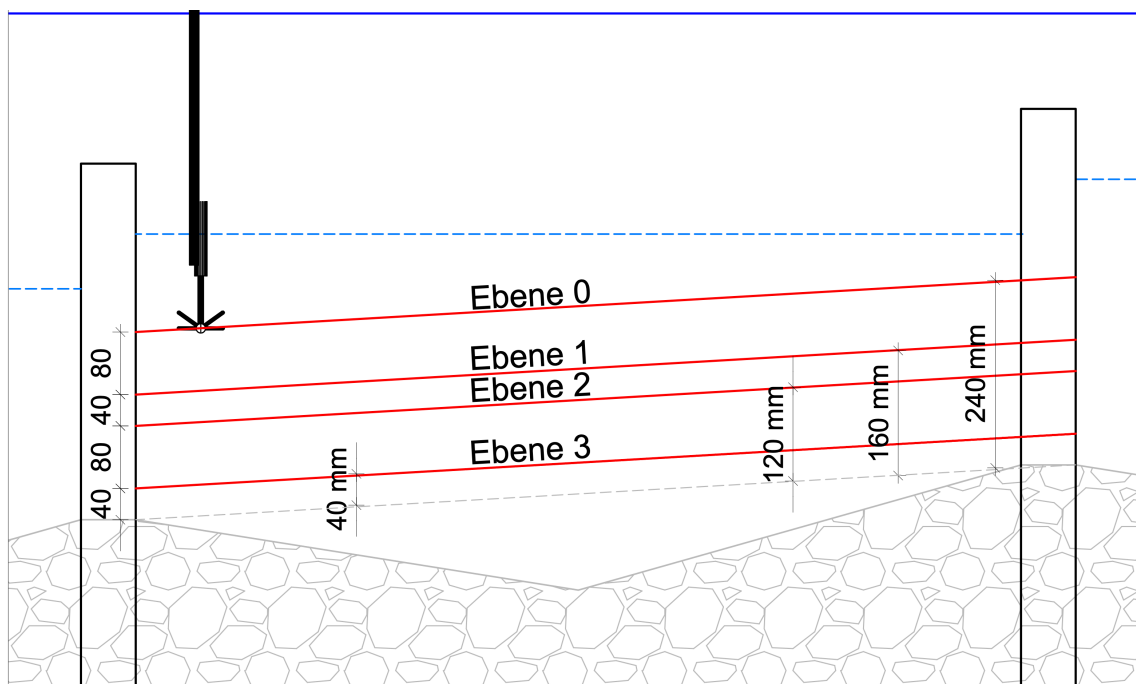


Abbildung 45: Messebenen Schnitt (Becken 2) im Technischen Beckenpass

4. Messungen und Ergebnisse

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Darstellung des Strömungsverhaltens in den Modellaufbauten, welche primär durch die Auswertung der gemessenen Fließgeschwindigkeiten erfolgt. Zusätzlich wurden weitere begleitende Messungen, etwa zur Kontrolle des Durchflusses sowie parallele Messungen der Wasserstände zur Rückrechnung des tatsächlichen Überfallbeiwerts durchgeführt.

4.1 Durchgeführte Messungen

4.1.1 Ermittlung der durchschnittlichen Korndurchmesser im Sohlsubstrat

Zur Ermittlung der durchschnittlichen Korndurchmesser wurde die ‚Wolman Random Walk Pebble Count‘ Methode angewandt (Kondolf 1992). Dazu wurden mehrere beliebig ausgewählte Steine aus dem Sohlsubstrat an unterschiedlichen Positionen entnommen und deren mittlere Durchmesser mittels Schiebelehre vermessen. Die Gesamtzahl der entnommenen Proben wurde auf zehn Stück reduziert, da das künstlich eingebrachte Sohlsubstrat aus einer Einheitskörnung besteht und eine Korngrößenverteilung mit Fein- und Feinstanteilen, wie sie in natürlichen Flussläufen vorkommt, auszuschließen ist. Wie in Abbildung 47 ersichtlich, wurde durch die Bildung des Mittelwertes der entnommenen Proben die durchschnittliche Steinkörnung im Sohlsubstrat (k_s) mit 60 mm bestimmt.

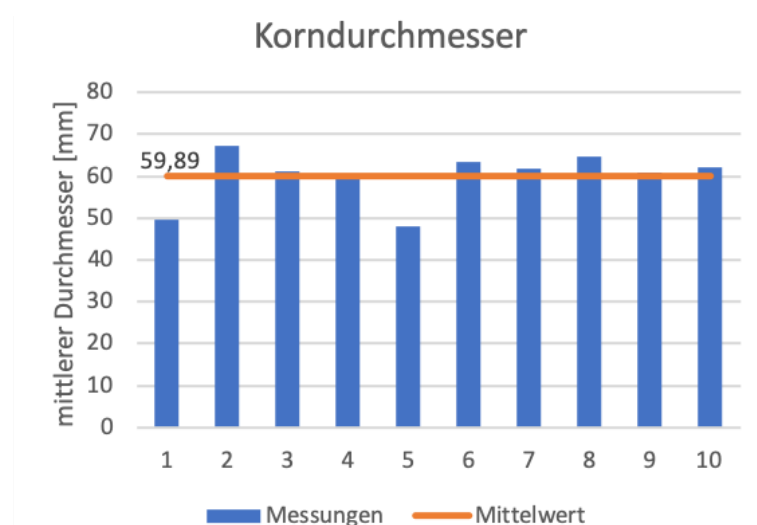


Abbildung 47: Ermittlung der Korndurchmesser im Sohlsubstrat

4.1.2 Pegelmessung zum Rückschluss auf die Überfallbeiwerte

Während der Durchfluss kontinuierlich bis zur gewünschten Dotation der anschließenden Geschwindigkeitsmessungen gesteigert wurde, erfolgten parallel dazu mehrere Messungen der Wasserstände für unterschiedliche Durchflussmengen. Die Ober- und Unterwasserstände sowie die Höhe der Sohle wurden an unterschiedlichen Beckenübergängen mittels Stechpegel aufgenommen und gemeinsam mit den zugehörigen Durchflusswerten notiert. Mit den dadurch bekannten Ober- sowie Unterwassertiefen lässt sich jeweils bei bekanntem Durchfluss der tatsächliche rückstaubeinflusste Überfallbeiwert aus der Formel zur Ermittlung der Abflusskapazität von Schlitzpässen (siehe Kapitel 2.4.4, Formel (11)) zurückrechnen. Abbildung 48 zeigt die Definition der Ober- und Unterwassertiefen im Vertical Slot sowie den Einfluss durch die Körnung des Sohlsubstrats.

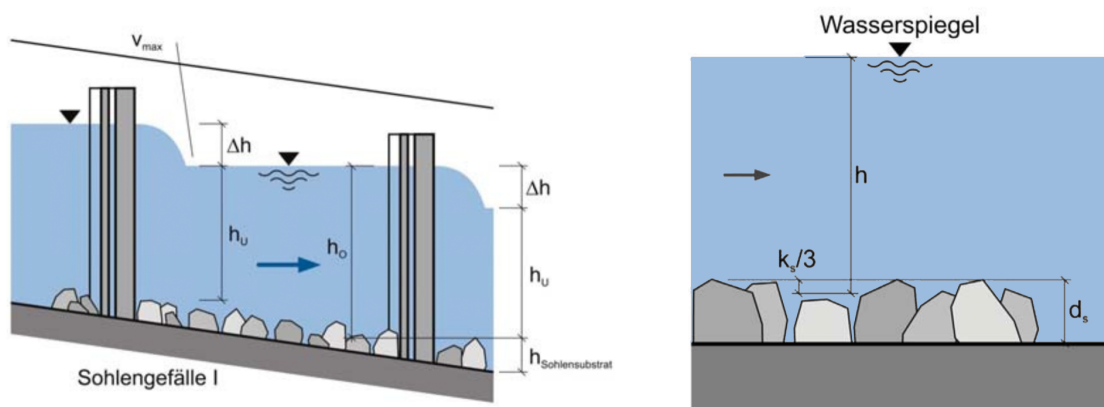


Abbildung 48: Wassertiefe VS mit Einfluss des Sohlsubstrats (DWA 2010)

Die Auswertung der tatsächlichen Überfallbeiwerte im Modellversuch (Abbildung 49) ergibt für beinahe alle untersuchten Ober- zu Unterwasserstandverhältnisse (h_u/h_o) leicht höhere Werte als die in der Literatur vorgegebenen Dimensionierungsparameter. Diese Vorgabewerte wiederum beruhen auf unterschiedlichen Daten aus der Literatur der 80er und 90er Jahre, welche teilweise aus Modellversuchen, teilweise von Messungen an bestehenden Anlagen stammen (DWA 2010). Die Rückrechnung der Überfallbeiwerte aus Feldmessungsprotokollen der letzten Jahre zeigt, dass auch hier verglichen mit der Literatur ein deutlicher Trend zu höheren Überfallbeiwerten zu erkennen ist. In Abbildung 49 sind die

rückstaubeinflussten Abflussbeiwerte (μ_r) bezogen auf das Verhältnis von Unter- zu Oberwasserstand (h_u/h_o) dargestellt. Mit zunehmendem Verhältniswert lässt sich eine Reduktion der Abflussbeiwerte erkennen. Dies bedeutet, dass bei abnehmender Wasserspiegeldifferenz die Dotation sinkt, was durch die geringeren auftretenden Fließgeschwindigkeiten (siehe auch Kapitel 2.4.4, Formel (10)) bestätigt wird.

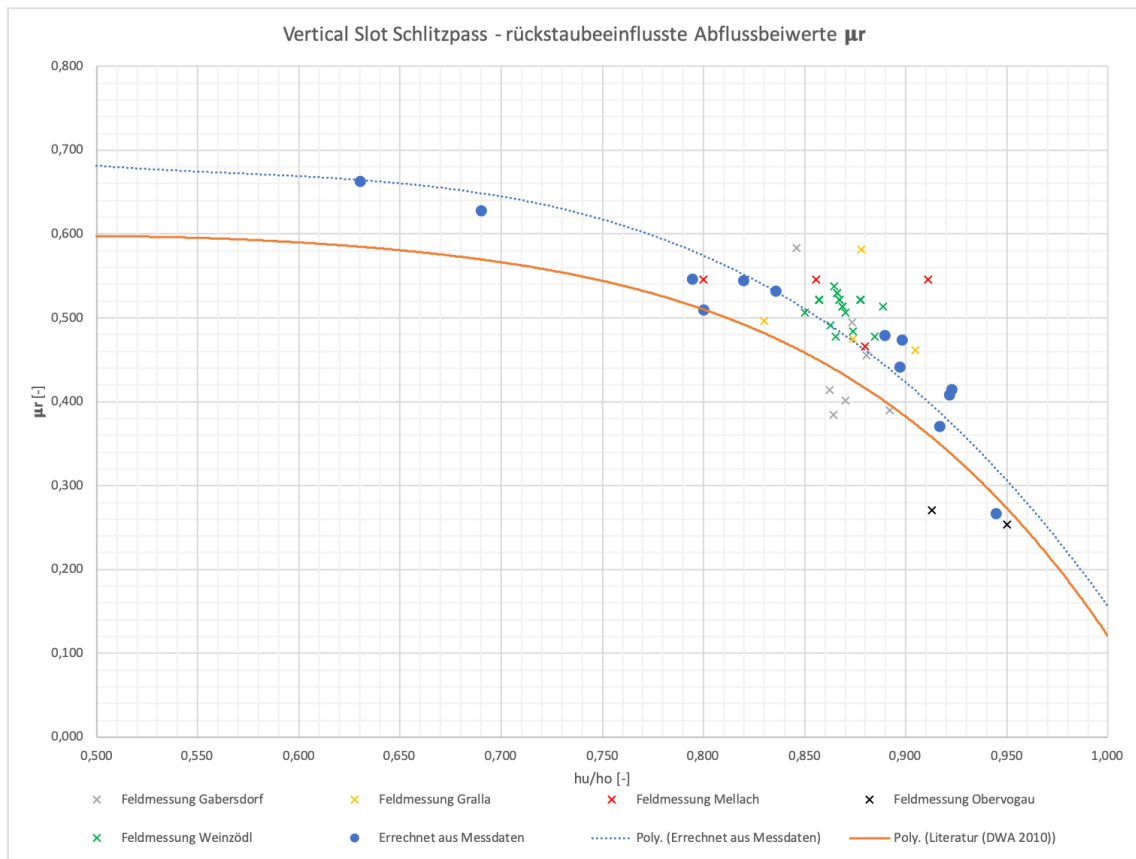


Abbildung 49: Rückstaubeinflusste Abflussbeiwerte VS Modell

Auch für den Beckenpass wurden Messungen der Ober- sowie Unterwasserpegel an allen Übergängen durchgeführt. Durch die geringere notwendige Dotation des Beckenpasses im Vergleich zum Schlitzpass bei den selben Oberwassertiefen (h_o) konnte bereits im Vorhinein aufgrund der Kontinuität auf geringere Überfallbeiwerte des Beckenpasses geschlossen werden. Die Untersuchung der Ober- und Unterwasserpegel mit anschließendem Rückschluss auf die vorherrschenden Überfallbeiwerte bestätigte diese Annahme. Auch die Überlagerung der Ergebnisse mit Daten aus Feldmessungen (Abbildung 50) zeigt deutlich geringere Überfallbeiwerte im Vergleich zum Vertical Slot Schlitzpass auf. Da zu

zeitverlauf eventuelle maßgebliche Schwankungen, welche zu einer Wiederholung der Messreihe führen würden, erkannt werden. Die Auswertung dieser Durchflussprotokolle erfolgte zur Kontrolle nach jeder durchgeführten Messreihe und wird in nachfolgender Abbildung 51 auszugsweise dargestellt.

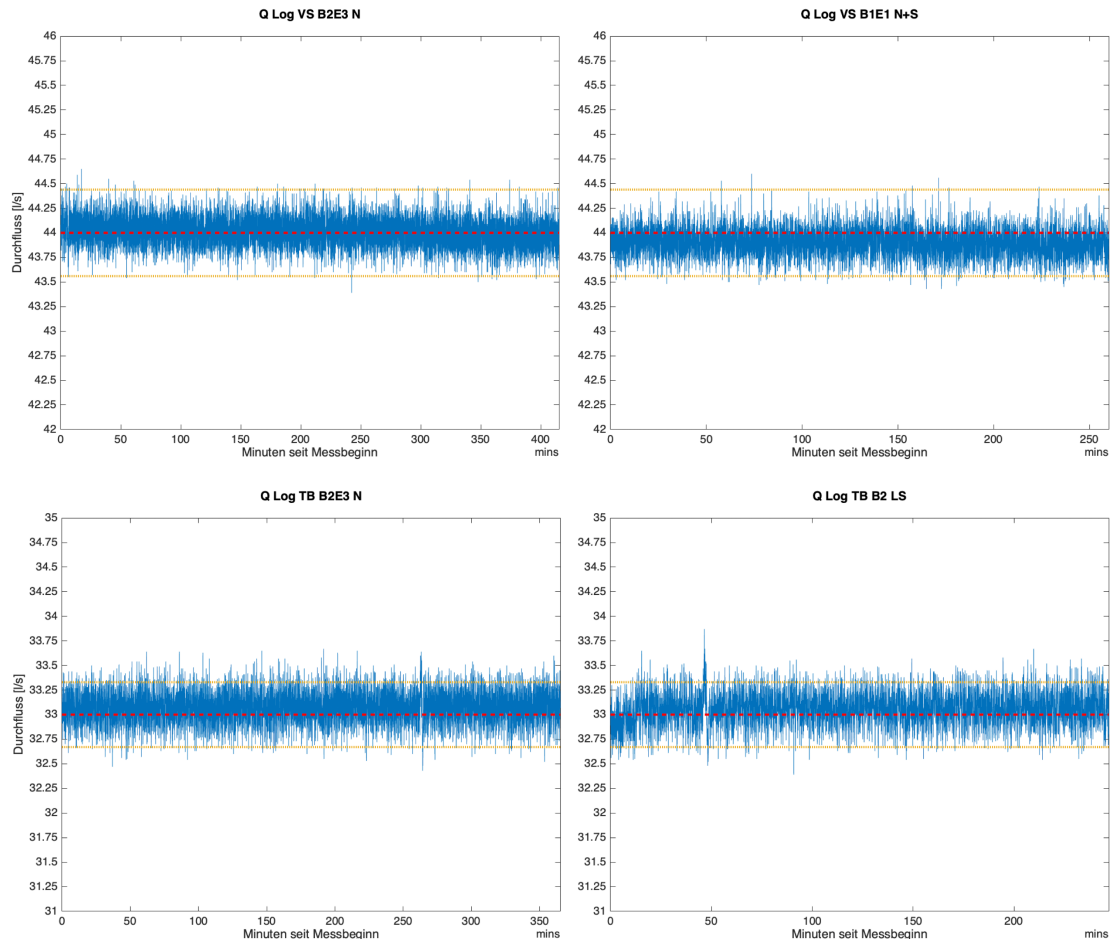


Abbildung 51: Durchflussprotokoll, Sollwert (rot), $\pm 1\%$ -Abweichung (gelb)

4.1.4 Messungen der Fließgeschwindigkeiten

Die im Modellversuch tatsächlich auftretenden Fließgeschwindigkeiten wurden aus den im Kapitel 3.3.1 genannten Gründen letztlich ausschließlich mittels ADV-Methode gemessen. Die mittels LDA-Methode durchgeführten Messungen dienten dem eingangs durchgeführten Vergleich der beiden Messmethoden. Dieser zeigte einen deutlichen Vorteil der ADV-Methode aufgrund genauerer zeitlicher Auflösung durch die mögliche höhere Messfrequenz sowie damit verbunden eine geringere notwendige Messdauer bis zur Stabilisierung der Messwerte.

Für den Vergleich der Fließgeschwindigkeiten zwischen Vertical Slot Schlitzpass und Technischem Beckenpass wurden automatisierte Beckenmessungen, wie in Kapitel 3.4 beschrieben, durchgeführt. Ein paar Eindrücke der durchgeführten Messungen mit den ‚Vectrino‘-Sonden sind in Abbildung 52 zusammengefasst.



Abbildung 52: Durchführung der Messungen mit Vectrino-Sonden

4.2 Aufbereitung der Geschwindigkeits-Messergebnisse

Die erhobenen Messwerte wurden mithilfe der Software ‚WinADV32‘ des ‚US Department of the Interior‘ weiter aufbereitet. Hierbei erfolgte eine Filterung nach der Signalqualität (SNR – ‚SignalNoiseRatio‘), welche über das Verhältnis der reflektierten Schallwellen zum Hintergrundrauschen definiert wird und in den Rohdaten aus der ‚Vectrino‘-Messung hinterlegt ist. Für Messungen einer durchschnittlichen Geschwindigkeit wird ein SNR-Wert von mehr als 5 dB empfohlen (Nortek AS 2018).

Zusätzlich wurde zur Entfernung von fehlerhaften Ausreißern, die Filterung im Phasenraum ‚phase space threshold despiking‘ angewandt. Hierbei wird, beruhend auf drei kombinierten statistischen Konzepten, ein Ellipsoid im dreidimensionalen Phasenraum aufgespannt und außerhalb liegende Punkte als sogenannte Spitzen herausgefiltert (Goring, Nikora 2002).

Ein weiteres Kriterium zur Beurteilung der Qualität der Messdaten stellt die Korrelation dar, welche ebenfalls in den Rohdaten aus den ‚Vectrino‘-Messungen hinterlegt ist und die Ähnlichkeit der beiden reflektierten Schallwellen beschreibt. In der Vergangenheit wurde davon ausgegangen, dass ein Korrelationswert über 70% ausschlaggebend für eine gute Datenqualität sei (Nortek AS 2018). Es wurde allerdings festgestellt, dass speziell in turbulenten Strömungen, bei gleichzeitig hohen SNR-Werten, auch bei Korrelationswerten weit unter 70% weiterhin qualitativ hochwertige Daten vorliegen (Wahl 2000).

Da eine Filterung nach einer Korrelation über 70% den Großteil der Messdaten eliminieren würde, wurde der Korrelationsfilter für die Aufarbeitung der Daten auf einen Mindestwert von 50% reduziert. Im Gegenzug wurde der Grenzwert für den Filter nach dem SNR-Wert auf ein Minimum von 20 dB erhöht. Der Prozentsatz der nach der Filterung verbleibenden Datensätze liegt trotz dieses erhöhten Minimalwertes in den meisten Messpunkten über 70%, was einen weiteren Indikator für qualitativ hochwertige Messdaten darstellt (Baki et al. 2015). Abbildung 53 zeigt die gewählten Filtereinstellungen zur Datenaufbereitung mit ‚WinADV32‘.

Filtering	Sampling	Traversing	Scaling / Transforms	Units
☒ Average Correlation >				50
☐ Minimum Correlation >				70
☒ Average SNR >				20
☐ Minimum SNR >				5
☐ Velocity	V-x, V-1, V-Ea	<		0
☐ Acceleration spike filter		Acceleration threshold (g's)		1
☒ Phase-space threshold despiking (Goring & Nikora 2002, as modified in Wahl 2002)				
☒ Filter out communications errors ☐ Replace with interpolated values				

Abbildung 53: Einstellungen Datenfilterung mittels ‚WinADV‘-Software

Zusätzlich zur Filterung der Daten wurden bereits im Vorhinein die Rohdaten statistisch nach der relativen Häufigkeit ausgewertet und visuell dargestellt. Durch die Kontrolle mithilfe der Darstellung des Mittelwerts und die optische Überprüfung auf die Ausbildung einer Normalverteilung, konnten so bereits im Vorhinein fehlerhaften Datensätze erkannt und ausgeschlossen werden. Diese fehlerhaften Daten resultierten etwa aus Messpunkten, dessen Lage nahe an sogenannten ‚Weak Spots‘ auszumachen war. Diese neigen zu Störung, welche durch die mögliche ungünstige Überlagerung von Reflexionen von festen Oberflächen hervorgerufen werden. Für die kritischen Entfernungen von Messpunkten zu festen Oberflächen werden für die gewählte ‚Nominal Velocity Range‘ in der Literatur Werte von 30 mm, 78 mm oder 100 mm genannt (Nortek AS 2018; Clunie et al. 2007). Die für die Modellversuche kritischen Abstände zu den Seitenwänden des Glasgerinnes sind in den Darstellungen der Messpunkte (Abbildung 42 und Abbildung 44) als Strichlinien in der Farbe Cyan dargestellt.

Abbildung 54 zeigt die statistische Auswertung der Rohdaten von zufällig ausgewählten Messpunkten. Während die Annäherung an eine Normalverteilung (links) von qualitativ hochwertigen Daten zeugen, sind die rot hinterlegten Auswertungen (rechts) Anzeichen für fehlerhafte Daten. Daten aus Messpunkten, welche diese Anzeichen aufwiesen, wurden vor der weiteren Auswertung aussortiert.

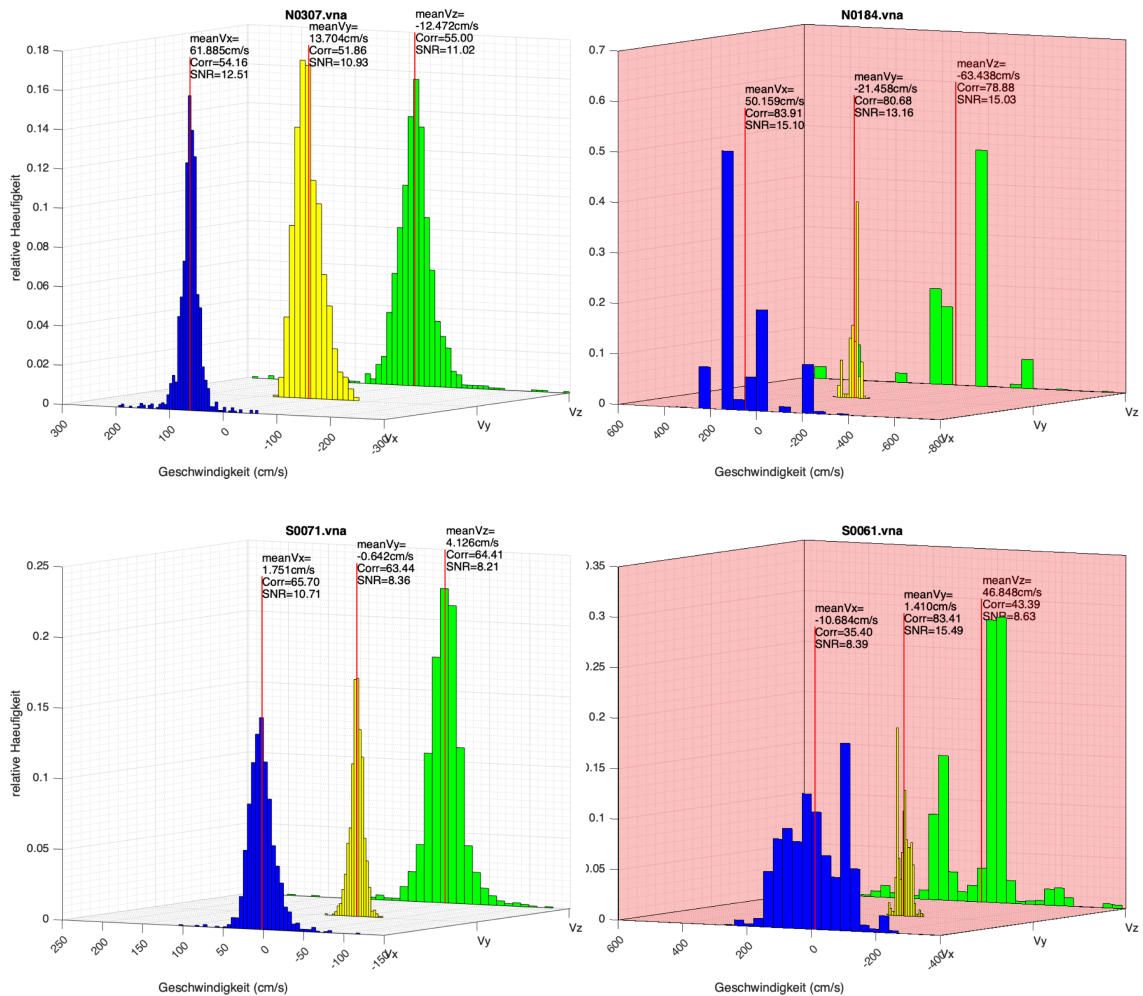


Abbildung 54: Statistische Auswertung der Rohdaten

4.3 Visualisierung der Geschwindigkeits-Messergebnisse

Die Visualisierung der Messergebnisse erfolgte mithilfe eines eigens erstellten Skriptes und der Software ‚MATLAB‘ des US-amerikanischen Entwicklers ‚The MathWorks, Inc‘. Hierfür wurden die bereits zuvor gefilterten und für die Auswertung aufbereiteten Messdaten in einer Excel-Datei zum Import bereitgestellt. Die Visualisierung kann wahlweise für jede einzelne Geschwindigkeitskomponente (V_x , V_y oder V_z), die Gesamtresultierende (V -Avg) oder die turbulente kinetische Energie (TKE) erfolgen. Nach Auslesen der Koordinaten und Aufbau des Messrasters erfolgt im ersten Schritt die Berechnung von eventuell fehlenden Messwerten. Diese können vereinzelt auf dem Herausfiltern fehlerhafter Daten oder größtenteils auf Lücken im Messraster aufgrund der nur in Teilbereichen verdichteten Messpunkte beruhen. Hierfür erfolgt je nach Möglichkeit eine lineare oder

bilineare Interpolation auf Basis der vorhandenen umliegenden Messwerte. Sobald das gesamte Messraster mit gemessenen oder daraus abgeleiteten Werten befüllt ist, erfolgt zur gleichmäßigeren Darstellung eine Verdichtung des gesamten Messrasters auf 1 mm Abstände verbunden mit weiteren (bi-)linearen Interpolationen der Zwischenwerte. Damit erfolgt die endgültige Visualisierung der Messdaten wahlweise als Schwarz-Weiß-Grafik mit Darstellung von Isotachen oder als farbiger Contour-Plot. Zusätzlich werden die Stellen der Maximalwerte gekennzeichnet und mit dessen Messgröße beschriftet. Zur anschaulicheren Darstellung der Strömungsverhältnisse werden die Richtungsvektoren der entsprechenden Geschwindigkeitskomponenten überlagert.

4.4 Visualisierung der turbulenten kinetischen Energie (TKE)

Analog zur Auswertung und Visualisierung der Fließgeschwindigkeiten erfolgte auch die Darstellung der turbulenten kinetischen Energie. Ausreißer und fehlerhafte Daten wurden auch hier aussortiert und aus den verbleibenden Messdaten die turbulente kinetische Energie errechnet wie in Kapitel 2.4.2 beschrieben.

Aufgrund der konsequenten Filterung der Daten (siehe Kapitel 4.2) gab es bei der Auswertung der Turbulenz einen erhöhten Prozentsatz fehlerhafter Daten. Da die Thematik der Turbulenz speziell von hochfrequenten und qualitativ hochwertigen Daten profitiert, sollte für eine detailliertere Betrachtung eine erneute Untersuchung mit höheren Messfrequenzen durchgeführt werden. Die im Zuge dieser Arbeit erhaltenen Ergebnisse werden dessen ungeachtet vollumfänglich dargestellt und lassen einen ersten Trend zu den turbulenten Bedingungen innerhalb der beiden Modelle erahnen.

4.5 Ergebnisse Vertical Slot Schlitzpass

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Messungen im Modell des Vertical Slot Schlitzpasses nach der Auswertung und Visualisierung im Grundriss dargestellt.

4.5.1 Fließgeschwindigkeiten VS (Grundriss Becken 2)

Die Fließgeschwindigkeiten innerhalb der Becken des Vertical Slot Schlitzpasses sowie im Übergangsbereich zeigen eine deutlich ausgeprägte Strömungsfahne mit den höchsten auftretenden Fließgeschwindigkeiten knapp unterhalb des Schlitzes (etwa 1,30 m/s bis 1,40 m/s). Die Hauptströmung verläuft nahezu geradlinig vom oberen Schlitz direkt zum unteren Schlitz, wobei die darin auftretenden Fließgeschwindigkeiten mit Ausnahme des direkten Strömungsschattens des Umlenkblockes kontinuierlich über 0,50 m/s liegen. In der orografisch rechten Beckenhälfte entsteht durch die Positionierung des Hakenelementes eine Rückströmung mit Geschwindigkeiten unter 0,35 m/s sowie eine strömungsberuhigte Ruhezone. Mit zunehmender Tiefe kann eine geringfügige Verkleinerung der Strömungsfahne beobachtet werden (Abbildung 57), das Strömungsbild sowie die Höchstwerte der Fließgeschwindigkeiten bleiben aber ähnlich bis nahezu konstant.

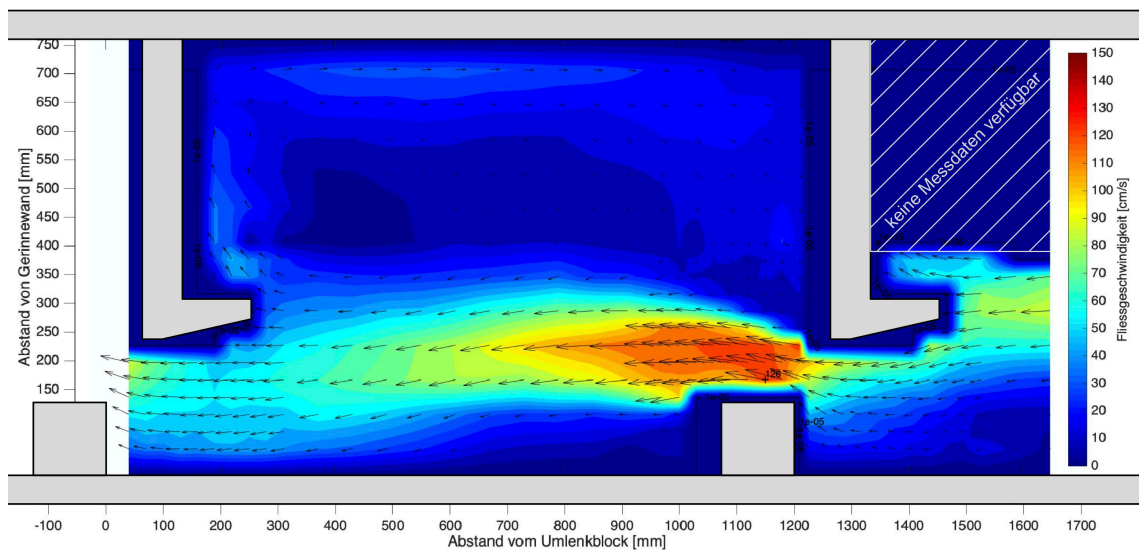


Abbildung 55: V-Avg VS, Becken 1+2, Ebene 1 ($z = 160$ mm über Sohle)

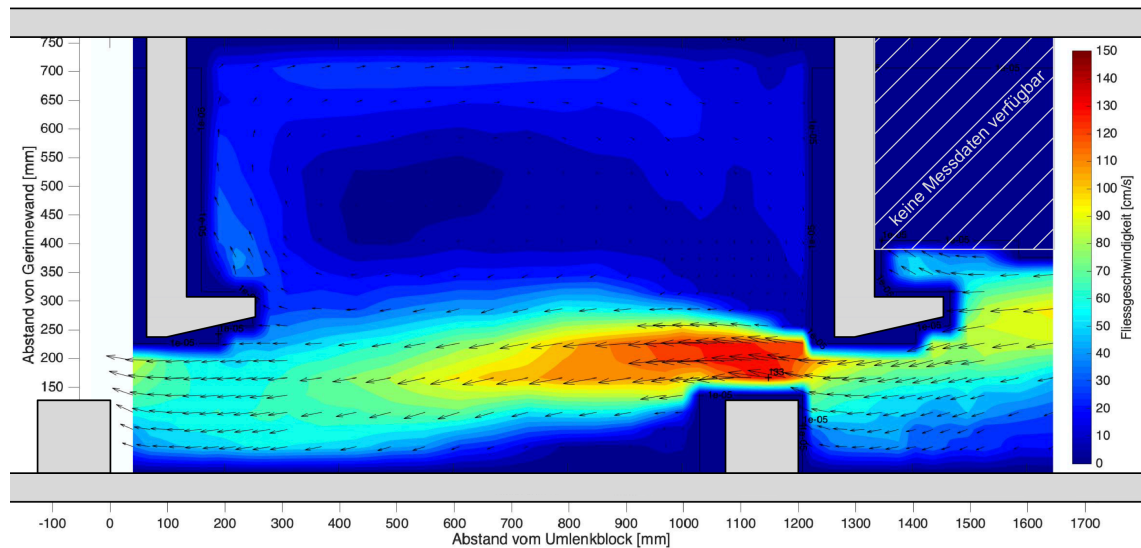


Abbildung 56: V-Avg VS, Becken 1+2, Ebene 2 ($z = 120$ mm über Sohle)

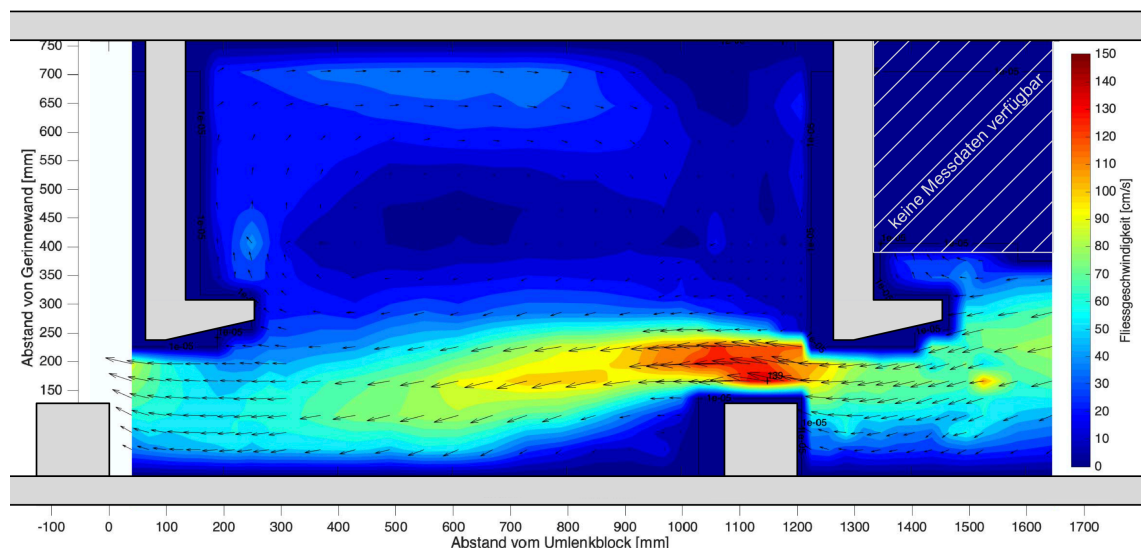


Abbildung 57: V-Avg VS, Becken 1+2, Ebene 3 ($z = 40$ mm über Sohle)

4.5.2 Turbulenzen VS (Grundriss Becken 2)

Die Ergebnisse der Turbulenzen durch Auswertung der turbulenten kinetischen Energie zeigen lokal auftretende Spitzen von bis zu $2500 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ (Abbildung 60). Die höchsten Turbulenzen treten an den Kanten des Umlenkblockes sowie weitere erhöhte Werte an den Rändern der Strömungsfahne auf. Innerhalb der Hauptströmung treten größtenteils Werte von über $500 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ auf. Die Maximalwerte der turbulenten kinetischen Energie bleiben über die Tiefe etwa gleich, der

Bereich der erhöhten Werte innerhalb der Hauptströmung reduziert sich allerdings mit zunehmender Tiefe. In den Ruhezonen treten nur geringe oder größtenteils nahezu keine Turbulenzen auf.

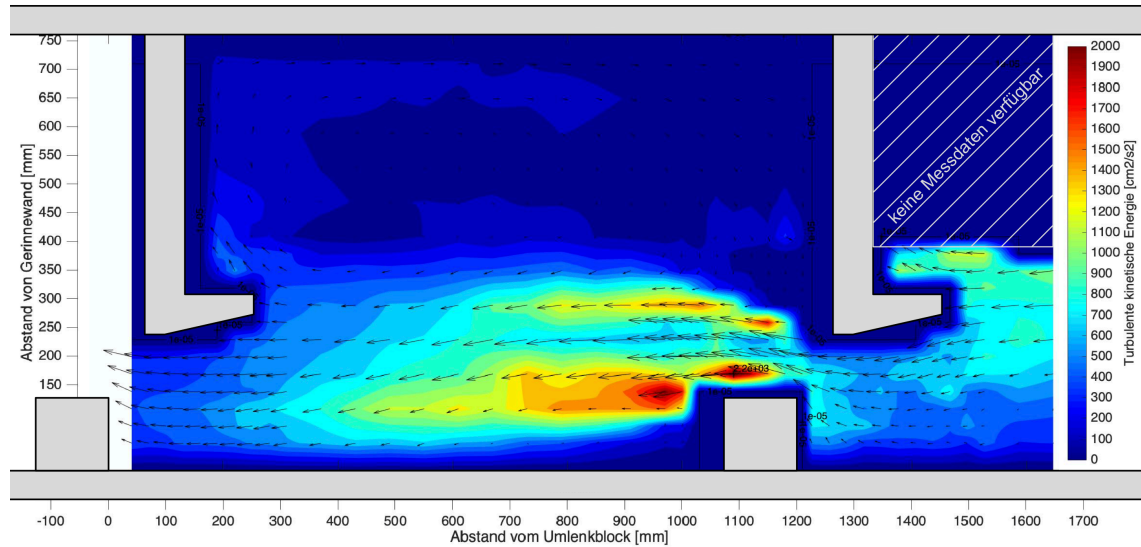


Abbildung 58: TKE VS, Becken 1+2, Ebene 1 ($z = 160$ mm über Sohle)

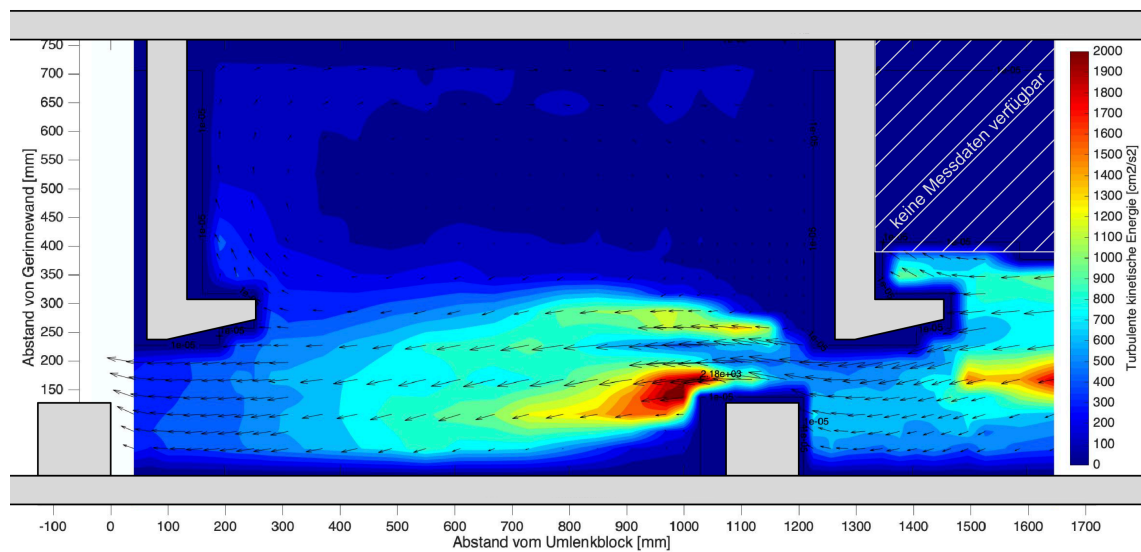


Abbildung 59: TKE VS, Becken 1+2, Ebene 2 ($z = 120$ mm über Sohle)

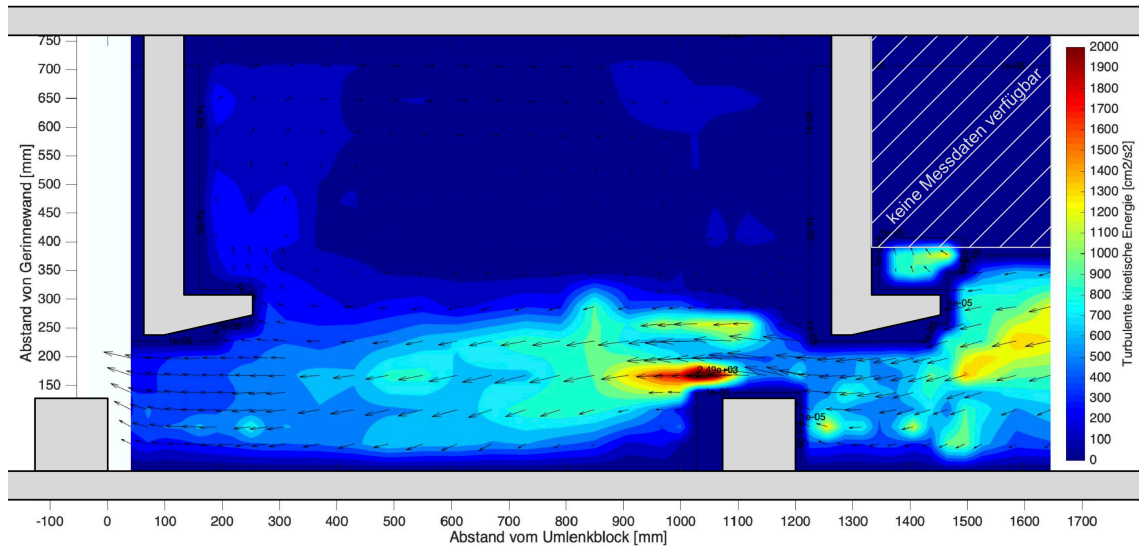


Abbildung 60: TKE VS, Becken 1+2, Ebene 3 ($z = 40$ mm über Sohle)

4.6 Ergebnisse Technischer Beckenpass

Zum Vergleich der beiden Bautypen werden nachfolgend die ausgewerteten Messergebnisse des Technischen Beckenpasses ebenfalls durch Visualisierung im Grundriss sowie zusätzlich in Form eines Längsschnittes dargestellt.

4.6.1 Fließgeschwindigkeiten TB (Grundriss Becken 2)

Die Ergebnisse der Fließgeschwindigkeiten im Becken 2 des Technischen Beckenpasses zeigen ein konstantes Strömungsbild über die gesamte Tiefe. Vom oberen Schlitz aus wird die Strömungsfahne zur orografisch rechten Seitenwand abgelenkt (Abbildung 61). Die Hauptströmung verläuft danach nahezu parallel entlang der Gerinnewand und wird anschließend von der Trennwand zum unteren Schlitz umgeleitet. Die Höchstwerte der Fließgeschwindigkeit liegen etwa bei 1,30 m/s bis 1,40 m/s, im weiteren Strömungsverlauf entlang der Seitenwand reduzieren sich diese und weisen nur noch im Randbereich erhöhte Werte von etwa 0,80 m/s bis 0,90 m/s auf. An der orografisch linken Seitenwand bildet sich eine geringe Rückströmung mit geringen Fließgeschwindigkeiten von maximal 0,25 m/s aus. Der Großteil des Beckens bleibt von der Hauptströmung unbeeinflusst wodurch sich eine Ruhezone mit nahezu keinen Fließgeschwindigkeiten ausbildet. Mit zunehmender Tiefe lässt sich eine Verkleinerung der Strömungsfahne

sowie die Reduktion der Fließgeschwindigkeiten entlang der Hauptströmung und eine Vergrößerung der strömungsberuhigten Ruhezone beobachten.

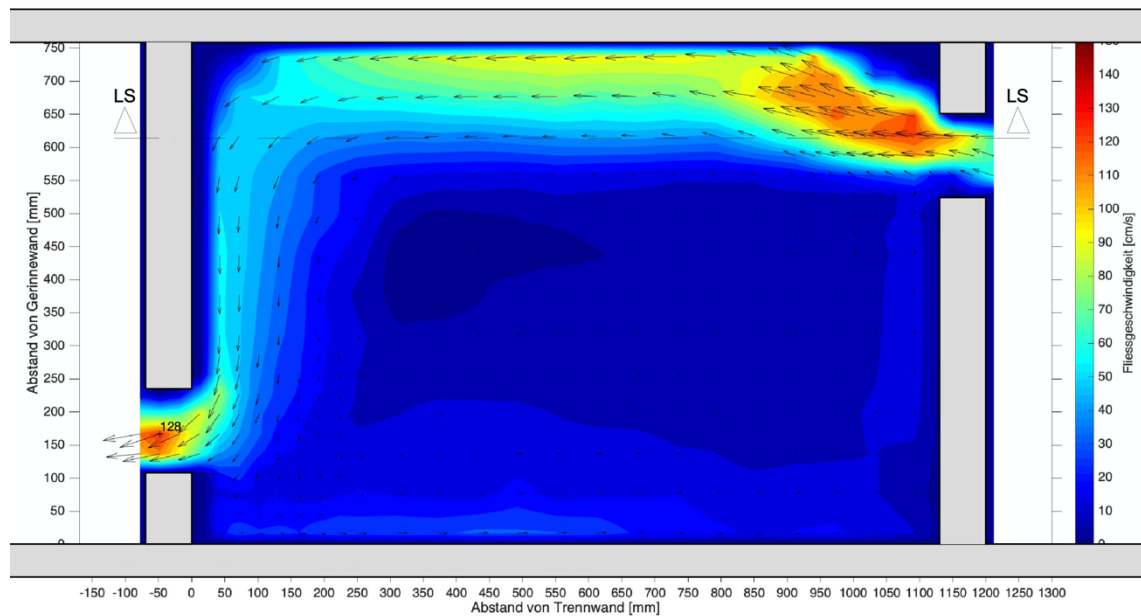


Abbildung 61: V-Avg TB, Becken 2, Ebene 0 ($z = 240$ mm über Sohle)

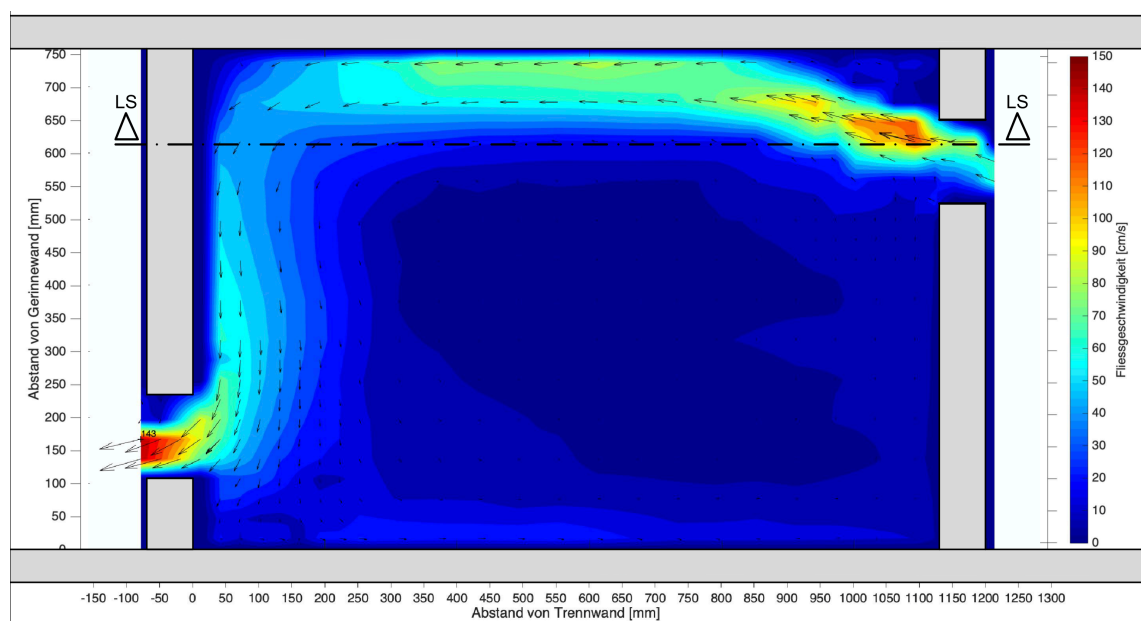


Abbildung 62: V-Avg TB, Becken 2, Ebene 1 ($z = 160$ mm über Sohle)

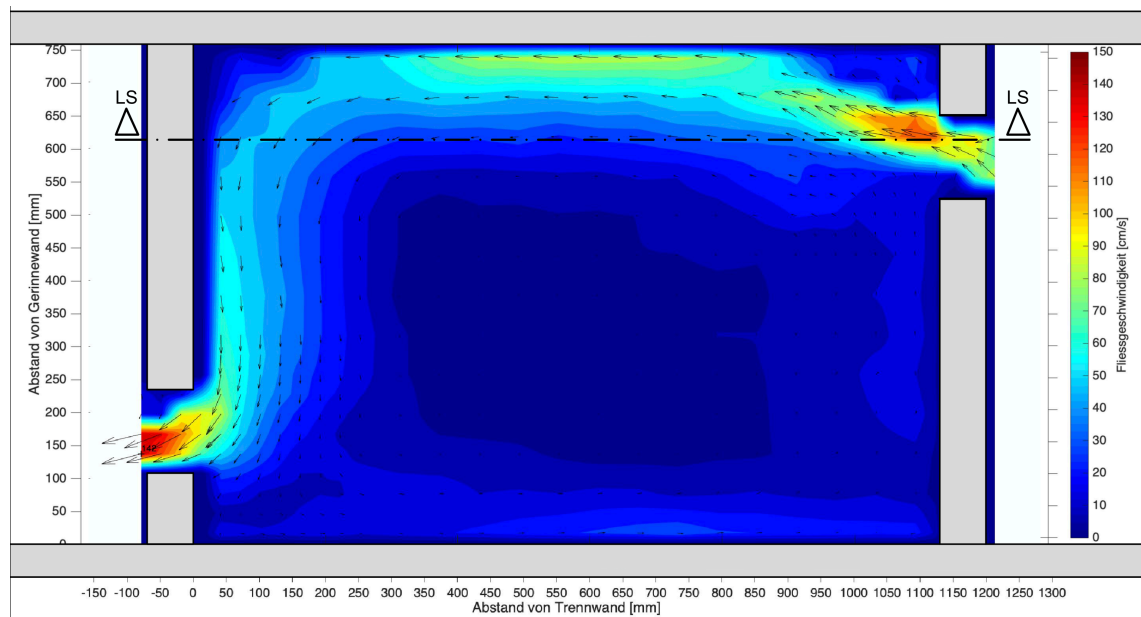


Abbildung 63: V-Avg TB, Becken 2, Ebene 2 ($z = 120$ mm über Sohle)

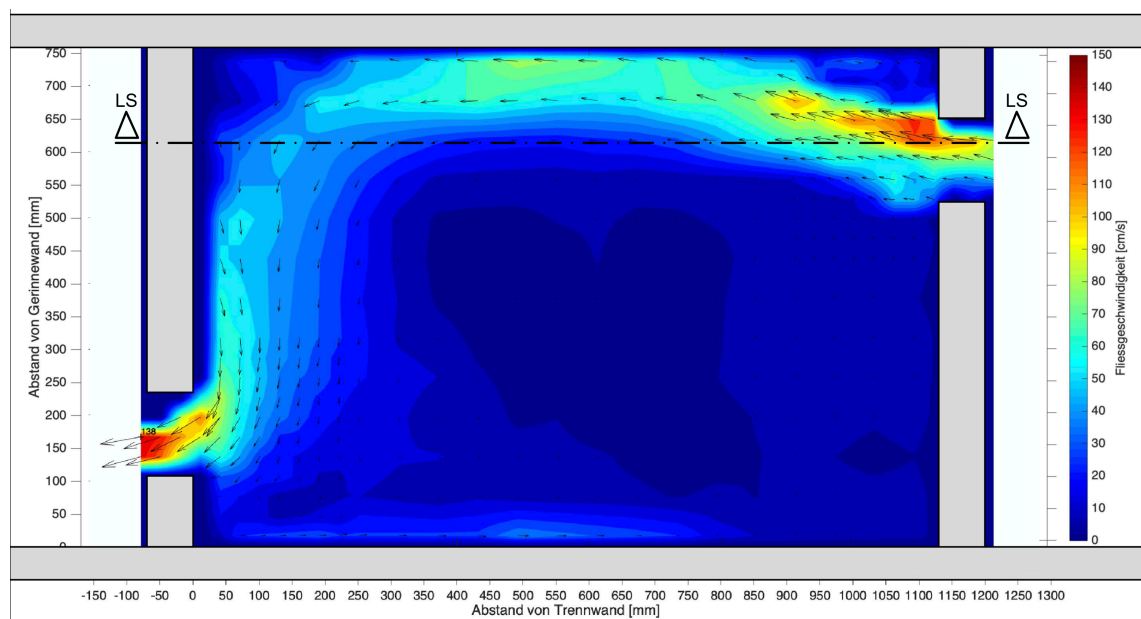


Abbildung 64: V-Avg TB, Becken 2, Ebene 3 ($z = 40$ mm über Sohle)

4.6.2 Turbulenzen TB (Grundriss Becken 2)

Im Technischen Beckenpass treten nur geringe lokale Turbulenzen mit Höchstwerten der turbulenten kinetischen Energie von etwa $1250 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ auf. Turbulenzen treten hierbei direkt im Eintauchbereich des Überfallstrahls (Abbildung 67) sowie an den Rändern der Strömungsfahne (Abbildung 66) auf. Entlang der Hauptströmung treten nur geringe Turbulenzen im Bereich von maximal etwa 350

cm^2/s^2 auf, während im restlichen Bereich des Beckens nahezu keine Turbulenzen zu erkennen sind.

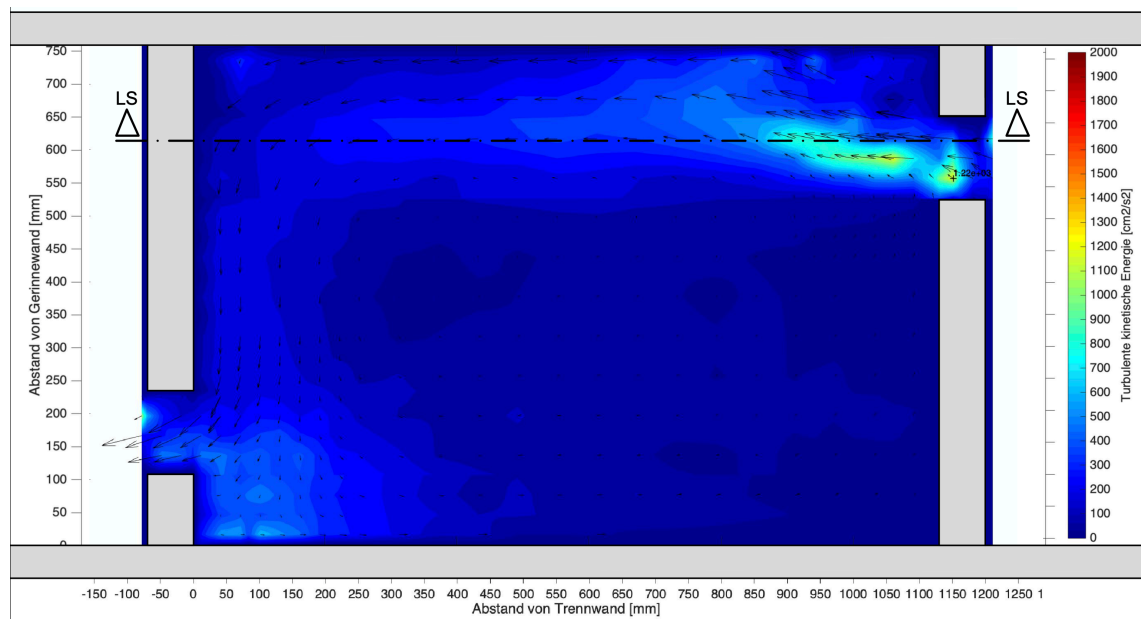


Abbildung 65: TKE TB, Becken 2, Ebene 0 ($z = 240 \text{ mm}$ über Sohle)

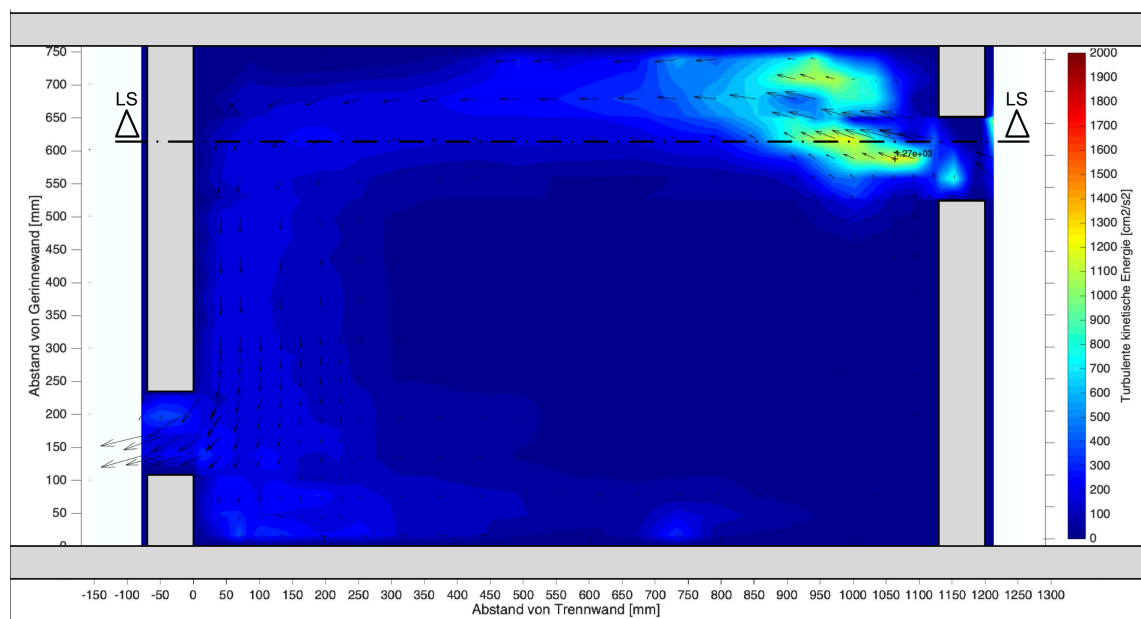


Abbildung 66: TKE TB, Becken 2, Ebene 1 ($z = 160 \text{ mm}$ über Sohle)

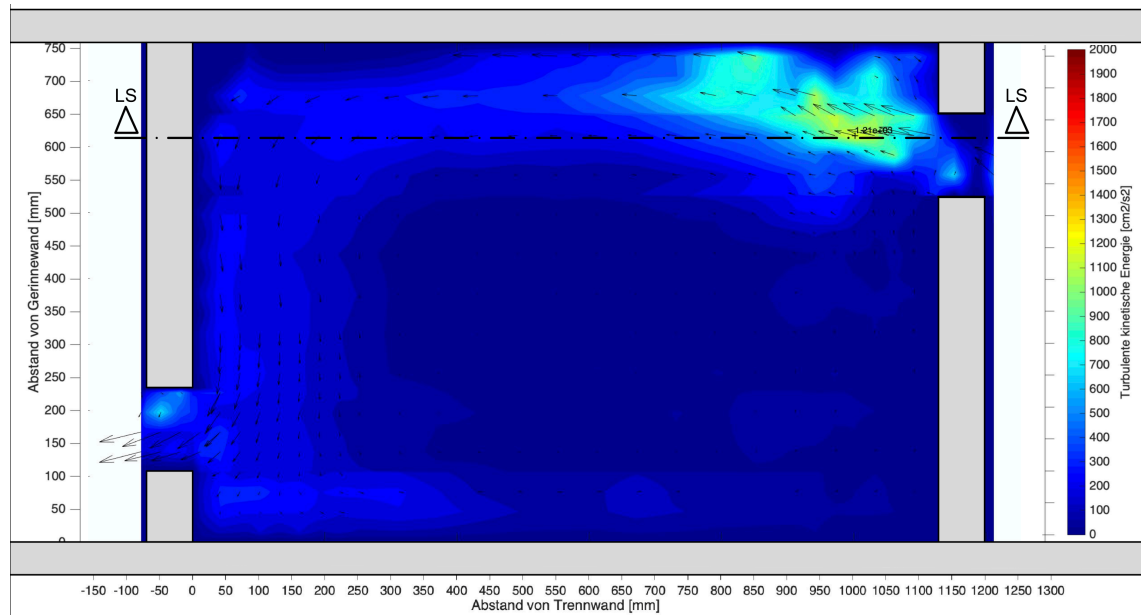


Abbildung 67: TKE TB, Becken 2, Ebene 2 ($z = 120$ mm über Sohle)

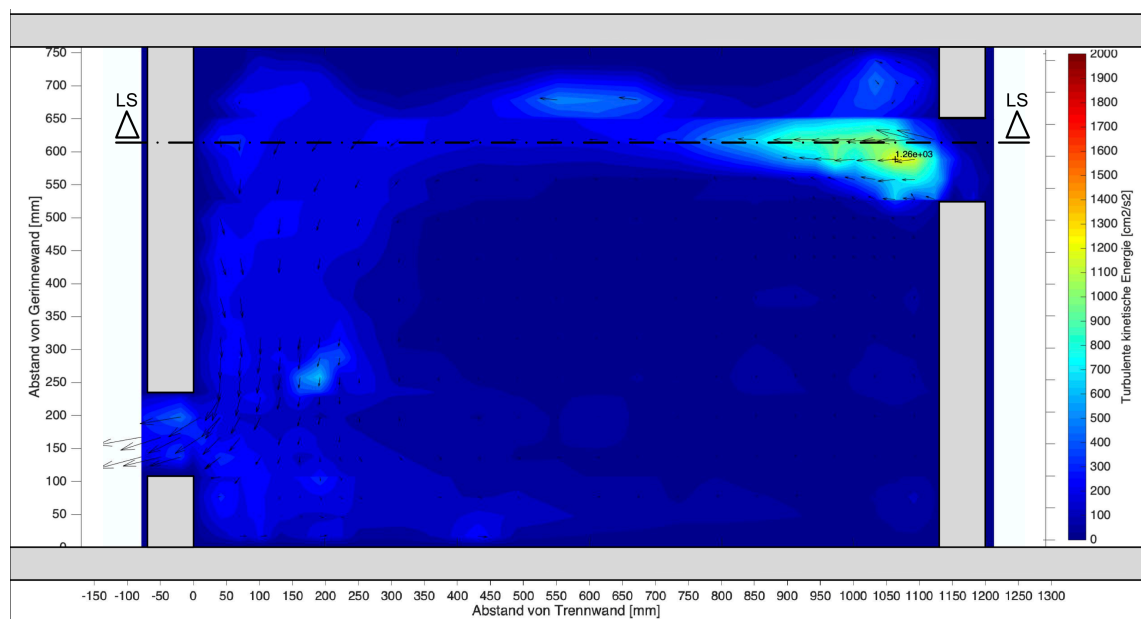


Abbildung 68: TKE TB, Becken 2, Ebene 3 ($z = 40$ mm über Sohle)

4.6.3 Fließgeschwindigkeiten TB (Längsschnitt durch Schlitz)

Die Auswertung der Fließgeschwindigkeiten im Längsschnitt (Abbildung 69) zeigt den Bereich der Maximalwerte knapp unterhalb des Schlitzes mit etwa 1,30 m/s. Die Fließgeschwindigkeiten in Beckenmitte liegen oberflächennah bei etwa 0,55 m/s und reduzieren sich mit zunehmender Tiefe. Im Kolkbereich bildet sich eine Ruhezone mit geringen Fließgeschwindigkeiten unter 0,15 m/s aus.

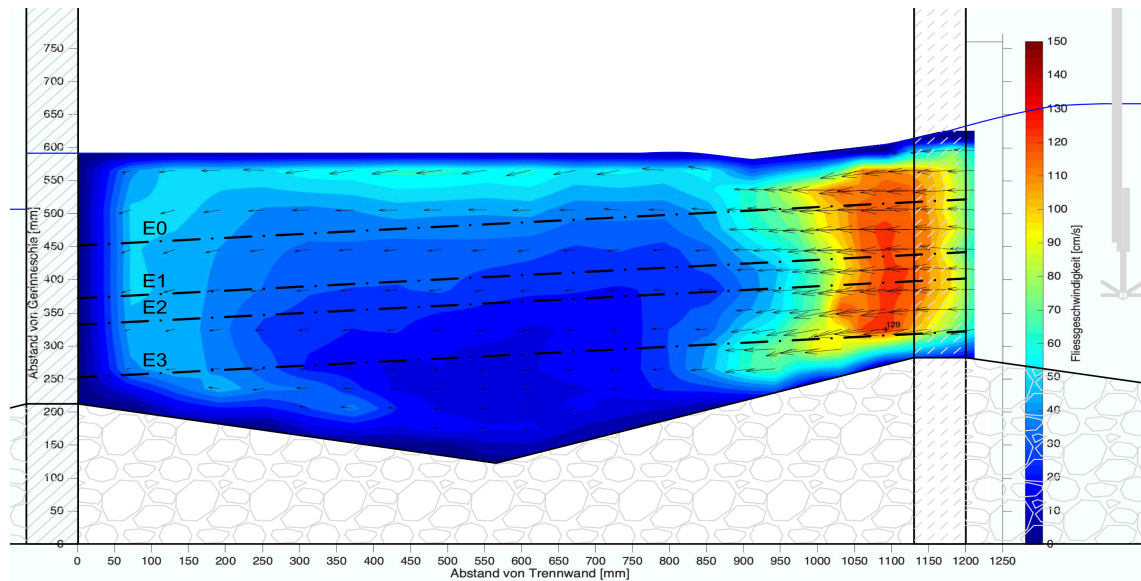


Abbildung 69: V-Avg TB, Becken 2, Längsschnitt (durch Schlitz)

4.6.4 Turbulenzen TB (Längsschnitt durch Schlitz)

Die Turbulenzen im Längsschnitt zeigen den Bereich der Höchstwerte ebenfalls knapp unterhalb des Schlitzes mit einem Maximalwert von etwa $1250 \text{ cm}^2/\text{s}^2$. Oberflächennah treten auch in Beckenmitte Turbulenzen mit einer turbulenten kinetischen Energie von etwa $900 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ auf, welche sich mit zunehmender Tiefe auf Minimalwerte von etwa $50 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ reduzieren.

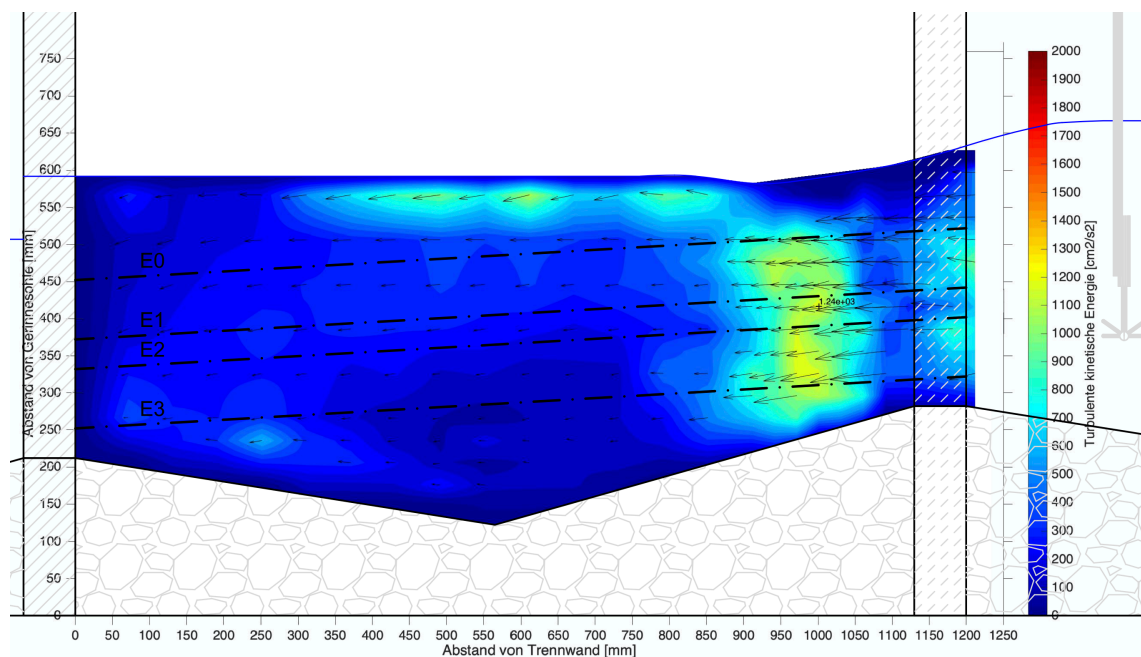


Abbildung 70: TKE TB, Becken 2, Längsschnitt (durch Schlitz)

5. Diskussion und Erkenntnisse

Nachfolgend erfolgt die Interpretation der Messergebnisse und dessen Erkenntnisse sowie Erläuterung der relevanten Unterschiede zwischen Technischem Beckenpass und Vertical Slot Schlitzpass.

5.1 Erkenntnisse Vertical Slot Schlitzpass

Die Ergebnisse der Labormessungen der Fließgeschwindigkeiten zeigen deutlich den Strömungsverlauf innerhalb der Becken des Vertical Slot Schlitzpasses sowie im Übergangsbereich. Durch die korrekte Dimensionierung und Positionierung des Umlenkblocks, in Anlehnung an die Bemessungskriterien der DWA (DWA 2010), soll eine Umlenkung des Hauptstromes in Richtung Beckenmitte erfolgen. So soll die Umwandlung der freigesetzten potentiellen Energie über ein möglichst großes Beckenvolumen stattfinden, was zur Umlenkung der Strömungsfahne und strömungsberuhigten Bereichen unmittelbar nach der Passage des Schlitzes führt. Die Ergebnisse lassen allerdings erkennen, dass diese Umlenkung nur eine geringe Auswirkung zeigt, was zu dem Schluss führt, dass die Einhaltung der empfohlenen Dimensionierungsparameter im vorliegenden Fall nur geringe bis keine Wirkung zeigte, sodass nur kleine Teilbereiche des Beckens zur Energieumwandlung genutzt werden. In weiterer Folge könnte sich hier ein geradliniges Durchströmen (hydraulischer Kurzschluss) einstellen, wodurch die Fischpassage, besonders für schwimmschwache Arten, mögliche Einschränkungen erfährt. Oberwasserseitig des Hakenelementes bildet sich eine Rückströmung entlang der orografisch rechten Seitenwand sowie eine etwas außermittig gelegene Ruhezone mit niedrigeren Fließgeschwindigkeiten aus. Der Bereich mit der höchsten Fließgeschwindigkeit, welcher von Fischen bei der Aufwanderung überwunden werden muss, findet sich erwartungsgemäß knapp unter dem Schlitz. Laut Literatur liegt dieser Bereich etwa in einem Abstand der 1 bis 2-fachen Wasserspiegeldifferenz (DWA 2010). Im Modellversuch konnte dies nicht vollständig bestätigt werden, die Maximalwerte lagen hier mit knapp weniger als die 1-fache Wasserspiegeldifferenz etwas näher am Schlitz. Es ist zu erkennen, dass sich die Ausbildung der Strömungsfahne mit zunehmender Tiefe leicht reduziert.

Die Auswertung der Turbulenzen im Modell des Vertical Slot Schlitzpass durch Visualisierung der turbulenten kinetischen Energie in den Messpunkten, liefert erwartungsgemäß die höchsten Werte nah an den Kanten des Umlenkblockes. Dies ist auf die erzwungene Umlenkung der Hauptströmung zurückzuführen, welche durch die exakte Positionierung des Umlenkblockes möglichst in Richtung Beckenmitte erfolgen soll. Dieser Umlenkeffekt soll dazu führen, die Energie in einem möglichst großen Beckenvolumen umzuwandeln, bewirkt im Gegensatz aber zugleich die Etablierung von lokal hochturbulenten Bereichen entlang der Kanten des Umlenkblockes. Die räumliche Ausdehnung der auftretenden Turbulenzen reduziert sich zwar mit zunehmender Tiefe, die Auswertung zeigt aber über die gesamte Tiefe ein ähnliches Bild sowie annähernd gleichbleibende Maximalwerte der turbulenten kinetischen Energie.

5.2 Erkenntnisse Technischer Beckenpass

Aus den Ergebnissen der Labormessungen im Becken 2 des Technischen Beckenpasses kann der Verlauf der Hauptströmung mit großer Konsistenz über die Tiefe aus allen Messebenen anschaulich interpretiert werden. Diese verläuft parallel zur Gerinnewand an der orografisch rechten Seite und wird anschließend von der Trennwand orthogonal zur gegenüberliegenden Seite abgelenkt. Dort erfolgt ein erneuter Richtungswechsel und der Durchfluss durch den Schlitz mit anschließender Ausprägung des gespiegelten Strömungsbildes im nachfolgenden Becken aufgrund der alternierend angeordneten Schlitze. Ein geringer Teil der Strömung verläuft über den Schlitz hinaus bis zur orografisch linken Seite des Beckens und bewirkt dadurch eine leichte Rückströmung entlang der Gerinnewand. Diese Kombination erzeugt in Beckenmitte einen deutlich größeren Ruhebereich mit geringeren Fließgeschwindigkeiten als im Vertical Slot. Die höchsten gemessenen Geschwindigkeiten liegen je nach Beckenübergang direkt im oder kurz nach dem Schlitz. Die Maximalwerte entsprechen hierbei in etwa den Werten im Vertical Slot oder liegen leicht darüber. Im Vergleich zum Vertical Slot Schlitzpass bildet sich der Bereich der höchsten Fließgeschwindigkeiten nicht über die gesamte Schlitzbreite aus, wodurch für schwimmschwache Arten selbst direkt im Schlitz Korridore mit reduzierten Geschwindigkeiten für eine energieschonende Aufwanderung verbleiben.

Die im Technischen Beckenpass zusätzlich durchgeführte Messung im Längsschnitt durch den Schlitz zeigt ein stimmiges Bild zu den bereits dargestellten Ergebnissen. Die leicht erhöhten Fließgeschwindigkeiten in Oberflächennähe sowie die Reduzierung mit zunehmender Tiefe werden deutlich bestätigt. Auch die Lage des Bereichs der höchsten Fließgeschwindigkeiten bleibt über die Tiefe konstant, knapp unterhalb des Schlitzes. Im Längsschnitt lässt sich erkennen, dass im gesamten Becken nur geringe Geschwindigkeitskomponenten in vertikaler Richtung vorkommen. Dies bekräftigt die Entscheidung, das Hauptaugenmerk auf die Darstellung der Hauptströmung in den Grundrissen gelegt zu haben.

Durch die an den Beckenrändern verlaufende Hauptströmung wird im Technischen Beckenpass nur der Randbereich des Beckenvolumens zur Energieumwandlung genützt. Die Auswertung der turbulenten kinetischen Energie zeigt allerdings trotzdem keine generell hohen Turbulenzen im Becken sondern ähnlich zum Vertical Slot ausschließlich lokal begrenzte Bereiche erhöhter Werte unterhalb des Schlitzes. Analog zu den Ergebnissen des Vertical Slot bleiben auch im Technischen Beckenpass die Maximalwerte der turbulenten kinetischen Energie über die Tiefe annähernd konstant.

Auch die Darstellung der turbulenten kinetischen Energie im Längsschnitt deckt sich mit den Ergebnissen der 4 Messebenen. Der Bereich der höchsten Turbulenzen verschiebt sich im Vergleich zu den Maximalwerten der Fließgeschwindigkeiten leicht in Richtung Unterwasser, bleibt aber über die Tiefe in annähernd konstanter Form. Weitere Bereiche erhöhter Turbulenzen treten oberflächennah auf, bleiben für die Fischmigration allerdings irrelevant, da diese Bereiche nicht als Wanderkorridor genutzt werden müssen.

5.3 Erkenntnisse zum Vergleich der beiden Bautypen

Der Vergleich der beiden Bautypen im Modell zeigte eine um etwa 25% reduzierte erforderliche Dotation des Beckenpasses im Vergleich zum Vertical Slot bei gleichzeitiger Etablierung der gleichen Wassertiefen. Bei vergleichbaren Maximalwerten, bilden sich im Technischen Beckenpass kleinere Bereiche erhöhter Fließgeschwindigkeiten aus und selbst im Schlitz bleiben strömungsberuhigte Korridore zur Aufwanderung von schwimmschwachen Arten erhalten, während

im Vertical Slot die weiter ausgedehnten Bereiche der höheren Geschwindigkeiten über die gesamte Schlitzbreite reichen und somit einen kritischen Zwangspunkt zur Überwindung darstellen. Sobald der anstrengende Übergang in das nächste Becken erfolgt ist, müssen erschöpfte Fische im Vertical Slot erst weiter gegen die Hauptströmung anschwimmen, um die Ruhezone hinter dem Haken-element zu erreichen, wogegen der weitaus größer ausfallende strömungsberuhigte Bereich beim technischen Beckenpass direkt oberhalb des Schlitzes anschließt.

Die jeweilige Leistungsdichte der beiden Systeme, welche laut Literatur zur Abschätzung der Turbulenzen herangezogen wird, errechnet sich nach der Formel (12 aus Kapitel 2.4.4 und ergibt nach der Umrechnung in Naturmaße einen Wert von ca. 140 W/m^3 für den Technischen Beckenpass beziehungsweise ca. 190 W/m^3 für den Vertical Slot Fischpass. Diese Berechnungsmethode beruht auf der Annahme, dass der gesamte Beckeninhalt zur Energiedissipation zur Verfügung steht, was nach den Erkenntnissen aus den Beckenmessungen für beide Systeme nicht der Fall ist. Die Betrachtung der turbulenten kinetischen Energie hingegen zeigt auch das Vorhandensein von lokal begrenzten Turbulenzen auf. Im Vertical Slot zeigte die Umlenkung des Hauptstromes durch die Positionierung des Umlenkblockes trotz optimaler Dimensionierung nach den Vorgaben der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft (DWA) nur einen geringfügigen Effekt, weshalb keinesfalls von der Energieumwandlung im gesamten Beckenvolumen ausgegangen werden kann. Die Hauptströmung des Technischen Beckenpasses verläuft dagegen weitgehend entlang der Beckenrändern, weshalb die Energieumwandlung ebenfalls nur in einem Teilbereich des Beckenvolumens erfolgt. Im Gegensatz zur Beurteilung der Turbulenzen über die Leistungsdichte bietet die Betrachtung der turbulenten kinetischen Energie die tatsächlichen räumlichen Vorkommen von Bereichen erhöhter Turbulenzen, zeigt allerdings im Technischen Beckenpass keinerlei nachteilige Auswirkungen der randgebundenen Hauptströmung, während beim Vertical Slot größere Bereiche erhöhter Turbulenzen speziell an den Kanten des Umlenkblockes auftreten.

6. Zusammenfassung

Im Zuge dieser Arbeit wurden zahlreiche Messungen im Labor an den Modellen der beiden Schlitzpass-Bautypen Vertical Slot (VS) und Technischer Beckenpass (TB) durchgeführt. Nach anfänglichen Probemessungen und dem Vergleich unterschiedlicher Methoden fiel die Wahl auf dreidimensionale Geschwindigkeitsmessungen mittels ‚Acoustic Doppler Velocimetry‘ (ADV). Die Durchführung der Messreihen erfolgte mit der ‚Vectrino‘ ‚Sidelooking‘-Sonde der Firma ‚Nortek‘. Es erfolgten Beckenmessungen in 3 (VS) bzw. 4 (TB) Messebenen in einem Raster von 6 x 6 cm, welcher in den relevanten Bereichen auf 3 x 3 cm verdichtet wurde. Zusätzlich erfolgte für den technischen Beckenpass die Aufnahme eines Messrasters im Längsschnitt. Durch statistische Auswertung sowie Filterung der Daten nach Qualitätskriterien und Aussortieren von Ausreißern, konnten für sämtliche Messreihen ausreichende, qualitativ hochwertige und räumlich gut aufgelöste Ergebnisse zur Visualisierung der Fließgeschwindigkeiten erzielt werden. Diese zeigen konstante Verläufe der Hauptströmungsbilder über alle Ebenen und einen schlüssigen Zusammenhang mit dem Längsschnitt im Technischen Beckenpass.

Im direkten Vergleich zum konventionellen, im Leitfaden des BMLFUW empfohlenen Vertical Slot Schlitzpass weist der Technische Beckenpass einen geringeren Durchfluss bei Ausbildung der gleichen Wassertiefen auf, wodurch ein wirtschaftliches Einsparungspotential durch Reduktion der Dotation um etwa 25% entsteht. Ein weiterer ökonomischer Vorteil lässt sich in der deutlich einfacheren Herstellungsweise der Beckenübergänge und dadurch dem Entfall der aufwändigen Schalungsarbeiten für die Einbauten erkennen. Aus hydraulischer Sicht bleiben die beiden Systeme bei ähnlichen Maximalwerten der Fließgeschwindigkeiten allerdings reduzierten Turbulenzen im Technischen Beckenpass vergleichbar, wobei die stärkere Ausprägung von Ruhezonen sowie die räumliche Verteilung der Fließgeschwindigkeiten eine deutlich verbesserte Funktionalität des Technischen Beckenpasses erwarten lässt. Der Technische Beckenpass vereint somit den ökologischen sowie hydraulischen Vorteil der Beckenstruktur mit Kolkbildung des Naturnahen Beckenpasses mit der Reduktion im Platzbedarf, der bautechnisch exakt möglichen Ausführung der Beckenübergänge sowie der ökonomisch effizienten Herstellungsweise eines technischen Bautyps.

Literaturverzeichnis

- AG-FAH (2011): Arbeitsgruppe Fischaufstiegshilfen: Grundlagen für einen österreichischen Leitfaden zum Bau von Fischaufstiegshilfen (FAHs), BML-FUW (Hrsg.): Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. Wien: 91 Seiten. URL: https://www.bmlrt.gv.at/dam/jcr:f8ca9a0f-68b2-428b-b39f-991c7113cd87/02_20Grundlagen_FAH_Endbericht_M_rz_2011.pdf (geladen am 22.04.2019)
- Baki A.B.M., Zhu D.Z., Rajaratnam N. (2015): Turbulence Characteristics in a Rock-Ramp-Type Fish Pass,. Journal of Hydraulic Engineering 141(2): Seiten 04014075–1 bis 04014075–14. DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000962
- BMLFUW (Hrsg.) (2010): Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft: Nationaler Gewässerbewirtschaftungsplan 2009, Wien: 225 Seiten. URL: https://www.bmlrt.gv.at/dam/jcr:af32d6d1-4217-4ec4-9e33-6a35a79445db/NGP_Textdokument_30_03_2010.pdf (geladen am 06.03.2020)
- BMLFUW (Hrsg.) (2012): Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft: Leitfaden zum Bau von Fischaufstiegshilfen, Wien: 102 Seiten. URL: https://www.bmlrt.gv.at/dam/jcr:ddc26978-eb6c-488a-bcec-16822a90a4b2/FAH%20Leitfaden_19_12_2012_final.pdf (geladen am 23.04.2019)
- BMLFUW (Hrsg.) (2017): Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft: Nationaler Gewässerbewirtschaftungsplan 2015, Wien: 358 Seiten. URL: https://www.bmlrt.gv.at/dam/jcr:0a6b3e92-143b-490e-aaf2-02d0caac2bdc/NGP%202015_Endversion_gsb.pdf (geladen am 06.03.2020)
- Bollrich G. (2007): Technische Hydromechanik. Bd. 1: Grundlagen, 6., durchges. und korr. Aufl. Huss-Medien. Berlin: 456 Seiten.
- Clunie T.M., Nikora V.I., Coleman S.E., Friedrich H., Melville B.W. (2007): Flow Measurement Using Flying ADV Probes,. Journal of Hydraulic Engineering 133(12): Seiten 1345 bis 1355. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2007)133:12(1345)
- Dantec Dynamics (2020): Laser Doppler Anemometry (LDA) - Theory and applications,. URL: <https://www.dantecdynamics.com/wp-content/uploads/2019/11/LDA-Educational-Slideshow-v2.pptx> (geladen am 23.09.2020)
- DWA (Hrsg.) (2010): Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.: Merkblatt DWA-M 509, Fischaufstiegsanlagen und fischpassierbare Bauwerke - Gestaltung, Bemessung, Qualitätssicherung, Hennef, Deutschland: 287 Seiten.

- FISHCON GmbH (2019): FISHCON-Schleuse am Aschacharm,. URL: <https://image.jimcdn.com/app/cms/image/transf/dimension=2048x2048:format=jpg/path/sfb02bbb6d819b9d5/image/i99b9f12d2e93b566/version/1577711447/image.jpg> (geladen am 23.09.2020)
- flusslauf e.U. (2017): Technischer Beckenpass am Lobenbach/Burgau,. URL: flusslauf.at/wp-content/uploads/20180418_125336-1110x800.jpg (geladen am 20.01.2020)
- Goring D.G., Nikora V.I. (2002): Despiking Acoustic Doppler Velocimeter Data,. Journal of Hydraulic Engineering 128(1): Seiten 117 bis 126. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:1(117)
- Handrick S. (2016): Naturnaher Beckenpass an der Schlossmühle Schieritz,. URL: <https://ib-handrick.de/wp-content/uploads/2018/11/FAH-1.jpg> (geladen am 23.09.2020)
- Haunschmid R., Schotzko N., Petz-Glechner R., Honsig-Erlenburg W., Schmutz S., Spindler T., Unfer G., Wolfram G., Bammer V., Hundritsch L., Prinz H., Sasano B. (2010): Leitfaden zur Erhebung der biologischen Qualitätselemente Teil A1 - Fische, BMLFUW (Hrsg.): Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. Wien: 82 Seiten. URL: https://www.bmlrt.gv.at/dam/jcr:55dbc676-64f8-4236-96d3-d0ca1c864f26/A1_20Leitfaden_20Flie_gew_sser_20_20Qualit_tselement_20Fische.zip (geladen am 06.03.2020)
- Hentschel B. (2015): Messungen des Wasserspiegels in gegenständlichen Modellen,. In: Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen, Heft 53. 38. Dresdner Wasserbaukolloquium 2015. Messen und Überwachen im Wasserbau und am Gewässer. Dresden: Seiten 69 bis 78.
- Hydro-Connect GmbH (2017): Die technischen Komponenten der Fischaufstiegsschnecke,. URL: http://www.hydroconnect.at/wp-content/uploads/2016/12/einbausituation_Hydroconnect-Fischaufstiegsschnecke.jpg (geladen am 20.01.2020)
- Katopodis C., Gervais R. (2016): Fish swimming performance database and analyses, Winnipeg: 551 Seiten.
- Kondolf G.M. (1992): The Pebble Count Technique for Quantifying Surface Bed Material Size in Instream Flow Studies,. Rivers 3(2): Seiten 80 bis 87.
- Kroll L. (2016): Die Fischregionen RLP im wasserwirtschaftlichen Handeln, 52 Seiten. URL: https://gfg-fortbildung.de/web/images/stories/gfg_pdfs_ver/R_P/GE_aktuell/2016/16_obb_v3.pdf (geladen am 06.03.2020)
- Nortek AS (2018): The Comprehensive Manual for Velocimeters, Vector | Vectrino | Vectrino Profiler, Rud, Norwegen: 119 Seiten. URL: https://www.nortekgroup.com/assets/software/N3015-030-Comprehensive-Manual-Velocimeters_1118.pdf (geladen am 18.10.2019)

- Pavlov D.S. (1989): Structures assisting the migrations of non-salmonid fish: USSR, Rom: 97 Seiten. URL: <http://www.native-fishlab.net/library/textpdf/11231.pdf> (geladen am 23.09.2020)
- Ratschan C., Jung M., Zauner G. (2017): Fischeaufstiegsschnecken: Funktionsfähigkeit und Eignung für unterschiedliche Standorte zum gegenwärtigen Wissensstand, Umweltschutz OÖ (Hrsg.): 60 Seiten. URL: https://www.oee-umweltschutz.at/Mediendateien/fisch_Bericht_Juli2017.pdf (geladen am 20.01.2020)
- Sackel A. (2014): Patentierte Fische Schleuse für ökologische Durchgängigkeit, zek Fachverlag für Zukunftsenergie + Kommunaltechnik <http://hydro-int.zek.at/hydro/news/patentierte-fische-schleuse-fuer-oekologische-durchgaengigkeit/> (aufgerufen am 08.07.2020)
- Seidl G. (2018): Technische Beckenpässe - Eine funktionale Variante zu den Vorgaben des Leitfadens, Wasserbausymposium Graz 2018: Seiten 175 bis 181.
- Seidl G. (2021): Die Schwimmleistung von Fischen als Parameter zur technischen Auslegung innovativer Fischeaufstiegsanlagen, Wasserbausymposium 2021: 9 Seiten.
- Seidl G., Parthl G. (2018): Kombiniertes Fischliftsystem — Entwicklung, Auslegung und Monitoring eines Fischliftes in der Barbenregion, WASSERWIRTSCHAFT 108(9): Seiten 20–27. DOI: 10.1007/s35147-018-0181-1
- Strobl T., Zunic F. (2006): Wasserbau: aktuelle Grundlagen - Neue Entwicklungen, Springer. Berlin: 604 Seiten.
- Stuart T.A. (1962): The leaping behaviour of salmon and trout at falls and obstructions, Edinburgh: 46 Seiten.
- Tudorache C., Viaene P., Blust R., Vereecken H., De Boeck G. (2008): A comparison of swimming capacity and energy use in seven European freshwater fish species, Ecology of Freshwater Fish 17(2): Seiten 284 bis 291. DOI: 10.1111/j.1600-0633.2007.00280.x
- Wahl T.L. (2000): Analyzing ADV Data Using WinADV, In: Building Partnerships. Joint Conference on Water Resource Engineering and Water Resources Planning and Management 2000. American Society of Civil Engineers. Minneapolis, Minnesota, United States: Seiten 1 bis 10. URL: <http://ascelibrary.org/doi/10.1061/40517%282000%29300> (geladen am 18.08.2020)
- Walter+Partner GbR (2004): Umgehungsgerinne-Igersheim-Gewässerentwicklung-3.jpg, URL: <https://walter-und-partner.de/wp-content/uploads/2018/04/Umgehungsgerinne-Igersheim-Gewässerentwicklung-3.jpg> (geladen am 23.09.2020)
- Ward J.V. (1989): The Four-Dimensional Nature of Lotic Ecosystems, Journal of the North American Benthological Society 8(1): Seiten 2 bis 8. DOI:

10.2307/1467397

WRG (1959): Wasserrechtsgesetz 1959 – WRG. 1959. StF: BGBl. Nr. 215/1959 (WV), 121 Seiten. URL: Wasserrechtsgesetz 1959 – WRG. 1959. StF: BGBl. Nr. 215/1959 (WV) (geladen am 15.10.2020)

WRRL (2000): Richtlinie 2000/60/EG des europäischen Parlaments und des Rates zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik, 72 Seiten.

Zach S. (2018): Feldversuch eines adaptierten Denil-Fischpasses im Epipotamal - Biotisches und abiotisches Monitoring einer Fischaufstiegsanlage, Masterarbeit an der Universität für Bodenkultur, Wien: 113 Seiten.

Zitek A., Haidvogel G., Jungwirth M., Pavlas P., Schmutz S. (2007): Ein ökologisch-strategischer Leitfaden zur Wiederherstellung der Durchgängigkeit von Fließgewässern für die Fischfauna in Österreich, 138 Seiten. URL: https://www.bmlrt.gv.at/dam/jcr:b2d1879e-5c56-432d-858a-9b6bc6febf85/MIRR_Kontinuumsleitfaden_2007.pdf (geladen am 21.09.2020)

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schwimmleistungen von Fischen (Pavlov 1989, verändert)	9
Abbildung 2: Fischregionen mit Leitarten (Kroll 2016, verändert)	11
Abbildung 3: Umgehungsgerinne an der Tauber (Walter+Partner GbR 2004) .	16
Abbildung 4: Ausführungsbeispiel Aufgelöste Sohlrampe (AG-FAH 2011)	17
Abbildung 5: Naturnaher Beckenpass am Ketzerbach/DE (Handrick 2016).....	18
Abbildung 6: Vertical Slot Schlitzpass an der Mur (eigene Aufnahme).....	20
Abbildung 7: Konventioneller Beckenpass, schematisch (DWA 2010)	21
Abbildung 8: TB, Betongerinne an der Feistritz (eigene Aufnahme).....	23
Abbildung 9: TB, naturnahes Gerinne am Lobenbach (flusslauf e.U. 2017).....	23
Abbildung 10: Modifizierter Denilpass (links) neben einem TB (rechts) am Hirschbach/Ratten (eigene Aufnahme).....	25
Abbildung 11: Schema Fischaufstiegsschnecke (Hydro-Connect GmbH 2017)	26
Abbildung 12: Einstieg einer FAS an der Feistritz mit zusätzlicher Leitstromdotation (KG-Rohr) (eigene Aufnahme)	27
Abbildung 13: Ablaufzyklen einer Fischschleuse (DWA 2010)	28
Abbildung 14: Ausführung ‚FISHCON‘-Schleuse (FISHCON GmbH 2019)	29
Abbildung 15: Fischlift am Safenbach (Bad Blumau) (Seidl, Parthl 2018)	30
Abbildung 16: Rückstaubeinflusste Abflussbeiwerte für den VS (DWA 2010)	35
Abbildung 17: Dimensionierung eines VS (DWA 2010, verändert).....	37
Abbildung 18: Draufsicht auf Glasgerinne im Wasserbaulabor der TU Graz....	40
Abbildung 19: 3D-Darstellung des Vertical Slot Modellaufbaus.....	43
Abbildung 20: Modellaufbau Vertical Slot Schlitzpass im Glasgerinne	44
Abbildung 21: Trennwand im Vertical Slot Modellaufbau.....	45
Abbildung 22: Abmessungen des Vertical Slot Modellaufbaus	45
Abbildung 23: Sohlsubstrat VS mit Abdichtungsfolie (blaue Strichlinie)	46

Abbildung 24: Betrieb VS Modell mit Bemessungsdotation (44 l/s)	47
Abbildung 25: Beckenübergang VS während Füllvorgang.....	47
Abbildung 26: 3D-Darstellung des Technischen Beckenpass Modellaufbaus ..	48
Abbildung 27: Modellaufbau Technischer Beckenpass im Glasgerinne	48
Abbildung 28: Trennwand im Technischen Beckenpass Modellaufbau	49
Abbildung 29: Abmessungen des Technischen Beckenpass Modellaufbaus ...	50
Abbildung 30: Sohlsubstrat TB mit fiktivem Einheitsgefälle (blaue Strichlinie) .	50
Abbildung 31: Betrieb TB Modell mit Bemessungsdotation (33 l/s)	51
Abbildung 32: Beckenübergang TB während Füllvorgang.....	51
Abbildung 33: Begleitende Kontrollen mittels Stechpegelmessungen	52
Abbildung 34: Protokollschreiber (links) an induktivem Durchflusszähler.....	53
Abbildung 35: Funktionsprinzip LDA (Dantec Dynamics 2020)	54
Abbildung 36: Laser Doppler Anemometry (LDA) Messinstrumente	55
Abbildung 37: Geschwindigkeitsmessung mittels LDA-Methode	55
Abbildung 38: Funktionsprinzip ADV (Nortek AS 2018).....	56
Abbildung 39: Varianten der ‚Vectrino‘-Sonde (Nortek AS 2018)	57
Abbildung 40: Einstellungen in der Vectrino Software zur ADV-Messung	58
Abbildung 41: Gleitende Mittelwerte V_x und V_y in Langzeitmessungen	59
Abbildung 42: Messraster im Grundriss (Becken 1+2) im Vertical Slot.....	60
Abbildung 43: Messebenen Schnitt (Becken 1+2) im Vertical Slot	61
Abbildung 44: Messraster Grundriss (Becken 2) im Technischen Beckenpass	62
Abbildung 45: Messebenen Schnitt (Becken 2) im Technischen Beckenpass .	62
Abbildung 46: Messraster Längsschnitt durch Schlitz (Becken 2) im TB.....	63
Abbildung 47: Ermittlung der Korndurchmesser im Sohlsubstrat.....	64
Abbildung 48: Wassertiefe VS mit Einfluss des Sohlsubstrats (DWA 2010).....	65
Abbildung 49: Rückstaubeinflusste Abflussbeiwerte VS Modell	66

Abbildung 50: Rückstaubeinflusste Abflussbeiwerte TB Modell	67
Abbildung 51: Durchflussprotokoll, Sollwert (rot), $\pm 1\%$ -Abweichung (gelb)	68
Abbildung 52: Durchführung der Messungen mit Vectrino-Sonden	69
Abbildung 53: Einstellungen Datenfilterung mittels ‚WinADV‘-Software	70
Abbildung 54: Statistische Auswertung der Rohdaten	72
Abbildung 55: V-Avg VS, Becken 1+2, Ebene 1 (z = 160 mm über Sohle)	74
Abbildung 56: V-Avg VS, Becken 1+2, Ebene 2 (z = 120 mm über Sohle)	75
Abbildung 57: V-Avg VS, Becken 1+2, Ebene 3 (z = 40 mm über Sohle)	75
Abbildung 58: TKE VS, Becken 1+2, Ebene 1 (z = 160 mm über Sohle)	76
Abbildung 59: TKE VS, Becken 1+2, Ebene 2 (z = 120 mm über Sohle)	76
Abbildung 60: TKE VS, Becken 1+2, Ebene 3 (z = 40 mm über Sohle)	77
Abbildung 61: V-Avg TB, Becken 2, Ebene 0 (z = 240 mm über Sohle)	78
Abbildung 62: V-Avg TB, Becken 2, Ebene 1 (z = 160 mm über Sohle)	78
Abbildung 63: V-Avg TB, Becken 2, Ebene 2 (z = 120 mm über Sohle)	79
Abbildung 64: V-Avg TB, Becken 2, Ebene 3 (z = 40 mm über Sohle)	79
Abbildung 65: TKE TB, Becken 2, Ebene 0 (z = 240 mm über Sohle)	80
Abbildung 66: TKE TB, Becken 2, Ebene 1 (z = 160 mm über Sohle)	80
Abbildung 67: TKE TB, Becken 2, Ebene 2 (z = 120 mm über Sohle)	81
Abbildung 68: TKE TB, Becken 2, Ebene 3 (z = 40 mm über Sohle)	81
Abbildung 69: V-Avg TB, Becken 2, Längsschnitt (durch Schlitz)	82
Abbildung 70: TKE TB, Becken 2, Längsschnitt (durch Schlitz)	82

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Maßgebende Länge und Fischart je Fischregion (AG-FAH 2011) ... 12

Tabelle 2: Körperabmessungen maßgebender Fischarten (AG-FAH 2011)..... 13

Tabelle 3: Mindestbemessungswerte für den VS (BMLFUW 2012, verändert) 40