



Schlussbericht vom 04.06.2021

Optimierung von Coanda-Rechen für Wasserfassungen an alpinen Gewässern



Foto: FHGR, 2019



Datum: 04.06.2021

Ort: Bern

Subventionsgeberin:

Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Ko-Finanzierung:

Fachhochschule Graubünden FHGR
Institut für Bauen im alpinen Raum IBAR
Pulvermühlestrasse 80
CH-7000 Chur
www.fhgr.ch

Subventionsempfängerin:

Fachhochschule Graubünden FHGR
Institut für Bauen im alpinen Raum IBAR
Pulvermühlestrasse 80
CH-7000 Chur
www.fhgr.ch

Autorinnen und Autoren:

Prof. Dr. Imad Lifa, FHGR
Max Witek, FHGR
Dr. Seraina Braun, FHGR
Barbara Krummenacher, FHGR
Prof. Dr. Robert Michael Boes, VAW, ETH Zürich
Claudia Beck, VAW, ETH Zürich
Dr. Armin Peter, FishConsulting GmbH

imad.lifa@fhgr.ch
max.witek@fhgr.ch
seraina.braun@fhgr.ch
barbara.krummenacher@fhgr.ch
boes@vaw.baug.ethz.ch
beck@vaw.baug.ethz.ch
apeter@fishconsulting.ch

BFE-Projektbegleitung:

BFE-Bereichsleitung:	Dr. Michael Moser	Michael.Moser@bfe.admin.ch
BFE-Programmleitung:	Dr. Klaus Jorde	Klaus.Jorde@kjconsult.net

BFE-Vertragsnummer: SI/501288-02

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.



Zusammenfassung

Die Fassung von Triebwasser für Wasserkraftanlagen an meist geschiebereichen Gebirgsbächen erfolgt in der Schweiz überwiegend durch Fallrechen (Tirolerwehre). Seit einigen Jahren werden dafür alternativ vermehrt auch Coanda-Rechen eingesetzt. Im Rahmen dieser Studie wurden verschiedene in Betrieb stehende Anlagen analysiert. Dabei konnten die bekannten Vorteile bestätigt werden, wie zum Beispiel das Fernhalten eines grossen Anteils der Feststoffe und des Geschwemmsels vom Triebwassersystem, Selbstreinigung des Rechens, geringe Betriebskosten, bei Verzicht auf einen Sandfang geringere Anlagekosten sowie Fischfreundlichkeit. Es zeigte sich bei Feldversuchen jedoch auch, dass die weit verbreiteten Annahmen zum Abweisungsgrad von Feststoffen zu hoch sind, wodurch weiterhin oft Massnahmen zum Ausscheiden der Feinanteile notwendig sind. Dieser erste Teil wird in Kapitel 1.1 zusammengefasst. Die aktuell verfügbaren Rechentypen weisen noch technologisches Entwicklungspotential auf – betreffend Erhöhung der spezifischen Schluckfähigkeit, Verlängerung der Lebensdauer und Erhöhung des Abweisungsgrades. Diese Optimierungen sollten Gegenstand von weiterführenden Forschungsarbeiten sein. In der vorliegenden Arbeit haben wir uns deshalb mit der Hydraulik, der Fischgängigkeit und betrieblichen Aspekten der Coanda-Rechen befasst.

In einer zweiten Phase wurden in der Versuchshalle der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) an der ETH Zürich ein Versuchsstand im Massstab 1:1 aufgebaut, um Versuche zu Geschiebeabweisung, Schluckvermögen und hydraulischem Verhalten durchzuführen. Hierbei wurden marktübliche Rechen getestet. In einer dritten Phase wurden Versuche zur Fischverträglichkeit beim Abstieg gemacht, um die proklamierte Fischfreundlichkeit mittels konkreter Messdaten zu validieren.

Die Ergebnisse der Versuchsanlage spiegeln die Ergebnisse aus den Feldversuchen wider. Es zeigte sich, dass die weit verbreiteten Annahmen zum Abweisungsgrad von Feststoffen zu hoch sind, wodurch weiterhin oft Massnahmen zum Ausscheiden der Feinanteile notwendig sind. Ausserdem liegt das erreichbare Schluckvermögen höher als die oftmals publizierten 140 l/(s.lfm).

Die Fischfreundlichkeit der Coanda-Rechen konnte in den Laborversuchen bestätigt werden. Der Abstieg über den Coanda-Rechen stellt für Bachforellen (Referenzfisch für alpine Gewässer in der Schweiz) kein Risiko dar, solange die anderen Anlageteile passend ausgelegt sind. In Summe konnten mit dem Projekt wertvolle Daten für die Dimensionierung und Auslegung künftiger Anlagen gefunden werden. Ausserdem konnte die oftmals diskutierte Fischfreundlichkeit mit konkreten Daten belegt werden.

Résumé

En Suisse, le captage de l'eau pour les centrales hydroélectriques sur les torrents charriant beaucoup de bois et des alluvions, se fait principalement à l'aide de dégrilleurs (déversoirs tyroliens). Depuis quelques années, les râtaux Coanda sont de plus en plus utilisés comme alternative. Dans le cadre de cette étude, différentes usines en fonctionnement ont été analysées. Les avantages connus ont été confirmés. Par exemple, la rétention d'une grande proportion de solides et de flottants à l'écart du système d'eau d'amont, l'autonettoyage de l'écran, les faibles coûts d'exploitation, la réduction



des coûts de l'installation si aucun piège à sable n'est utilisé, et la convivialité pour les poissons. Cependant, les essais sur le terrain ont également montré que les hypothèses largement utilisées sur le degré de rejet des solides sont trop élevées, ce qui signifie que des mesures pour la séparation des fines sont encore souvent nécessaires. Cette première partie est résumée au chapitre 1.1. Les types de tamis actuellement disponibles présentent encore un potentiel de développement technologique - en ce qui concerne l'augmentation de la capacité d'absorption spécifique, l'allongement de la durée de vie et l'augmentation du degré de rejet. Ces optimisations devraient faire l'objet de travaux de recherche ultérieurs. Dans le présent travail, nous nous sommes donc occupés de l'hydraulique, du passage des poissons et des aspects opérationnels des râteaux Coanda.

Dans un deuxième temps, un banc d'essai à l'échelle 1:1 a été mis en place dans la halle expérimentale du Laboratoire d'hydraulique, d'hydrologie et de glaciologie (VAW) de l'ETH Zurich afin d'effectuer des tests sur le rejet des charges de fond, la capacité d'engloutissement et le comportement hydraulique. Au cours de ces essais, des trashracks disponibles dans le commerce ont été testés. Dans une troisième phase, des tests ont été effectués sur la compatibilité avec les poissons pendant la descente afin de valider la convivialité proclamée pour les poissons au moyen de données de mesure concrètes.

Les résultats de l'installation d'essai ont reflété les résultats des essais sur le terrain. Il a été démontré que les hypothèses répandues concernant le degré de rejet des solides sont trop élevées, ce qui signifie que des mesures de séparation des fines sont encore souvent nécessaires. En outre, la capacité d'entraînement réalisable est supérieure aux 140 l/s m souvent publiés.

Les tests en laboratoire ont permis de confirmer que le râteau Coanda est adapté aux poissons. La descente par le râteau Coanda ne présente pas de risque pour la truite brune (poisson de référence pour les eaux alpines en Suisse) pour autant que les autres composants du système soient conçus de manière appropriée. Dans l'ensemble, le projet a fourni des données précieuses pour le dimensionnement et la conception des futures usines. En outre, la convivialité pour les poissons, dont on parle souvent, a pu être prouvée par des données concrètes.

Summary

The water supply for hydropower plants in Switzerland, is predominantly sourced from gravel rich mountain streams using drop screens (Tyrolean weirs). For some years now, Coanda rakes have been increasingly used as an alternative. Within the framework of this study, the use of Coanda rakes were tested on operational power plants. The known advantages of Coanda rakes were confirmed, such as keeping a large proportion of solids and flotsam away from the drive water system, self-cleaning of the screen, low operating costs, lower plant costs if no sand trap is used, and fish-friendliness. However, field tests also showed that assumptions of the extent of particle separation are too high, resulting in a requirement for additional particle separation measures. These findings are summarised in chapter 1.1. The currently available Coanda rakes still show potential for technological development – by increasing the specific filter capacity, extending the service life and increasing the degree of particle separation. These developments should be the subject of further research. The work herein deals with the hydraulics, fish passage and operational aspects of the Coanda rakes.



In a second phase, a full-scale test rig was set up in the Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology (VAW) at the ETH Zurich in order to carry out tests on bed-load separation, swallowing capacity and hydraulic behaviour. Commercially available rakes were tested. In a third phase, tests were carried out on fish compatibility during descent over the rakes in order to validate the proclaimed fish-friendliness with direct measurement data.

The results of the test facility mirrored the results from the field tests. It was shown that the widespread assumptions on the degree of particle separation are too high, which means that measures to separate out fines are often still required. Furthermore, the achievable absorption capacity is higher than the often published 140 l/s·m.

The fish-friendliness of the Coanda rake was confirmed in the laboratory tests. The descent via the Coanda rake poses no risk to brown trout (reference fish for alpine waters in Switzerland) as long as the other system components (tailwater, etc.) are suitably designed. Overall, the project provided valuable data for the dimensioning and design of future plants. In addition, the often-discussed fish-friendliness could be proven with concrete data.



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	2
Résumé.....	2
Summary	3
Abkürzungen	7
Erläuterungen.....	7
1 Einleitung.....	8
1.1 Ausgangslage.....	9
1.2 Ziele der Arbeit.....	10
2 Vorgehen / Methode.....	10
2.1 Grundlagenbeschaffung, internationale Recherche	10
2.1.1 Wasserfassungen an Gebirgsbächen.....	10
2.1.2 Bekannte Vor- und Nachteile des Coanda-Rechens.....	14
2.1.3 Rechenhersteller und Vertriebsfirmen.....	15
2.1.4 Kurzbeschreibung der Rechentypen, Dokumentationen der Rechenhersteller	18
2.1.5 Forschung an Coanda-Rechen	23
2.1.6 Ethohydraulische Versuche am Coanda-Rechen.....	31
2.1.7 Technische Entwicklungen und Patente Coanda-Rechen	32
2.1.8 Verbreitung des Coanda-Rechens in Europa und Übersee	33
2.2 Versuchsanlage.....	34
2.2.1 Modell Coanda-Rechen	34
2.2.2 Aufbau Versuchsanlage	34
2.2.3 Inbetriebnahme der Versuchsanlage	35
2.3 Rechentypen und Versuchsdurchführung.....	38
2.4 Einfluss der Anströmung auf die Schluckfähigkeit	42
2.5 Ermittlung des Ausscheidungsgrades von Feststoffen.....	42
2.5.1 Ausgangsmaterial	42
2.5.2 Durchführung der Geschiebeversuche.....	44
2.6 Fischgängigkeit	46
2.6.1 Abfischung/Transport.....	47
2.6.2 Hälterung.....	48
2.6.3 Versuchsdurchführung	48



2.6.4	Versuchskonfiguration	50
2.6.5	Bildauswertung.....	51
3	Ergebnisse / Erkenntnisse	52
3.1	Schluckfähigkeit.....	52
3.1.1	Volle Rechenbreite 1.115m	52
3.1.2	Klarwasserversuche mit reduzierter Rechenbreite	68
3.1.3	Einfluss von teilweiser Funktionslosigkeit des Rechens.....	73
3.2	Abweisungsgrad	75
3.2.1	Versuche mit gesamter Rechenbreite (1.115m)	76
3.2.2	Versuche mit reduzierter Rechenbreite von 0.5m.....	83
3.2.3	Versuche an einem verschlissenen Rechen	86
3.2.4	Einfluss von Verlegung oder Vereisung auf den Abweisungsgrad	89
3.3	Fischabstieg	93
3.3.1	Hydraulische Voraussetzungen	93
3.3.2	Verwendete Fische/Protokoll.....	94
3.3.3	Statistische Bildauswertung Schuppenverluste	95
3.3.4	Interpretation statistische Bildauswertung.....	97
3.3.5	Interpretation der Gesamtergebnisse.....	97
4	Zusammenfassende Ergebnisse und Planungshilfen	102
5	Schlussfolgerungen	106
6	Ausblick, nächste Schritte nach Projektschluss.....	110
6.1	Wissens- und Technologietransfer.....	110
6.2	Ausblick und Anschlussprojekte	110
7	Referenzen	112
7.1	Literatur	112
7.2	Abbildungsverzeichnis.....	115
7.3	Tabellenverzeichnis	117
7.4	Anhang.....	118



Abkürzungen

l/(s.lfm): Liter pro Sekunde und Laufmeter (spezifischer Abfluss)

Erläuterungen

Die Versuchsanlage an der VAW wurde auf einen Maximaldurchfluss von 300 l/s ausgelegt. Der Rechenaufsatz ist jedoch nicht 1 m breit, sondern 1.115 m. Das ergibt bei einem Anlagendurchfluss von 300 l/s einen spezifischen Durchfluss von 269 l/s.lfm. Die Anlagekapazität wurde nach der ersten Projektetappe auf 600 l/s.lfm erhöht, indem die Versuchsrinne inkl. Rechenaufsatz auf 0.5 m verschmälert wurde.

Anlagendurchfluss [l/s]	spezifischer Durchfluss bei Rechenbreite 1.115 m [l/s.lfm]	spezifischer Durchfluss bei Rechenbreite 0.5 m [l/s.lfm]
50	44.8	100
100	89.7	200
150	134.5	300
200	179.4	400
250	224.2	500
300	269	600



1 Einleitung

Die Fassung von Wasserkraftanlagen an meist geschiebereichen Gebirgsbächen erfolgt in der Schweiz überwiegend durch Fallrechen, sogenannte Tirolerwehre. Diese weisen ein grosses Schluckvermögen auf, haben aber grundsätzlich den Nachteil, dass sie das Nutzwasser nur vom groben Geschiebe trennen. Das feinere Geschiebe muss deshalb mittels Entsander ausgeschieden werden, um Abrasionsschäden an baulichen (z.B. Druckleitung) und maschinellen Anlageteilen (z.B. Turbinen) zu minimieren.

Alternativ zum Fallrechen wird seit einigen Jahren der Coanda-Rechen eingesetzt. Im Gegensatz zum Fallrechen liegen beim Coanda-Rechen die Stäbe nicht parallel zur Fließrichtung, sondern senkrecht dazu, wobei der Stababstand nur einige wenige Millimeter beträgt. Durch dieses Design hält der Coanda-Rechen bereits den grössten Teil des Geschiebes vom Turbinenwasser fern. Problematisch sind allerdings der Abrieb und der Verschleiss der scharfkantigen Profile, so dass die Rechen häufig ausgetauscht werden müssen oder eine verminderte Schluckfähigkeit aufweisen.

In der Literatur sind vereinzelte wissenschaftliche Studien über Coanda-Rechen zu finden. Umfassende hydraulische Untersuchungen unter natürlichen Randbedingungen existieren jedoch nicht. Im Rahmen einer Vorgängerarbeit wurden deshalb verschiedene, in Betrieb stehende Anlagen analysiert (siehe Kapitel 1.1). Dabei konnten die bekannten Vorteile wie Fernhalten eines grossen Anteils von Geschwemmel vom Triebwassersystem, Selbstreinigung des Rechens, geringe Betriebs- und Wartungskosten und bei Verzicht auf einen Sandfang geringere Anlagekosten bestätigt werden. Es zeigte sich bei Feldversuchen jedoch auch, dass die weit verbreiteten Annahmen zum Abweisungsgrad von Feststoffen zu hoch sind, wodurch weiterhin oft Massnahmen zum Abweisen der Feinanteile notwendig werden. Die aktuell verfügbaren Rechentypen weisen vermutlich betreffend Erhöhung der spezifischen Schluckfähigkeit, Verbesserung der Dauerhaftigkeit und Erhöhung des Abweisungsgrades noch beträchtliches technologisches Entwicklungspotential auf.

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wurden elf Rechen von zwei Herstellern untersucht (siehe Tabelle 4). Mit Ausnahme von einem Rechen waren alle Rechen zu Versuchsbeginn neu ab Werk.

Die geringe Schluckfähigkeit des Coanda-Rechens ist gemäss Herstellern ein Schwachpunkt. Deshalb wurde die Schluckfähigkeit eines 1.115 m breiten Rechens bei Zuflüssen zwischen 50 und 300 l/s (44.8 - 269 l/(s.lfm)) im Versuchslabor systematisch untersucht.

Zur optimalen Ausschöpfung der Schluckfähigkeit des Coanda-Rechens wurde zudem untersucht, inwiefern die Anströmung des Rechens seine Schluckfähigkeit beeinflusst. Dieser Parameter wurde ohne Geschiebe untersucht (sogenannte Klarwasserversuche).

Die Anordnung der Rechenstäbe und ihre Form wurden von den Firmen Wild Metal GmbH, Höhenenergie (neu: Quellfrosch) und Stocker weiterentwickelt. Deshalb wäre es künftig sinnvoll, den Einfluss dieser Parameter zusätzlich zu untersuchen.



1.1 Ausgangslage

Im Rahmen des abgeschlossenen Forschungsprojekts SI/501288-01 im Jahr 2016 wurden 22 bestehende Anlagen in Bezug auf die Betriebserfahrungen analysiert. Dabei konnte festgestellt werden, dass alle Akteure im Markt auf dieselben wissenschaftlichen Ressourcen zurückgreifen, deren Wurzeln in der Entwicklungsphase des Coanda-Rechens liegen. Planer, Betreiber und Hersteller stützen sich bei der Dimensionierung der Anlagen mit Coanda-Rechen auf Fakten unbekannter Herkunft, die wissenschaftlich unbegründet sind. Über drei Jahrzehnte wurden Dimensionierungsgrundlagen gutwillig kopiert, ohne die Quelle dieser Grundlagen in Frage zu stellen. Im abgeschlossenen Projekt konnten die Fragen zum Abweisungsgrad von Geschiebe nicht abschliessend beantwortet werden. Umfangreiche Antworten und definitive Resultate sind im Rahmen von Anschlussforschungen jedoch zu erwarten.

Durch einen vom Institut IBAR der FH Graubünden durchgeführten Feldversuch konnte nachgewiesen werden, dass die Behauptung mancher Hersteller, dass 90% der Partikel mit jeweils einem Durchmesser des halben Stababstands abgeschieden werden, nicht stimmt. Diese Versuche wurden im Rahmen eines BFE unterstützten Forschungsprojektes 2017 durchgeführt [Lifa, Schlegel]. Dort wurde empfohlen, weitere Untersuchungen durchzuführen, insbesondere als systematische Laborversuche mit Rechen im Massstab 1:1.

Diese Versuche sollten mit den marktüblichsten Rechentypen durchgeführt werden. Die Firma Wild Metal GmbH stellte diese zur Verfügung. Der 0.6 mm Rechen hat dabei den höchsten Marktanteil (Tabelle 1).

Tabelle 1: Rechentypen der Firma Wild Metal GmbH und ihre Marktanteile

Rechentyp	Spaltweite	Marktanteil	Bemerkung
Sb18 0.6	0.6 mm	52 %	
Sb18 1.0	1.0 mm	40 %	Stiele von Buchenblättern hängen sich ein
Übrige der Fa. Wild Metal	Verschiedene (0.4, 1.5, 2.0, 3.0 mm, usw.)	8 %	Verschiedene Spaltweiten und Konstruktionen

Weiter konnte ein verzinkter Coanda-Rechen der Firma Höhenergie aus der Serie «Bec de Canard» mit einer nominellen Spaltweite von 1.05 mm für die Versuche akquiriert werden, der auf der adaptierten Anlage mit 0.5 m Rechenbreite untersucht wurde.

In diesem Forschungsprojekt wurden untersucht, ob Coanda-Rechen für den Fischabstieg geeignet sind und wie sie allenfalls optimiert werden können. Als erstes musste der Grenzdurchfluss für die Durchgängigkeit des Coanda-Rechens für die Bachforellen ermittelt werden. Die Bachforellen wurden einzeln im Zulaufbecken platziert und akklimatisiert. Dann wurde die Abwanderung ermöglicht, der Fisch soll aus eigener Motivation über den Coanda-Rechen schwimmen. Unmittelbar nachdem der Fisch den Rechen passiert hat, wurde er intensiv auf Verletzungen untersucht.



Es werden 20 Replikationen pro Konfiguration durchgeführt. Bei 2 Grössenklassen von Bachforellen, 3 Rechentypen und 3 Durchflüssen wurden 360 Fischversuche durchgeführt. Alle Fischversuche wurden mit der adaptierten Versuchsanlage mit 0.5 m Rechenbreite durchgeführt.

1.2 Ziele der Arbeit

Die Versuche sollten sich hauptsächlich damit beschäftigen, den Abweisungsgrad und die tatsächlichen Schluckvermögen verschiedener Coanda-Rechen zu ermitteln. Ausserdem sollte der Abweisungsgrad in Abhängigkeit davon, ob der Rechen teilweise oder voll beaufschlagt wird, ermittelt werden. Zusätzlich war der Einfluss der Kornform und der Kantigkeit des Geschiebes von Interesse. Darüber hinaus sollten mögliche Optimierungen der Konstruktion der Coanda-Rechen, z.B. hinsichtlich Spaltweite und Stabbreite, untersucht werden.

Der Forschungsbedarf basierend auf den Erkenntnissen und Schlussfolgerungen des 2016 abgeschlossenen Forschungsprojekts SI/501288-01. Die Ziele der vorliegenden Studie können wie folgt zusammengefasst werden:

1. Ermittlung des Schluckvermögens verschiedener Rechen-Typen.
2. Ermittlung der optimalen Spaltweite und des Abweisungsgrades von Feststoffen.
3. Ermittlung von Abrieb und Verschleiss.
4. Einfluss der Beaufschlagung und der Spaltweite auf die Fischgängigkeit
5. Empfehlungen zur optimalen Konzeption der Wasserfassung.

2 Vorgehen / Methode

2.1 Grundlagenbeschaffung, internationale Recherche

2.1.1 Wasserfassungen an Gebirgsbächen

2.1.1.1 Typen von Wasserfassungen

Wasserfassungen sind Bauwerke, die der Entnahme von Triebwasser aus einem Gewässer dienen, welches einer Wasserkraftanlage zugeleitet wird. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass das Gewässer - und insbesondere die hier betrachteten Bergbäche – erhebliche Mengen von Feststoffen und Geschwemmsel transportieren. Daher ist bei jeder Gebirgsbach-Fassung stets das Zusammenspiel des Systems „Wasser und Geschiebe“ zu betrachten. Eingezogenes Geschiebe lässt sich nur mit grösserem Aufwand entfernen, was mit Betriebsunterbrüchen und Produktionsverlusten einhergeht. Auch Geschwemmsel führt zu Schäden, wenn sich beispielsweise Treibholz in mechanischen Anlageteilen verklemmt. Schwebstoffe sind vor allem aufgrund hervorgerufener Abrasionsschäden an Turbinen oder anderen mechanischen Teilen unerwünscht. Der Einzug von Schwebstoffen in die Fassung lässt sich zwar kaum vermeiden, durch bauliche Massnahmen ist es jedoch möglich, die Grösse der Schwebstoffe auf einen maximal zulässigen Korndurchmesser zu reduzieren, welcher keine nennenswerten Schäden mehr bewirkt.



Vor allem die Problematik der Geschiebeabweisung führte zur Entwicklung verschiedener Fassungsarten. Das Geschiebe muss bei der Fassung abgewiesen werden, jedoch ohne diese dabei zu verstopfen. Hinsichtlich der Entnahmekategorie von Kraftwerks-Fassungen werden im Wesentlichen drei Formen unterschieden: Seitenentnahme, Stirnentnahme und Sohlentnahme. Bei Flusswasserfassungen ist die Seitenentnahme eine häufige Fassungsart, bei Gebirgsbächen ist die Sohlentnahme über ein sog. Tirolerwehr, der am meisten verbreitete Fassungstyp.

Tirolerwehr

Bei Gebirgsbächen mit grossen Längsneigungen ($> 5\%$), relativ geringer Wasserführung ($Q_a < 6 \text{ m}^3/\text{s}$) und hoher Geschiebeführung kommt meist eine Sohlentnahme bzw. eine Fallrechenfassung zur Anwendung, die im deutschsprachigen Raum unter dem Namen Tirolerwehr bekannt ist. Dabei wird das Triebwasser über ein Grundwehr mit liegendem Grobrechen, dessen Stäbe in Strömungsrichtung liegen, entnommen und quer zum Ufer ausgeleitet (Abbildung 1). Die Spaltweiten des Tirolerwehr-Rechens liegen zwischen 3 und 10 cm. Mit diesem Fassungstyp können spezifische Wassermengen von bis ca. $2 \text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{lfm})$ gefasst werden. Ein Vorteil ist, dass die freie Hochwasserentlastung und Weiterleitung von Grobgeschiebe direkt über das robuste Bauwerk erfolgen können. Ein gewichtiger Nachteil ist, dass Körner kleiner als die Spaltweite des Rechens mit dem Wasser ebenfalls entnommen werden und in einem speziellen Sandfang ausgeschieden werden müssen. Die im Sandfang zurückgehaltenen Feststoffe werden über eine Spülöffnung wieder ins Gewässer zurückgeleitet, was entsprechende Spülverluste zur Folge hat. Ein weiterer Nachteil ist der Umstand, dass Fische und Wassertiere kleiner als die lichte Weite des Tirolerwehr-Rechens ebenfalls gefasst werden, was bei Fischgewässern den Zielsetzungen des Gewässerschutzgesetzes (GSchG) widerspricht.

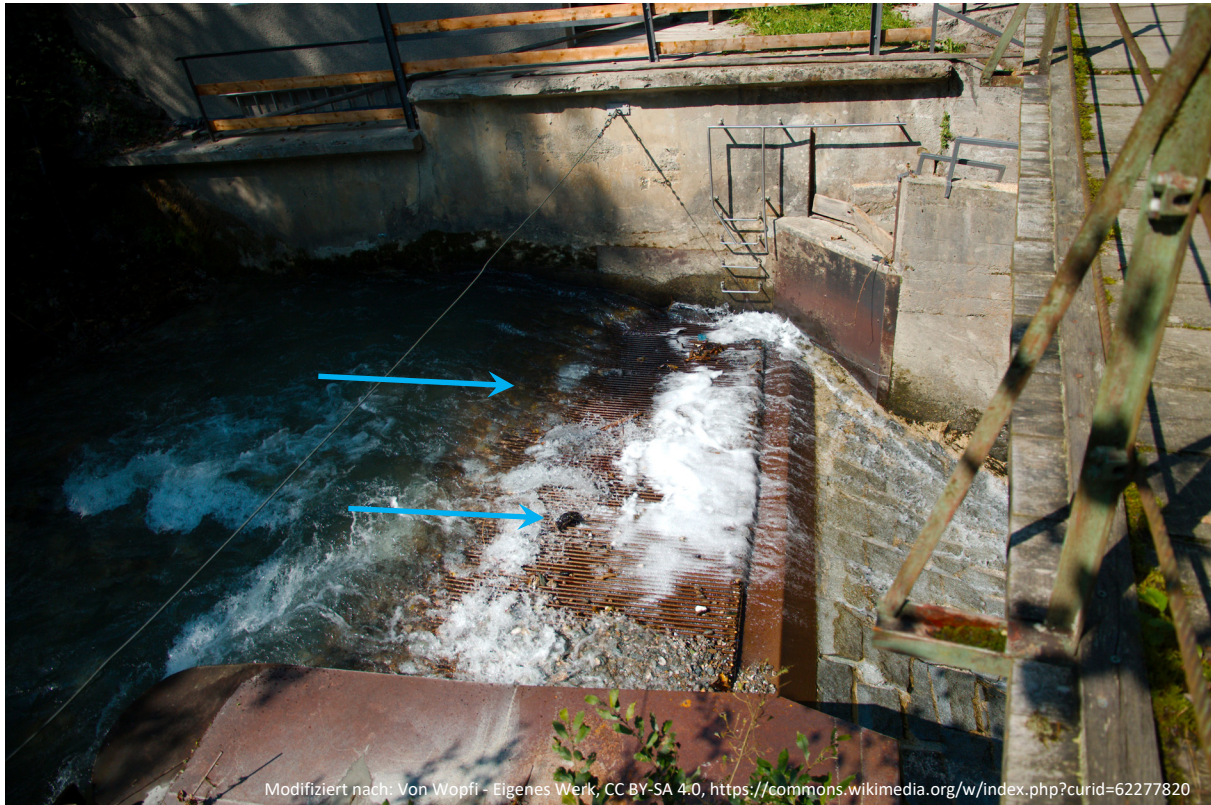


Abbildung 1: Tirolerwehr in Kolsassberg (Österreich)

Sandfang

Neben Geschiebe führen Gebirgsbäche auch Feinbestandteile (Schwebstoffe) mit. Ihre mittlere Konzentration kann 2 bis 10 g/l, bei Hochwasser bis über 100 g/l betragen. Die Feststoffkonzentration ist über den Gewässer-Querschnitt nicht gleichmässig verteilt, die Schwebstoffkonzentration und die Korngrösse nehmen üblicherweise gegen die Sohle hin zu (Spreafico et al., 2005). Die spezifische Schwebstoffführung als Produkt der Schwebstoffkonzentration und der Fliessgeschwindigkeit des Wassers ist allerdings etwa in Gewässermittle am grössten, wie Schwebstoff-Konzentrationsmessungen im gesamten Querprofil gezeigt haben (Grasso et al., 2012). Um empfindliche Anlageteile (Pumpen, Turbinen, Schieber usw.) vor Abrasion zu schützen werden die gröberen Feststoffkomponenten in Entsandernanlagen ausgeschieden. Besonders abrasiv für empfindliche Anlageteile gelten z.B. Quarzkörner aufgrund des hohen Härtegrades. Die abrasive Wirkung wächst mit der Fallhöhe und der Korngrösse. Üblicherweise liegt die Entsandungsgrenze bei einer charakteristischen Korngrösse $d_{ch} = 0.2$ bis 0.5 mm. Insbesondere bei Mittel- und Hochdruckanlagen (Fallhöhe > 50 m) ist es von besonderem Interesse, die meist scharfkantigen Korngrössen aus Mittel und Grobsand fernzuhalten. Der gebräuchlichste Sandfang-Typ bei Wasserkraftanlagen ist der Langsandfang. Für die Spülung der Ablagerungen in Entsandernbauwerken wurden diverse Spülsysteme entwickelt (Spülsysteme nach Büchi, Bieri, Dufour, 4S, HSR).



Bei einem Entsandungsgrad-Rs¹ von 95% werden zur hydraulischen Bemessung des Sandfangs üblicherweise folgende charakteristischen Korngrößen angesetzt (Giesecke, Mosonyi, 2009):

Tabelle 2: Charakteristische Korngrößen zur Bemessung von Sandfängen (vgl. Giesecke & Mosonyi, 2009)

Fallhöhe h_f	Charakteristische Korngrösse d_{ch}	Anlagentyp
20 – 50 m	0.30 mm	Mitteldruckanlage
50 – 100 m	0.25 mm	Hochdruckanlage
100 – 300 m	0.20 mm	Hochdruckanlage

Dabei gibt es durchaus auch andere Definitionen für Nieder-, Mittel- und Hochdruckanlagen.

Bei Hochdruckanlagen mit einer Fallhöhe $h_f > 100$ m könnte bei stark abrasivem Gestein eine Herabsetzung bis zu einem charakteristischen Durchmesser von $d_{ch} = 0.05$ bis 0.1 mm notwendig werden (vgl. Giesecke & Mosonyi, 2009). Vor allem bei Hochdruckanlagen ist in den wenigsten Fällen die gänzliche Erfüllung der optimalen Entwurfskriterien möglich. Die für den vollständigen Schutz erforderliche Entsandung benötigt manchmal Absetzbecken mit unverhältnismässig grossen Abmessungen, die wegen topografischen und geologischen Beschränkungen sowie unververtretbarem Mehraufwand nicht zu verwirklichen sind. In solchen Fällen ist man dann zu einem Kompromiss gezwungen (Giesecke & Mosonyi, 2009; Abgottspon et al., 2016). In der Praxis jedoch werden Wasserkraftwerke auf grössere Korndurchmesser bemessen. Weniger als 0.3 mm sind in der Praxis schwer einzuhalten.

2.1.1.2 Erfordernisse der Gewässer- und Fischökologie an Wasserfassungen

Fassungen und Wehranlagen bewirken einen Unterbruch des Fliessgewässer-Kontinuums. Gemäss dem gültigen Gewässerschutzgesetz (GSchG) wird bei Fischgewässern eine möglichst ungehinderte Fischwanderung flussaufwärts und flussabwärts gefordert. Zudem sind auch bestehende KW-Anlagen zu sanieren („Sanierung Wasserkraft“): Neben der Gewährleistung einer ausreichenden Restwassermenge gemäss dem GSchG von 1991 (Restwassersanierung, wünschbar ist eine zuflussdynamische Dotierung) sind gemäss dem neuen GSchG und der neuen Gewässerschutzverordnung (GSchV) von 2011 folgende Ziele anzustreben:

- Verminderung der negativen Auswirkungen von Schwall/Sunk
- Reaktivierung des Geschiebehaltens
- Eliminierung von Fisch-Wanderhindernissen

Die gesetzeskonforme Umsetzung baulicher Sanierungsmassnahmen von bestehenden Wasserkraftanlagen hat bis 2030 zu erfolgen. Die Wünsche und Forderungen seitens Umweltverbänden und Fischereiorganisationen betreffend Rechenabständen, Umgehungsgerinnen und Fischabstiegsanlagen sind gross. Die technischen Anforderungen an den Fischaufstieg sind bekannt, bauliche Massnahmen können i.d.R. umgesetzt werden (BAFU, 2012). Sie bewirken teilweise grosse Produktionsverluste und bauliche Kosten. Bei bestehenden Anlagen sind die speziellen Randbedingungen zu beachten.

¹ Unter dem Entsandungsgrad versteht man das Verhältnis der Schwebstoffkonzentration des entsandeten zum nicht entsandeten Wasser in Prozenten.

Gegenüber einem Tirolerwehr mit grossen lichten Rechenweiten ist beim Coanda-Rechen der Fischabstieg grundsätzlich möglich.

In Abbildung 2 ist der Fischabstieg über den Coanda-Rechen und die runde Wehrschwelle angeordnet. Der Fischaufstieg wird durch einen Beckenpass (rechts im Bild) gewährleistet. Für den Fischaufstieg ist die Lage und Grösse der Lockströmung entscheidend.



Abbildung 2: Fassung am Vallerbach bei Vals, Südtirol (Italien); Blick gegen die Fließrichtung

2.1.2 Bekannte Vor- und Nachteile des Coanda-Rechens

2.1.2.1 Bekannte Vorteile des Coanda-Rechens

Gemäss den Rechenherstellern weisen Coanda-Rechen folgende Vorteile auf:

- Abweisung eines grossen Anteils von Sand und Geschiebe; je nach Fallhöhe ist kein Sandfang notwendig.
- Selbstreinigend; im Gegensatz zum Tirolerwehr gibt es keine Rechenverlegung durch Steine und Holz. Festgeklemmte Feststoffe werden bei genügend Abfluss wieder rausgespült. Dadurch sind keine elektrisch betriebenen Reinigungsmaschinen notwendig.
- Minimale Rechenbelegung mit Laub; unterhaltsarm (Reinigung 1 bis max. 2x pro Jahr)
- Im Allgemeinen kein Algen- oder Moosbefall
- Im Allgemeinen keine Verkalkung (primär abhängig vom Gesteinstyp)
- Kaum Vereisung; selbst bei Temperaturen unter -25°C frieren Coanda-Rechen selten zu und bleiben somit auch im Winter einsatzfähig
- Keine Rostbildung bei Verwendung von rostfreiem Stahl
- Fischabstieg über Coanda-Rechen ist grundsätzlich möglich; Fische werden nicht verletzt

2.1.2.2 Bekannte Nachteile des Coanda-Rechens

- Schluckfähigkeit bis ca. 140 l/(s.lfm), und damit deutlich kleiner als beim Tirolerwehr
- Maximale Schluckfähigkeit erfordert eine gleichmässige Anströmung
- Die filigrane Struktur des Feinrechens benötigt einen zusätzlichen Schutz gegen grobes Geschiebe und Holztrieb
- Relativ kurze Lebensdauer von ca. 15 Jahren; abrasives Gestein führt im Laufe der Betriebsdauer zu einer Reduktion des Schluckvermögens und eventuell frühzeitigem Ersatz des Rechens.
- Wirtschaftlichkeit: Aufgrund des Fallverlusts der nutzbaren Fallhöhe von ca. 1 bis 2 m ist der Coanda-Rechen für Niederdruckkraftwerke (Fallhöhe < 15 m) nicht wirtschaftlich. Die Erfahrung hat gezeigt, dass die Wirtschaftlichkeit eines Coanda-Feinrechens ab einer Fallhöhe von ca. 30 m gegeben ist. Darunter sollte diese überprüft werden.
- In seltenen Fällen kommt es zur Verstopfung des Rechens, zum Beispiel durch Verkalkung der Rechenstäbe (primär abhängig vom Gesteinstyp), Laubbelegung, Vereisung oder Moosbildung

2.1.3 Rechenhersteller und Vertriebsfirmen

2.1.3.1 Bezeichnungen

„Coanda-Rechen“ (dt.) werden im angelsächsischen Sprachraum als „Coanda Screen“, „Hydro Intake Screen“, „Wedge-Wire-Screen“, im französischen Sprachraum als „Grille Coanda“ und in Italien als „Griglia Coanda“ bezeichnet.

2.1.3.2 Funktionen, Zweck

Coanda-Rechen werden im Alpenraum hauptsächlich für Kraftwerks-Fassungen von Gebirgsbächen verwendet (Abbildung 4). Im Kanton Wallis (CH) und im Südtirol (I) kommen Coanda-Rechen zudem auch für Bewässerungszwecke zum Einsatz (sog. Suonen, Wasserleiten, Bisses (frz) oder Waale, Abbildung 3). In den USA werden Coanda-Rechen schon seit einigen Jahrzehnten im Bergbau verwendet.



Abbildung 3: Coanda-Rechen mit obenliegendem Schutzrechen. Suonen-Fassung obere und untere Bitscheri, Gemeinde Naters, Kt. Wallis, Kapazität 200 l/s, Quelle: unbekannt



Abbildung 4: Grosse Wasserfassung mit einem Coanda-Rechen in Kanada, Fabrikat: Norris Screen, Brandywine Creek Hydro-electric Project, Kapazität: 4'000 l/s, Quelle: unbekannt

2.1.3.3 Rechenhersteller

In der vorliegenden Studie wurden die im Markt tätigen Rechenhersteller evaluiert (Tabelle 3). In Europa sind nur wenige Rechenhersteller tätig. In der Schweiz werden derzeit nur von einer Kleinfirma für Kleinstwasserkraftwerke Coanda-Rechen hergestellt (Fa. HOEHENERGIE). Marktführer in der Schweiz ist die Vertriebsfirma Andaco GmbH, Sierre, welche Coanda-Rechen der Fa. Dulas Ltd., Wales, vertreibt. Im Tirol (A) und im Südtirol (I) ist die Fa. Wild Metal GmbH, Ratschings (I), marktführend. Kleinere Rechenhersteller in Europa sind neromylos Kraftwerksbau und engineering GmbH (Coanda Asterikks) und die Stocker Mechatronik GmbH. Bilfinger Water Technologie GmbH vertreibt Rechen der Fa. „Johnson Screens“ aus Neuseeland. In den USA und Kanada ist die Firma „Norris Screen & Manufacturing Inc.“ federführend, welche zur Firmengruppe „Elgin Equipment Group“ gehört.

Tabelle 3: Hersteller- und Vertriebsfirmen von Coanda-Rechen

Name	Herkunft	Website
Andaco GmbH	Schweiz (Sierre, Wallis)	andaco.ch
HOEHENERGIE	Schweiz (Zürich-Altstetten)	hoehenergie.ch
Bilfinger Water Technologies GmbH	Deutschland (Karlsruhe)	water.bilfinger.com
Angeli idraulica s.r.l	Italien (Cloz)	angeliidraulica.it
Wild Metal GmbH	Italien (Ratschings)	wild-metal.com
neromylos Kraftwerksbau & Engineering GmbH	Österreich (Bleiburg)	neromylos.com
Stocker Mechatronik GmbH	Österreich (Häselgehr)	wasserkraft.npage.at
Aquashear Coanda Screens, Dulas Ltd	Wales (Machynlleth)	aquashear.com
Coanda Water Intakes Ltd.	Kanada (Kamloops)	coandawaterintakes.com
Industrial Screen Products Inc.	Kanada (Plazerville)	wedgewire.com
Welco Ltd.	Kanada (Calgary)	welco.ca



Johnson Screens NZ	Neuseeland	deco.co.nz
Cook Legacy Water + Energy	USA (Pickertington)	Waterscreen.com
Coanda Inc.	USA (Irvine)	coanda.com
Elgin Equipment Group (Norris Screen)	USA (Tazewell VA)	elginwatersolutions.com
Hydroscreen Co. LLC	USA (Denver)	elginindustries.com
		hydroscreen.com

2.1.4 Kurzbeschreibung der Rechentypen, Dokumentationen der Rechenhersteller

Für die vorliegende Studie wurden die Dokumentationen der in Europa tätigen Rechenhersteller beschafft. Für weitere Informationen wird auf die Webseiten der Rechenhersteller bzw. Vertriebsfirmen verwiesen (siehe Tabelle 3). Im Sinne einer Systemübersicht werden nachfolgend einige Besonderheiten von Rechentypen verschiedener Hersteller von Anlagen beschrieben, welche im Rahmen der Studie besucht und analysiert wurden.

2.1.4.1 Coanda-Rechen der Firma Andaco GmbH (Aquashear Coanda Screens, Dulas Ltd)

Die Firma Andaco GmbH bzw. Dulas Ltd vertreibt seit über 30 Jahren ein grosses Repertoire an Rechen-Typen (Typen A, AB, C, E, F und K). Der kleinste Rechen ist Typ E mit einer Höhe von 50 cm, der grösste Typ K mit einer Höhe von 199 cm. Die Formgebung ist je nach Rechentyp unterschiedlich. Die verfügbaren Stababstände betragen je nach Typ 0.2 mm, 0.4 mm, 1 mm, 1.5 mm und 2 mm. Die Schluckfähigkeit des kleinsten Typs F beträgt für einen Stababstand von 1 mm 35 l/s.lfm, der grösste Typ K schluckt 250 l/(s.lfm) bei einem Stababstand von 1 mm. Für einen Stababstand von 2 mm wird gemäss Firmenprospekt die spezifische Schluckfähigkeit bis um einen Faktor 2 erhöht. Die Mehrzahl der in der Schweiz bisher installierten Coanda-Rechen wurde von der Andaco GmbH geliefert. Für den Schutz des Coanda-Rechens vor grobem Geschiebe ist bei diesen Rechen ein Grobrechen bzw. ein Tirolerwehr vorgeschaltet. Damit das Feinsieb nicht durch Geschiebe beschädigt wird, wird der Coanda-Rechen häufig vertikal versetzt zum vorgeschalteten Grobrechen angeordnet.

Die Coanda-Rechen dieses Herstellers wurden aus Kostengründen in der vorliegenden Arbeit nicht untersucht.



Abbildung 5: Fassung am Gorpatbach, Gde Eischoll (VS). Coanda-Rechen der Fa. Andaco GmbH. Der oben sichtbare Schutzrechen mit runden Stäben ist gegenüber dem Coanda-Rechen versetzt angeordnet. Das Grobgeschiebe wird über den Schutzrechen abgeführt

2.1.4.2 Coanda-Rechen der Firma Wild Metal GmbH

Die Firma Wild Metal GmbH aus Ratschings (I) erstellt und vertreibt seit ca. 10 Jahren Coanda-Rechen und ist Marktführer im Alpenraum. Vertrieben wird der patentierte Rechen unter dem Namen „Grizzly Power“. Angeboten werden derzeit die folgenden drei Grundtypen (siehe auch Abbildung 6):

- **Grizzly Power Protec:** Dieser Rechen eignet sich für Gebirgsbäche mit grosser Geschiebeführung. Er kombiniert das Feinsieb mit einem darüberliegenden, robusten Schutzrechen bestehend aus Schutzstäben. Bei ihm halten die strömungsoptimierten Strangpressprofilstäbe das Feinsieb von Geschiebe fern und leiten das Wasser von der Beschleunigungsplatte zum Feinsieb. Durch die besondere Anordnung der Rechenstäbe in ihrer Höhe wird ein Verkeilen der Steine weitgehend verhindert.
- **Grizzly Power Titan:** Dieser Rechen verfügt über vertikale Stahlrippen in Abständen von 190 mm, welche das Feinsieb vor Holzstämmen und Geschwemmsel schützen. Er kommt bei Fischgewässern mit grossen Laubmengen zum Einsatz, in welchen kein Geschiebetrieb im Bereich der Fassung stattfindet, z.B. beim Abfluss eines Sees.
- **Grizzly Power Optimus:** Dieser Rechen ist ohne Schutzrechen ausgeführt und findet seine Anwendung bei einer Wasserfassung mit einer Seitenentnahme, die durch einen Grobrechen geschützt ist, sowie bei Wasseraufbereitungs- und Fischzuchtanlagen.

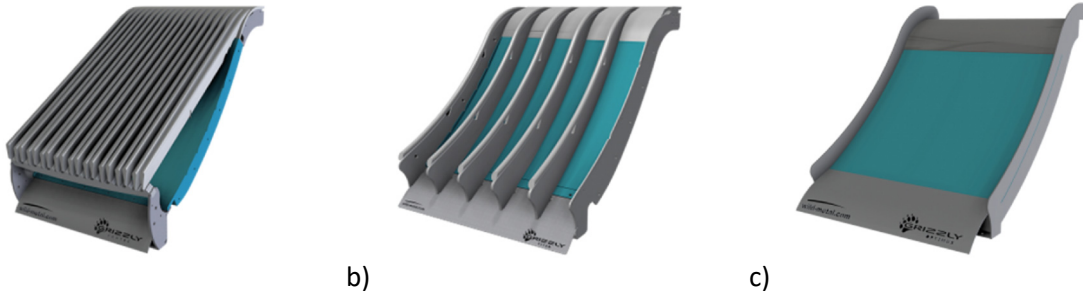


Abbildung 6: Grizzly-Rechen der Fa. Wild Metal GmbH; Module mit verschiedenen Schutzrechenausführungen. **a)** Grizzly Power Protec **b)** Grizzly Power Titan **c)** Grizzly Power Optimus. Quelle: wild-metal.com

In der vorliegenden Studie wurde ausschliesslich der Typ Optimus verwendet, d.h. nur das Feinsieb ohne Schutzrechen, wobei die Spaltweiten der gelieferten Rechen von 0.4 – 3 mm variierten. Die in der Praxis am häufigsten verwendeten Spaltweiten sind 0.6 mm und 1.0 mm. Bei den getesteten Rechen liegt die Schluckfähigkeit zwischen 52 l/s.lfm – 307 l/s.lfm.

Die Schluckfähigkeit des kleinsten getesteten Typs Optimus 650 beträgt 52 l/s.lfm bei einem Stababstand von 0.4 mm. Optimus 2500 schluckt 307 l/s.lfm bei einem Stababstand von 1 mm und ist somit der Rechen mit dem grössten Schluckvermögen.

Insgesamt haben wir im Rahmen des vorliegenden Projekts elf Coanda-Rechen untersucht. Diese sind in nachfolgender Tabelle 4 zusammengefasst. Im Bericht sind die Rechen vom Typ Sb18 fallweise als Standardrechen oder ohne Profiltypenbezeichnung als Sb18 aufgeführt. Die Profiltypenbezeichnung gibt immer die Spaltweite in Millimeter an.

Tabelle 4: Für das Projekt verwendete Coanda-Rechen

	Hersteller	Rechentyp / Profiltyp	Spaltweite	Zustand
Standardrechen	Wild Metal GmbH	Sb18 0.4	0.4 mm	neu
	Wild Metal GmbH	Sb18 0.6	0.6 mm	neu
	Wild Metal GmbH	Sb18 1.0	1.0 mm	neu
	Wild Metal GmbH	Sb18 1.5	1.5 mm	neu
	Wild Metal GmbH	Sb18 2.0	2.0 mm	neu
	Wild Metal GmbH	Sb18 3.0	3.0 mm	neu
	Wild Metal GmbH	Sb18 0.6	0.6 mm	verschlissen
Spezialrechen	Wild Metal GmbH	Sb34 0.6	0.6 mm	neu
	Wild Metal GmbH	Sb34 1.0	1.0 mm	neu
	Wild Metal GmbH	Sb42 1.0	1.0 mm	neu
	Höhenergie	Bec de Canard	1.05 mm	neu, unverzinkt

2.1.4.3 Coanda-Rechen der Firma Stocker Mechatronik GmbH

Die im Bereich der Wasserkraft tätige Firma Stocker Mechatronik GmbH aus Häselgehr (AT) produziert und erstellt seit einigen Jahren in robuster Bauweise Kompakt-Wasserfassungen mit integrier-

tem Coanda-Rechen. Der Coanda-Rechen mit Drehstäben IBEX weist gegenüber den bisherigen Typen einige Besonderheiten auf: Im Gegensatz zu den im Markt üblichen filigranen Rechenstäben besteht der Stocker-Rechen aus dreieckförmigen, robusten Profilstäben 15x15x15 mm bei einer Spaltweite von 1 mm. Die Rechenstäbe sind aus Baustahl, Edelstahl oder HARDOX verfügbar, sodass auf einen vorgeschalteten Grobrechen häufig verzichtet werden kann. Die abgerundeten Rechenstäbe können bei Verschleiss durch Drehung um jeweils 120° insgesamt dreifach genutzt werden. Bei Bedarf können einzelne abgenutzte oder deformierte Stäbe leicht ersetzt werden. Das Schluckvermögen beträgt gemäss Hersteller bis zu 120 l/s pro m² Rechenfläche.

Die Coanda-Rechen dieses Herstellers wurden in der vorliegenden Arbeit nicht untersucht.



Abbildung 7: Coanda-Rechen (QWehr-Rechen Ravensburg) der Fa. Stocker Technik GmbH. Quelle: www.stockertechnik.at

2.1.4.4 Coanda-Rechen der Firma HOEHENERGIE

Die Schweizer Fa. HOEHENERGIE vertreibt einen patentierten Coanda-Rechen für Kleinstwasserkraftwerke unter dem Namen «Bec de Canard». Das kleine Modell Bec de Canard 40 (Breite 60 cm, Höhe 40 cm) schluckt gemäss Hersteller max. 100 l/s.lfm, das mittlere Modell Bec de Canard 60 (Breite 60/90 cm, Höhe 60 cm) 150 l/s.lfm und das grössere Modell Bec de Canard 90 (Breite 60/90 cm, Höhe 90 cm) max. 230 l/s.lfm. Die Spaltweite beträgt nominell 1 mm. Speziell ist das Design des Lamellenprofils, und somit gemäss Herstellerangaben ein "Doppeltes Coanda-System" (Abbildung 8: **a**) und **b**) patentierter Coanda-Rechen der Fa. HOEHENERGIE mit dem speziellen Lamellenprofil. Quelle: Homepage hoehenergie.ch. **c**) Systemskizze Höehenergie (Bec de Canard). **d**) Systemskizze IBAR (altes System DS Avale)). Durch das Design des Lamellenprofils entsteht ein partieller Unterdruck. Die so

entstehende Sogwirkung hat gemäss Hersteller eine Beschleunigung des über das Profil geführten Wasserstroms und somit eine Erhöhung der Schluckkapazität zur Folge.

In der vorliegenden Arbeit wurde ein Coanda-Rechen dieses Herstellers untersucht (Tabelle 4).

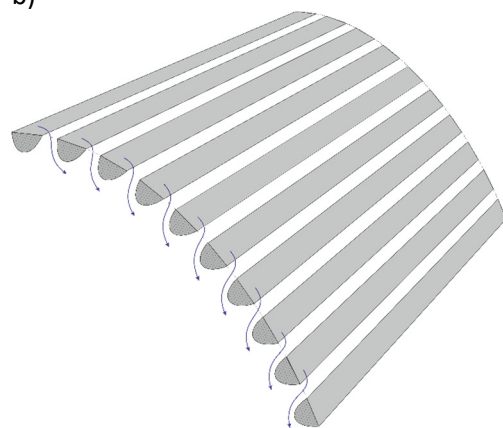
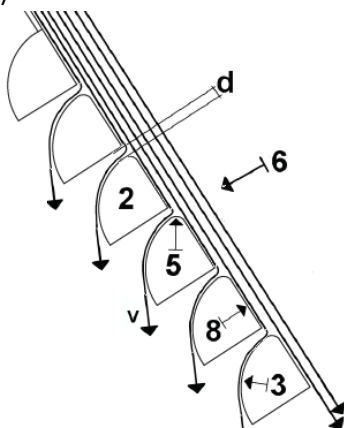
Tabelle 5: Technische Daten Schluckvermögen der unterschiedlichen Modelle (Höhnergie-Rechentypen)

Modell	Breite Modul [cm]	Schwelldhöhe [cm]	Schluckvermögen [l/(s.lfm)]
Bec de Canard 40	60	40	100
Bec de Canard 60	60 / 90	60	150
Bec de Canard 90	60 / 90	90	230



a)

b)



c)

d)

Abbildung 8: a) und b) patentierter Coanda-Rechen der Fa. HOEHENERGIE mit dem speziellen Lamellenprofil. Quelle: Homepage hoehenergie.ch. c) Systemskizze Höhnergie (Bec de Canard). d) Systemskizze IBAR (altes System DS Avale)

Nachfolgende Abbildung 9 zeigt den Versuchsaufbau der Herstellers Höhnergie

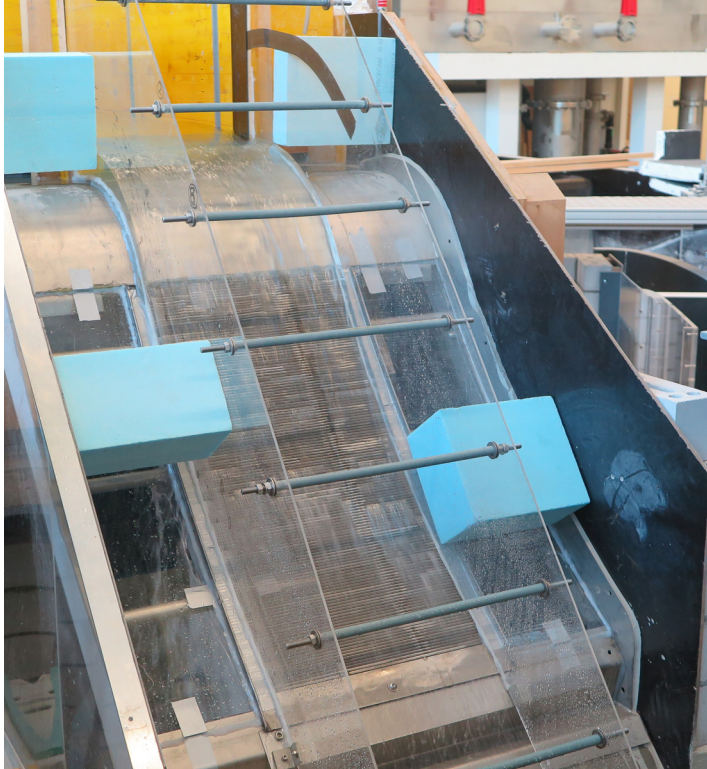


Abbildung 9: Bec de Canard 1.05 mm Spaltweite, Durchfluss 100 l/s.lfm

2.1.5 Forschung an Coanda-Rechen

2.1.5.1 Versuchsergebnisse vom Bureau of Reclamation, Denver/USA

Das renommierte „Bureau of Reclamation“, Denver, Colorado, hat den Coanda-Rechen im Rahmen des „Bureau of Reclamation Coanda Program“ untersucht und mehrere hydraulische Modellversuche (Kapazitätstests, ohne Feststofftests) zur Ermittlung der Schluckfähigkeit in Funktion des Stababstands mit unterschiedlichen Rechengeometrien durchgeführt (Abbildung 10). Grundlegend hierzu ist die Publikation von Wahl, 2003: Design Guidance for Coanda-Effect Screens. Überdies wurde von Wahl et al. (2000) auch ein numerisches Modell zur Berechnung der Abflusskapazität in Abhängigkeit der Rechengeometrie entwickelt.



Abbildung 10: Modellversuch am Coanda-Rechen im Bureau of Reclamation, Denver, Colorado (USA) (Wahl, 2003)

Literaturhinweise zu hydraulischen Modellversuchen (ohne Schwebstoffmessungen):

- “Bureau of Reclamation Coanda Program”, Last reviewed June 9, 2011 (http://www.usbr.gov/pmts/hydraulics_lab/twahl/coanda)
- Wahl Tony L., 2013: New Testing of Coanda-Effect Screens Capacities, Bureau of Reclamation, Hydraulic Laboratories, Denver, Colorado
- Wahl Tony L., 2003: Design Guidance for Coanda-Effect Screens, Bureau of Reclamation, Hydraulic Laboratories, Denver, Colorado
- Wahl Tony L., 2001: Hydraulic Performance of Coanda-Effect Screens, Journal of Hydraulic Engineering, June 2001, 480 - 488
- Wahl Tony L., Einhellig Robert F., 2000: Laboratory Testing and Numerical Modeling of Coanda-Effect Screens, 2000 Joint Conference on Water Resources Engineering und Water Resources Planning & Management, Minneapolis, Minnesota
- Wahl, T. L. (1995). Hydraulic Testing of Static Self-Cleaning Inclined Screens. Proceedings of the First International Conference on Water Resources Engineering, ASCE, San Antonio, Texas, August 14-18, 1995.

Weitere Literatur:

- Buell, J. W. (2000). “Biological Performance Tests of East Fork Irrigation District's Sand Trap and Fish Screen Facility: phase I—1999.” Buell and Associates, Final Report to the East Fork Hood River Irrigation District, Parkdale, Oregon.
- Ott, R. F. & Strong, J. J. (1988, October). “Intake Screens for Small Hydro Plants.” Hydro-Review, vol. VII, no. V.

- Cox A., Thornton C.L., Turner M.D., 2008: Norris Screen and Manufacturing, Inc. Coanda Intake Design Project Report 2008, Colorado State University, Fort Collins, Colorado
- Cook Ryan, ohne Jahresangabe: Simply Green: Coanda Power Systems for Small Hydro (www.waterscreen.com)

2.1.5.2 Versuchsergebnisse der Universität Trondheim/ Norwegen

Feststofftests im Rahmen von Modellversuchen wurden gemäss unserer Recherche bisher nur an der Universität Trondheim, Norwegen, durchgeführt. Die Tests wurden im Auftrag der NVE Oslo (Norwegian Resources Water and Energy Directorate) durchgeführt. Es kamen Rechen der Fa. Dulas Ltd, Wales, zum Einsatz. Die Rechenhöhe betrug 705 mm, was gemäss Bericht der halben Rechenhöhe des damals verwendeten Typs entspricht. Durchgeführt wurden neben Feststofftests auch Kapazitätstests sowie Tests mit Zugabe von Gras. Dabei wurde eine Modellanlage (Abbildung 11) mit einer Rechenbreite von 15 und 45 cm verwendet. Die Stababstände betragen 0.2 mm, 0.5 mm und 1.0 mm. Die zugeführte Wassermenge variierte von 5 bis 30 l/s.



a)



b)

Abbildung 11: Versuchsanlage zur Durchführung von Modellversuchen an der Universität Trondheim, Norwegen (Jensen und Huber, 2005); Modell **a**) in der Seitenansicht und **b**) in der Aufsicht

Zugegeben wurde bei den Feststofftests ein Sandgemisch von jeweils 20 kg pro Versuch. Die Korngrößenverteilung des zugegebenen Sandes (Summationskurve gemäss Siebanalyse) ist im Bericht nicht ausgeführt, sodass die Ergebnisse nur beschränkt interpretierbar sind. Bei den Versuchen zeigte sich, dass die Rechen mit 1 mm Spaltweite nur wenig verstopfen (Tabelle 6). Die Rechen mit 0.5 mm Spaltweite wiesen eine mittlere bis grosse Verstopfung auf. Die Rechen mit 0.2 mm Spaltweite verstopften fast vollständig, sodass praktisch alles Wasser den Rechen überströmte und die fassbare Wassermenge sehr stark reduziert wurde. Daraus kann geschlossen werden, dass ein Rechen mit einer Spaltweite von 0.2 mm für die Fassung eines geschiefbeführenden Gebirgsbachs ungeeignet ist.



Tabelle 6: Ergebnisse der Sedimenttests von Jenssen und Huber, 2005. Modifiziert nach einheitlicher Rechenbreite.

Spaltweite S (mm)	Abfluss (l/(s.lfm))	Abweisungsgrad (%)		Total	Verstopfen des Re-chens	Überfall (l/s)
		$d < \frac{1}{2} S$	$\frac{1}{2} S < d < S$			
1.0	11.1	1.4	17.5	18.5	Sehr wenig	0
1.0	66.7	1.0	41.0	22.5	Sehr wenig	0 – 1
1.0	200	3.9	62.9	28.0	Nicht	0 – 3
0.5	11.1	3.9	44.7	51.0	Viel	0
0.5	66.7	2.6	47.4	51.5	Viel	0 – 1
0.5	166.7	4.5	50.4	54.0	Mittel	0 – 3
0.2	11.1	65.2	79.1	83.0	Fast komplett	2 – 3
0.2	66.7	47.1	63.2	72.0	Fast komplett	27
0.2	160	34.0 ¹	61.4 ¹	69.5 ¹	Fast komplett	23

Wobei: d = Partikelgrösse

S = Spaltweite

$\frac{1}{2} S$ = halbe Spaltweite

¹ = Der hohe Abweisungsgrad erklärt sich durch den Sedimenttransport übers Überfallwasser

Die Ergebnisse von Jenssen und Huber (2005) in Tabelle 6 lassen sich folgendermassen zusammenfassen:

- Bei den drei Versuchen mit 1 mm Spaltweite beträgt der Abweisungsgrad der Sedimente mit Korndurchmesser < 1 mm total 18 – 28 %.
- Bei den drei Versuchen mit 0.5 mm Spaltweite beträgt der Abweisungsgrad der Sedimente mit Korndurchmesser < 0.5 mm total 51 – 54 %.
- Bei den drei Versuchen mit 0.2 mm Spaltweite wird der Rechen fast vollständig verstopft und kann fast kein Triebwasser mehr fassen.

Eine weitere Studie der Universität Trondheim von Nøvik et al. (2014) zeigt, dass der Coanda-Effekt in kaltem Klima gut funktioniert und die Schluckfähigkeit gewährleistet ist.

Durch Experimente in einem Frostlabor und Überwachungsprogramme bestehend aus hydrologischen Messungen, einer Online-Webkamera und Feldbeobachtungen eines Einlaufbauwerks in Norwegen konnte ein breites Verständnis der Winterleistung des Coanda-Rechens in kaltem Klima gewonnen werden.

2.1.5.3 Versuchsergebnisse ENTEC

Auch bei einer ungünstigen festen Eisdecke über dem Sieb gelangt Wasser durch die Siebspalten unter dem Eis in den Einlauf, wie berichtet von ENTEC (1998). Eisbildung kann vorübergehend die Ansaugleistung des Siebes reduzieren oder zur kompletten Eisblockade führen. Die Lufttemperatur



während dieser Blockade lag bei -5.4 °C bis -1.7 °C . Der Coanda-Rechen war komplett selbstreinigend und der Rechen wurde ohne manuellen Eingriff wieder enteist nach allen beobachteten Eisblockaden-Ereignissen im Feld.

2.1.5.4 Versuchsergebnisse des Instituts für Bauen im alpinen Raum IBAR der FH Graubünden

Im Rahmen eines Forschungsprojekts des Bundesamtes für Energie BFE untersuchte das Institut für Bauen im alpinen Raum IBAR der Fachhochschule Graubünden (ehemalige Hochschule für Technik und Wirtschaft HTW Chur) bestehende Anlagen mit Coanda-Rechen (Forschungsprojekt SI/501288-01). Es wurden 22 bestehende Anlagen in der Schweiz sowie in Österreich (Bundesländer Vorarlberg und Tirol), Deutschland (Bayern) und Italien (Südtirol) in Bezug auf die Betriebserfahrungen analysiert und daraus Empfehlungen für die Praxis abgeleitet. Die bekannten Vorteile der Coanda-Rechen konnten bestätigt werden (Fernhalten eines grossen Anteils der Feststoffe und vor allem des Gschwemmsels vom Triebwassersystem, Selbstreinigung des Rechens, geringe Betriebs- und Wartungskosten, bei Verzicht auf einen Sandfang geringere Anlagekosten).

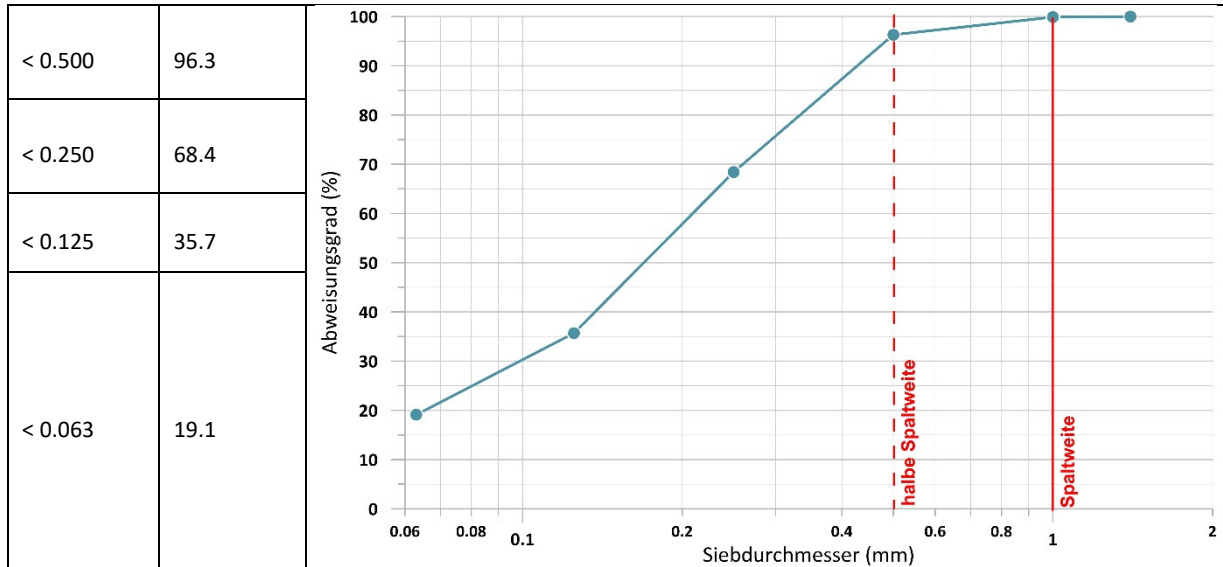
Im Rahmen eines Feldversuchs am Coanda-Rechen am Mühlbach (Oberschan, SG; Spaltweite 1 mm) wurde der Abweisungsgrad der Feststoffe mittels Siebanalyse ermittelt. Am Coanda-Rechen an der Samina (Frastanz, Vorarlberg; Stababstand 1 mm) wurden ausserdem die Feststoffanteile während einem stark geschiebeführenden Hochwasser unmittelbar vor bzw. nach dem Coanda-Rechen mittels Laserdiffraktometrie ermittelt. Der Coanda-Rechen hält zwar alle Feststoffkörner, die grösser als die Spaltweite des Rechens sind, vom Triebwasser fern. Die Messergebnisse der beiden Feldversuche haben aufgezeigt, dass rund 40 bis 57% der Feststoffe der Korngrösse kleiner als 1 mm (Stababstand) den Coanda-Rechen passieren und somit ins Triebwassersystem gelangen (Abweisungsgrad 43 bis 60%). Von den Feststoffen mit einer Korngrösse kleiner als 0.5 mm passieren rund 93% den Rechen (Abweisungsgrad 7%). Der Abweisungsgrad der Feststoffe, die kleiner als die ganze bzw. die halbe Spaltweite des Rechens sind, ist somit ungünstiger als von den Rechenherstellern angegeben wird.

Probenahme Palüdbach, Brand (A)

Die von den Mitarbeitern der Anlage erhaltene Sandprobe wurde mit einer Siebanalyse nach SN EN 933-1 analysiert. Die Probe liefert die zu erwartenden Ergebnisse; die gesamte Probe besteht aus Sand mit einem Durchmesser $< 1.0\text{ mm}$, wobei der Grossteil aus Körner mit einem Durchmesser kleiner 0.5 mm besteht (Tabelle 7). Der minimale Anteil an Körner mit einem Durchmesser grösser 1.0 mm muss auf andere Weise in den Bereich des Oberwassers nach dem Coanda gelangt sein oder ist auf eine Verunreinigung der Probe zurückzuführen.

Tabelle 7: Korngrössenverteilung Unterstufe Palüdbach

Korngrösse [mm]	Summation [%]	Korngrössenverteilung nach Coanda-Rechen
< 1.4	100.0	
< 1.0	99.9	



Dieses Diagramm zeigt gut auf, woher die in der Literatur weit verbreitete Aussage kommt, dass der Coanda-Rechen 90 % des Geschiebes mit einer Korngrösse zwischen der halben und der ganzen Spaltweite ausscheidet. Diese Aussage nimmt Bezug auf das effektiv den Rechen passierte Geschiebe und steht nicht im Verhältnis zu dem vor dem Rechen anfallende Material. Insofern ist ein mehrheitlicher Anteil von Fraktionen kleiner als die halbe Spaltweite (in diesem Fall kleiner 0.5 mm) zu erwarten, da sich der Hauptteil des gefassten Geschiebes als Schwebstoffe im Wasser befindet.

Feldversuch Mühlbach, Oberschan (SG)

Am Mühlbach in Oberschan (Abbildung 12) wurde im Oktober 2016 ein Feldversuch durchgeführt.



Zugabe 20 kg definierter Feststoffmischung

Abfangen der ausgeschiedenen Feststoffe mittels einer Wanne und einer Folie

Abbildung 12: In Situ Versuche am Mühlbach, Oberschan SG.



Bei der Interpretation der Daten ist zu beachten, dass aus betrieblichen Gründen nicht das effektiv den Coanda-Rechen passierte Schüttmaterial analysiert werden konnte, sondern das vom Rechen abgewiesene. Das gefasste Material wurde anschliessend mittels einer Differenzrechnung zur bekannten Ausgangsmischung ermittelt. Es entsteht somit eine gewisse Fehlertoleranz zu den effektiv den Rechen passierten Mengen. Grössere Korndurchmesser prallten vom Coanda-Rechen weit ab und wurden nicht immer mit der Auffangwanne gesammelt. Kleinere Durchmesser konnten aufgrund des geringen Abflusses auf dem Coanda-Rechen liegen bleiben.

Die Feldversuche zeigten, dass der Coanda-Rechen nur einen kleinen Anteil der Fraktionen kleiner als die Spaltweite = 1.0 mm abhalten kann. Die als Rechendurchgang berechneten Werte der Fraktionen mit einem Durchmesser grösser als die Spaltweite sind als Verluste infolge des beschriebenen Abprallens und Liegenbleibens auf dem Rechen zu interpretieren.

Die Siebkurve zeigt per Definition den Anteil der verschiedenen Korndurchmesser im Verhältnis zu der gesamten Probe. Es kann daraus aber keine Aussage über die quantitativen Mengen der abgewiesenen und gefassten Korndurchmesser gemacht werden. Zur Veranschaulichung dieser Beziehung wurden die von der Ausgangsprobe bekannten und im Versuch ermittelten Massengewichte pro Korndurchmesserintervall verglichen und daraus der prozentuale Abweisungsgrad berechnet (Abbildung 13 und Abbildung 14).

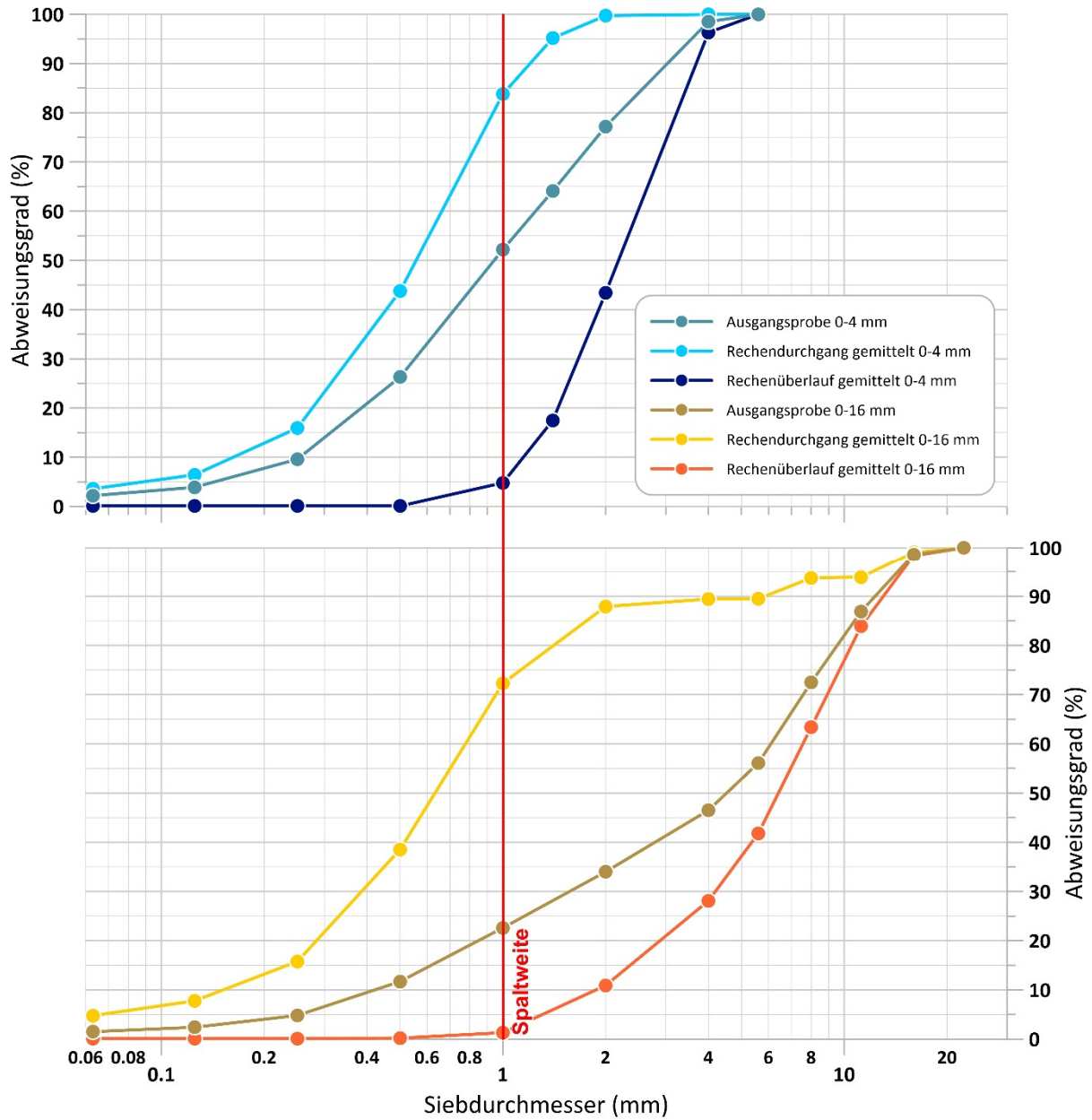


Abbildung 13: Siebkurve Feldversuch Mühlbach: Korngemische Sand 0/4 und Kies 0/16

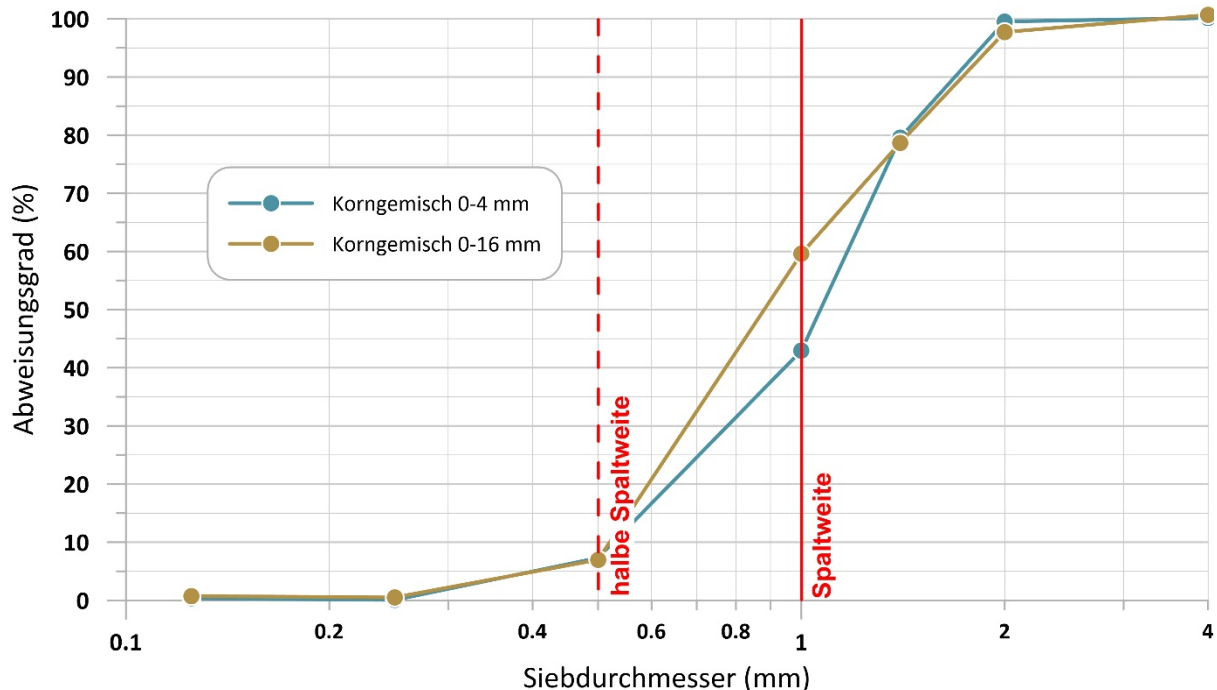


Abbildung 14: Abweisungsgrad Feldversuch Mühlbach

Die Schwebestoffe mit einem Durchmesser kleiner 0.25 mm wurden wie zu erwarten praktisch komplett gefasst. Im Bereich von 0.25 mm bis 0.5 mm beläuft sich der Abweisungsgrad von beiden Mischungen auf ca. 7%. Beim besonders interessanten Bereich zwischen 0.5 mm und 1.0 mm beläuft sich der Abweisungsgrad bei der Mischung Sand 0/4 auf 43.0% und bei der Mischung Korngemisch 0/16 auf 59.6%. Diese Ergebnisse decken sich nicht mit der in der Literatur verbreiteten Aussage, dass der Coanda-Rechen 90% des Geschiebes mit einer Korngrösse zwischen der halben und ganzen Spaltweite (im Mühlbach entspricht das dem Bereich von 0.5 mm bis 1.0 mm) abweist.

Die Messergebnisse am Mühlbach haben aufgezeigt, dass rund 40 bis 57% der Feststoffe der Korngrösse kleiner als 1 mm (Spaltweite) den Coanda-Rechen passieren und somit ins Triebwassersystem gelangen (Abweisungsgrad 43 bis 60%). Von den Feststoffen mit einer Korngrösse kleiner als 0.5 mm passieren rund 93% den Rechen (Abweisungsgrad 7%). Der Abweisungsgrad der Feststoffe, die kleiner als die ganze bzw. die halbe Spaltweite des Rechens sind, ist somit ungünstiger als von den Rechenherstellern angegeben wird.

2.1.6 Ethohydraulische Versuche am Coanda-Rechen

Unsere Literaturrecherche ergab, dass bisher mit der Bachforelle keine Untersuchungen zum Verhalten oder zu Verletzungen am Coanda-Rechen durchgeführt wurden. Entsprechende Experimente liegen nur für eine nordamerikanische Elritzenart (fathead minnow, *Pimephales promelas*) sowie für Steelhead Brütlinge, Smolts (Regenbogenforellen) und Brütlinge des Königlachs (Chinook salmon) vor. Kleine Elritzen (5-7.5 mm Länge) erlitten hohe Mortalitäten bei der Rechenpassage (50-75 %). Bei grössere Elritzen hingegen (22.5-45 mm) war die Mortalität deutlich geringer (0-12 %, Bestgen et



al., 2001). Bei den drei getesteten Salmonidenarten kam es zu keinen Verletzungen, Verhaltensanomalien oder latenten Mortalitäten bei der Passage über den Coanda-Rechen (Buell, 2000). Die Resultate dieser Arbeiten sind nicht ohne weiteres auf in Europa einheimische Fische übertragbar. Für die Bachforelle (*Salmo trutta fario*) als wichtigste einheimische Fischart in alpinen Gewässern existieren keine ähnlichen Untersuchungen. Das Verhalten der Bachforelle ist komplett anders als dasjenige von Elritzen und auch nur bedingt vergleichbar mit nordamerikanischen Salmoniden (Bestgen et al., 2000, 2001, 2004).

Bei Buell (1999) wurden alle Fische vor den Versuchen anästhesiert und nach Verletzungen untersucht. Anschliessend wurden die Versuchsfische in das System am Kronenrand des Überlaufwehrs eingeführt. Es wurde darauf geachtet, dass die Versuchsfische vor dem Abgang über den Rechen vollständig in die Wassersäule eingetaucht wurden. Nach dem Durchgang über das Wehr und den Rechen wurden die Fische in einem Fangnetz zurückgehalten. Nachdem alle Fische den Rechen passiert hatten, wurden sie im Auffangnetz in einen kleineren Abschnitt gedrängt, wieder anästhesiert und nach Verletzungen untersucht. Kontrollfische wurden gleich behandelt wie Versuchsfische, ausser dass sie direkt ins Auffangnetz gegeben wurden ohne über den Rechen zu schwimmen. Alle Fische wurden für 96 h gehältert und täglich auf latente Mortalität überprüft

Bestgen (2000, 2004) führte ethohydraulische Versuche mit der fettköpfigen Elritze (*Pimephales promelas*) an drei verschiedenen Rechen durch, wobei sich die Spaltweiten und die Anstellwinkel voneinander unterschieden (1 mm und 45°, 1 mm und 60°, 0.5 mm und 60°). Die Versuche wurden mit fünf verschiedenen Fischgrössen (5-45 mm TL) durchgeführt. Die im Modell platzierten Fische wurden über den Rechen geschwemmt und in einem Netz am Ende des Rechens eingefangen. Die Ausschussrate sinkt mit der Grösse der Fische, auch überlebten mehr grosse als kleine Fische. Der Anstellwinkel hat die Überlebensrate der Fische aller Grössen nicht beeinflusst, jedoch war die Überlebensrate der Fische grösser bei der kleineren Spaltweite 0.5 mm als bei 1 mm.

2.1.7 Technische Entwicklungen und Patente Coanda-Rechen

Coanda-Rechen (engl. coanda screen) sind eine amerikanische Erfindung und wurden dort zuerst im Bergbau, später auch für Kraftwerks-Fassungen eingesetzt. Der Coanda-Rechen wurde im Jahre 1983 in den USA erstmals patentiert (United States Patent Nr. 4'415'462, Nov. 15, 1983).

Für den Coanda-Rechen „Grizzly Power“ der Südtiroler Firma „Wild Metal GmbH“ aus Ratschings liegt auch ein Patent vor. Hier wurde insbesondere die Anordnung des Grobrechens patentiert, welcher über dem Coanda-Rechen liegt.

Der Coanda-Rechen „Bec de Canard“ mit speziellem Viertelkreis-Lamellenprofil und Einsatzgebiet im Bereich der Kleinstwasserkraft der Schweizer Firma Höhenergie, Gais AR, ist gemäss Firmenprospekt ebenfalls patentiert.

Der Coanda-Rechen der Fa. Stocker Technik GmbH mit drehbaren, dreieckförmigen, massiven Rechenstäben mit dem Namen IBEX ist gemäss Hersteller beim europäischen Patentamt zur Patentierung angemeldet.

2.1.8 Verbreitung des Coanda-Rechens in Europa und Übersee

Coanda-Rechen sind eine amerikanische Erfindung und wurden dort zuerst im Bergbau, später auch für Kraftwerks-Fassungen eingesetzt. Sie sind in den USA, in Kanada und Neuseeland stark verbreitet. Gemäss Herstellerangaben sind auch Anwendungen in Südamerika und in der Ukraine erfolgt. In Europa liegt das Hauptverbreitungsgebiet in Schottland, England, Wales, in Skandinavien (insbesondere Norwegen) sowie im Alpenraum und im Balkan. Im Alpenraum sind insbesondere im Südtirol Coanda-Rechen seit ca. fünf bis zehn Jahren sehr verbreitet. Häufig eingesetzt werden Coanda-Rechen auch im Tirol und Vorarlberg (Österreich). In Frankreich werden Coanda-Rechen insbesondere aus Sicht der Fischereien in den letzten Jahren vermehrt eingesetzt. Auch im deutschen Bergland, insbesondere in Bayern, gibt es etliche Anwendungen.

2.1.8.1 Übersicht der Coanda-Rechen in der Schweiz

Die Recherche bei Rechenherstellern und KW-Gesellschaften ergab, dass in der Schweiz bis Ende 2016 insgesamt ca. 50 Coanda-Rechen in Betrieb oder im Bau waren. Die Standorte der Schweizer Anlagen und der im nahen Ausland begangenen Anlagen sind in der nachfolgenden Karte sowie im Anhang 1 ersichtlich. In der Karte sind nicht alle im Anhang aufgeführten Anlagen eingezeichnet, da der Standort teilweise nicht genau ermittelt werden konnte.

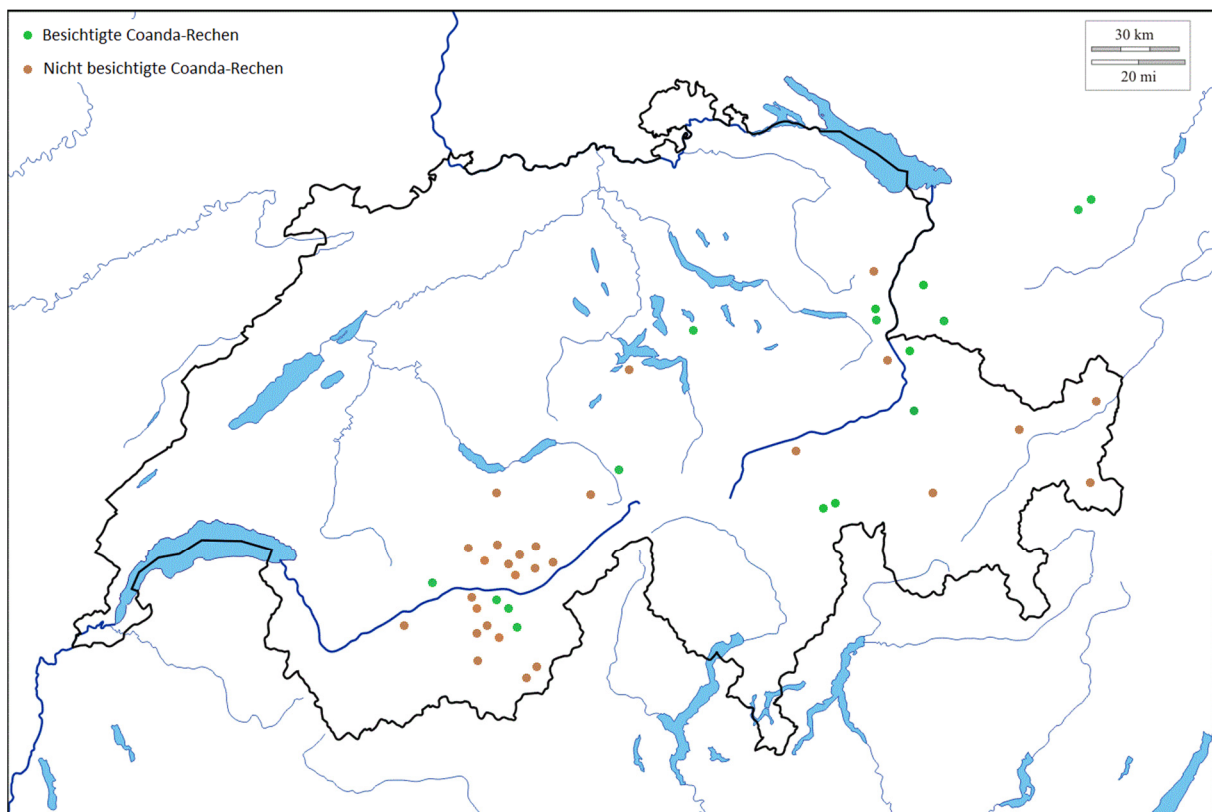


Abbildung 15: Übersichtskarte Coanda-Rechen in der Schweiz und im nahen Ausland, Stand Dez. 2016

2.2 Versuchsanlage

2.2.1 Modell Coanda-Rechen

Das Coanda-Modell wurde in der Halle der Versuchsanstalt für Wasserbau (VAW) der ETH Zürich errichtet. Die VAW-Werkstatt führte die Grossbauarbeiten durch. Aus den Bestandsaufnahmen und Erfahrungsanalysen des 2016 abgeschlossenen Forschungsprojekts wurden die Versuchsparameter für die Laborversuche bestimmt. Die Fassungskapazität der Rechen wurde auf 300 l/s festgelegt. Bezüglich Anströmung wurde die Anlage auf eine frontale Anströmung ausgelegt; hierbei konnte zwischen einer Anströmung mit und ohne Wehrschwelle (zur Geschiebezugabe) variiert werden.

2.2.2 Aufbau Versuchsanlage

Nach dem Literaturstudium wurde Anfang 2018 der Versuchsstand an der VAW (Versuchsanstalt für Wasserbau) der ETH Zürich errichtet. Dieser wurde von der Modellwerkstatt der VAW gebaut und von der FHGR nach der Inbetriebnahme weiter optimiert. Die einzelnen Rechen können unkompliziert ausgetauscht werden. Zu Beginn haben wir die Zulaufstrecke mit einem Absatz vor dem Wehrrücken für Klarwasserversuche getestet. Anschliessend wurde die Zulaufstrecke zu einer ebenen Geschiebezulaufstrecke umgebaut und so für alle nachfolgenden Versuche belassen. Dazu gehören weitere Klarwasserversuche, Geschiebeversuche sowie später ethohydraulische Versuche. Eine Übersicht zu allen durchgeführten Versuchen findet sich in Tabelle 8.

Die gesamte Versuchsanlage erstreckt sich über zwei Stockwerke, das Wasser wird im Kreislauf gepumpt.

Im oberen Stockwerk ist die Anlage insgesamt 8.5 m lang, 2.4 m hoch und 1.6 m breit (Abbildung 16). Das Wasser wird über ein Zuleitungsrohr mit 250 mm Durchmesser in das stählerne Einlaufbecken gepumpt, welches der Beruhigung des Wassers dient.

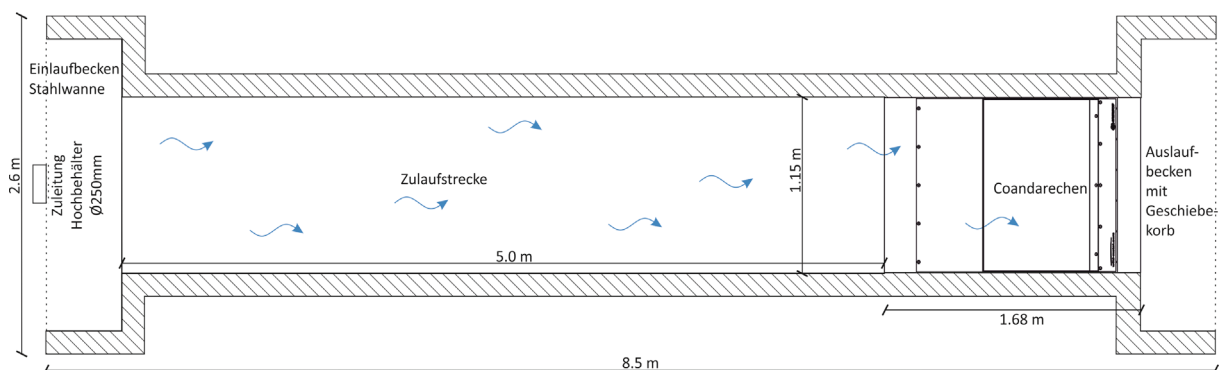


Abbildung 16: Aufsicht der Versuchsvorrichtung

Anschliessend fliesst das Wasser über einen Überlauf in die Zulaufstrecke. Mittels schwimmendem Styroporblock werden Oberflächenwellen gedämpft. Die 0.85 m hohe und 5 m lange Zulaufstrecke ist mit Schaltafeln ausgekleidet. Sie führt das Wasser zum Testrahmen, in welcher der zu untersuchende Coanda-Rechen eingespannt wird. Die Rechenbreite beträgt 1.115 m, der Testrahmen ist 1.68 m lang. Die Seitenwände des Testrahmens sind mit Plexiglas versehen, sodass das Wasser über die gesamte Rechenbreite abgeführt wird.

Das vom Rechen geschluckte Wasser, wird in das untere Stockwerk abgeleitet. Dort durchströmt es zuerst einen Geschiebefang sack, welcher die Entnahme und damit die Untersuchung des Geschiebes ermöglicht (siehe Abbildung 17). Das Wasser gelangt wieder zurück in den Wasserkreislauf. Das Wasser, welches als Überfallwasser über den Rechen abgeleitet wird, gelangt in das Auslaufbecken mit Geschiebekorb, welcher sich ebenfalls im unteren Stockwerk befindet. Dort wird das Geschiebe abgesetzt und das Wasser wieder dem Kreislauf zugeführt.

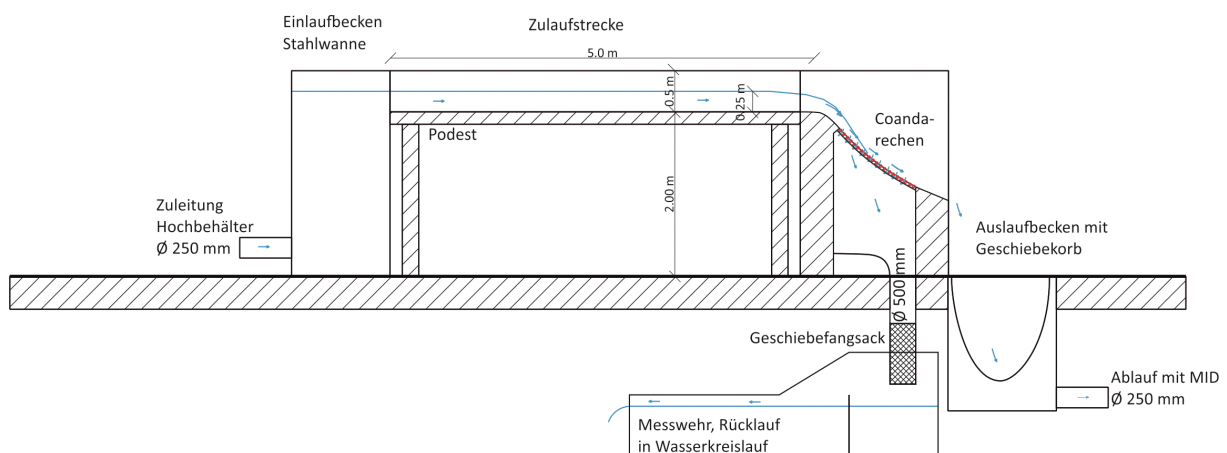
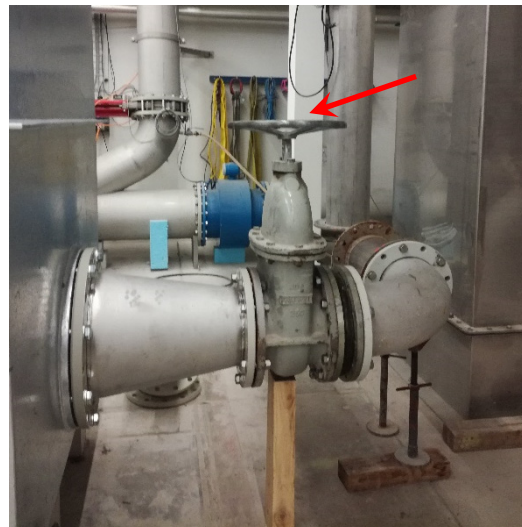


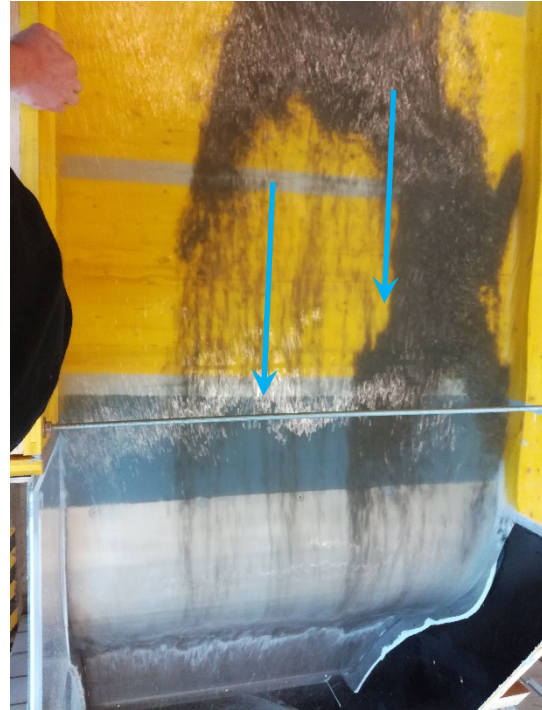
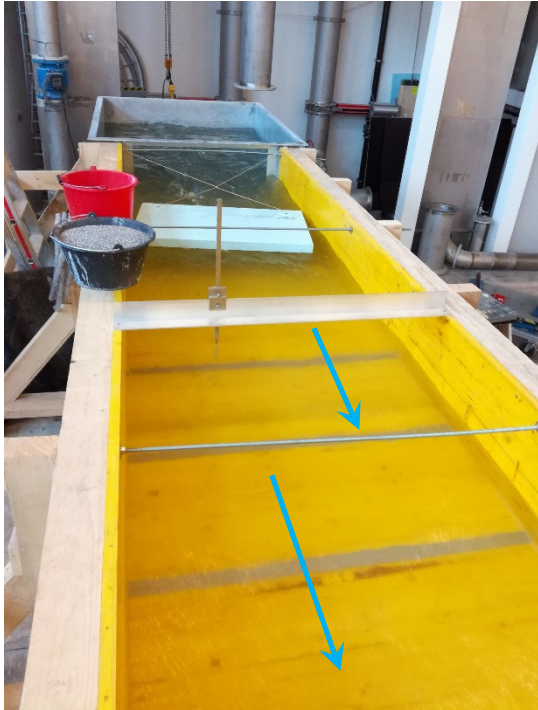
Abbildung 17: Seitenansicht der Versuchsvorrichtung

2.2.3 Inbetriebnahme der Versuchsanlage

Im Frühjahr 2018 wurde der Bau der Versuchsanlage abgeschlossen. Die erste Inbetriebnahme der Anlage erfolgte im März 2018. Nach der Modelloptimierung wurden ab April 2018 die geplanten Laborversuche durchgeführt. Die nachfolgenden Abbildungen 18- 20 zeigen den Aufbau der Versuchsanlage von verschiedenen Seiten.



a) b)
Abbildung 18: Aufbau Versuchsanlage. **a)** Seitenansicht mit Einlaufbecken aus Stahl am rechten Bildrand. **b)** Zulauf mit Regulierungrad (roter Pfeil).



a) b)
Abbildung 19: Zulaufstrecke der Versuchsanlage. Die blauen Pfeile markieren die Fließrichtung. **a)** Frontansicht, im Hintergrund befindet sich die Einlaufwanne aus Stahl. Eine hellblaue Styroporplatte schwimmt an der Wasseroberfläche und dient der Wasserberuhigung. **b)** Aufsicht mit Überfall und eingesetztem Coanda-Rechen.



Abbildung 20: Ablauf im Keller, weisser Geschiebesack ist knapp erkennbar hinter der Schalltafel (roter Pfeil) und Rücklauf (nicht auf dem Bild)

Bei den Tests auf der 1.115 m breiten Anlage zeigte sich, dass die von den Herstellern angegebenen Abflusskapazitäten in den Laborversuchen übertroffen wurden. Deshalb wurde die Versuchsanlage im Februar 2019 für eine weitere Versuchsreihe auf 50 cm verschmälert.

Dies erfolgte, um eine vollständige Überströmung der Rechen zu erreichen und bei höheren spezifischen Durchflüssen bis zu 600 l/s.lfm die tatsächliche maximale Abflusskapazität zu ermitteln. Neben einer seitlichen Plexiglaswand am Rechen wurde hierzu auch die Zulaufstrecke erhöht und auf 50 cm Breite verschmälert (Abbildung 21).



Abbildung 21: Versuchsstand auf 0.5 m verschmälert, blaue Pfeile zeigen die Fließrichtung an



2.3 Rechentypen und Versuchsdurchführung

Innerhalb des Projektes wurden 12 Rechen, 3 Geschiebetypen und Durchflüsse zwischen 44.8 und 269 l/s·lfm, bzw. 600 l/s·lfm nach der Verschmälerung untersucht.

Da bei Projektstart nur die Firma Wild Metal GmbH bereit war, Rechen für das Projekt zur Verfügung zu stellen, konnten nur die unterschiedlichen Stabbreiten, -winkel und -geometrien (Typ Sb18, Typ Sb34, Typ Sb42, Typ Optimus Strong Prototyp) dieser Firma getestet werden. Zusätzlich zu den Rechen der Wild Metal GmbH konnte am Ende des Projektzeitraumes ein Coanda-Rechen der Firma Höhenergie getestet werden.

Tabelle 8: Gesamtübersicht aller durchgeführter Versuche

		Standardrechen						Spezialrechen					Total Versuche
Hersteller		Wild Metal GmbH						Wild Metal GmbH				Höhe- nergie	
Rechentyp		Sb18 1.0	Sb18 0.6	Sb18 0.4	Sb18 1.5	Sb18 2.0	Sb18 3.0	Sb42 1.0	Sb34 1.0	Sb34 0.6	Sb18 0.6 verschl.°	Bec de Canard	
Spaltweite [mm]		1.0	0.6	0.4	1.5	2.0	3.0	1.0	1.0	0.6	0.6	1.05	
Klarwasserversuche	Durchfluss [l/s·lfm]	44.8, 89.7, 134.5, 179.4, 224.2, 269, 200*, 400*, 600*	44.8, 89.7, 134.5, 179.4, 224.2, 269, 200*, 400*, 600*	44.8, 89.7, 134.5, 224.2, 269	44.8, 89.7, 134.5, 224.2, 269	44.8, 89.7, 179.4, 224.2, 269	44.8, 89.7, 134.5, 224.2, 269	44.8, 89.7, 179.4, 224.2, 269	44.8, 89.7, 179.4, 224.2, 269	44.8, 89.7, 179.4, 224.2, 269	44.8, 89.7, 179.4, 224.2, 269	200*, 300*, 400*, 500*, 600*	
	Anzahl Versuche	6 + 3*	6 + 3*	6	6	6	6	6	6	6	6	5*	60 ± 11*
	Anzahl Versuche mit partieller Abklebung	14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14
Geschiebeversuche	Durchfluss [l/s·lfm]	44.8, 89.7, 134.5, 179.4, 224.2, 269	44.8, 89.7, 134.5, 179.4, 224.2, 269	89.7, 179.4, 269	89.7, 179.4, 269	89.7, 179.4, 269	89.7, 179.4, 269	89.7, 179.4, 269	89.7, 179.4, 269	89.7, 179.4, 269	89.7, 179.4, 269	89.7, 179.4, 269	
	Materialklasse	0 - 4 mm kantig	18	24	9	9	9	9	3	9	9	3	9
		0 - 8 mm rund	18	18	9	9	9	9	-	9	9	-	-
		0 - 16 mm kantig	18	18	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Anzahl Versuche	54	60	18	18	18	18	3	18	18	3	9	237	
Ethohyd-	Durchfluss [l/s·lfm]	50*, 150*	50*, 150*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

Anzahl Fische	Rechen	72*	72*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Kontrolle	36*	39*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Anzahl Versuche		216*	222*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	438*

Total Anzahl Versuche: 311 + 449* = 760

° verschl. = verschlissen

* Versuche auf der verschmälerten Anlage mit 0.5 m Breite

Die gängigsten beiden Rechentypen Sb18 0.6 (mit 0.6 mm Spaltweite) und Sb18 1.0 (mit 1.0 mm Spaltweite) wurden jeweils mit sechs Anlagedurchflüssen (50, 100, 150, 200, 250 und 300 l/s) untersucht. Die Rechentypen Sb18 0.4, Sb18 1.5, Sb18 2.0, Sb18 3.0 und weitere Spezialrechen wurden jeweils mit drei Durchflüssen (100, 200 und 300 l/s) getestet. Zusätzlich wurden mit den beiden gängigsten Rechentypen von Wild Metal Sb18 0.6 und Sb18 1.0 sowie dem Rechen von Höhengnergie Versuche mit einer reduzierten Rechenbreite von 50 cm durchgeführt, um mit einem spezifischen Durchfluss von bis zu 600 l/s. lfm eine Überströmung des gesamten Rechens zu erreichen und die maximale Schluckfähigkeit zu eruieren.

Die Geschiebemischungen für die Versuche wurden aus gelieferten Siebungen hergestellt, welche direkt vom Kieswerk in Untervaz bezogen wurde. Dazu wurden zwei Kantkornmischungen 0 – 4 mm und 0 – 16 mm sowie eine Rundkornmischung 0 – 8 mm verwendet (vgl. Abbildung 22).

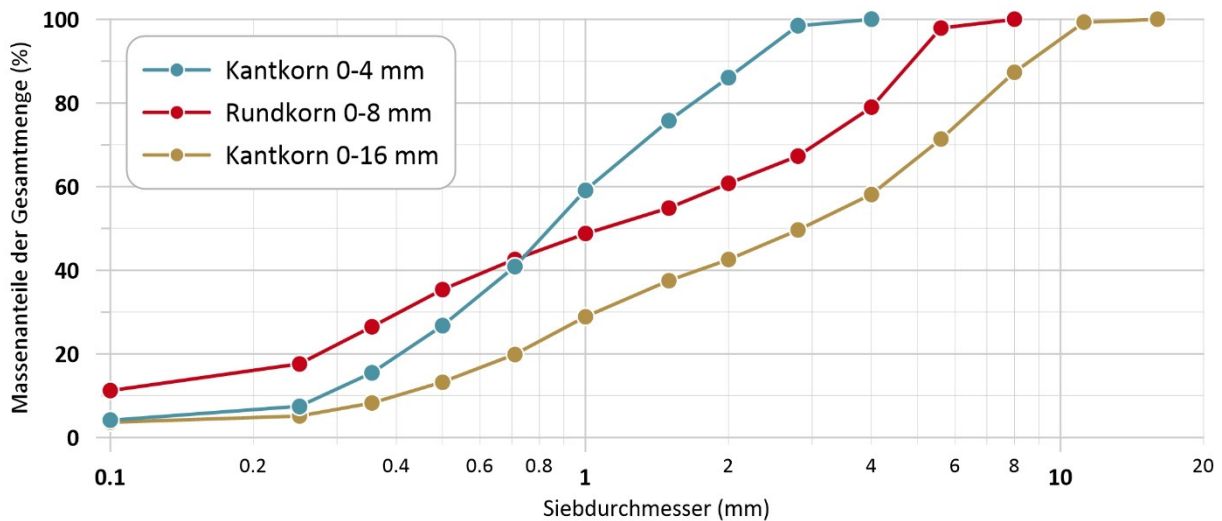


Abbildung 22: Siebkurven des Ausgangsmaterials

Die Kantkornmischung 0 – 16 mm wurde nur bei den beiden Rechentypen Sb18 0.6 resp. Sb18 1.0 angewendet. Die anderen beiden Geschiebemischungen wurden für alle getesteten Rechen verwendet.

Dazu wurden jeweils 11 kg getrocknetes Geschiebe in einen Sack abgefüllt und von einer Person gleichmässig auf der Zulaufstrecke 3 m vor dem Rechen verteilt. Das Hineinschütten dauerte jeweils ca. 10 s. Die Zeit, bis das gesamte Geschiebe über den Rechen geschwemmt wurde, hing direkt von der Durchflussmenge ab und dauerte zwischen einigen wenigen Sekunden bei hohem Durchfluss bis mehrere Minuten bei niedrigem Durchfluss.

Mit je drei Wiederholungen wurde getestet, welchen Einfluss die Aufgabe des Geschiebes auf den Abweisungsgrad hat. Dies ist der einzige Versuch, welcher mit der Geschiebemischung der ETH Zürich durchgeführt wurde. Die Geschiebeprobe von 10 kg wurde bei Durchfluss 89.7 l/s.lfm (=typischer Betriebslastfall) einmal während 2 min und einmal während 20 min aufgegeben (10 kg/120 s und 10 kg/1200 s). Dabei wurde die Zeit gestoppt, bis das gesamte Geschiebe jeweils komplett den Rechen passierte. Die Geschiebekonzentration wurde als durchschnittliche Geschiebekonzentration aus Geschiebemenge und Dauer von Beginn der Aufgabe bis zum Transport des letzten Geschiebepartikels über den Rechen ausgewertet.

Nachfolgende Abbildung 23 zeigt, dass bei dieser Kombination von Einflussfaktoren die Aufgabegeschwindigkeit keinen Einfluss auf den Abweisungsgrad hat. Deshalb wurde die Geschiebeaufgabe immer gleich gehandhabt. Das Geschiebe wurde innert weniger Sekunden ins Wasser gegeben und durch die Schleppkraft des künstlichen Gerinnes über den Rechen gespült. Bei höheren Durchflüssen ergab sich aufgrund der höheren Schleppkraft auch eine erhöhte Geschiebekonzentration.

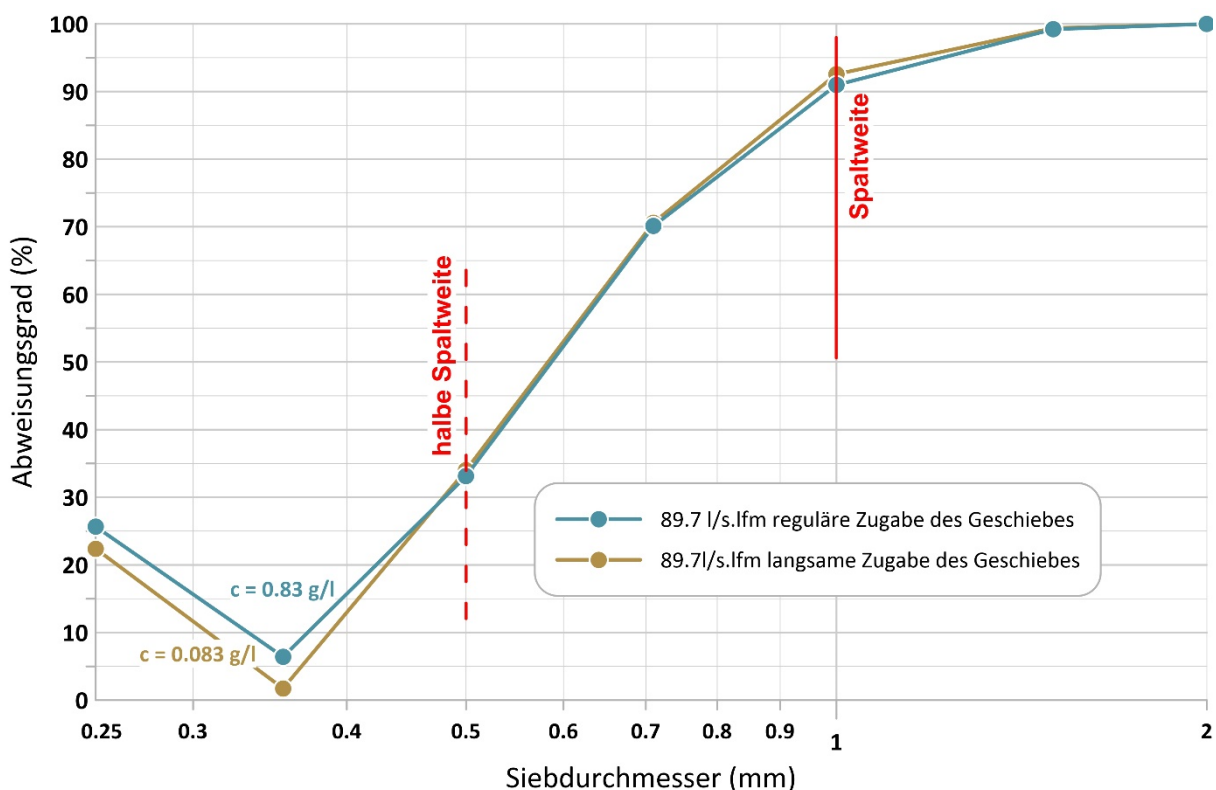


Abbildung 23: Vergleich reguläre und langsame Geschiebezugabe bei 89.7 l/s.lfm und 1.00 mm Spaltweite

Alle nun nachfolgenden Ausführungen zu den Geschiebeversuchen wurden mit 11 kg des Lockergesteinsmaterials aus dem Kieswerk Untervaz mit der regulären Zugabemethode durchgeführt. Dabei wurde bei 89.7l/s.lfm eine Konzentration des Geschiebes von 0.83 g/l erreicht.

Später wurden Versuche mit 400 l/s.lfm durchgeführt. Diese zeigten, dass bei hohem Wasserdurchfluss die Geschiebekonzentration hinsichtlich Abweisung der kleinen Fraktionen doch eine Rolle spielen kann (Abbildung 24). Realitätsnaher sind jedoch die diesbezüglichen Versuche bei geringen

Durchflüssen, da der reale Betriebszustand der Coanda-Rechen gemäss Herstellern diesem Lastfall entspricht.

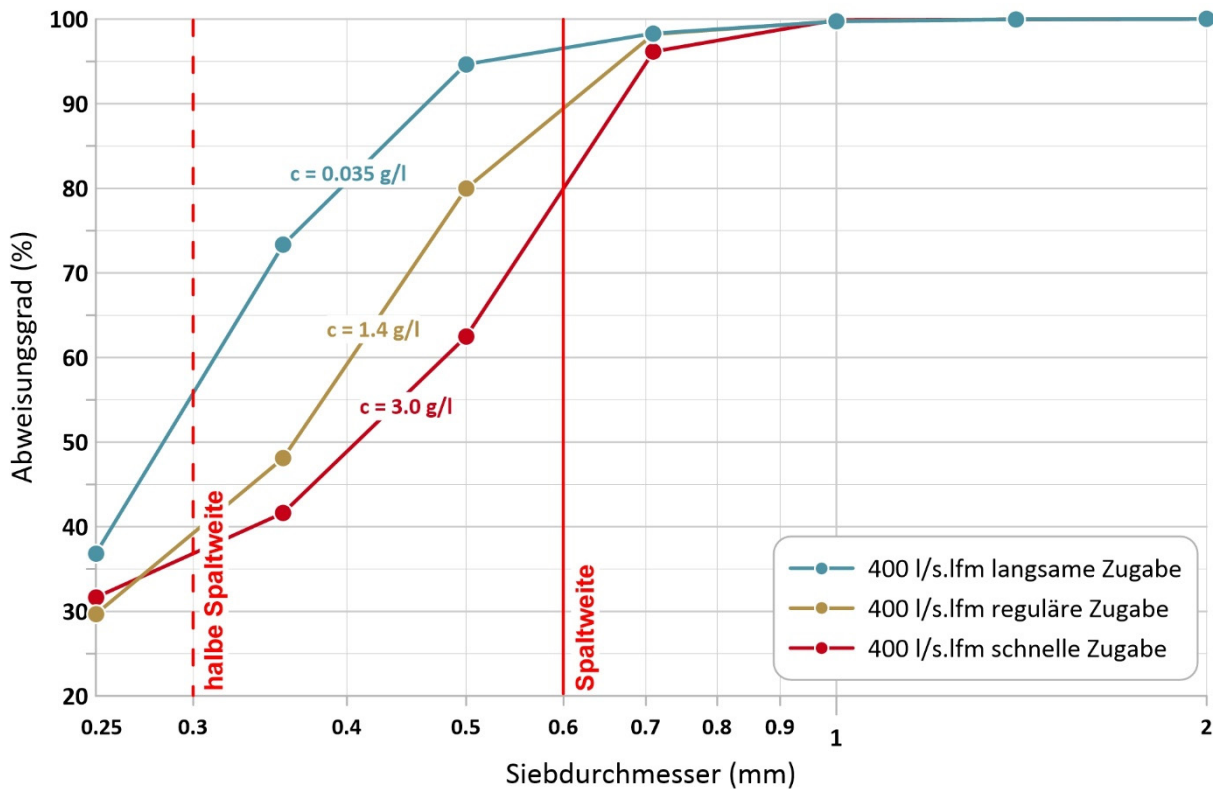


Abbildung 24: Vergleich der Abweisungsgrade bei langsamer, regulärer und schneller Zugabe bei 400 l/s.lfm beim Rechen Sb18 0.6 mit 0.6 mm Spaltweite

Bei der langsamen Zugabe wurde der 11kg Sack Geschiebe über etwa 25 Minuten verteilt aufgegeben, wodurch sich eine Konzentration von rund 0.035 g/l ergab (Abbildung 24, petrol).

Die reguläre Zugabe erfolgte jeweils mit einem Sack von 11 kg Geschiebe, der gleichmässig verteilt wurde und von der Schleppekraft des Wassers bei 400 l/s.lfm und in rund 40 Sekunden mit einer Fließgeschwindigkeit von 1.5 m/s über den Rechen gespült wurde. Daraus resultiert eine reguläre Geschiebekonzentration von rund 1.4 g/l (Abbildung 24, ocker).

Bei der schnellen Aufgabe des Geschiebes wurde eine hohe Geschiebefracht imitiert. Dabei haben drei Personen gleichzeitig insgesamt 33 kg Geschiebe auf einmal 3m vor dem Rechen in die Fließrinne gegeben. Es dauerte insgesamt ca. 60 s, bis das gesamte Geschiebe den Rechen passierte. Dadurch ergab sich eine Konzentration von ca. 3.0 g/l (Abbildung 24, rot). Alle Angaben sind in nachfolgender Tabelle 9 zusammengefasst.

Tabelle 9: Angaben zum Versuch verschiedenen schneller Zugabe

	Aufgabezeitraum	Abtransportzeitraum	Aufgegebene Menge	Konzentration
Langsame Zugabe	25 min	25 min	11 kg	0.035 g/l



Reguläre Zugabe	5 s	40 s	11 kg	1.4 g/l
Hohe Konzentration	5 s	60 s	33 kg	3.0 g/l

Im Gegensatz zum Versuch bei 89.7 l/s.lfm am Anfang des Testzeitraumes, konnten bei 400 l/s.lfm Differenzen im Schluckvermögen abhängig von der Geschiebekonzentration gefunden werden.

In der Praxis sind die Ergebnisse bei 89.7 l/s.lfm gemäss Betreiber / Hersteller relevanter, da dieser Durchfluss eher einem typischen Praxiswert entspricht. Ab welchem spezifischen Durchfluss sich die Unterschiede in der Geschiebekonzentration manifestieren, ist ohne weitere systematische Versuche nicht feststellbar.

Eine Teilbeaufschlagung kann durch Teilvereisung oder Verstopfung vorkommen. Deshalb wird dieser Parameter durch Abkleben der Rechen untersucht. Referenzversuche mit Geschiebe werden für bestimmte Konfigurationen durchgeführt. Eine ausführliche Untersuchung wurde aus Kostengründen nicht durchgeführt

2.4 Einfluss der Anströmung auf die Schluckfähigkeit

Veränderungen im Zulaufbereich können die Schluckfähigkeit des Coanda-Rechens beeinflussen. Durch Versuche ohne Geschiebe kann dieser Parameter untersucht werden. Hierzu wurde eine Zulaufstrecke mit einem Absatz vor dem Wehrrücken und eine ebene Geschiebezulaufstrecke untersucht. Alle Versuche erfolgen mit einer idealen, frontalen Anströmung des Coanda-Rechens.

An den zehn unterschiedlichen Rechen der Firma Wild Metal GmbH und dem Rechen von Höhenergie wurde ohne Geschiebe in einem ersten Schritt die Schluckfähigkeit überprüft und dokumentiert. Dabei wurden die Pegelstände und Fliessgeschwindigkeiten mit und ohne Einlaufschwelle am Wehr ermittelt.

2.5 Ermittlung des Ausscheidungsgrades von Feststoffen

2.5.1 Ausgangsmaterial

Es wurden insgesamt drei standardisierte Geschiebemischungen eingesetzt, welche bereits im Vorprojekt erfolgreich zur Anwendung gekommen sind (vgl. Kapitel 1.1). Die Kornverteilung ist typisch für Schweizer Wildbäche. Alle Kornmischungen, welche mit «0 mm - ...» angegeben wurden, sind streng genommen Mischungen ab 0.25 mm. Der Einfachheit halber und gemäss Usus in der Praxis verzichten wir in diesem Bericht durchwegs auf die Nachkommastellen.

Die zwei feinkörnigsten Materialien mit Korndurchmesser 0 – 2 mm und 2 – 4 mm wurden zuerst zu gleichen Teilen gemischt. Wir verwendeten 2 kg der Mischung und führten davon die Siebanalysen durch. Vom Material 0 – 16 mm wurden die Siebanalysen von jeweils 3 kg Material erstellt. Grössere Proben als 2 kg resp. 3 kg konnten nicht analysiert werden, da ansonsten die Menge an Rückstand

pro Sieb die zulässige Menge gemäss Norm überschritten hätte. Von jeder Probe wurden fünf bis sechs Siebanalysen durchgeführt, um die Variabilität innerhalb der Ausgangsgemische genau zu kennen und einen statistisch relevanten Mittelwert zu erhalten. Details zu den Siebanalysen der einzelnen Proben sind im Anhang 2 ersichtlich, inklusive d_{90} , d_m , σ .

Die Siebanalysen zeigten, dass das feinkörnigere Kantkorn 0 – 4 mm im Massenverhältnis 70/30 gemischt werden muss und nicht im Verhältnis 1:1. So kann insgesamt eine harmonische Sieblinie erzeugt werden. Das heisst, für die späteren Geschiebeversuche wurde 70% vom Kantkorn 0 – 2 mm und 30% vom Kantkorn 2 – 4 mm gemischt.

Weiter sollen Geschiebeversuche mit Rundkorn einen möglichen Unterschied zum gebrochenen Material aufzeigen. Das Kieswerk Untervaz mischte für unser Projekt das Rundkorn 0 – 4 mm und das Rundkorn 4 – 8 mm im Massenverhältnis 70/30 (d.h. 70% 0 – 4 mm, 30% 4 – 8 mm), um auch hier eine harmonische Sieblinie zu erhalten. Auch das Rundkorn-Material wurde fünf Mal zu je 3 kg analysiert. Nachfolgende Tabelle 10 listet das gesamte Material auf, welches für die Geschiebeversuche verwendet wurde:

Tabelle 10: Verwendetes Ausgangsmaterial

Korndurchmesser	Kornform	Mischung
0 – 2 mm	kantig	Gemischt durch FHGR im Massenverhältnis 7:3
2 – 4 mm	kantig	
0 – 8 mm	gerundet	Das Kieswerk mischte 0 – 4 mm und 4 – 8 mm Rundkorn im Massenverhältnis 7:3
0 – 16 mm	kantig	Geliefert ab Kieswerk

Abbildung 25 stellt die gemittelten Siebkurven des Ausgangsmaterials dar. Dabei handelt es sich bei der Sieblinie des 0 – 4 mm Kantkorns um die Mischung im Verhältnis 1:1, so wie sie zu Beginn durchgeführt wurde. Der Unterschied zwischen dieser Kurve und der Kurve 0 – 16 mm Kantkorn ist dabei gut ersichtlich und zeigt auf, weshalb für die nachfolgenden Geschiebeversuche das Mischverhältnis wie oben beschrieben angepasst wurde.

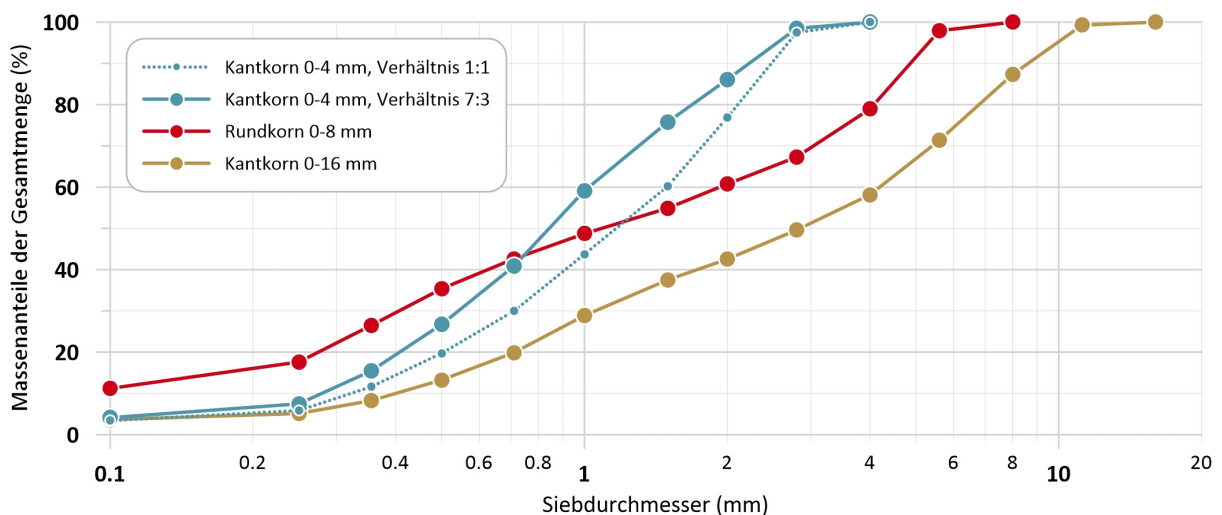


Abbildung 25: Gemittelte Siebkurven des Ausgangsmaterials

Die Siebanalysen wurden mit Hilfe einer Haver-Analysensiebmaschine EML 450 Digital Plus T mit Siebaufsätzen zu 400 mm Durchmesser aus Edelstahl-Metalldrahtgewebe durchgeführt (vgl. Abbildung 26). Korngrößen kleiner als 0.25 mm und somit kleiner als die kleinste Maschenweite des Auffangsiebes, wurden bei der Auswertung nicht berücksichtigt, da hierzu keine exakten Daten gewonnen werden konnten.



Abbildung 26: Analysensiebmaschine EML 450 Digital Plus T der Marke Haver & Boecker

2.5.2 Durchführung der Geschiebeversuche

Die Geschiebeversuche wurden zunächst über die gesamte Rechenbreite und später auch mit einer auf 0.5m reduzierten Rechenbreite gemacht, um einen höheren spezifischen Durchfluss erzielen zu können.

In nachfolgender Tabelle 11 sind alle durchgeführten Geschiebe-Versuche aufgelistet. Die beiden gebräuchlichsten Rechen (Wild Metal Typ Sb18 0.6 und Sb18 1.0) wurden der kompletten Serie unterzogen. Sie wurden bei sechs verschiedenen Durchflüssen (50 l/s, 100 l/s, 150 l/s, 200 l/s, 250 l/s, 300 l/s) mit allen drei Geschiebetypen getestet.

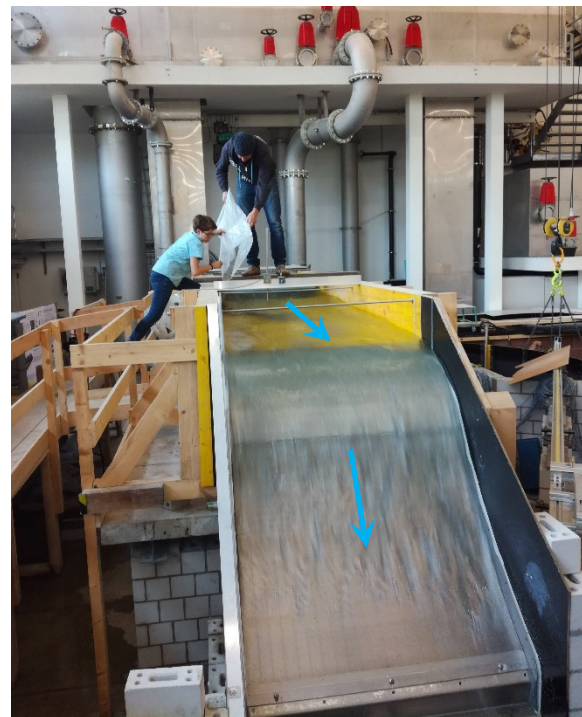
Tabelle 11: Durchgeführte Geschiebeversuche

		Korngrösse des Ausgangsmaterials			Anzahl Versuche	
		Spaltweite (mm)	0-4 mm, kantig	0-8 mm, rund		0-16 mm, kantig
Standardrechen	1		18	18	18	54
	0.6		24	18	18	60
	0.4		9	9	-	18
	1.5		9	9	-	18
	2		9	9	-	18

	3	9	9	-	18
	Total				<u>186</u>
Spezialrechen	Sb42 / 1 mm	3	-	-	3
	Sb34 / 1 mm	9	9	-	18
	Sb34 / 0.6 mm	9	9	-	18
	Sb18 / 0.6 mm verschlissen	3	-	-	3
	Höhenergie Bec de Canard	9	-	-	9
	Total				<u>51</u>
			Total Versuche		237

Die weiteren Rechen wurden einem gekürzten Untersuchungsprogramm unterzogen. Dabei wurden nur die drei Durchflussraten 100 l/s, 200 l/s, 300 l/s sowie die Geschiebetypen 0 – 4 mm Kantkorn und 0 – 8 mm Rundkorn verwendet. Jede Konfiguration wurde drei Mal getestet. Versuche mit Ergebnissen, welche aus der Reihe gefallen sind, wurden wiederholt. Um die statistische Aussagekraft für die Einzelergebnisse zu erhöhen, wurden die Ausreisser von der Auswertung ausgeschlossen.

Die Geschiebezugabe erfolgte mit einem Eimer oder einem Geschiebesack direkt in die Zulaufstrecke (Abbildung 27). Das Geschiebe, welches den Rechen passierte, konnte mittels Gewebesäcken aus Polyethylen mit 0.18 mm Maschenweite unter dem Rechen aufgefangen werden (Abbildung 28a und Abbildung 28b). Dieses Material wurde für die weitere Untersuchung in einem Trocknungssofen (Abbildung 28c) getrocknet und anschliessend der Siebanalyse unterzogen. Dabei wurde die selbe Siebmachine verwendet, mit welcher bereits das Ausgangsmaterial untersucht wurde (vgl. Kapitel 2.5.1).



b)

a)

Abbildung 27: Geschiebeaufgabe, die blaue Pfeile markieren die Fließrichtung. **a)** mit Eimer und **b)** mit Geschiebesack



a)



c)

b)

Abbildung 28: Die blauen Pfeile markieren die Fließrichtung des Wassers. **a)** Geschiebeauffangsack beim Triebwasserablauf **b)** Wasserkreislauf Unterbecken/Rücklauf. **c)** Trocknungsöfen

Weiter konnte vom häufig verwendeten Rechentyp Sb18 0.6 ein verschlissenes Exemplar bezogen werden, um die verschiedenen Kennwerte (Abweisungsgrade, Schluckvermögen) mit einem neuwertigen Rechen zu vergleichen.

Zusätzlich wurden im November 2018 Versuche mit partieller Überströmung am Standardrechen Sb18 1.0 durchgeführt, um eine Vereisung oder einen anderen, ähnlichen Betriebszustand mit partieller Funktionslosigkeit zu simulieren. Dies wurde durch stellenweises Abkleben des untersuchten Rechens erreicht und mit unterschiedlichen Durchflüssen getestet. Die Geschiebeversuche wurden mit dem Geschiebetyp 0 – 4 mm Kantkorn durchgeführt.

2.6 Fischgängigkeit

Coanda-Rechen werden hauptsächlich an alpinen Wasserfassungen eingesetzt. Die Bachforelle ist die häufigste Fischart in alpinen Gewässern, oft kommen neben den Bachforellen keine weiteren Fischarten vor. Für den Versuch wurden Wildfische verwendet. Zuchtfische als Ersatz sind keine Alternative, da diese oft ein anderes Verhalten als Wildfische zeigen.

2.6.1 Abfischung/Transport

Die Fische wurden mittels Elektrofischerei (Abbildung 29) im Schanielabach, einem alpinen Fließgewässer im Kanton Graubünden, gefangen und anschliessend ins Labor transportiert (Abbildung 30).

Die Behältnisse wurden mit Bachwasser gefüllt und ständig belüftet. Die Temperatur wurde regelmässig überprüft und bei Bedarf Wasser vom Bach ausgewechselt oder auf der Fahrt Eis zur Kühlung dazugegeben. Im Labor musste die Temperatur langsam an die Hälterungsbecken angepasst werden, um Stress bei den Fischen zu vermeiden. Auch hier wurde das Wasser langsam bis zur Anpassung ausgewechselt.



a)

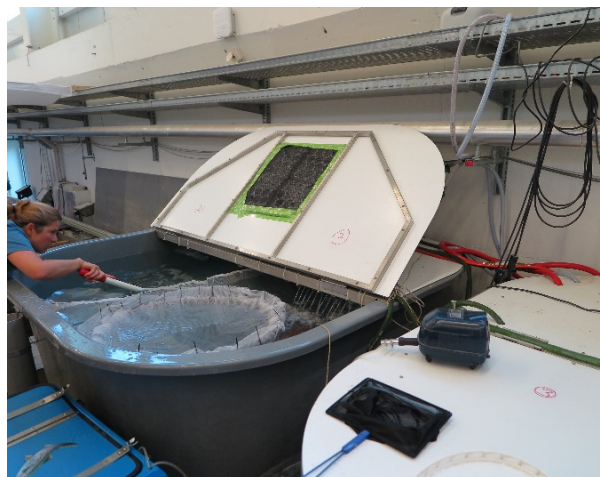


b)

Abbildung 29: a), b) Elektrische Abfischung mittels Anode, Kescher und Eimer



a)



b)

Abbildung 30: Hälterungsboxen. a) Transportbehälter b) Hälterungsbecken im Labor

2.6.2 Hälterung

Vor der Einhälterung wurden die Fische anästhesiert, vermessen, gewogen und markiert (PIT-Tag). Das PIT-Tagging erfolgte anhand der *Standard operating procedure* (Vollzugshilfe BAFU: Fang, Markierung und Beprobung von freilebenden Wildtieren). Ein kleiner Sender wurde mittels Skalpellschnitt in die Bauchhöhle eingesetzt und konnte anschliessend mit einem Gerät eingelesen bzw. identifiziert werden (Abbildung 31). Durch die Markierung wurden die Forellen individuell erkennbar. Nach der Markierung wurden sie in die Hälterungsbecken gegeben und erst am nächsten Tag für die Experimente verwendet. Die Fischtanks und das Wasser für die Versuche wurden aus demselben Kreislauf entnommen. Die Wassertemperatur im Schanielabach wurde durch zwei Temperaturlogger ermittelt und lag zwischen 8 und 16°C. Der Wasserkreislauf des Versuchslabors ist an eine Kühlung angeschlossen und wurde auf die Wassertemperatur im Schanielabach angepasst.

Für die Erhebung der biometrischen Daten (Längen/Gewicht, Verletzungsanalyse) und das Markieren (PIT-Tag) wurden die Fische anästhesiert. Dafür wurde Nelkenöl in einer Konzentration von 40 mg/l verwendet (Anästhesiestufe 5 nach Summerfelt & Smith, 1990). Die Anästhesie dauerte zirka vier Minuten. Das Becken mit dem Narkosemittel wurde ausreichend mit Sauerstoff versorgt, ebenso das Hälterungsbecken zum Aufwachen aus der Narkose.

Der Einfluss der Narkose wird als gering eingeschätzt, da die Fische sich innerhalb von 30 Minuten gut erholten und sich im Vergleich zu nicht narkotisierten Fischen gleich verhielten. Dieses Verhalten konnte in diversen Versuchen festgestellt werden.

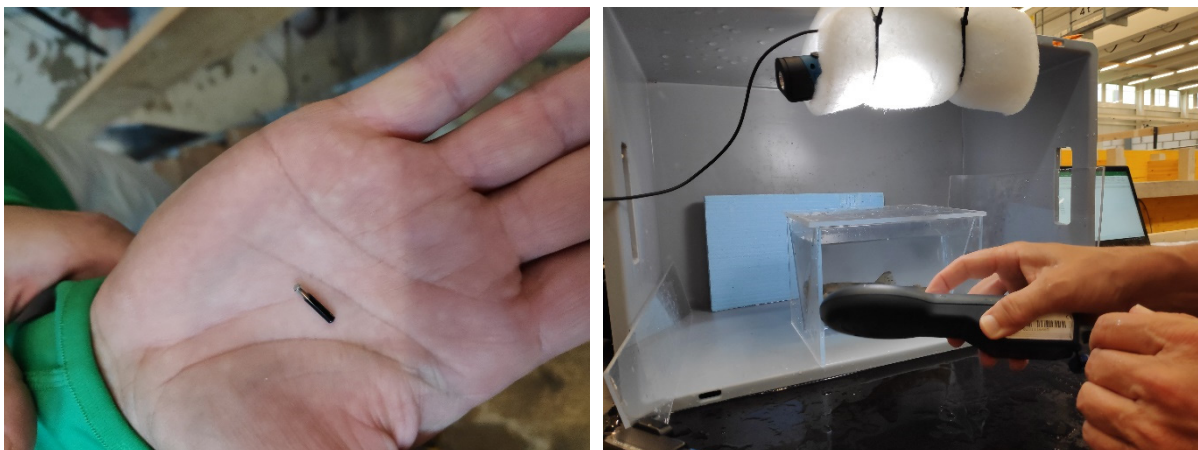


Abbildung 31: Einlesemethodik. **a)** PIT Tag, welcher den Fischen in die Bauchhöhle eingesetzt wird. **b)** Einlesegerät zur eindeutigen Identifikation

2.6.3 Versuchsdurchführung

Für das eigentliche Experiment wurden die Fische mittels Netz schonend aus den Hälterungsbecken entnommen. Jeder Fisch wurde vor Versuchsbeginn unter Anästhesie auf allfällige Verletzungen untersucht, in dem er beidseitig in einer Küvette gefüllt mit Wasser fotografiert wurde (Abbildung 32b). Anschliessend konnte sich der Fisch für eine Stunde im Aufwachbecken erholen (Abbildung 32a), bis

er mittels Eimer in das Startabteil des Kanals gebracht und freigelassen wurde. Bei der Abwanderung schwammen die Fische über den Coanda-Rechen und fielen in einen Kolk, wo sie schonend abgefangen wurden. Die Fallhöhe mass 1.4 m (Oberkante Wehr bis Wasserspiegel Kolk), der Wasserspiegel im Kolk betrug 1.3 m (Abbildung 33). Die Fische wurden aus dem Kolk abgefangen, anästhetisiert und erneut fotografiert. Schliesslich wurde der Fisch wieder ins Hälterungsbecken entlassen. Das zeitaufwändige Protokollieren von allfälligen Fischverletzungen erfolgte nach Abschluss der Versuche anhand der Fotos.



a)



b)

Abbildung 32: Hälterung der Fische. **a)** Hälterungsbecken mit Aufwächernetzen **b)** Küvette mit Wasser und Fisch fürs einfachere Fotografieren



Abbildung 33: Zulauf, Wehr und Kolk mit Netz

2.6.4 Versuchskonfiguration

Pro Konfiguration wurden 12 Replikationen mit je 3 Forellen durchgeführt. Dabei wurden zwei Grössenklassen von Forellen verwendet: Grössenklasse klein: Forellen bis 16 cm, Grössenklasse gross: Forellen grösser als 16 cm. Zwei verschiedene Rechentypen (Sb18 0.6 und Sb18 1.0) wurden bei zwei verschiedenen Durchflüssen (100 und 300 l/s.lfm) getestet. Somit wären insgesamt 288 Fische benötigt worden ($12 \times 3 \times 2 \times 2 \times 2$). Da jede Forelle zweimal verwendet wurde (bei unterschiedlichem Durchfluss), reichten total $288/2 = 144$ Bachforellen für diese Versuchsreihen aus. Zusätzlich wurden Kontrollfische verwendet, an denen nur das Handling durchgeführt wurde. Diese Fische wurden nicht im Versuch eingesetzt und passierten somit keinen Coanda-Rechen. Diese Kontrollgruppe umfasste 72 Fische. Im Total waren dies $144 + 72 = 216$ Fische + Reserve. Die Kontrollgruppe war nötig, um statistisch gesicherte Aussagen zu den vom Versuch stammenden Verletzungen machen zu können. Es wurde davon ausgegangen, dass diese Fische keine mittleren oder grösseren Verletzungen aufweisen. Sie wurden genauso anästhesiert, markiert, fotografiert und gehältert wie die Rechenfische, also die Fische, welche den Coanda-Rechen passierten. Nur wurde bei den Kontrollfischen der Versuchseinfluss durch den Coanda-Rechen weggelassen. In Tabelle 8 ist ein Überblick über die durchgeführten Versuche zu finden, im Kapitel 3.3.2 finden sich Daten zur Einteilung der Fische in die Grössenklassen.

Die Fische wurden nicht gefüttert. Ein Futterentzug bis zu max. 7 Tagen ist kein Problem und schadet den Fischen nicht nachträglich (Azodi et al., 2016). Zudem verweigern wilde Forellen in den ersten Tagen in der Hälterung in der Regel das Futter.

2.6.5 Bildauswertung

Die Fotos wurden intensiv auf Verletzungen der Fische untersucht, wobei das Foto vor einem Versuch mit dem Foto nach einem Versuch verglichen wurde. Erst wurden die Schuppenverluste mit dem *freehand tool* markiert. Die Fläche wurde anschliessend in Pixel gemessen -> *analyze measure*.

Die Fläche vom gesamten Fisch wurde mit dem *polygon tool* markiert, gemessen und der Schuppenverlust prozentual berechnet.

Verwendetes Programm open source: ImageJ, mit Freehand und Polygon (ImageJ, 2019)

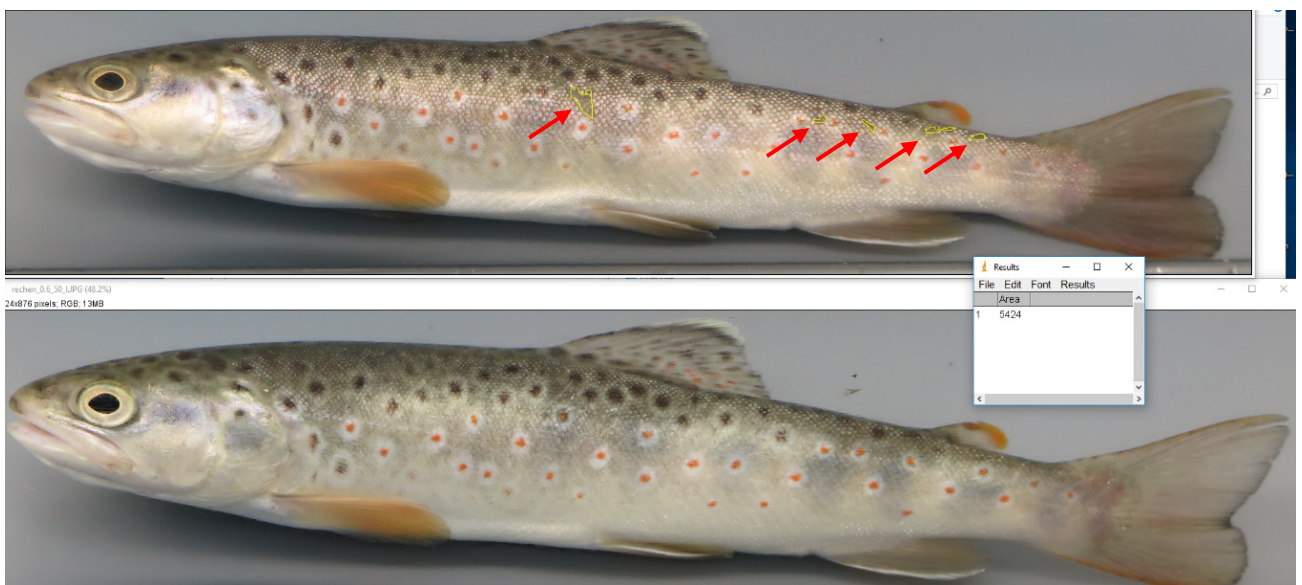


Abbildung 34: Schuppenverluste wurden mit dem freehand tool markiert (schwach erkennbar sind gelb umkreiste Flächen, mit roten Pfeilen wird darauf hingewiesen); **oben**: nach dem Versuch, **unten**: vor dem Versuch

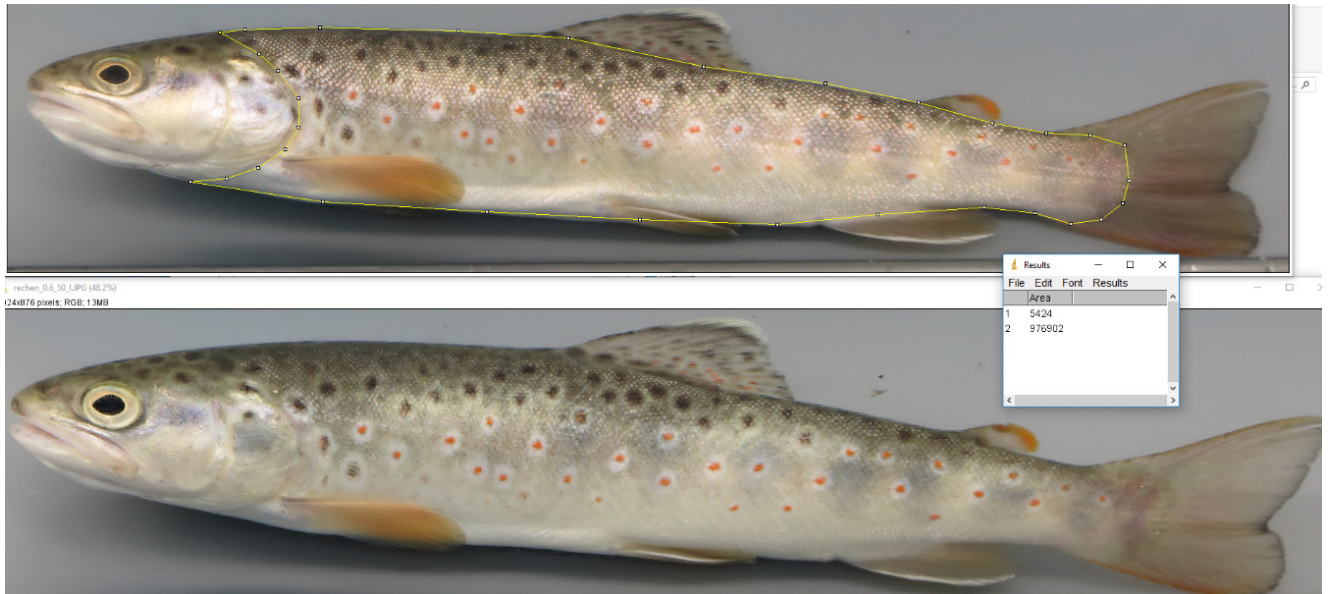


Abbildung 35: Gesamtfläche wurde mit dem polygon tool (gelbe Umrandung) beim oberen Bild markiert; **oben**: nach Versuch, unten: vor Versuch

3 Ergebnisse / Erkenntnisse

3.1 Schluckfähigkeit

3.1.1 Volle Rechenbreite 1.115m

Mit allen Rechen wurden Klarwasserversuche (d.h. ohne Geschiebezugabe) durchgeführt, um die Schluckfähigkeit zu erfassen (vgl. Tabelle 8). Alle getesteten Rechen konnten das Maximum der Versuchsanlage von 300 l/s schlucken. Ausnahmen bildeten die Standardrechen mit 2 mm und 3 mm Spaltweite. Diese wiesen beim maximalen Durchfluss 1 -2 % Überfallwasser auf, welches über den Rechen ins Unterwasser geleitet wurde. Ebenso konnte der Spezialrechen Sb34 mit 1.0 mm Spaltweite ab 200 l/s Anlagendurchfluss nicht mehr alles Wasser schlucken. Ein MID-Gerät konnte die Überfallwassermenge im Abfluss des Unterwassers messen. Nachfolgende Tabelle 12 fasst die Ergebnisse zusammen.

Tabelle 12: Überfallwassermenge in l/s der Standardrechen von Wild Metal bei verschiedenen Durchflüssen

Durchfluss (l/s)	Standardrechen Sb18						Spezialrechen Sb34 1.0mm
	0.4 mm	0.6 mm	1.0 mm	1.5 mm	2.0 mm	3.0 mm	
50	0	0	0	0	0	0	0
100	0	0	0	0	0	0	0
150	0	0	0	0	0	0	0
200	0	0	0	0	0	0	2 l/s
250	0	0	0	0	0	2 l/s	6-7 l/s
300	0	0	0	0	5 l/s	5 l/s	20 l/s



In den Klarwasserversuchen wurde zudem für jeden Durchfluss festgehalten, wieviel Prozent des Rechens mit Wasser überströmt wurde (Rechenbenetzung). Bei einer Durchflusszunahme von 50 l/s wurden etwa 10 bis 15 cm des Rechens zusätzlich benetzt (vgl. Tabelle 13). Die Benetzung wurde anhand von Fotos eruiert. Frontal hat der Rechen 100 cm Benetzungslänge.

Aus wasserwirtschaftlicher Sicht am günstigsten verhielten sich die Rechen vom Typ Wild Metal Sb18 0.6 mm sowie 1.0 mm. Wie man an den nachfolgenden Abbildungen 39-42 sieht, hatten die Spaltweite keinen sehr grossen Einfluss auf die Benetzung. Generell war die Tendenz zu erkennen, dass bei grösseren Spaltweiten oder stärker angewinkelten und gröbereren Rechenstäben mehr Turbulenzen an der Rechenhaut entstanden und daher auch die Benetzung bei gleichem Durchfluss anstieg.

Tabelle 13: Rechenbenetzung der Standardrechen Sb18 bei verschiedenen Durchflüssen

Durchfluss (l/s)	Rechenbenetzung (%) ab Oberkante Rechen
50	14 – 20
100	24 – 31
150	43 – 46
200	49 – 57
250	60 – 71
300	86 – 100

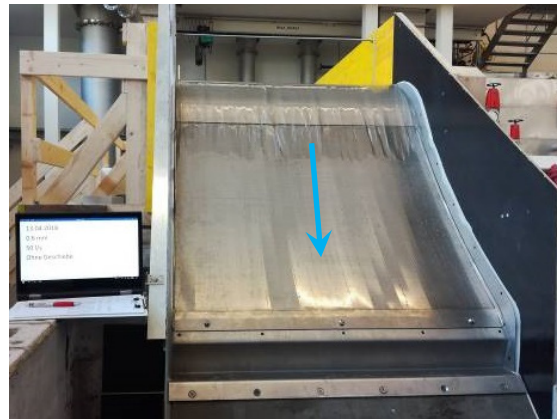
Durch Klarwasserversuche wurden Veränderungen im Zulaufbereich untersucht. Hierzu wurde eine Zulaufstrecke mit einem Absatz vor dem Wehrrücken und eine ebene Geschiebezulaufstrecke getestet. Alle Versuche erfolgen mit einer idealen, frontalen Anströmung des Coanda-Rechens. Diese Versuche zeigten, dass die Schluckfähigkeit für beide Zulaufgeometrien gleich hoch war.

Das ermittelte Schluckvermögen betrug bei fast allen Rechen mindestens die maximal getesteten 269 l/s.lfm. Weitere Untersuchungen wurden nach dem Umbau auf 0.5 m Rinnenbreite mit dem 0.6 mm und dem 1.0 mm Rechen von Wild Metal Typ Sb18 durchgeführt (siehe nachfolgende Kapitel).

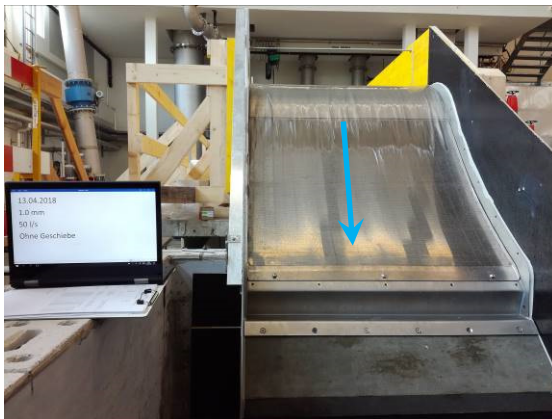
Durchfluss 44.8 l/s.lfm, Rechenbenetzung 14-20 %, kein Überfall, vollständige Schluckfähigkeit



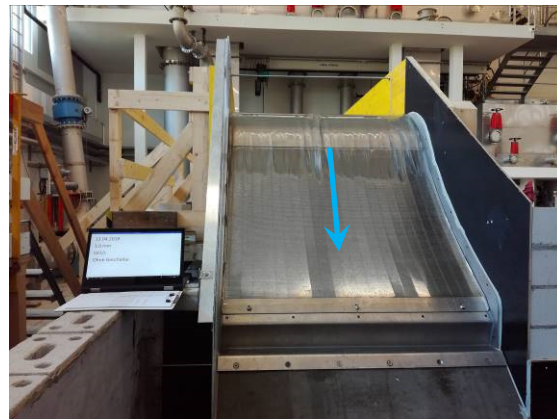
a) Spaltweite 0.4 mm



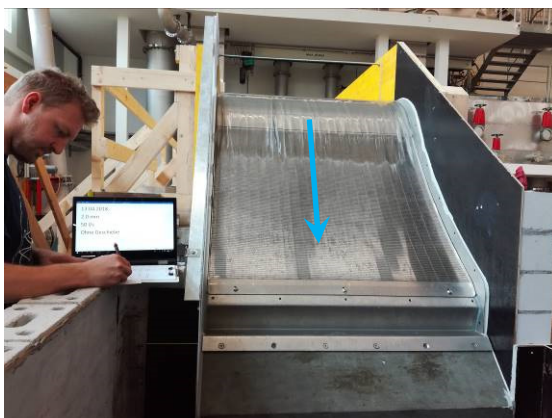
b) Spaltweite 0.6 mm



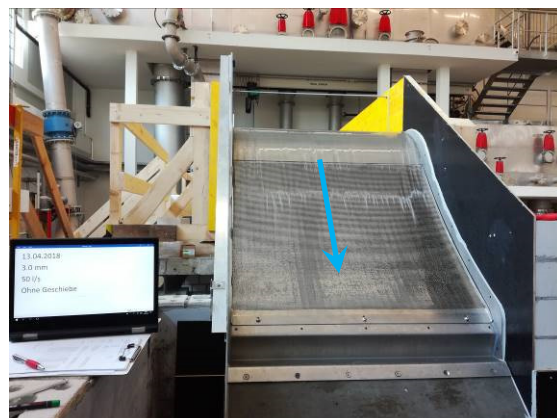
c) Spaltweite 1.0 mm



d) Spaltweite 1.5 mm



e) Spaltweite 2.0 mm

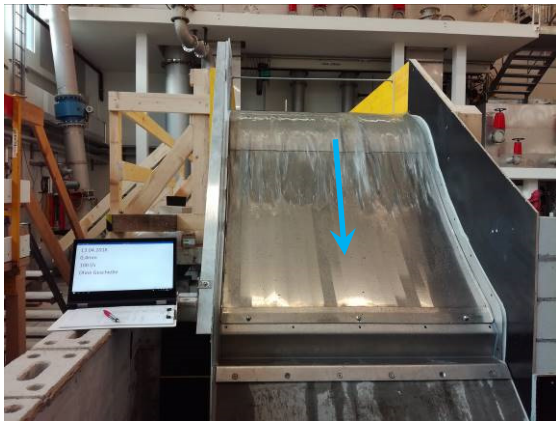


f) Spaltweite 3.0 mm

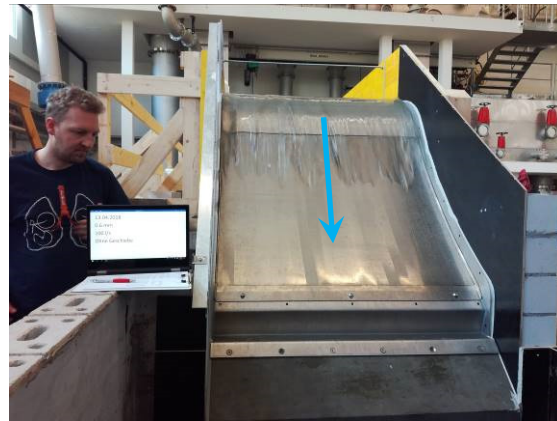
Abbildung 36: Klarwasserversuche mit 44.8 l/s.lfm Durchfluss, die blauen Pfeile markieren die Fließrichtung. Die Bilder a) bis f) zeigen die Überströmung der Standardrechen Sb18 von Wild Metal GmbH mit Spaltweite 0.4 bis 3.0 mm.



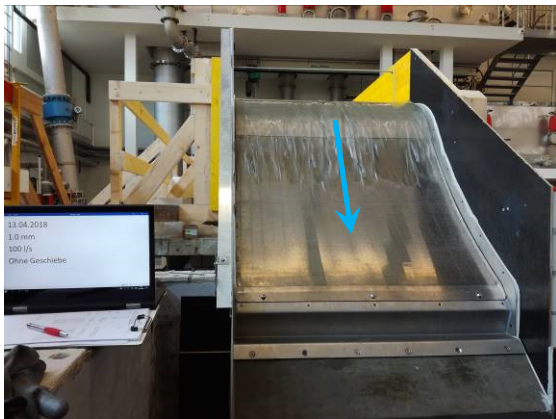
Durchfluss 89.7l/s.lfm, Rechenbenetzung 24-31 %, kein Überfall, vollständige Schluckfähigkeit



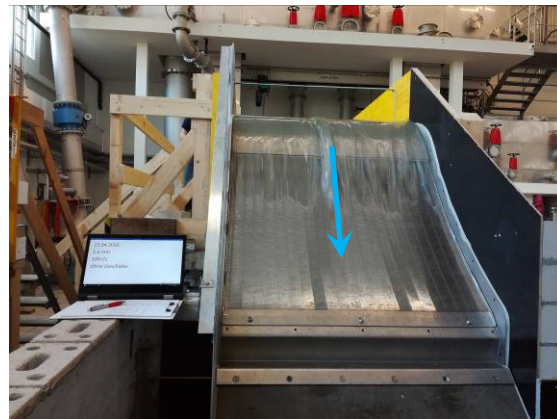
a) Spaltweite 0.4 mm



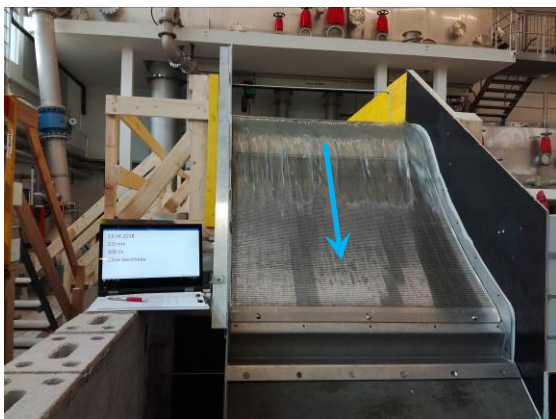
b) Spaltweite 0.6 mm



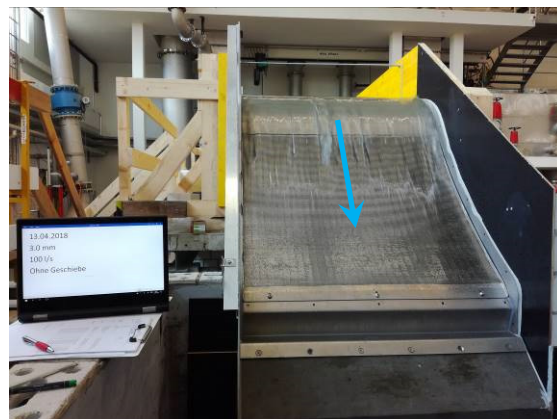
c) Spaltweite 1.0 mm



d) Spaltweite 1.5 mm



e) Spaltweite 2.0 mm

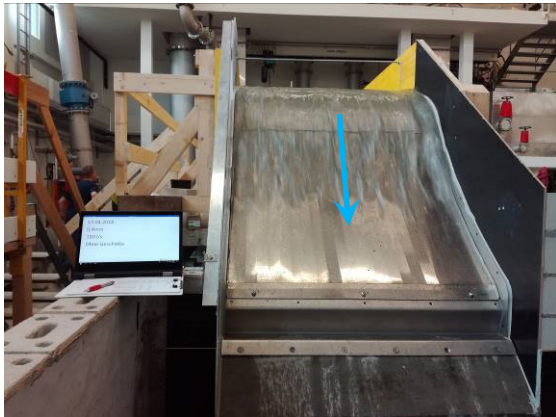


f) Spaltweite 3.0 mm

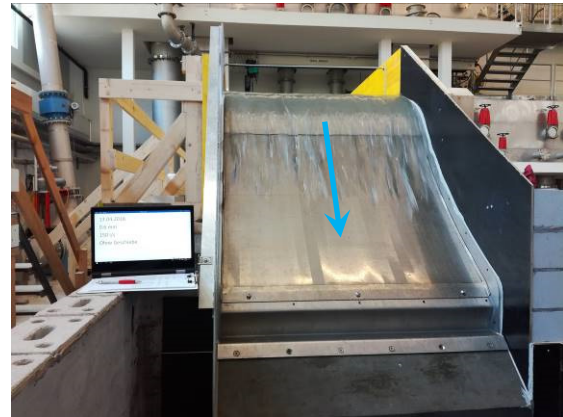
Abbildung 37: Klarwasserversuche mit 89.7 l/s.lfm Durchfluss, die blauen Pfeile markieren die Fließrichtung. Die Bilder a) bis f) zeigen die Überströmung der Standardrechen Sb18 von Wild Metal GmbH mit Spaltweite 0.4 bis 3.0 mm.



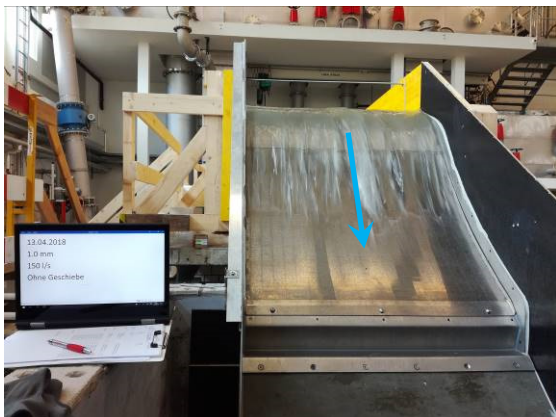
Durchfluss 134.5 l/s.lfm, Rechenbenetzung 43-46 %, kein Überfall, vollständige Schluckfähigkeit



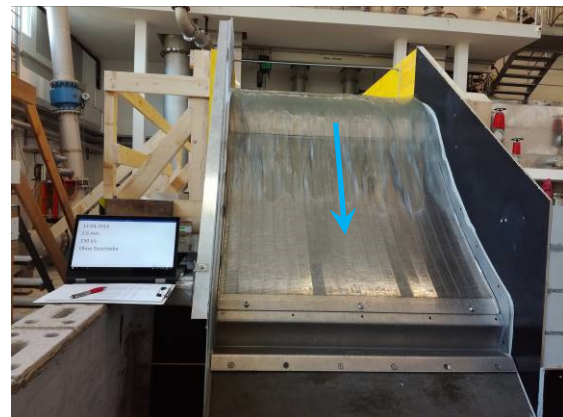
a) Spaltweite 0.4 mm



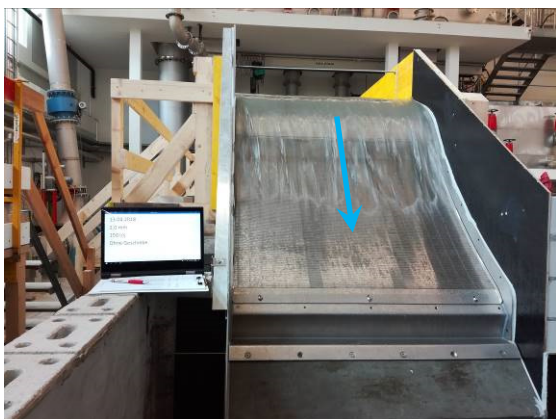
b) Spaltweite 0.6 mm



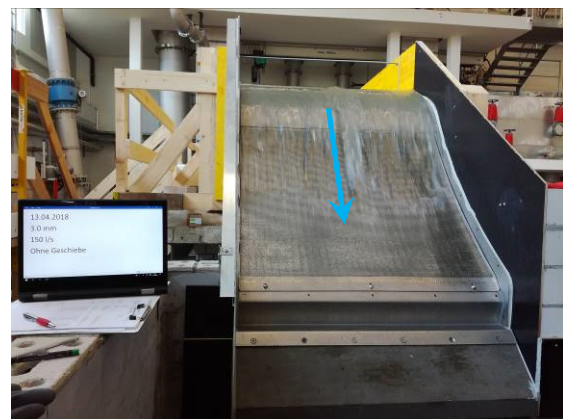
c) Spaltweite 1.0 mm



d) Spaltweite 1.5 mm



e) Spaltweite 2.0 mm

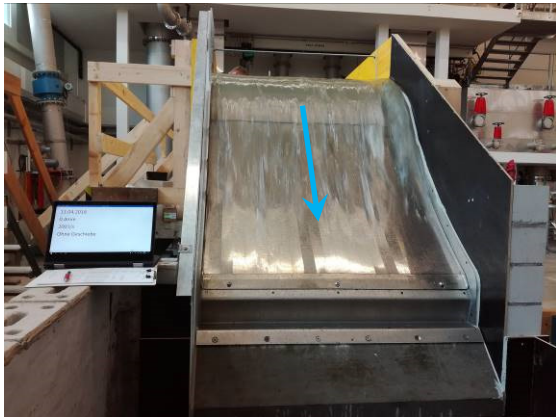


f) Spaltweite 3.0 mm

Abbildung 38: Klarwasserversuche mit 134.5 l/s.lfm Durchfluss, die blauen Pfeile markieren die Fließrichtung. Die Bilder a) bis f) zeigen die Überströmung der Standardrechen Sb18 von Wild Metal GmbH mit Spaltweite 0.4 bis 3.0 mm.



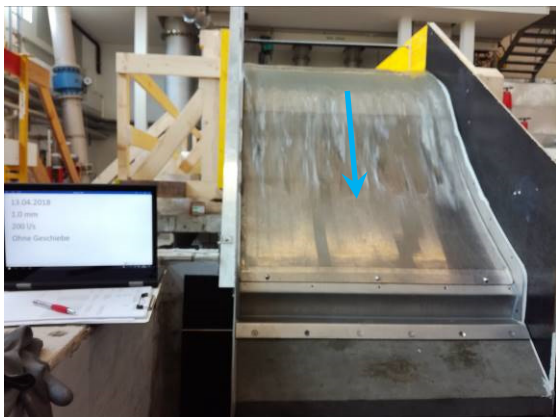
Durchfluss 179.4 l/s.lfm, Rechenbenetzung 49-57 %, kein Überfall, vollständige Schluckfähigkeit



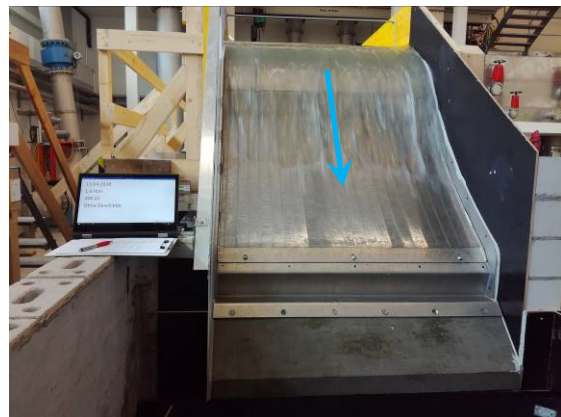
a) Spaltweite 0.4 mm



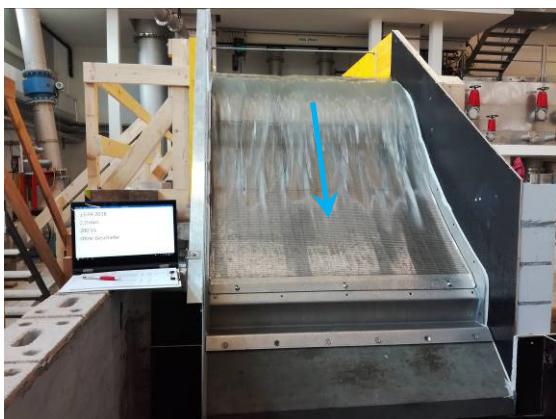
b) Spaltweite 0.6 mm



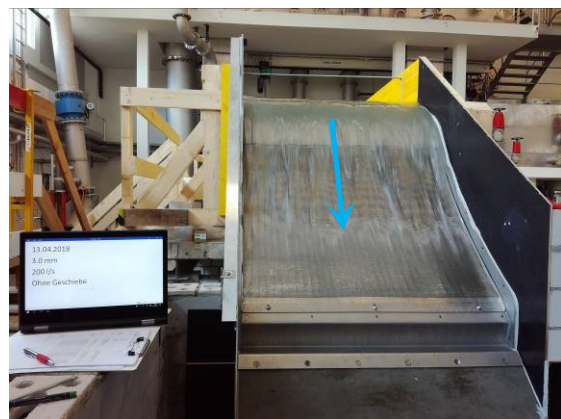
c) Spaltweite 1.0 mm



d) Spaltweite 1.5 mm



e) Spaltweite 2.0 mm

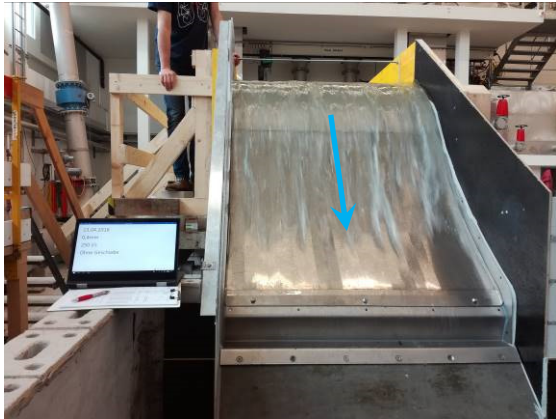


f) Spaltweite 3.0 mm

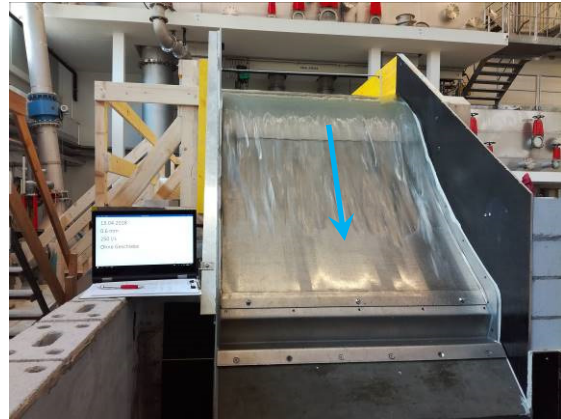
Abbildung 39: Klarwasserversuche mit 179.4 l/s.lfm Durchfluss, die blauen Pfeile markieren die Fließrichtung. Die Bilder a) bis f) zeigen die Überströmung der Standardrechen Sb18 von Wild Metal GmbH mit Spaltweite 0.4 bis 3.0 mm.



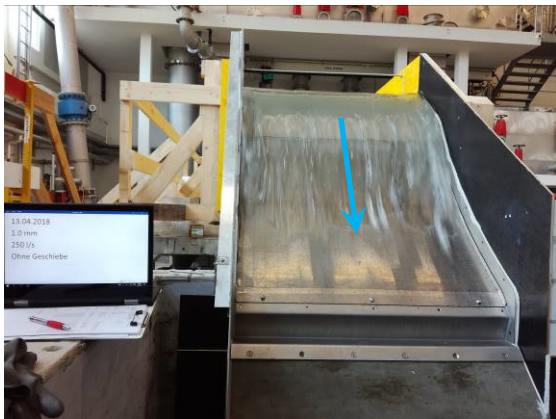
Durchfluss 224.2 l/s.lfm, Rechenbenetzung 60-71 %



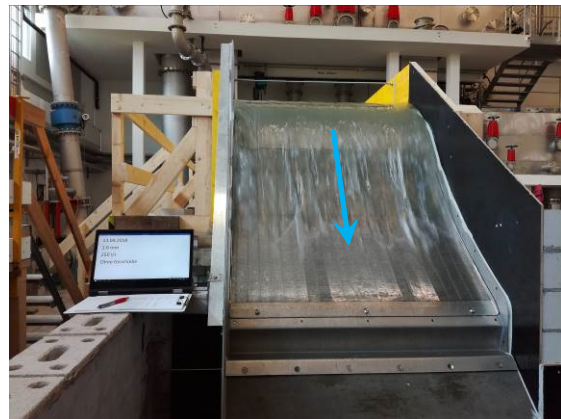
a) Spaltweite 0.4 mm, kein Überfall



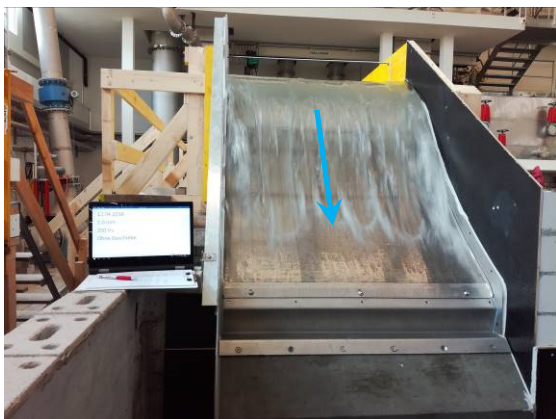
b) Spaltweite 0.6 mm, kein Überfall



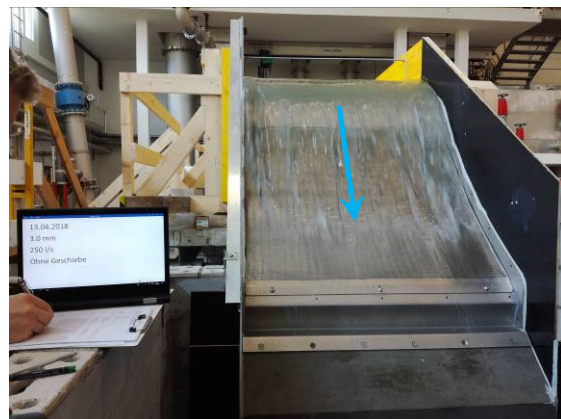
c) Spaltweite 1.0 mm, kein Überfall



d) Spaltweite 1.5 mm, kein Überfall



e) Spaltweite 2.0 mm, kein Überfall

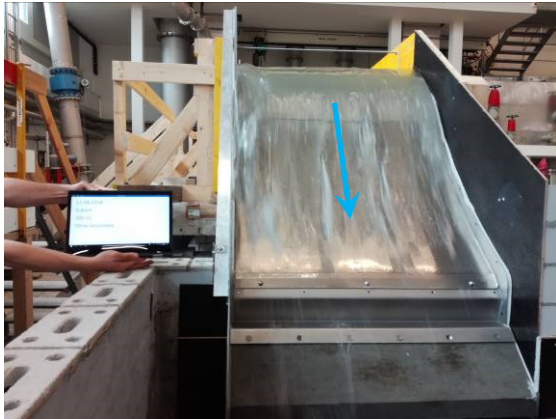


f) Spaltweite 3.0 mm, Überfall 2 l/s

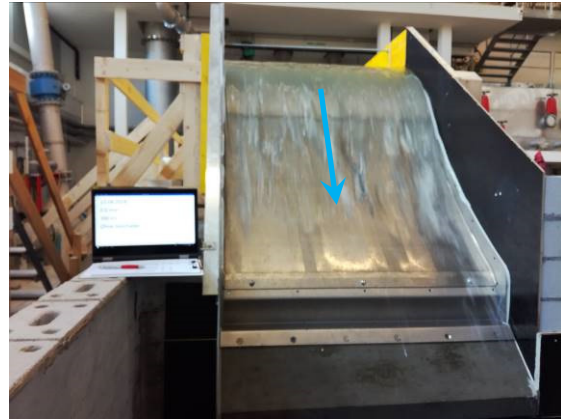
Abbildung 40: Klarwasserversuche mit 224.2 l/s.lfm Durchfluss, die blauen Pfeile markieren die Fließrichtung. Die Bilder a) bis f) zeigen die Überströmung der Standardrechen Sb18 von Wild Metal GmbH mit Spaltweite 0.4 bis 3.0 mm.



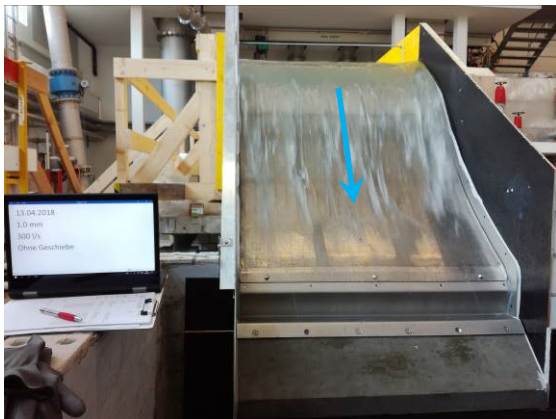
Durchfluss 269 l/s.lfm, Rechenbenetzung 86-100 %



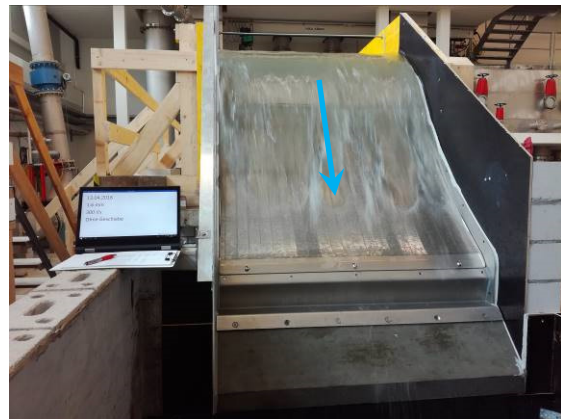
Spaltweite 0.4 mm, kein Überfall



Spaltweite 0.6 mm, kein Überfall



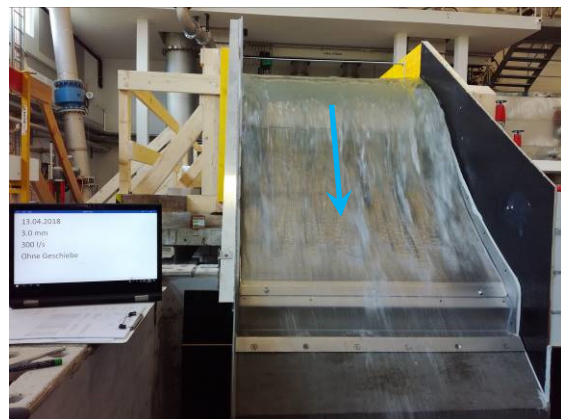
Spaltweite 1.0 mm, kein Überfall



Spaltweite 1.5 mm, kein Überfall



Spaltweite 2.0 mm, Überfall 5 l/s

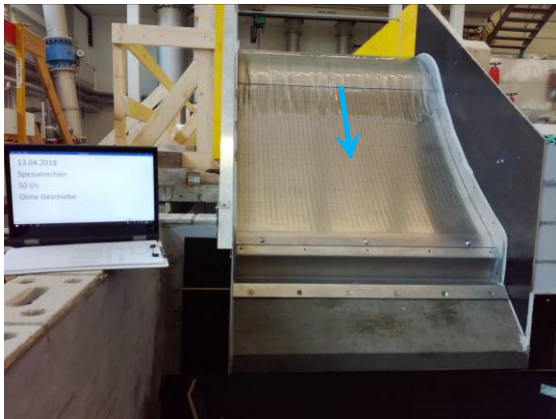


Spaltweite 3.0 mm, Überfall 5 l/s

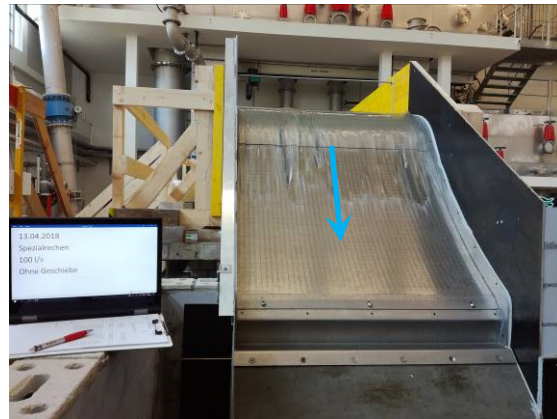
Abbildung 41: Klarwasserversuche mit 269 l/s.lfm Durchfluss, die blauen Pfeile markieren die Fließrichtung. Die Bilder a) bis f) zeigen die Überströmung der Standardrechen Sb18 von Wild Metal GmbH mit Spaltweite 0.4 bis 3.0 mm.



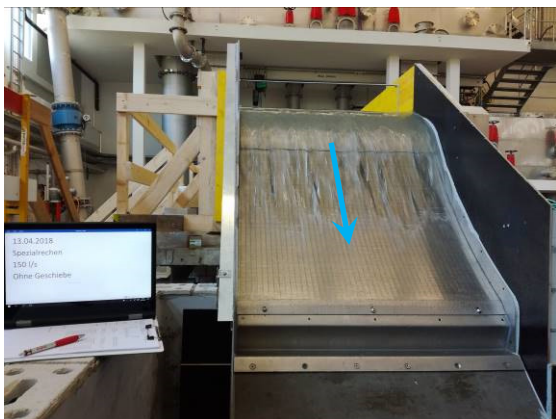
Spezialrechen Sb34 1.0 mit Spaltweite 1.0 mm – Durchflussangaben gemäss Beschreibung



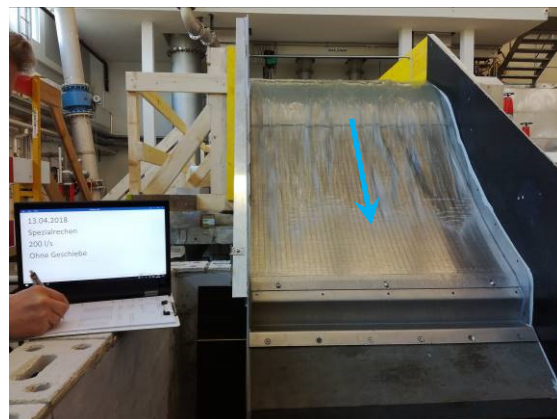
a) Durchfluss 44.8 l/s.lfm, kein Überfall



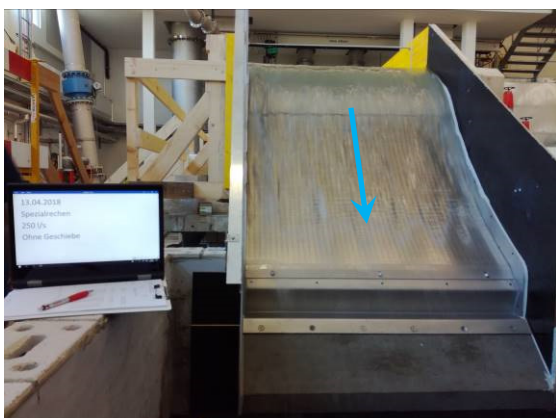
b) Durchfluss 89.7 l/s.lfm, kein Überfall



c) Durchfluss 134.5 l/s.lfm, kein Überfall



d) Durchfluss 179.4 l/s.lfm, kein Überfall



e) Durchfluss 224.2 l/s.lfm, kein Überfall



f) Durchfluss 269 l/s.lfm, Überfall 20 l/s

Abbildung 42: Klarwasserversuche mit dem Spezialrechen Sb34 1.0 mm, die blauen Pfeile markieren die Fließrichtung. Die Bilder a) bis f) zeigen die Überströmung bei unterschiedlicher Durchflussrate.



3.1.2 Klarwasserversuche mit reduzierter Rechenbreite

Um die Abflusskapazität des Versuchsstands zu erhöhen, wurde die Rechenbreite sowohl auf der Zuflussstrecke als auch auf dem Wehr/Rechen von 1.115 m auf 0.5 m reduziert. Dabei erhöhen sich die Durchflüsse auf max. 600 l/s.lfm. Bei dieser Rechenbreite wurden drei verschiedene Rechen getestet. Es handelt sich dabei um die am häufigsten verwendeten Rechen von Wild Metal, die Rechen Sb18 0.6 und Sb18 1.0 mit 0.6 mm resp. 1.0 mm Spaltweite sowie den Rechen «Bec de Canard» von Höhenergie mit einer Spaltweite von 1 mm. Auf der verschmälerten Anlage wurden Versuche zur Hydraulik (Schluckfähigkeit, Fließgeschwindigkeiten, Abflusstiefen) und zum Abweisungsgrad (siehe Kapitel 3.2) durchgeführt. Die beiden Rechen von Wild Metal wurden zudem auch für den Fischabstieg getestet (Kapitel 3.3).

Abbildung 43 zeigt die Schluckfähigkeit Q_s der drei untersuchten Rechentypen für verschiedene Zuflüsse Q_{zu} . Der «Bec de Canard» von Höhenergie kann bereits ab 200 l/s.lfm nicht mehr den gesamten Zufluss schlucken und erreicht seine maximale Schluckfähigkeit $Q_{s,max}$ 345 l/s.lfm bei $Q_{zu} = 600$ l/s.lfm. Beide Rechen von Wild Metal (Typ Sb18) hingegen vermögen den gesamten Zufluss bis zu 300 l/s.lfm zu schlucken, danach wird Überfallwasser beobachtet. Die unterschiedliche Spaltweite hat erst ab einem Zufluss von 500 l/s.lfm einen massgebenden Einfluss auf die Schluckfähigkeit.

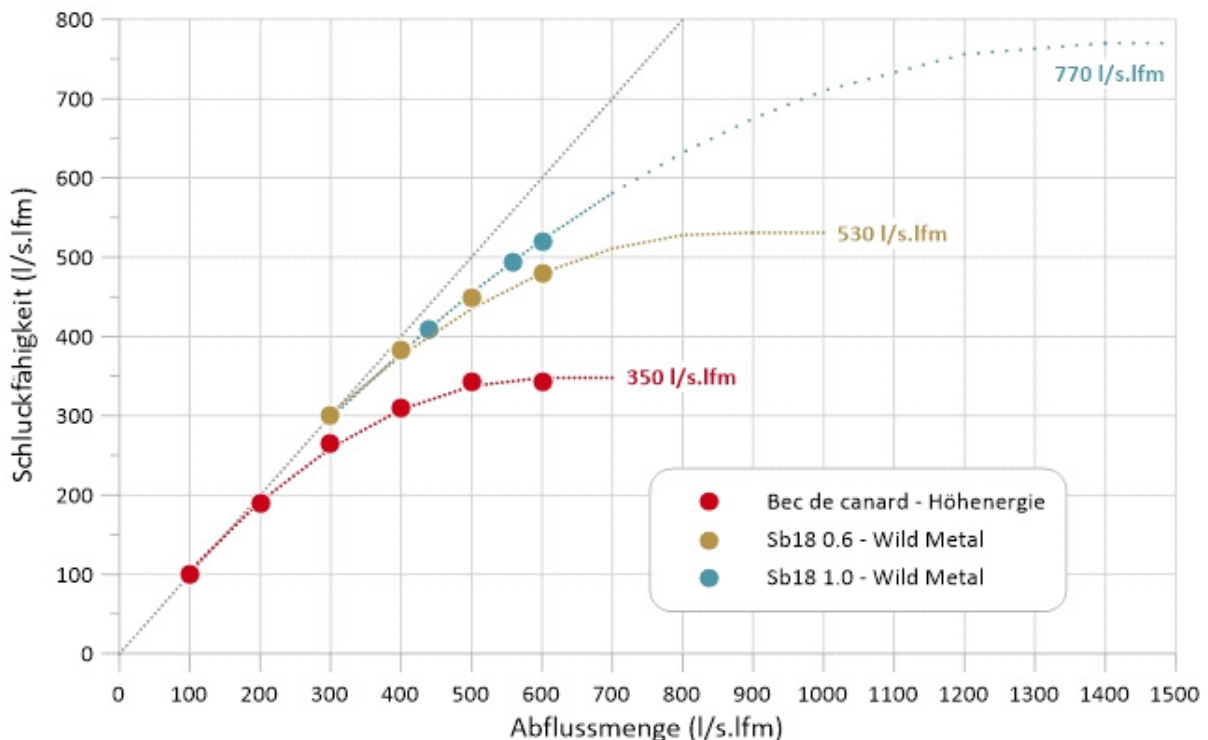


Abbildung 43: Gemessene Schluckfähigkeit Q_s (Kreissymbole) auf der verschmälerten Anlage (maximale Beaufschlagung $Q_{zu} = 600$ l/s.lfm) und empirische Funktionen (gepunktete Linie) für die Abschätzung der maximalen Schluckfähigkeit $Q_{s,max}$.

Abbildung 43 zeigt auch, dass $Q_{s,max}$ der beiden Rechen von Wild Metal mit der bestehenden Versuchsanlage nicht ermittelt werden konnte. Um $Q_{s,max}$ abzuschätzen, wurden die in Abbildung 43 dargestellten empirischen Funktionen (gepunktete Linien) mit einer Regressionsanalyse ($R^2 = 0.99$) aus



den geprüften Datensätzen bis zu 600l/s Abflussmenge ermittelt. Die maximale Schluckfähigkeit für den Rechen Sb18 1.0 von Wild Metal liegt gemäss dieser Extrapolation theoretisch bei $Q_{s,max} = 770$ l/s.lfm und wird bei einem Zufluss $Q_{zu} = 1390$ l/s.lfm erreicht. Für den Rechen Sb18 0.6 von Wild Metal ist $Q_{s,max} = 530$ l/s.lfm und wird bei $Q_{zu} = 900$ l/s.lfm erreicht. Das maximale Schluckvermögen unterscheidet sich somit für alle getesteten Rechentypen und ist in Tabelle 14 ersichtlich. Die dargestellten Maximalwerte sind Theoriewerte und können erst mit einer adaptierten Anlage in der Praxis überprüft werden.

Unter einem rein wasserwirtschaftlichen Aspekt ist es sinnvoll, die Rechen so zu betreiben, dass der Zufluss nicht höher liegt als das Schluckvermögen ($Q_{s,wirtsch}$). So kann die gesamte Wassermenge in die Turbine geleitet werden. Unter diesem Gesichtspunkt sind die beiden Rechen von Wild Metal mit maximal 300 l/s.lfm zu beaufschlagen und der Rechen von Höhenergie mit maximal 200 l/s.lfm (Tabelle 14). Neben dem rein wirtschaftlichen Aspekt sollte bezüglich Überfallwasser allerdings auch noch der Aspekt der Gewässerökologie berücksichtigt werden. Auf die Auswirkungen der Überfallwassermenge auf die Fauna (konkret auf die Bachforellen) wird im Berichtsteil zur Ethohydraulik (Kapitel 3.3) näher eingegangen.

Tabelle 14: Maximales Schluckvermögen gemäss den empirischen Funktionen in Abbildung 43 für verschiedene, im hydraulischen Modellversuch getestete Rechentypen

Rechentyp	$Q_{s,max}$ (l/s.lfm)	Q_{zu} (l/s.lfm)	Bemerkung	$Q_{s,wirtsch}$ (l/s.lfm)
Sb18 1.0	770	1390	Hochrechnung	300
Sb18 0.6	530	870	Hochrechnung	300
Bec de Canard 1.0	345	600	gemessen	200

Die Abflusstiefen und die Fliessgeschwindigkeiten wurden im Zulauf und über dem Rechen in der Mittelachse für die drei Rechentypen für verschiedene Q_{zu} gemessen. Die Zulaufstrecke erfolgte über eine Rampe in einer horizontalen, rund 3 m langen Rinne.

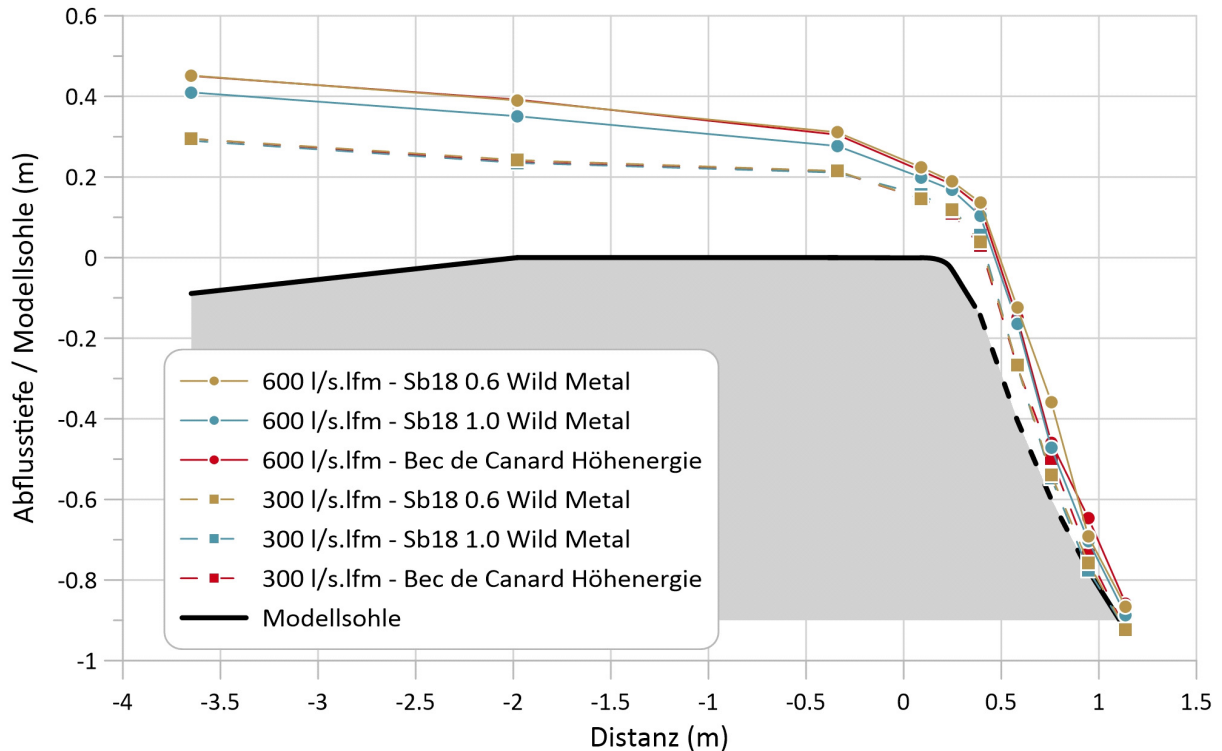


Abbildung 44: Drucklinienvergleich der verschiedenen Rechen bei 300 l/s.lfm und 600 l/s.lfm

In Abbildung 44 sind die mit dem Stechpegel gemessenen Abflusstiefen der drei getesteten Rechen bei den Abflüssen 300 l/s.lfm und 600 l/s.lfm grafisch dargestellt. Die durchlässige Rechenfläche ist mit einer gestrichelten Linie gekennzeichnet. In der Zulaufstrecke wird der Abfluss beschleunigt, sodass der Wasserspiegel sinkt. Bei 300 l/s.lfm sind die Abflusstiefen aller drei Rechen praktisch identisch. Bei 600 l/s.lfm zeigt sich ein minimaler Unterschied zwischen dem Abflussprofil des Sb18 1.0 und den anderen beiden Rechen Sb18 0.6 und «Bec de Canard 1.0 mm». Dies ist wohl damit zu erklären, dass der Sb18 1.0 auch bei 600 l/s.lfm mehr Wasser zu schlucken vermag. Beim Rechen Sb18 1.0 von Wild Metal konnte am untersten Messpunkt bei $x = 1.137$ m keine Abflusstiefen gemessen werden, da zu wenig Überfallwasser vorhanden war. Weitere Grafiken zu den einzelnen Rechen bei verschiedenen Abflussmengen sind in Anhang 3 ersichtlich.

Die Fliessgeschwindigkeiten wurden mit einem Mess-Propeller mit 10 mm Durchmesser ca. 20 mm über der Sohle bzw. über dem Rechen gemessen. Die dadurch eruierten Geschwindigkeitsprofile der drei untersuchten Rechen sind in Abbildung 45 für $Q_{zu} = 300$ l/s.lfm und 600 l/s.lfm dargestellt. In Anhang 4 sind weitere detaillierte Grafiken zu den Fliessgeschwindigkeiten pro Rechen separat zu finden.

Die Fliessgeschwindigkeiten sind in der Zulaufstrecke und bis kurz vor dem Überfall für alle drei Rechen praktisch identisch für beide Abflüsse. Danach, d.h. ab dem Überfall und über der Rechenfläche, ist die Fliessgeschwindigkeit für den Sb18 1.0 von Wild Metal tiefer, da er ein grösseres Schluckvermögen besitzt (vgl. Abbildung 43).

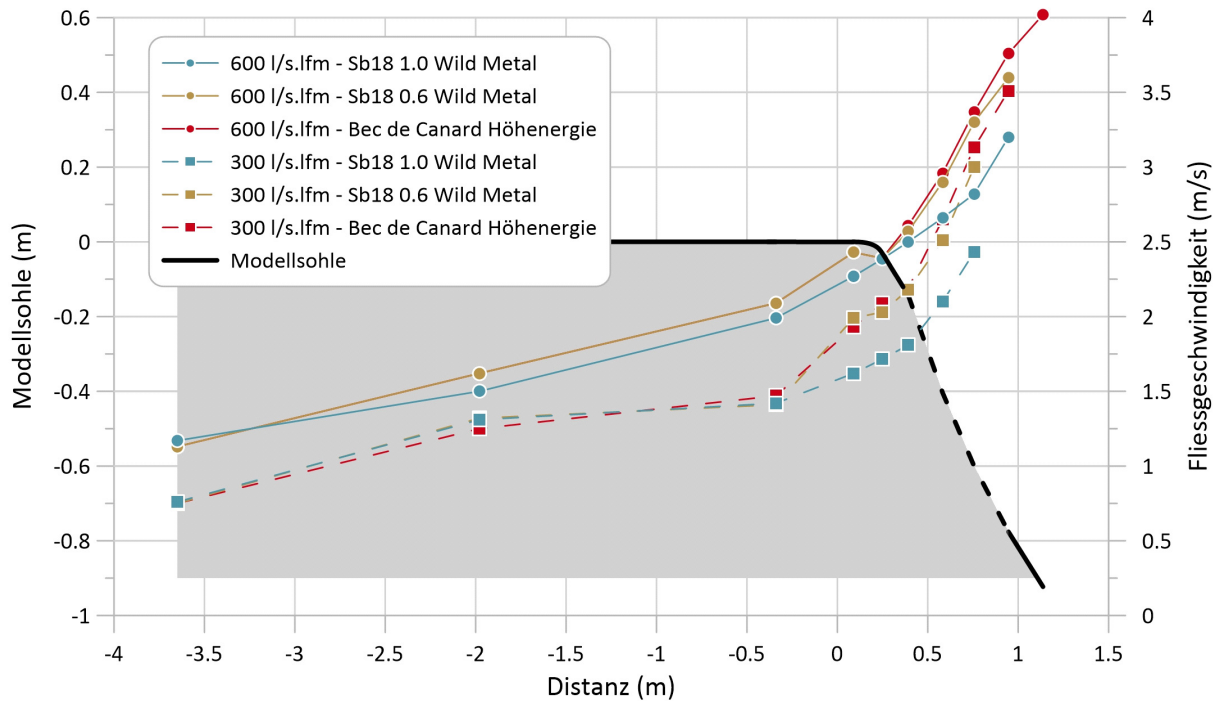


Abbildung 45: Vergleich der Fließgeschwindigkeiten bei 300 l/s.Ifm und 600 l/s.Ifm Abfluss bei verschiedenen Rechen

Abbildung 46 zeigt exemplarisch für alle verwendeten Rechen die Benetzung des Rechens bei unterschiedlicher Abflussmenge.



a)

b)

Abbildung 46: Klarwasserversuche am Rechen Sb18 1.0 von Wild Metal GmbH auf der verschmälerten Anlage, blaue Pfeile markieren die Fließrichtung. a) mit Durchfluss 400 l/s.lfm b) mit Durchfluss 600 l/s.lfm.

Die Rechen von Wild Metal werden in der Praxis oft gemeinsam mit einem groben Schutzrechen verkauft und eingebaut, was die Schluckfähigkeit vermindert. Leider konnte für diese Untersuchung kein Schutzrechen (diese werden oben auf die Rechen aufgesetzt) bezogen bzw. im bestehenden Modell verbaut werden. Daher fehlen Messdaten dazu, wie stark die Schluckfähigkeit mit dem Schutzrechen beeinträchtigt wird.

Der Rechen im Versuchsstand misst einen Einbauwinkel von 38° . Beim Rechen «Bec de Canard» der Firma Höhenergie ist der Einbauwinkel in der Praxis flacher. Da es nicht möglich war, den gesamten Versuchsstand auf den flacheren Winkel des «Bec de Canard» umzubauen, wurde der Rechen der Firma Höhenergie mit einem steileren und somit unter nicht optimalen Einsatzbedingungen getestet. Es ist deshalb davon auszugehen, dass der «Bec de Canard» in der Praxis mit den passenden Einbaubedingungen eine höhere Schluckfähigkeit erreichen wird.

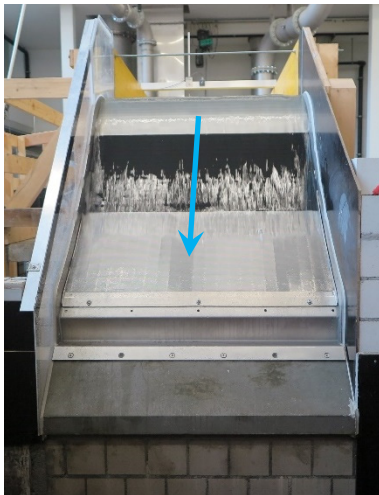
Die Firma Höhenergie hat eigene Versuche zur Schluckfähigkeit bei verschiedenen Einbauwinkeln gemacht (Anhang 5). Dabei wurde ein verzinkter Rechen mit einer Spaltweite von 0.95 mm getestet. Seine optimale Schluckfähigkeit beträgt demnach 208 l/s.lfm bei einem Einbauwinkel von 31° und liegt 18% höher als bei einem Einbauwinkel von 39°.

Dies entspricht fast genau der Vorrichtung unserer Versuchsanlage mit einem Einbauwinkel von 38°. Ausgehend von diesen Ergebnissen könnte der Rechen der Firma Höhenergie auch ein Schluckvermögen von über 400 l/s.lfm erreichen, wenn der Einbauwinkel optimal gewählt würde. Diese Rechen von Höhenergie haben robustere Stäbe als die Rechen der Firma Wild Metal GmbH und werden daher in der Praxis immer ohne Schutzrechen eingesetzt.

3.1.3 Einfluss von teilweiser Funktionslosigkeit des Rechens

Der Sb18 1.0 Rechen der Wild Metal GmbH mit einer Spaltweite von 1.0 mm wurde abgeklebt, um eine Vereisung, Verschmutzung oder Vermoosung zu simulieren (vgl. Abbildung 47). Durch die Abklebung der oberen Rechenhälfte wurde die Beschleunigungsstrecke verlängert. Dadurch konnten höhere Geschwindigkeiten erreicht werden. Die Verringerung des Schluckvermögens durch die Abklebung wurde bei verschiedenen Durchflüssen gemessen.

Bei einer Verlängerung der Beschleunigungsstrecke um 50% der Rechenlänge (halbe Abklebung) ist die Schluckfähigkeit bis $Q_{zu} = 200$ l/s gewährleistet. Bei 300 l/s beträgt die Überfallwassermenge 30 l/s, was einer Reduktion des Schluckvermögens um 10 % entspricht (Abbildung 47f).



a) 50 l/s \triangleq 44.8 l/s.lfm
kein Überfall



b) 100 l/s \triangleq 89.7 l/s.lfm
kein Überfall



c) 150 l/s \triangleq 134.5 l/s.lfm
kein Überfall



d) 200 l/s $\hat{=}$ 179.4 l/s.lfm
Überfall: 2 - 5 l/s



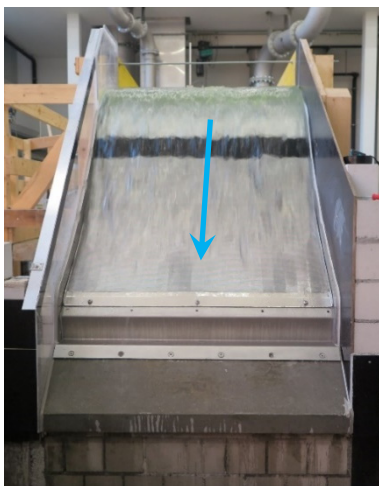
e) 250 l/s $\hat{=}$ 224.2 l/s.lfm
Überfall: 20 l/s



f) 300 l/s $\hat{=}$ 269 l/s.lfm
Überfall: 30 l/s
Schluckvermögen um 10 % reduziert

Abbildung 47: Ermittlung der Schluckfähigkeit bei verlängerter Beschleunigungsstrecke mit halber Abklebung vom oberen Rechenrand für den Rechen Sb18 1.0. a) bis f) zeigen Fotos mit unterschiedlichen Durchflussmengen

Anschliessend wurde für denselben Rechen Sb18 1.0 ermittelt, wie sich das Schluckvermögen bei schrittweiser Verlängerung der Beschleunigungsstrecke verhält. Hierzu klebten wir jeweils vom oberen Rechenrand her $\frac{1}{8}$ bis zu $\frac{3}{4}$ der Rechenhaut zu. Nachfolgende Abbildung 48 stellt die erfassten Resultate bildlich und tabellarisch dar.



a) $\frac{1}{8}$ Abklebung
300 l/s $\hat{=}$ 269 l/s.lfm
kein Überfall



b) $\frac{1}{4}$ Abklebung
300 l/s $\hat{=}$ 269 l/s.lfm
1-2 l/s Überfall



c) $\frac{3}{4}$ Abklebung
300 l/s $\hat{=}$ 269 l/s.lfm
9-10 l/s Überfall



d) $\frac{1}{2}$ Abklebung
300 l/s \triangleq 269 l/s.lfm
30 l/s Überfall



e) $\frac{3}{4}$ Abklebung
100 l/s \triangleq 90 l/s.lfm
20 l/s Überfall

Abbildung 48: Ermittlung des Schluckvermögens bei schrittweiser Verlängerung der Beschleunigungsstrecke am Rechen Sb18 1.0. Die Fotos a) bis e) stellen eine zunehmende Abklebung dar.

Beim Versuch mit der $\frac{3}{4}$ Abklebung konnte keine Messung mehr mit 300 l/s gemacht werden, da die hohe Überfallmenge nicht genügend schnell abgeleitet werden konnte .

Diese Klarwasserversuche zeigen, dass bei einer Verlegung von 25% des oberen Rechenteils das Schluckvermögen nicht wesentlich beeinflusst wird. Ausgehend von einem typischen Betriebslastfall mit einer Beaufschlagung des Rechens von ca. 120-150 l/s.lfm würde eine Vereisung von bis zu 50% der oberen Rechenfläche die Wirtschaftlichkeit noch nicht negativ beeinflussen.

Die Auswirkungen der Abklebung auf den Abweisungsgrad werden in Kapitel 3.2.4 erläutert.

3.2 Abweisungsgrad

In Abbildung 49 ist für den Standardrechen Sb18 1.0 der Abweisungsgrad für verschiedene Zuflüsse dargestellt. Ein höherer Überfallwasserabfluss über dem Rechen führt zu einem höheren Abweisungsgrad. Bei 44.8 l/s.lfm Durchfluss ist der Abweisungsgrad deutlich geringer als bei höheren Durchflüssen. Es ist davon auszugehen, dass es abhängig von der Spaltweite einen Mindestdurchfluss gibt, ab welchem die Geschiebeabweisung effizient funktioniert. Deshalb wurde beim oft verwendeten Standardrechen Sb18 1.0 zusätzlich der Abweisungsgrad bei 67.3 l/s.lfm (entspricht 75 l/s) gemessen. Das Resultat zeigt, dass dieser näher beim Abweisungsgrad des Durchflusses von 89.7 l/s.lfm liegt als beim Abweisungsgrad bei 44.8 l/s.lfm Durchfluss (Tabelle 15). Dieses Verhalten wurde ebenso bei den anderen getesteten Rechen beobachtet.

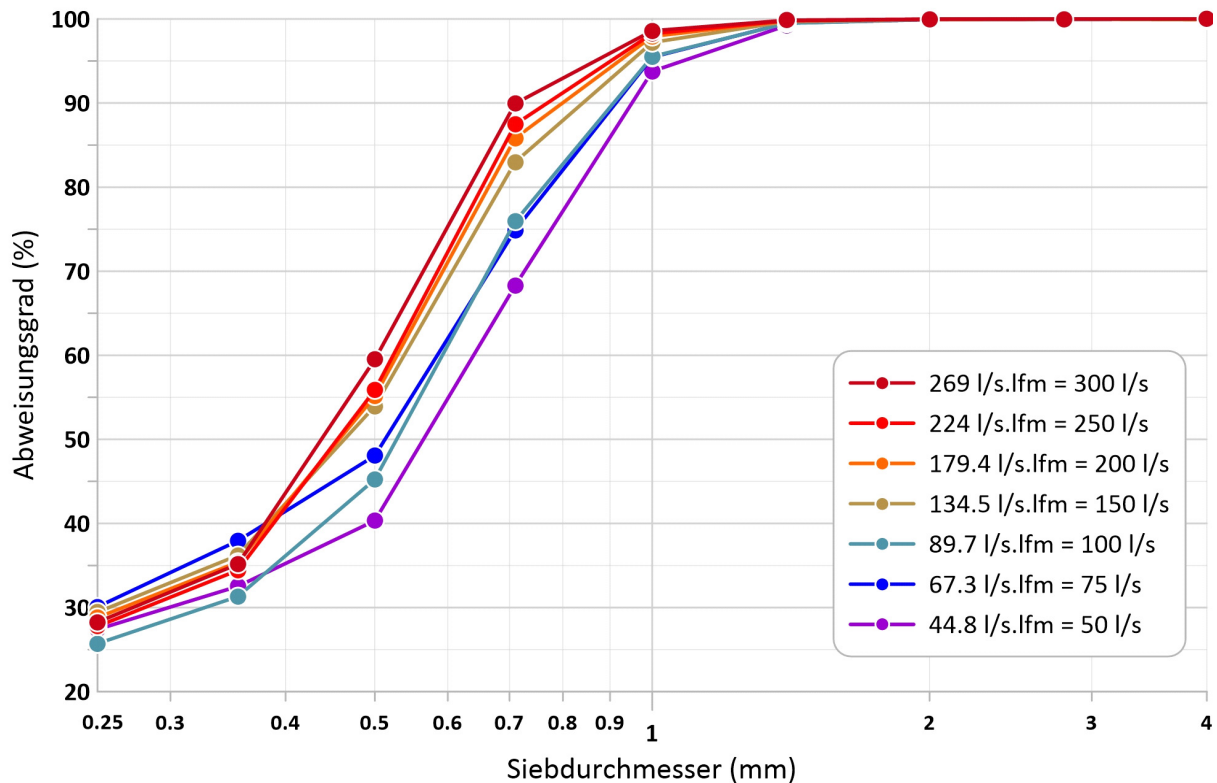


Abbildung 49: Vergleich Durchflüsse beim Sb18 1.0 mm Rechen mit Kantkorn 0-4 mm

Der Abweisungsgrad wurde für alle uns zur Verfügung gestellten Standardrechen der Firma Wild Metal GmbH (siehe Tabelle 4) untersucht. Nebst den Standardrechen (Typ Sb18) hat uns die Firma Wild Metal GmbH weitere Rechentypen zur Verfügung gestellt, welche sich hinsichtlich Stabgeometrie von den Standardrechen unterschieden. Zu den Spezialrechen zählt in der vorliegenden Untersuchung auch der Rechen «Bec de Canard», welcher uns von der Firma Höhenergie zur Verfügung gestellt wurde. Diese Spezialrechen wurden nicht bezüglich Abweisungsgrad untersucht (Tabelle 8).

3.2.1 Versuche mit gesamter Rechenbreite (1.115m)

Bei einem Geschiebedurchmesser von ungefähr einer halben Spaltweite liegt der Abweisungsgrad beim Sb18 1.0 Rechen bestenfalls bei 36 %, bzw. beim Sb18 0.6 Rechen bei 38 %. Die Herstellerangaben von 90 % werden von keinem Rechen erreicht. In den nachfolgenden Tabellen 15 – 20 sind die Gesamtabweisungsgrade der jeweiligen Geschiebefraktion bis zur Korngrösse der halben Spaltweite bzw. bis zur ganzen Spaltweite (aufsummiert) aufgelistet. Hierbei wurde der Anteil der Fraktionen, die theoretisch durch die Maschenweite des Geschiebefangsacks passen würde, gleich gewichtet wie der Rest der Geschiebefraktionen bis zur halben bzw. ganzen Spaltweite. Exemplarisch bedeutet dies, dass beim Rechen Sb18 1.0 bei einem Durchfluss von 134.5l/s.lfm nur 34% der Kantkörner 0-4 mm bis zur halben Spaltweite von 0.5 mm abgewiesen werden. 66% der Kantkörner mit einer Grösse bis zu 0.5 mm passieren den Rechen. Es wurde jeweils die Siebgrösse aus dem Standardsiebsatz verwendet, die am nächsten an der nominellen Spaltweite des Rechens liegt.



Tabelle 15: Abweisungsgrad bis zur halben und bis zur ganzen Spaltweite des Sb18 1.0 Rechens (aufsummiert)

Durchfluss (l/s.lfm)	Kantkorn 0-4 mm		Kantkorn 0-16 mm		Rundkorn 0-8 mm	
	Abweisungsgrad (%)		Abweisungsgrad (%)		Abweisungsgrad (%)	
	bis 0.5 mm	bis 1.0 mm	bis 0.5 mm	bis 1.0 mm	bis 0.5 mm	bis 1.0 mm
44.8	31	48	11	40	0	26
67.3	36	55	keine Messung	keine Messung	Keine Messung	keine Messung
89.7	30	52	14	50	5	33
134.5	34	59	23	58	7	36
179.4	29	57	13	54	0	28
224.2	32	61	13	58	6	41
269	33	63	14	61	0	34

Tabelle 16: Abweisungsgrad bis zur halben und bis zur ganzen Spaltweite des Sb18 0.6 Rechens (aufsummiert).*) Die Werte bei den Durchflüssen 400 l/s.lfm und 600l/s.lfm wurden mit der verschmälerten Anlage ermittelt.

Durchfluss (l/s.lfm)	Kantkorn 0-4 mm		Kantkorn 0-16 mm		Rundkorn 0-8 mm	
	Abweisungsgrad (%)		Abweisungsgrad (%)		Abweisungsgrad (%)	
	bis 0.355 mm	bis 0.71 mm	bis 0.355 mm	bis 0.71 mm	bis 0.355 mm	bis 0.71 mm
44.8	29	48	10	35	2	33
89.7	27	44	10	52	2	44
134.5	30	61	31	68	3	46
179.4	23	60	23	64	7	49
224.2	29	62	0	55	0	45
269	25	63	0	55	0	49
400*	30	61	keine Messung	keine Messung	keine Messung	keine Messung
600*	38	58	keine Messung	keine Messung	keine Messung	keine Messung

Es wurden die am nächsten an der halben bzw. ganzen Spaltweite liegenden Siebgrößen mit 0.355 bzw. 0.71mm verwendet.

Tabelle 17: Abweisungsgrad bis zur halben und bis zur ganzen Spaltweite des Sb18 0.4 Rechens

Durchfluss (l/s.lfm)	Kantkorn 0-4 mm		Rundkorn 0-8 mm	
	Abweisungsgrad (%)		Abweisungsgrad (%)	
	bis 0.25 mm	bis 0.5 mm	bis 0.25 mm	bis 0.5 mm
89.7	34	62	21	51
179.4	39	66	31	61
269	46	71	31	63

Es wurden die am nächsten an der halben bzw. ganzen Spaltweite liegenden Siebgrößen mit 0.25 bzw. 0.5mm verwendet.

Tabelle 18: Abweisungsgrad bis zur halben und bis zur ganzen Spaltweite des Sb18 1.5 Rechens

Durchfluss (l/s.lfm)	Kantkorn 0-4 mm		Rundkorn 0-8 mm	
	Abweisungsgrad (%)		Abweisungsgrad (%)	
	bis 0.71 mm	bis 1.4 mm	bis 0.71 mm	bis 1.4 mm
89.7	37	53	11.2	34
179.4	44	60	30	51
269	57	60	20	47

Es wurden die am nächsten an der halben bzw. ganzen Spaltweite liegenden Siebgrößen mit 0.71 bzw. 1.4mm verwendet.



Tabelle 19: Abweisungsgrad bis zur halben und bis zur ganzen Spaltweite des Sb18 2.0 Rechens

Durchfluss (l/s.lfm)	Kantkorn 0-4 mm		Rundkorn 0-8 mm	
	Abweisungsgrad (%)		Abweisungsgrad (%)	
	bis 1.0 mm	bis 2.0 mm	bis 1.0 mm	bis 2.0 mm
89.7	31	58	17	38
179.4	42	67	36	53
269	43	67	34	48

Tabelle 20: Abweisungsgrad bis zur halben und bis zur ganzen Spaltweite des Sb18 3.0 Rechens

Durchfluss (l/s.lfm)	Kantkorn 0-4 mm		Rundkorn 0-8 mm	
	Abweisungsgrad (%)		Abweisungsgrad (%)	
	bis 1.4 mm	bis 2.8 mm	bis 1.4 mm	bis 2.8 mm
89.7	42	53	17	36
179.4	42	60	30	47
269	39	57	26	44

Es wurden die am nächsten an der halben bzw. ganzen Spaltweite liegenden Siebgrössen mit 1.4 bzw. 2.8mm verwendet.

In Abbildung 50 finden sich die Maschenweiten der Prüfsiebe auf der X-Achse und die Abweisungsgrade für die einzelnen Korngruppen (z.B. 0.25 mm – 0.355 mm, 0.355 mm – 0.5 mm) als prozentualer Abweisungsgrad auf der Y-Achse. Diese Angaben sind auf die einzelnen Korngruppen bezogen und nicht aufsummiert. Hier wird deutlich ersichtlich, dass die Abweisungscharakteristik erwartungsgemäss im direkten Zusammenhang mit der Spaltweite steht und bei kleineren Spaltweiten ein höherer Prozentsatz der Feststoffe abgewiesen wird.

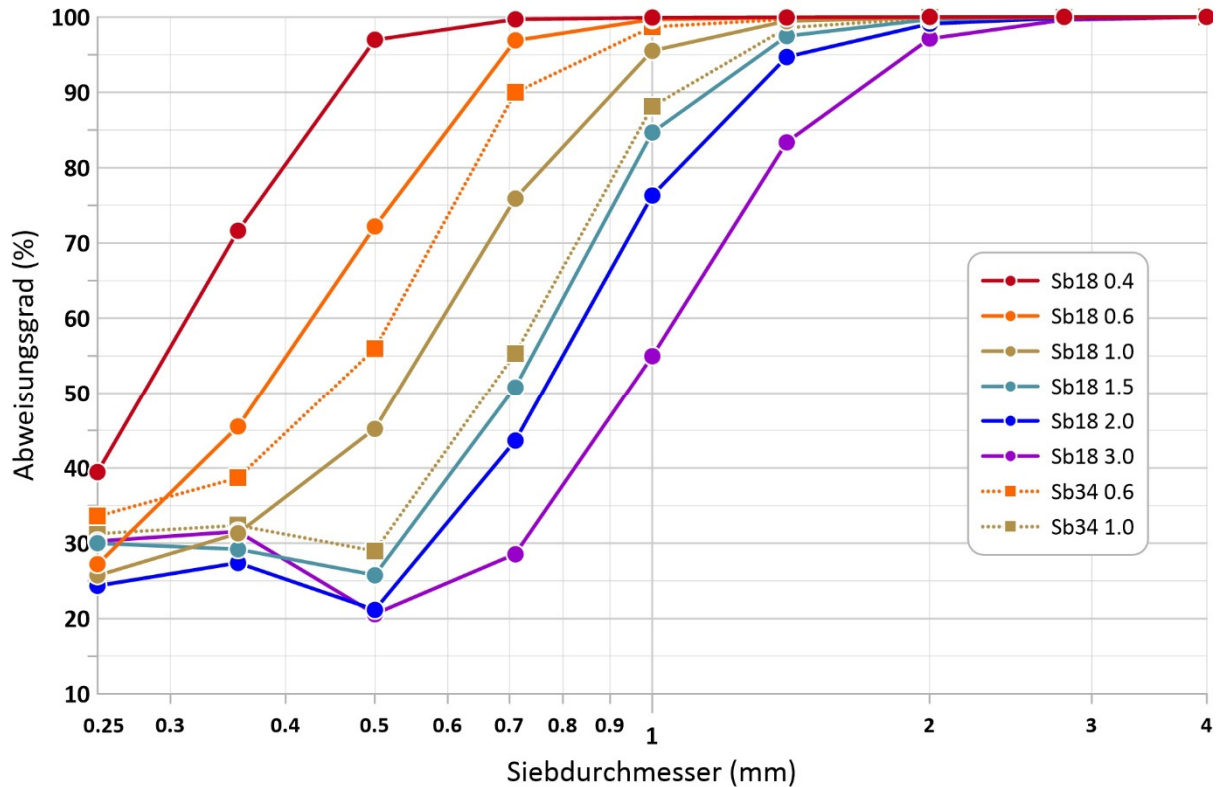


Abbildung 50: Abweisungscharakteristik mit dem Vergleich aller Rechen bei 89.7 l/s.lfm und 0 – 4 mm Kantkorn

Die Grafik zeigt, dass auch Körner grösser als die Spaltweite den Rechen passiert haben. Dies lässt sich durch die Plattigkeit der Körner erklären. Während die Spalten im Rechen über die gesamte Rechenbreite verlaufen, sind die Maschen im Sieb der Siebmaschine quadratisch. Es gibt also Körner, welche durch die Spalten des Rechens hindurchdringen aber im entsprechenden Sieb bei der Analyse hängen bleiben.

Des Weiteren ist zu erwähnen, dass die Messungen jeweils nur bei den Punkten abzulesen sind, da diese Punkte der Maschenweite der Siebe entsprechen. Zwischen den Punkten wurde linear interpoliert. Nachfolgende Abbildung 51 zeigt im Detail, wie beim Rechen SB18 0.4 die Kornverteilung auch entlang der gepunkteten Linie verlaufen könnte. Dabei wird ersichtlich, dass also beim Korndurchmesser 0.4 durchaus mehr als 90 % des Abweisungsgrades erreicht werden kann. Grundsätzlich liegt bei der Abweisungsgrad bei 100 % für Körner mit einem Durchmesser von 1.5 mal der Spaltweite.

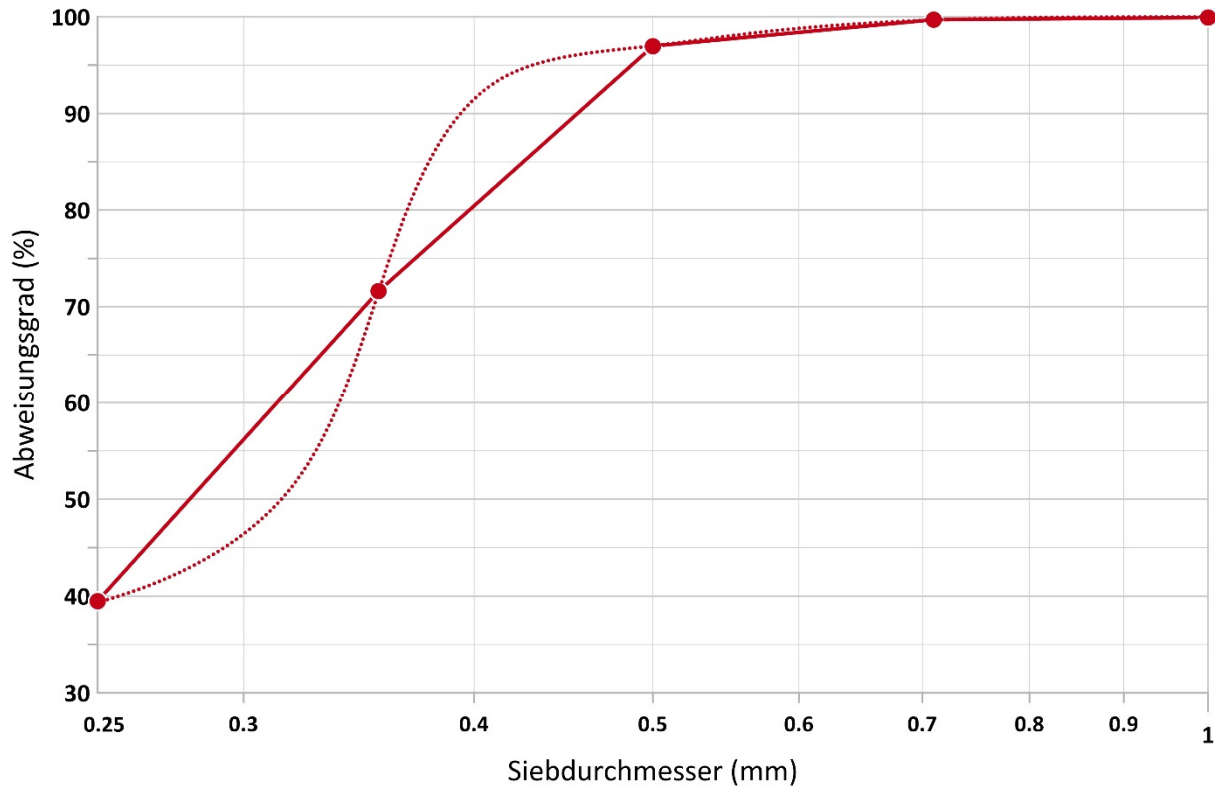


Abbildung 51: Detailansicht des Rechens SB18 0.4 aus Abbildung 50. Durchgezogene Linie: gemessene Punkte mit linearer Interpolation, gepunktete Linie: möglicher, tatsächlicher Verlauf

Die Spezialrechen der Serie Sb34 haben jeweils eine ungünstigere Abweisungscharakteristik als die Standardrechen der Serie Sb18 mit derselben Spaltweite. Diese Rechen haben dasselbe Stabprofil wie die Rechen der Serie Sb18, sind jedoch in allen Dimensionen grösser, und je nach Serie auch etwas stärker angewinkelt.

In Abbildung 52 ist die Abweisungscharakteristik von Kantkorn 0 – 4 mm und Rundkorn 0 – 8 mm für unterschiedliche Rechentypen dargestellt. Die Unterschiede zwischen den verschiedenen Gesteinskörnungen in der Abweisungscharakteristik sind nicht sehr ausgeprägt. Beim Rundkorn werden die feinsten Fraktionen schlechter abgewiesen als beim Kantkorn. Hingegen waren für die Rechen mit Spaltweite 1.5 bis 3.0 mm die Abweisungsgrade für die jeweils halben Korngrössen deutlich höher beim Rundkorn als beim Kantkorn. Bei den Rechen mit Spaltweiten kleiner gleich 1.0 mm verhält es sich genau gegensätzlich.

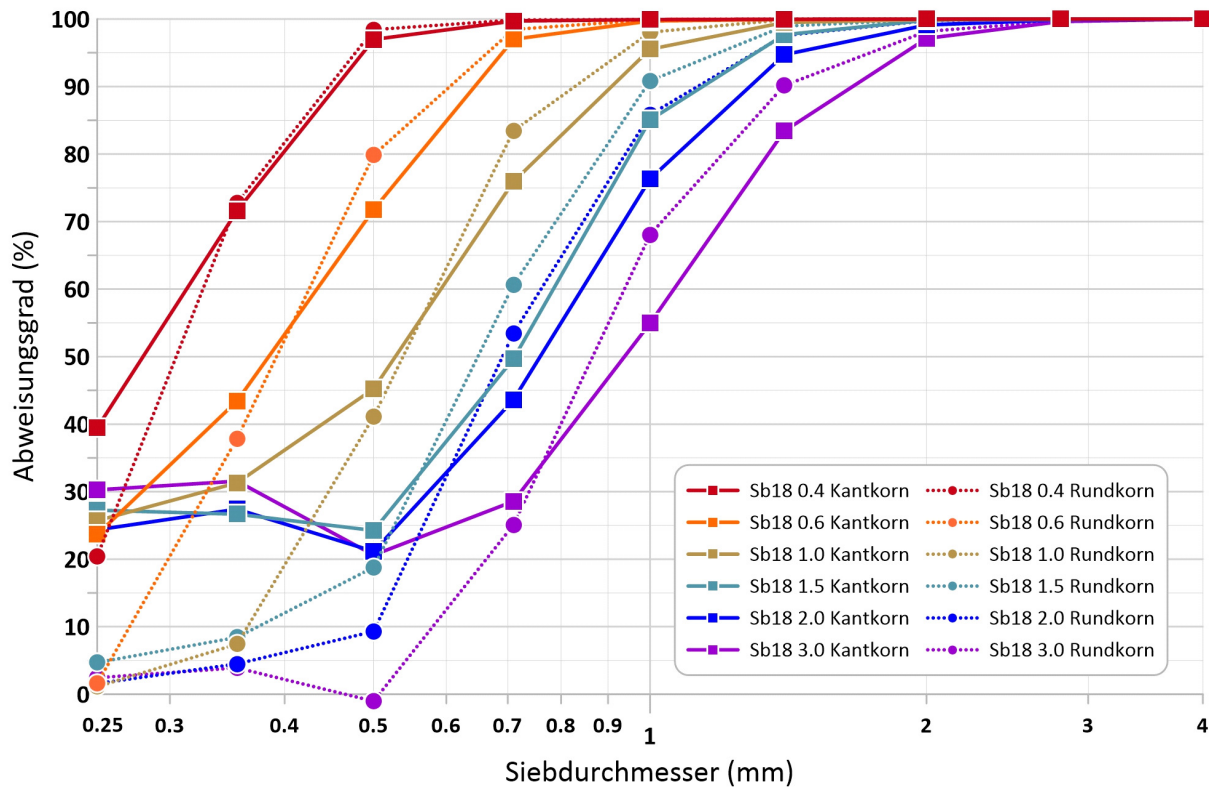


Abbildung 52: Abweisungscharakteristik aller Standardrechen (Sb) von Wild Metal bei 89.7 l/s.lfm mit Kant- und Rundkorn

Nachfolgend gehen wir auf die verschiedenen Standardrechen (Sb) von Wild Metal mit den unterschiedlichen Spaltweiten genauer ein. Die Resultate sind in nachfolgender der Tabelle 21 zusammengefasst.

Tabelle 21: Abweisungscharakteristik der Standardrechen von Wild Metal (Sb18) bei 89.7 l/s.lfm für Kant- und Rundkorn. Die Werte sind auf die jeweils halbe oder ganze Spaltweite des jeweiligen Rechens aus dem Diagramm in Abbildung 52/Abbildung 1 interpoliert.



Spaltweite	Abweisungsgrad bei Geschiebetyp: Kantkorn 0-4mm	Abweisungsgrad bei Geschiebetyp: Rundkorn 0-8mm	Bemerkung
0.4mm	40% für Korngrösse 0.25	20% für Fraktion 0.25	Kantkorn wird besser abgewiesen, 0.25mm=kleinste im Versuch messbare Korngrösse
	70% für Fraktion 0.35	70% für Fraktion 0.35	Wendepunkt der Siebkurve
	80% für Fraktion 0.4	82% für Fraktion 0.4	Rundkorn wird besser abgewiesen
0.6mm	34% für Fraktion 0.3	20% für Fraktion 0.3	Kantkorn wird besser abgewiesen
	55% für Fraktion 0.41	55% für Fraktion 0.41	Wendepunkt der Siebkurve
	85% für Fraktion 0.6	90% für Fraktion 0.6	Rundkorn wird besser abgewiesen
1.0mm	45% für Fraktion 0.5	42% für Fraktion 0.5	Kantkorn wird besser abgewiesen
	55% für Fraktion 0.55	55% für Fraktion 0.55	Wendepunkt der Siebkurve
	95% für Fraktion 1.0	97% für Fraktion 1.0	Rundkorn wird besser abgewiesen
1.5mm	67% für Fraktion 0.75	57% für Fraktion 0.75	Kantkorn wird besser abgewiesen
	32% für Fraktion 0.55	32% für Fraktion 0.55	Wendepunkt der Siebkurve
	96% für Fraktion 1.5	98% für Fraktion 1.5	Rundkorn wird besser abgewiesen
2.0mm	86% für Fraktion 1.0	76% für Fraktion 1.0	Kantkorn wird besser abgewiesen
	32% für Fraktion 0.61	32% für Fraktion 0.61	Wendepunkt der Siebkurve
	98% für Fraktion 2.0	99% für Fraktion 2.0	Rundkorn wird besser abgewiesen
3.0mm	90% für Fraktion 1.5	83% für Fraktion 1.5	Kantkorn wird besser abgewiesen
	33% für Fraktion 0.75	33% für Fraktion 0.75	Wendepunkt der Siebkurve
	100% für Fraktion 3.0	100% für Fraktion 3.0	Rundkorn wird besser abgewiesen

3.2.1.1 Rechentyp Sb18 Spaltweite 0.4 mm

Der Rechentyp mit der Spaltweite 0.4 mm wurde mit zwei verschiedenen Geschiebetypen getestet. Kantkorn 0-4 mm und Rundkorn 0-8 mm. In Abbildung 52 ist der Vergleich Kantkorn und Rundkorn dargestellt, wobei kein klarer Unterschied erkennbar ist.

3.2.1.2 Rechentyp Sb18 Spaltweite 0.6 mm

Der Rechentyp mit der Spaltweite 0.6 mm wurde mit 3 verschiedenen Geschiebetypen getestet. Kantkorn 0-4 mm, Rundkorn 0-8 mm und zusätzlich Kantkorn 0-16 mm. In Abbildung 52 ist der Vergleich Kantkorn und Rundkorn dargestellt, wobei das Rundkorn jeweils den höheren Abweisungsgrad aufweist.

3.2.1.3 Rechentyp Sb18 Spaltweite 1.0 mm

Der Rechentyp mit der Spaltweite 1.0 mm wurde mit 3 verschiedenen Geschiebetypen getestet. Kantkorn 0-4 mm, Rundkorn 0-8 mm und zusätzlich Kantkorn 0-16 mm, um zu testen, ob die kleinen Fraktionen durch die grösseren beeinflusst werden. Dies ist aus Abbildung 52 im Vergleich zwischen Kantkorn und Rundkorn zu sehen. In Abbildung 49 ist zu erkennen, dass die Geschiebeabweisung bei geringem 44.8 l/s.lfm Durchfluss deutlich (20 %) schlechter ist als bei hohem 269 l/s.lfm. Dasselbe Muster ist auch beim 0.6 mm Rechen erkennbar.

3.2.1.4 Rechentyp Sb18 Spaltweite 1.5 mm

Der Rechentyp mit der Spaltweite 1.5 mm wurde mit 2 verschiedenen Geschiebetypen getestet, Kantkorn 0-4 mm und Rundkorn 0-8 mm. In Abbildung 52 ist der Vergleich Kantkorn und Rundkorn dargestellt. Das Rundkorn weist für Fraktionen > 0.5 mm einen höheren Abweisungsgrad auf.



3.2.1.5 Rechentyp Sb18 Spaltweite 2.0 mm

Der Rechentyp mit der Spaltweite 2.0 mm wurde mit 2 verschiedenen Geschiebetypen getestet, Kantkorn 0-4 mm und Rundkorn 0-8 mm. In Abbildung 52 ist der Vergleich Kantkorn und Rundkorn dargestellt. Das Rundkorn weist für Fraktionen > 0.6 mm einen höheren Abweisungsgrad auf.

3.2.1.6 Rechentyp Sb18 Spaltweite 3.0 mm

Der Rechentyp mit der Spaltweite 3.0 mm wurde mit 2 verschiedenen Geschiebetypen getestet, Kantkorn 0-4 mm und Rundkorn 0-8 mm. In Abbildung 521 ist der Vergleich Kantkorn und Rundkorn dargestellt. Das Rundkorn weist für Fraktionen > 0.7 mm einen höheren Abweisungsgrad auf.

3.2.2 Versuche mit reduzierter Rechenbreite von 0.5m

Die Abweisungsgrade (bezogen auf einzelne Korngruppen) auf der verschmälerten Anlage wurden an drei verschiedenen Rechen getestet, den Standardrechen Sb18 0.6 und Sb18 1.0 von der Wild Metal GmbH sowie dem «Bec de Canard» von Höhenergie mit 1.05 mm Spaltweite (vgl. Tabelle 8). Der Abweisungsgrad des «Bec de Canard» liegt bei der Korngrösse 1 mm bei 80 – 90 %, während der Standardrechen Sb18 1.0 bereits 100 % abweist. Bei der halben Spaltweite liegen die Abweisungsgrade der beiden Rechen bei 27-32 % bzw. 55-60 % (Abbildung 53). Der Rechen Sb 18 0.6 wurde zum Vergleich bei einem spezifischen Durchfluss von 400 l/s.lfm getestet und zeigt grundsätzlich dasselbe Verhalten wie der Sb18 1.0, allerdings mit einer wesentlich höheren Abweisungscharakteristik. Dies liegt einerseits am höheren Durchfluss, andererseits aber auch an der kleineren Spaltweite.

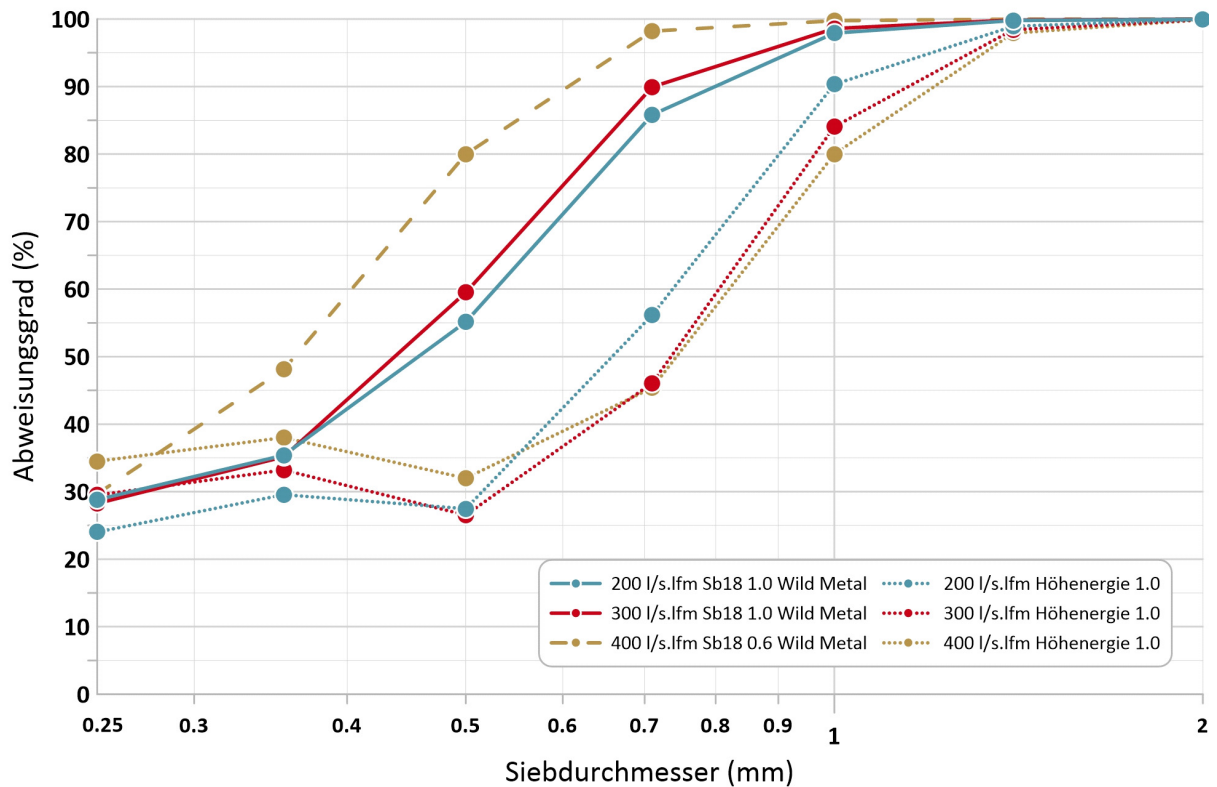


Abbildung 53: Abweisungscharakteristik von Rechen unterschiedlicher Hersteller mit Kantkorn 0 – 4 mm

Aus Abbildung 54 ist ersichtlich, dass bei einem Durchfluss von 300 l/s.lfm die höchste Abweisungseffizienz erreicht wird. Zwischen 100 und 300 l/s.lfm steigt die Abweisungseffizienz. Dagegen sinkt diese bei Durchflüssen zwischen 300 und 600 l/s.lfm. Für den Rechen Sb18 0.6 und bei Kantkorneschiebe kann daher angenommen werden, dass dieser Rechen mit einem optimalen Durchfluss von 300 l/s.lfm beaufschlagt werden sollte, um die höchste Abweisung zu erzielen. Diese Feststellung gilt für Fraktionen ab ca. 0.35 mm. Für Fraktionen von 0.25 bis 0.35 mm nimmt die Abweisungseffizienz mit steigendem Durchfluss zu. Vermutlich werden Körner ab Fraktion 0.35 mm durch den steigenden entstehenden Unterdruck (und Korngewicht!) in den Rechen eingesaugt. Würde die Unterseite des Rechens belüftet oder seine Kontur angepasst (konvex statt konkav), könnte eine Steigerung der Abweisung der Fraktion ab 0.35mm in Abhängigkeit des Durchflusses erzielt werden.

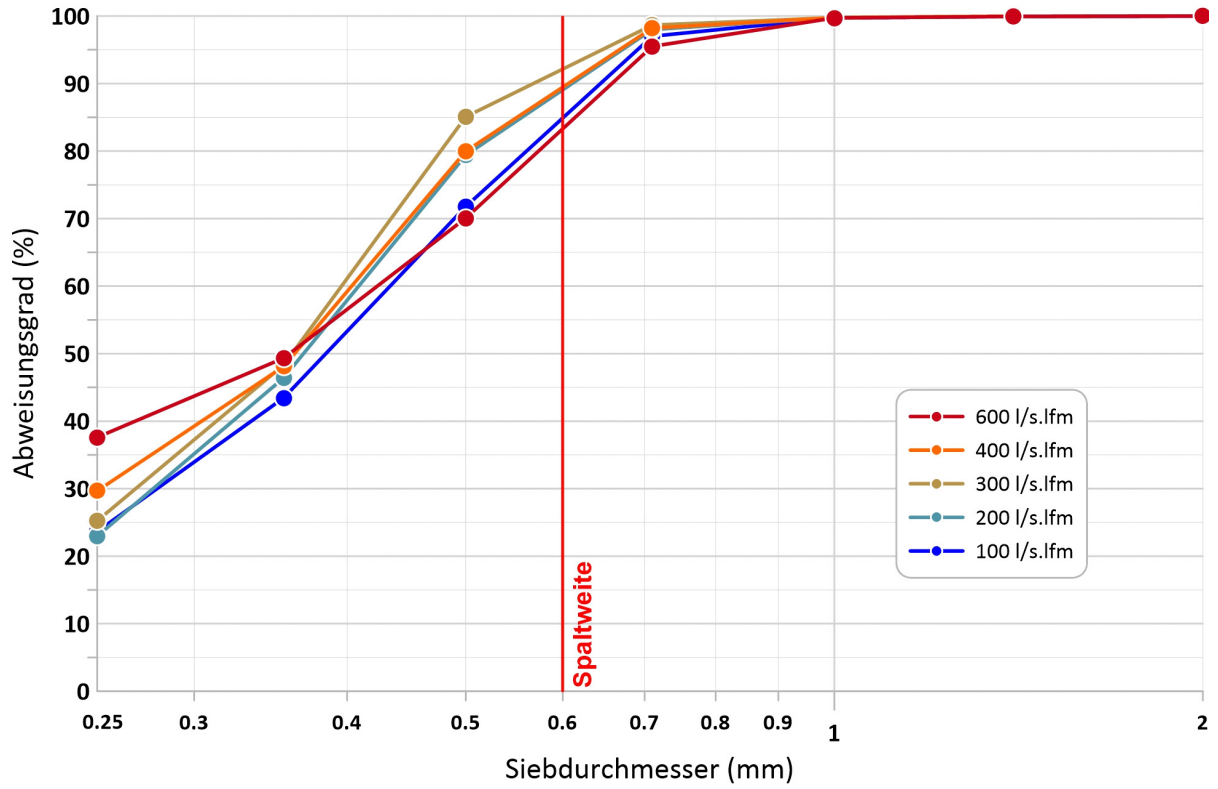


Abbildung 54: Abweisungscharakteristik bei Durchflüssen 100 - 600 l/s.lfm beim Rechen Sb18 0.6 mit Kantkorn 0-4 mm

3.2.3 Versuche an einem verschlissenen Rechen

Nachfolgende

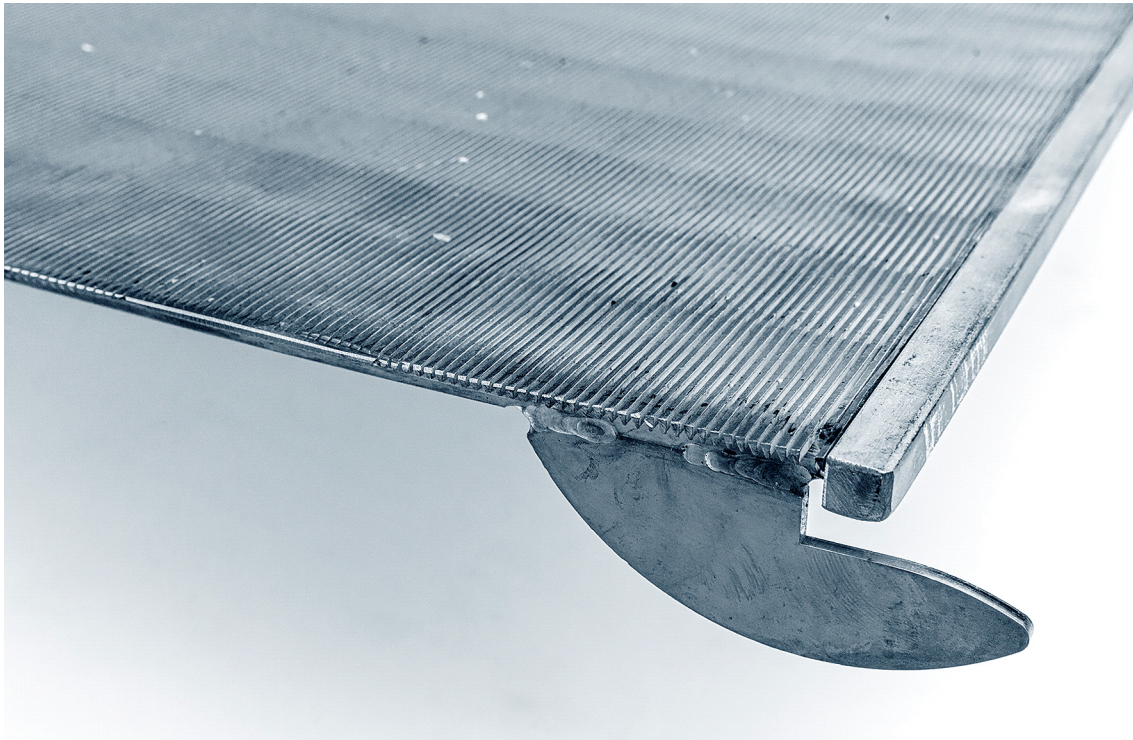


Abbildung 55 zeigt ein Foto des verschlissenen Rechens Sb18 0.6. Die Kanten sind durch den Geschiebetransport abgerundet worden.

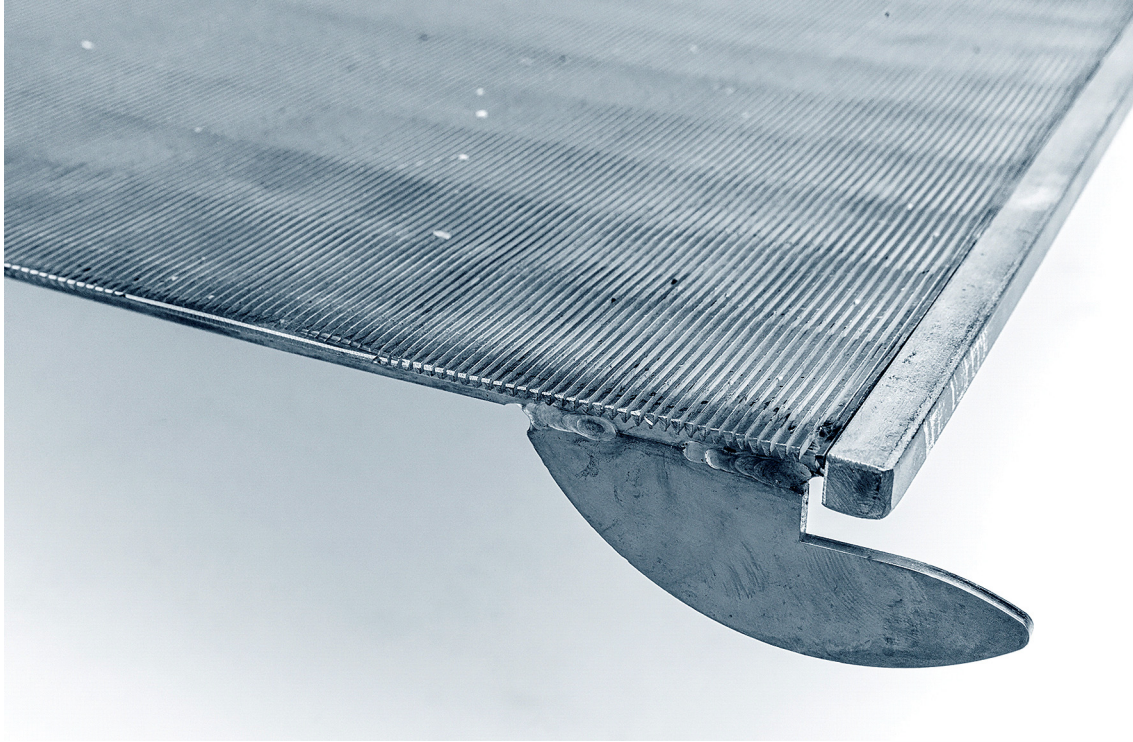


Abbildung 55: Abnutzung des verschlissenen Rechens mit Spaltweite 0.6 mm Wild Metal (oben) und eines neuen Rechens (unten)

In Abbildung 56 und Abbildung 57 sind die Abweisungscharakteristika des verschlissenen Rechens Sb18 0.6 und des baugleichen, neuen Modells grafisch dargestellt. Für die Analyse wurde das Kantkorn 0 – 4 mm und das Rundkorn 0 – 8 mm verwendet. Die Abweisungscharakteristika zeigen für

beide Korngrößenmischungen keine nennenswerten, relevanten Unterschiede zwischen den beiden Rechen auf.

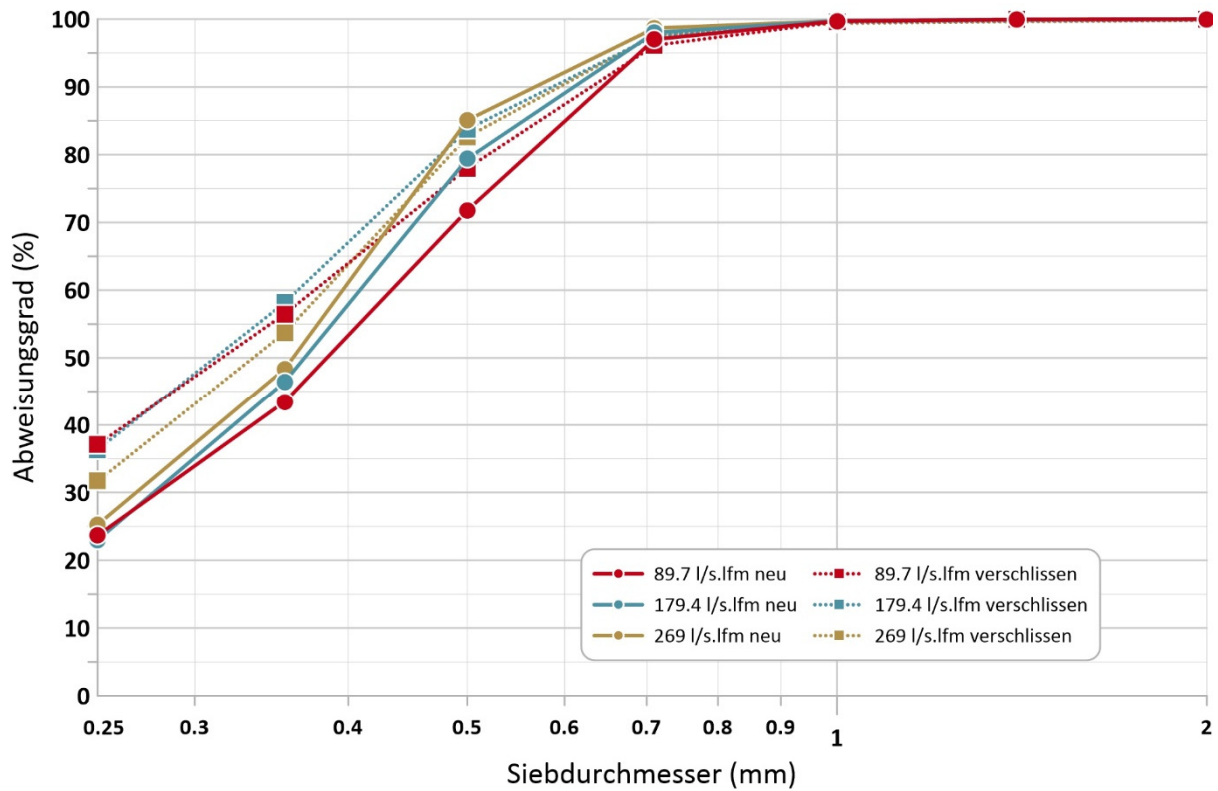


Abbildung 56: Vergleich der Abweisungsgrade am neuen und am verschlissenen Rechen Sb18 0.6 mit Kantkorn 0 – 4 mm

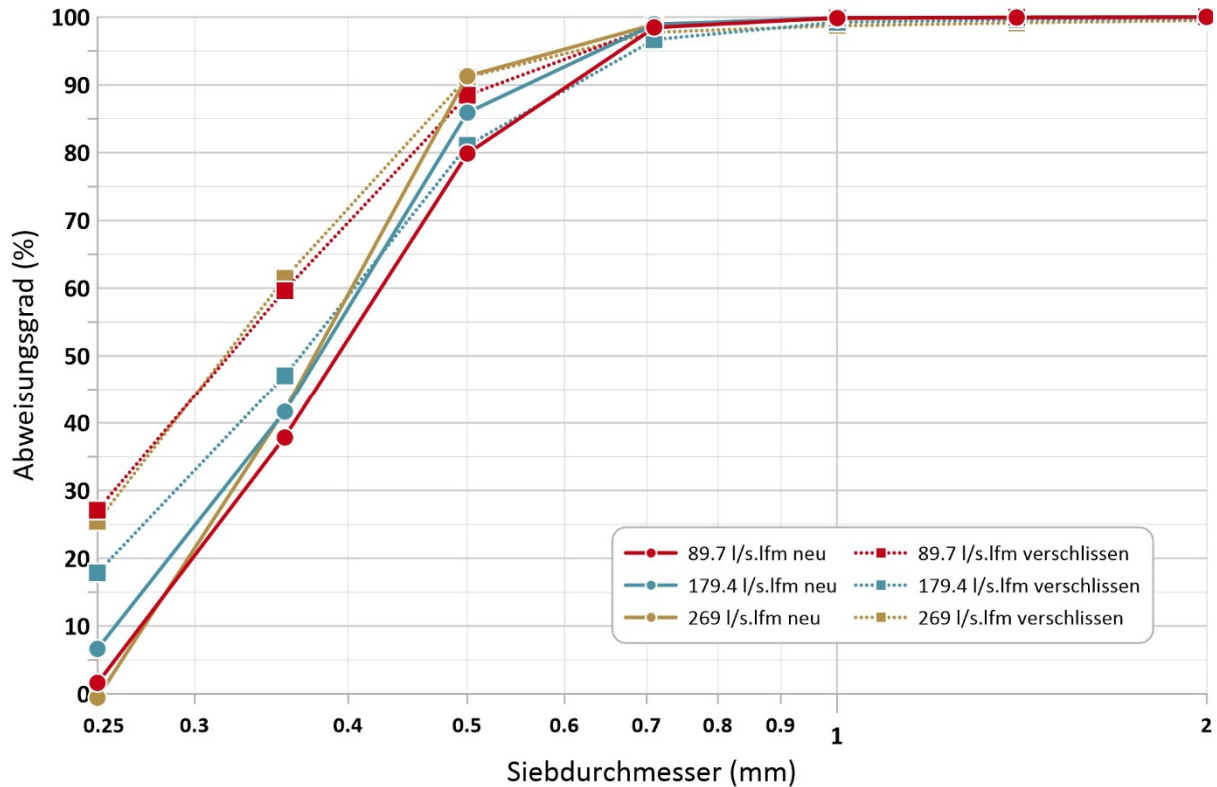


Abbildung 57: Abweisungsgrad von Rundkorn 0 – 8 mm am verschlissenen Rechen Sb18 0.6

Des Weiteren haben auch Klarwasserversuche kein vermindertes Schluckvermögen beim verschlissenen Rechen ergeben.

Der Rechen wurde aufgrund von Verschleiss vom Betreiber ausgetauscht und über den Hersteller an das Forschungsprojekt ausgeliefert, wobei Einsatzdauer und Betreiber dem Forschungsteam nicht bekannt sind. Die Laborergebnisse zeigen aber noch keine Einbußen bei der Leistungscharakteristik. Visuell sichtbare Abrundungen und Schäden müssen also noch nicht zwingend zu einem frühzeitigen Austausch führen.

Hierzu sind weitere Forschungsarbeiten zum Zusammenhang aus Verschleiss und Leistungsfähigkeit notwendig.

3.2.4 Einfluss von Verlegung oder Vereisung auf den Abweisungsgrad

Geschiebeversuche mit Abklebungen wurden nur am Rechen Sb18 1.0 mit einem Durchfluss von 134.5 l/s.lfm durchgeführt. Einerseits wurde der Rechen von oben abgeklebt, im Sinne einer Verlängerung der Beschleunigungsstrecke (Abbildung 58). Andererseits wurden beidseits die Rechenoberfläche verklebt, um eine Vereisung zu simulieren (Abbildung 60).

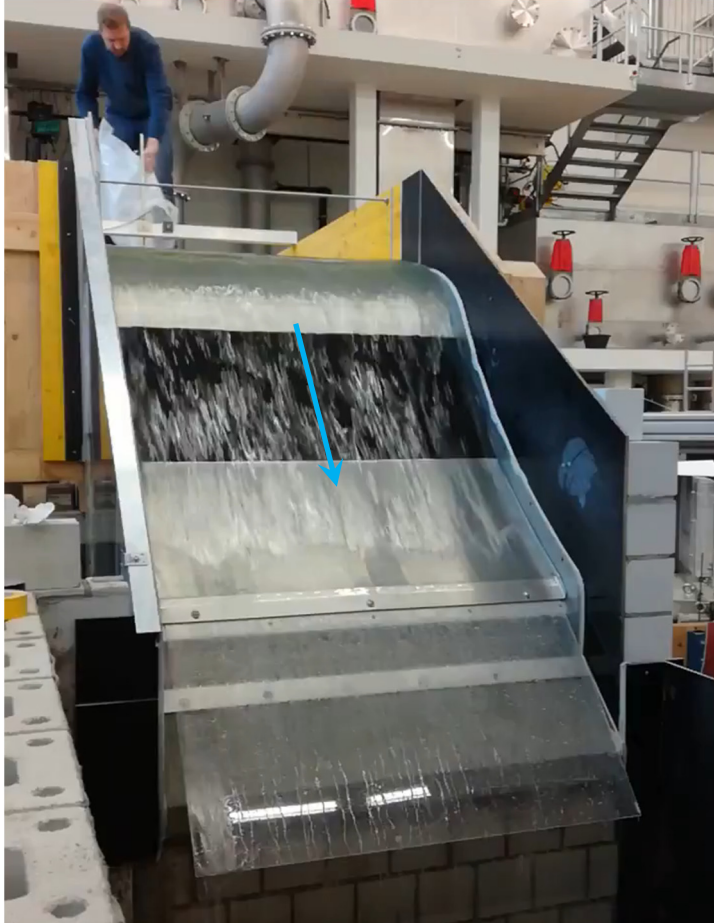


Abbildung 58: Überströmung bei Abklebung der oberen Rechenhälfte beim Sb18 1.0, Durchfluss 134.5 l/s.lfm

Die grösseren Fraktionen zwischen 0.355 mm und 0.71 mm weisen im Vergleich zu einem unverlegten Rechen einen 30% höheren Abweisungsgrad auf, wenn die obere Rechenhälfte abgeklebt wurde (Abbildung 59). Vermutlich werden die Körner aufgrund der höheren Fließgeschwindigkeiten und dem flacheren Aufprallwinkel vermehrt nach unten weggespült. Wenn nur das oberste Rechendrittel abgeklebt wird, liegt der Abweisungsgrad im Schnitt nur 5 % höher als beim komplett freien Rechen. Das Resultat deutet darauf hin, dass die obere Rechenhälfte mehr zum Geschiebeeintrag ins Triebwasser beiträgt als die untere Rechenhälfte.

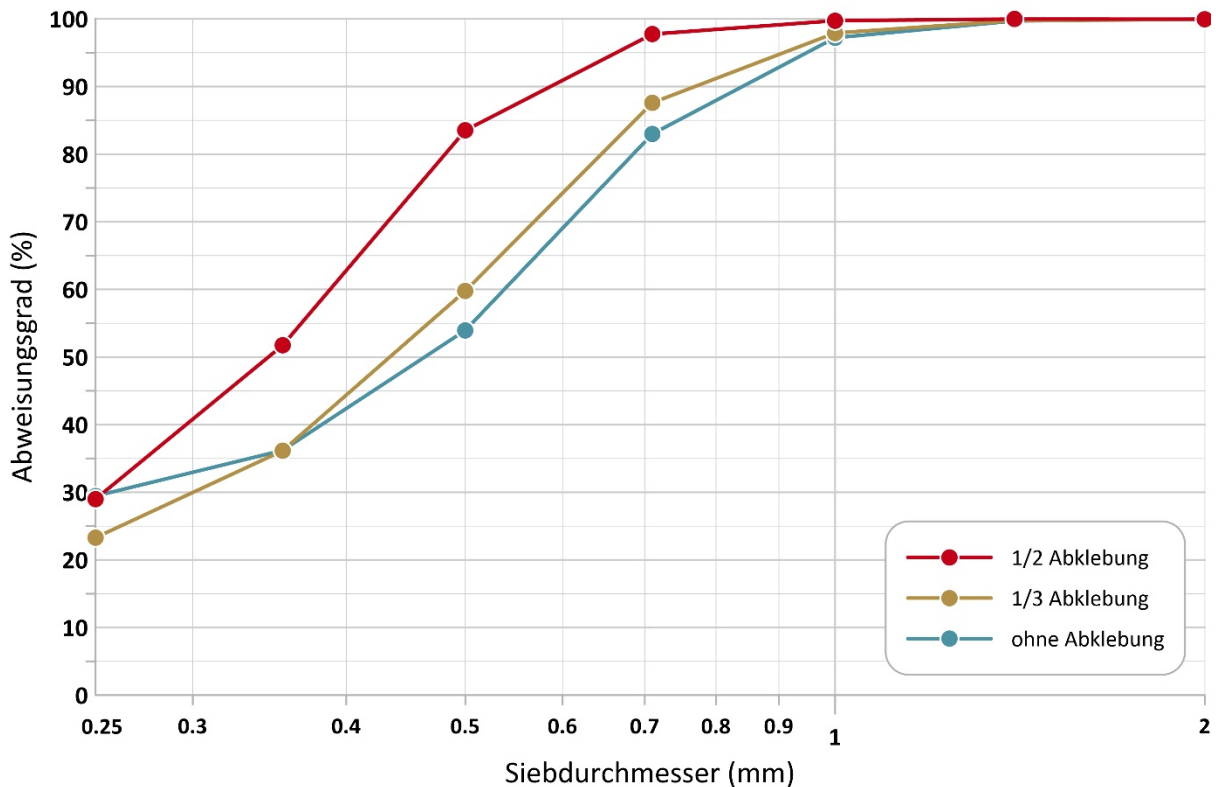


Abbildung 59: Abweisungsgrad bei $\frac{1}{3}$ - und $\frac{1}{2}$ -Abklebung beim Sb18 1.0, Durchfluss 134.5 l/s.lfm

Die seitliche Abklebung bewirkt, dass sowohl Geschiebe als auch Wasser seitlich ungehindert über den Rechen strömen. Abhängig von der Gleichmässigkeit der Geschiebezugabe in die Zulaufstrecke kann dies variieren. Von der Konfiguration ohne Abklebung bis $\frac{1}{3}$ wird der Abweisungsgrad 9 % höher, von $\frac{1}{3}$ zu $\frac{2}{3}$ sind es 5 % und von $\frac{2}{3}$ zu $\frac{3}{3}$ sind es 6 %. Daraus kann geschlossen werden, dass eine seitliche Vereisung den Abweisungsgrad um 5-10 % erhöht (Abbildung 61), da jetzt weniger Rechenfläche zum Schlucken der Partikel vorhanden ist und Überfallwasser gemeinsam mit Gesteinspartikeln über das Rechenende austreten. Allerdings nimmt auch die Schluckfähigkeit mit zunehmender Abklebung ab.

Diese Versuche wurden mit der regulären Zugabemethode und der Geschiebekonzentration, welche sich aus der Schleppkraft des Zulaufs ergibt, ermittelt.

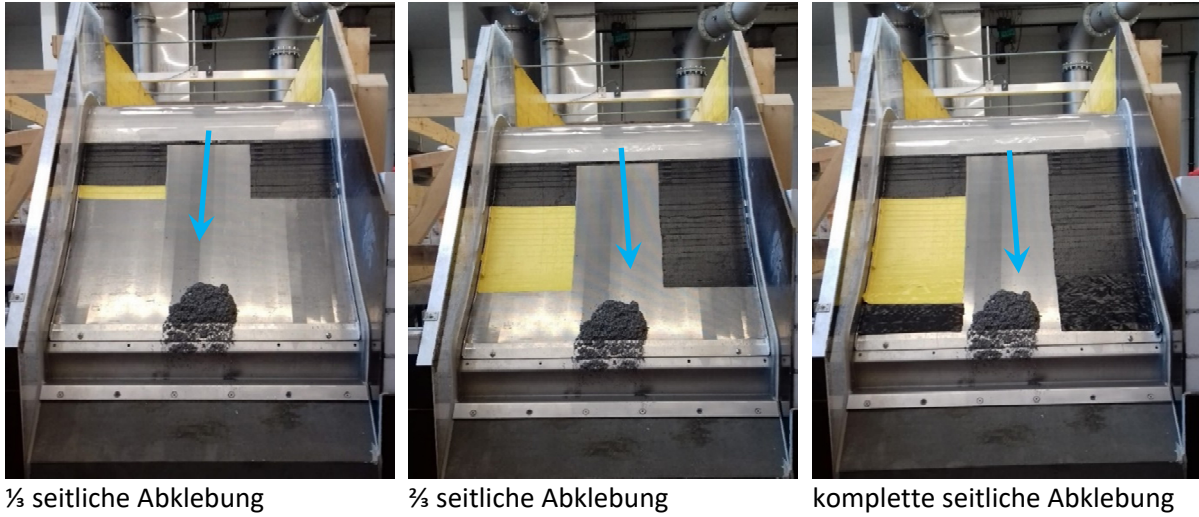


Abbildung 60: Seitliche Abklebung des Rechens Sb18 1.0 jeweils in Drittelschritten.

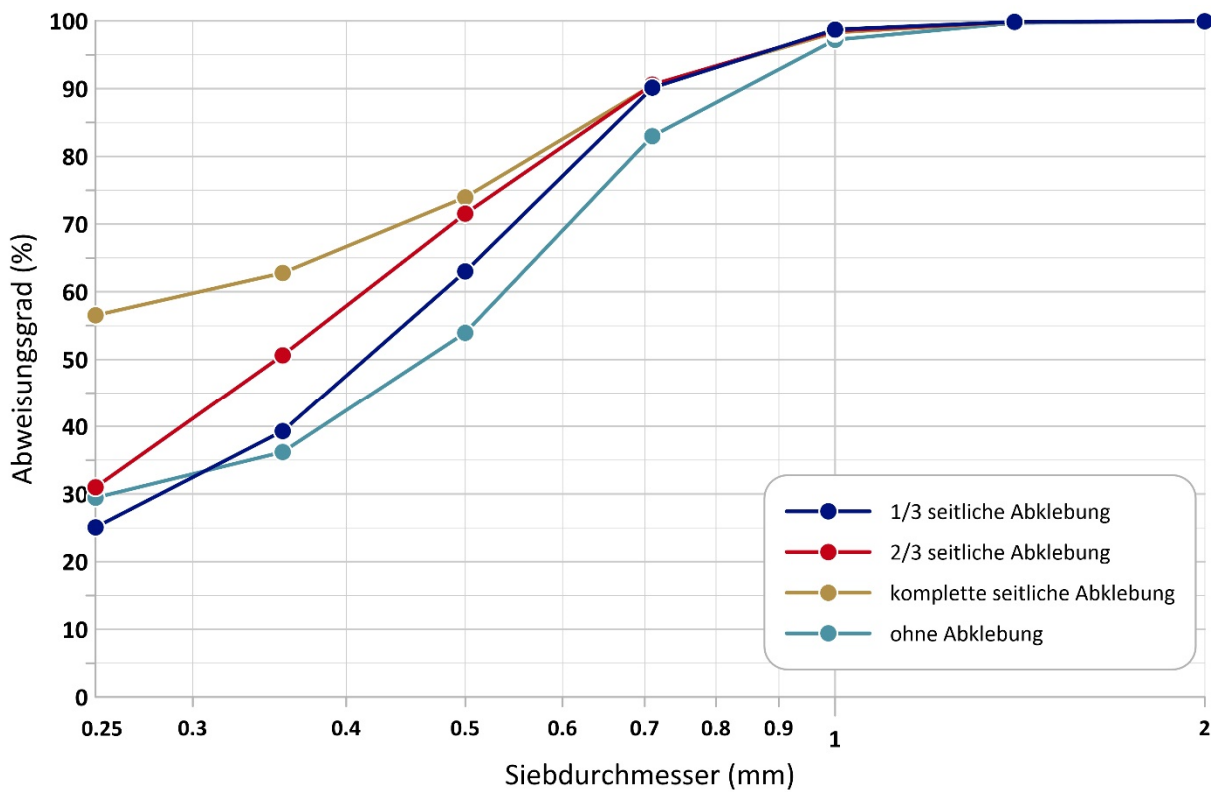


Abbildung 61: Abweisungsgrad bei einer seitlichen Abklebung am 1.0 mm Rechen, Durchfluss 134.5 l/s.lfm

3.3 Fischabstieg

3.3.1 Hydraulische Voraussetzungen

Die Fischversuche wurden für die beiden Rechen von Wild Metal (Sb18 0.6 und Sb18 1.0) bei $q_{zu} = 100 \text{ l/(s.lfm)}$ und 300 l/(s.lfm) durchgeführt. Die Abflusstiefen an der Stelle, wo die Fische in den Zuflusskanal eingesetzt wurden (2 m vor der Überfallschwelle), lagen bei $h = 0.12 \text{ m}$ für $q_{zu} = 100 \text{ l/(s.lfm)}$ und bei $h = 0.24 \text{ m}$ für $q_{zu} = 300 \text{ l/(s.lfm)}$. Die Fließgeschwindigkeiten an derselben Stelle lagen bei $v = 0.81 \text{ m/s}$ für $q_{zu} = 100 \text{ l/(s.lfm)}$ und bei $v = 1.32 \text{ m/s}$ für $q_{zu} = 300 \text{ l/(s.lfm)}$ (siehe Tabelle 22).

Tabelle 22: Abflusstiefen und Fließgeschwindigkeiten 2 m oberhalb der Überfallschwelle für beide Rechen Sb18 0.6 und Sb18 1.0

Spez. Abfluss $q_{zu} \text{ [l/(s.lfm)]}$	Abflusstiefe $h \text{ [m]}$	Fließgeschwindigkeit $v \text{ [m/s]}$
100	0.12	0.81
300	0.24	1.32

In den Versuchen wurden Bachforellen aus zwei verschiedenen Grössenklassen (klein und gross) getestet. Die kleinen Bachforellen hatten eine totale Körperlänge TL von 11 – 17 cm, die grossen Bachforellen von 17 – 27 cm. In nachfolgender Tabelle 23 ist für die beiden untersuchten Zuflussgeschwindigkeiten aufgelistet, wie lange Forellen unterschiedlicher Körperlängen bei 14°C Wassertemperatur der Strömung entgegenschwimmen können. Beim kleineren Zufluss $q_{zu} = 100 \text{ l/(s.lfm)}$ können alle getesteten Fische problemlos einige Sekunden bis mehrere Stunden der Strömung entgegenhalten. Die Fische mussten daher ein paarmal aktiv geschweicht werden, damit sie über den Rechen abschwammen. Beim grösseren Zufluss $q_{zu} = 300 \text{ l/(s.lfm)}$ konnten vor allem kleine Bachforellen der Strömung nicht lange standhalten und flüchteten in eine strömungsberuhigtere Ecke oder wurden sofort über den Rechen geschwemmt.

Tabelle 23: Schwimmdauer für Bachforellen unterschiedlicher Körperlängen für die Zuflussgeschwindigkeiten während den Fischversuchen im verschmälerten Modell (nach Ebel, 2016)

Körperlänge TL	$q_{zu} = 100 \text{ l/(s.lfm)}$ $v = 0.81 \text{ m/s}$	$q_{zu} = 300 \text{ l/(s.lfm)}$ $v = 1.32 \text{ m/s}$
11 cm	160 s	< 2 s
17 cm	120 min	33 s
27 cm	> 200 min	30 min

Für beide mit Fischen getesteten Zuflüsse wurde der gesamte Zufluss vom Rechen geschluckt, sodass die Fische über einen teilweise unbenetzten Rechen absteigen mussten. Die maximalen Fließgeschwindigkeiten, die die Fische über dem Rechen erfuhren, lagen bei $v_{\max} = 2.15 \text{ m/s}$ bei $q_{zu} = 100 \text{ l/(s.lfm)}$ und $v_{\max} = 3.0 \text{ m/s}$ bei $q_{zu} = 300 \text{ l/(s.lfm)}$.



3.3.2 Verwendete Fische/Protokoll

Die ethohydraulischen Versuche fanden während vier Wochen im August 2019 statt, wobei die Abfischungen jeweils montags (Tag 1) und die Versuche dienstags bis donnerstags (Tag 2-4) durchgeführt wurden. Zurückgesetzt wurden die Fische am Tag 4 abends oder am Tag 5 (freitags). Tabelle 24 zeigt, wie viele Fische von welcher Grösse in welcher Versuchswoche gefangen wurden.

Tabelle 24: Verwendete Bachforellen

Woche	Rechen	Total gefangen	Reserven	Markierte Fische klein / gross	Tod bei Markierung	Total ausgesetzt
1	Sb18 0.6	56	2	24 / 32	0	56
2	Sb18 1.0	56	2	24 / 32	0	56
3	Sb18 0.6	57	3	27 / 28	2	55
4	Sb18 1.0	58	4	22 / 32	1	57

Tabelle 25: Generelles Versuchsprotokoll

- Tag 1**
(Montag)
 - Am Schanielabach werden mindestens 54 Fische (vgl. Tabelle 24) abgefischt. Dabei handelt es sich jeweils um 36 Rechenfische und 18 Kontrollfische, Gröszenverteilung s. Tabelle 8.
 - Die Fische werden vor Ort vermessen, anästhesiert und markiert.
 - Es erfolgt der Transport zum Versuchslabor an der VAW, ETH Hönggerberg in Zürich
 - Eingangskontrolle: Jeder Fisch wird beidseitig fotografiert
 - Einhälterung.
- Tag 2**
(Dienstag)
 - Durchfluss 100 l/s.lfm, Durchführung von 6 Versuchen mit grossen Fischen: Pro Versuch jeweils 3 Fische in den Zulauf einsetzen und 2 Fische zur Kontrolle direkt in den Kolk geben.
 - Durchfluss 100 l/s.lfm, Durchführung von 2 Versuchen mit kleinen Fischen: Pro Versuch jeweils 3 Fische in den Zulauf einsetzen und 1 Fisch zur Kontrolle direkt in den Kolk geben.
 - Vor und nach jedem Versuch wird jeder Fisch mit Nelkenöl anästhesiert und beidseitig in der mit Wasser gefüllten Küvette fotografiert.
- Tag 3**
(Mittwoch)
 - Durchfluss 100 l/s.lfm, Durchführung von 4 Versuchen mit kleinen Fischen: Pro Versuch jeweils 3 Fische in den Zulauf einsetzen und 1 Fisch zur Kontrolle direkt in den Kolk geben.
 - Durchfluss 300 l/s.lfm, Durchführung von 4 Versuchen mit grossen Fischen: Pro Versuch jeweils 3 Fische in den Zulauf einsetzen und 2 Fische zur Kontrolle direkt in den Kolk geben.
 - Vor und nach jedem Versuch wird jeder Fisch mit Nelkenöl anästhesiert und beidseitig in der mit Wasser gefüllten Küvette fotografiert.
- Tag 4**
(Donnerstag)
 - Durchfluss 300 l/s.lfm, Durchführung von 2 Versuchen mit grossen Fischen: Pro Versuch jeweils 3 Fische in den Zulauf einsetzen und 2 Fische zur Kontrolle direkt in den Kolk geben.



- Durchfluss 300 l/s.lfm, Durchführung von 6 Versuchen mit kleinen Fischen: Pro Versuch jeweils 3 Fische in den Zulauf einsetzen und 1 Fisch zur Kontrolle direkt in den Kolk geben.
- Vor und nach jedem Versuch wird jeder Fisch mit Nelkenöl anästhesiert und beidseitig in der mit Wasser gefüllten Küvette fotografiert.
- Ev. abends: Fische wieder im Schanielabach aussetzen
- Falls nicht am Vorabend geschehen: Fische wieder im Schanielabach aussetzen

Tag 5
(Freitag)

Die Versuche wurden auf der verschmälerten Anlage bei einer Rechenbreite von 0.5 m durchgeführt. Um systematische Fehler zu minimieren, wurden die Rechen nach jeder Versuchswoche gewechselt. Zudem wurden die Versuchstage abwechslungsweise mit 100 l/(s.lfm) und 300 l/(s.lfm) Durchfluss begonnen. Die erste Versuchswoche war jedoch noch nicht standardisiert und wurde in der zweiten Woche stark optimiert. Jeder markierte Fisch wurde insgesamt fünfmal mit Nelkenöl anästhesiert, einmal bei der Markierung und bei beiden Versuchen je einmal vor und einmal nach der Fotoaufnahme. Die sogenannten «Rechenfische» sind jeweils bei 100 l/(s.lfm) bzw. 300 l/(s.lfm) über den Rechen abgestiegen. Die «Kontrollfische» passierten den Rechen nicht, sondern wurden direkt in den Kolk gesetzt, durchlebten ansonsten aber dieselbe Behandlung. Der Versuchsablauf wird detailliert in Tabelle 25 beschrieben.

3.3.3 Statistische Bildauswertung Schuppenverluste

Mithilfe eines zweiseitigen Mann-Whitney-U-Tests wurden die Rechenfische und die Kontrollfische unter Verwendung eines Signifikanzniveaus von 5 % in Bezug auf den prozentualen Schuppenverlust miteinander verglichen. Dabei wurde für jede der vier Kombinationsmöglichkeiten von den zwei Fischgrössenklassen und den zwei Durchflüssen ein separater Test durchgeführt. Die Kombinationsmöglichkeiten sind in nachfolgender Tabelle 26 aufgelistet.

Tabelle 26: Vier Kombinationsmöglichkeiten der beiden Fischgrösseklassen und der beiden Durchflüsse für die zweiseitigen Mann-Whitney-U Tests

	Grosse Fische	Kleine Fische
Rechen Sb18 1.0	Durchflussrate 100 l/s.lfm	Durchflussrate 100 l/s.lfm
	Durchflussrate 300 l/s.lfm	Durchflussrate 300 l/s.lfm
Rechen Sb18 0.6	Durchflussrate 100 l/s.lfm	Durchflussrate 100 l/s.lfm
	Durchflussrate 300 l/s.lfm	Durchflussrate 300 l/s.lfm

Nachfolgend in Abbildung 62 sind die Ergebnisse der Auswertung der Schuppenverluste zusammenfassend dargestellt. Die grafischen Darstellungen der einzelnen Konfigurationen sind in Anhang 7 einsehbar. Alle untersuchten Fische wiesen weniger als 1.0 % Schuppenverlust auf, wobei bei mehr als der Hälfte der Fische gar keine Schuppenverluste festgestellt werden konnten. Die Interpretation bzw. Darstellung der Fische, welche den grössten Schuppenverlust aufweisen, findet sich in Kapitel 3.3.5.

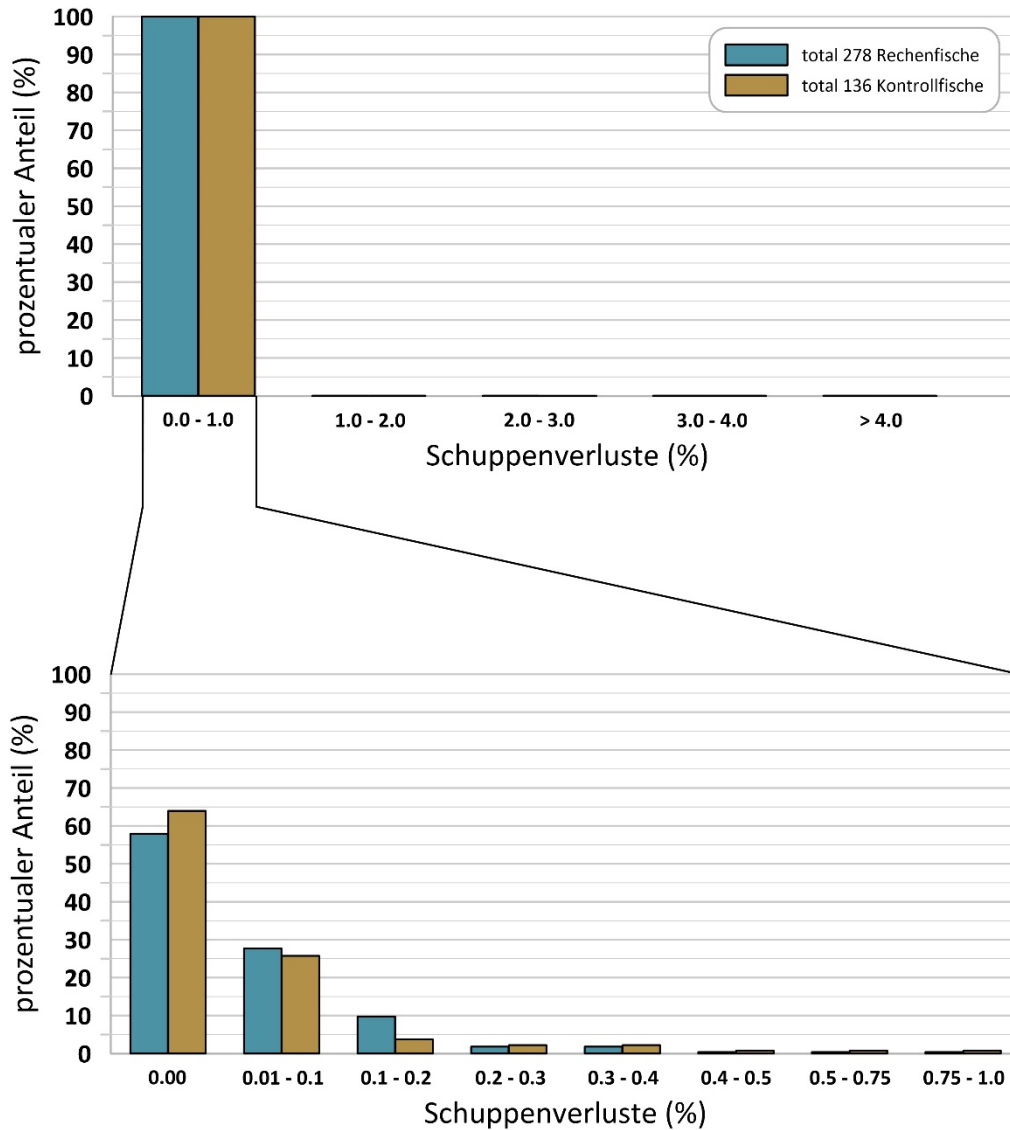


Abbildung 62: Gesamtheit der Schuppenverluste aller Fische bei beiden Durchflussraten und beiden Rechentypen

Nachfolgend sind die statistischen Auswertungen in Tabelle 27 zusammengefasst. Die Versuchskonfigurationen (Spaltweite, Fischgrösse und Durchfluss) mit einem grün hinterlegten Feld zeigen keinen statistisch signifikanten Unterschied zwischen Rechen- und Kontrollfischen. Hier ist also nicht davon auszugehen, dass die gemessenen Schuppenverluste mit dem Passieren des Rechens zusammenhängen, sondern bei beiden Gruppen ähnlich hoch sind und auf Handling und Hälterung zurückzuführen sind. Bei den rot hinterlegten Feldern weist die Versuchskonfiguration (Spaltweite, Fischgrösse und Durchfluss) einen statistisch signifikanten Unterschied zwischen Rechen- und Kontrollfischen auf, was auf zusätzlichen Schuppenverlust durch das Passieren des Rechens hinweist. Dennoch sind die Schuppenverluste im Allgemeinen sehr gering, was in die Gesamtinterpretation in Kapitel 3.3.5 einfließt.



Tabelle 27: Statistische Auswertung Fischversuche, Untersuchung auf Signifikanz

Fischgrösse	Durchfluss (l/s.lfm)	Spaltweite*		Einfluss der Spaltweite bzw. der Behandlung der Fische
		1 mm	0.6 mm	
Klein	100	(n _{rf} =33, n _{kf} =52) (p-Wert: 0.4893)	(n _{rf} =34, n _{kf} =52) (p-Wert: 0.8892)	Kein Schuppenverlust durch den Rechen
Klein	300	(n _{rf} =35, n _{kf} =52) (p-Wert: 0.9493)	(n _{rf} =35, n _{kf} =52) (p-Wert: 0.1829)	Kein Schuppenverlust durch den Rechen
Gross	100	(n _{rf} =19, n _{kf} =84) (p-Wert: 0.001587)	(n _{rf} =18, n _{kf} =84) (p-Wert: 0.02104)	Sehr geringer Schuppenverlust durch den Rechen
Gross	300	(n _{rf} =37, n _{kf} =84) (p-Wert: 0.4864)	(n _{rf} =18, n _{kf} =84) (p-Wert: 0.0004444)	Sehr geringer Schuppenverlust durch den Rechen 0.6 mm

* Der Rechen mit der Spaltweite 1 mm wurde in den Versuchswochen 2 und 4, derjenige mit Spaltweite 0.6 mm in den Wochen 1 und 3 verwendet. Für die Daten der grossen Fische bei 100 l/s.lfm Durchfluss wurden nur die Daten der Versuchswochen 2 und 3 verwendet.

3.3.4 Interpretation statistische Bildauswertung

Die Auswirkungen einer Rechenpassage auf Bachforellen sind bezüglich Schuppenbedeckung vernachlässigbar. Zwischen Bachforellen, die den Rechen passieren, und solchen, die den Rechen nicht passierten, gab es keinen statistisch signifikanten Unterschied.

Grosse Bachforellen, die den Rechen bei geringem Durchfluss passieren, erleiden am ehesten eine Beeinträchtigung der Schuppenbedeckung durch die Rechenpassage.

Gemessen an der Anzahl der Fälle, in denen unter Verwendung eines Signifikanzniveaus von 5 % ein statistisch signifikanter Unterschied zwischen Rechen- und Kontrollfischen feststellbar ist und in denen die Rechenfische im Vergleich zu den Kontrollfischen als beeinträchtigt erscheinen, schneidet der Rechen mit einer Spaltweite von 0.6 mm etwas schlechter ab als der Rechen mit einer Spaltweite von 1 mm. Ein grosses Gewicht sollte dieser Feststellung allerdings nicht beigemessen werden, da der Unterschied sehr gering ist.

3.3.5 Interpretation der Gesamtergebnisse

Die Individuen mit den höchsten Schuppenverlusten im gesamten Experiment werden hier anhand der Fotos dargestellt und interpretiert. Dies soll den prozentualen Schuppenverlust in eine Relation mit der effektiven Verletzung des einzelnen Tieres stellen. Alle verwendeten Tiere weisen nach dem Experiment einen Schuppenverlust von weniger als 1 % auf.

Schuppenverluste durch Verletzungen regenerieren sich wieder. In der Zeit bis zur Regeneration ist der Fisch verletzlicher und vor allem in der Reproduktionszeit anfälliger für Verpilzungen an den Stellen, wo Schuppen fehlen. Am Aufbau der Schuppen sind unterschiedliche Strukturen beteiligt: Knochen, Dentin, Cosmin, etc. Die Schuppen sind in ihrer Grösse und Form sehr variabel. Der Hinterrand



der Rundschuppe ist glatt. Ein Schuppenverlust von 1 % ist keine gravierende Verletzung und die Chancen, dass ein Fisch überlebt, sind gross.

1 % Schuppenverlust kann als ein geringer Verlust von Schuppen eingestuft werden. Verlorene Schuppen werden rasch wieder aufgebaut (regeneriert). In der Regel weisen Forellen und Lachse hohe Regenerationsraten von Schuppen auf (Love 1996). Bagliniere et al. (1986) zeigte, dass Bachforellen viele regenerierte Schuppen aufweisen (Meerforellen bis zu 60 %). Der Verlust von Schuppen und ihre erneute Regeneration ist bei Forellen und ihren natürlichen Populationen ein häufiger Prozess.

In Abbildung 63 bis Abbildung 65 werden drei Beispielfische mit den Fotos vor und nach dem Versuch gezeigt. Zwei der Beispiele sind Kontrollfische und sind somit nicht über den Rechen abgestiegen. Die Verletzungen stammen demnach vom Handling oder sind auf dem Foto davor aus Qualitätsgründen nicht ersichtlich. Grundsätzlich ist ein Rechenabstieg unproblematisch, alle Schuppenverluste unter 0.5 % sind als gering zu bezeichnen und haben vermutlich kaum Konsequenzen für Fische. Schuppenverluste von zirka 0.8 % sind auf dem Fisch klar ersichtlich, als fleckiges Fehlen von Schuppen.

Bei 0.86 % (Abbildung 63), 0.80 % (Abbildung 64), 0.7 % (Abbildung 65) sind die Verluste deutlich sichtbar, wobei es schwierig ist, über die Konsequenzen für den Fisch etwas Konkretes auszusagen. Sicher ist ein Fisch mit einer derartigen Verletzung anfälliger gegenüber bestimmten Krankheiten und Infektionen.

Interessant ist, dass die beobachteten Schuppenverluste meist punktuell sind, oder z. T. auch als Kratzer sichtbar. Verstreute Schuppenverluste sind eher selten. Das ist ein Unterschied zu Buell (1999), welcher nach dem Abstieg vor allem verstreute Schuppenverluste feststellte.

Man kann also festhalten, dass beim Parameter Schuppenverluste eher geringe Auswirkungen auf die Forellen nachzuweisen sind. Andere Verletzungen wie Quetschungen, eingerissene Flossen oder sogar tödliche Verletzungen konnten nicht festgestellt werden.

Ab Mitte der zweiten Woche wurde zudem vermerkt, wie viele Fische vorwärts und wie viele rückwärts über den Rechen geschwommen sind. Die Ergebnisse sind in nachfolgender Tabelle 28 aufgelistet. Die Mehrzahl der Fische hat den Rechen rückwärts passiert. Viele Fische die gescheucht werden mussten, weil sie sich länger als das Zeitlimit von 5 Minuten in der Strömung des Zulaufs halten konnten, sind vorwärts über den Rechen geschwommen. Allerdings gab es auch einige Fische, welche von sich aus vorwärts über den Rechen schwammen. Insgesamt schwammen über 76% der diesbezüglich beobachteten Fische rückwärts über den Rechen, was dem erwarteten natürlichen Verhalten entspricht, da die Fische in der Regel auch mit dem Kopf in die Strömung gerichtet schwimmen (positive Rheotaxis).

Tabelle 28: Schwimmrichtung der Fische über dem Coanda-Rechen

Versuchswoche	Datum	vorwärts	rückwärts	total
2	Mi, 14.08.2019	4	20	24
	Do, 15.08.2019	6	18	24
3	Di, 20.08.2019	7	17	24

	Mi, 21.08.2019	4	19	23
	Do, 22.08.2019	6	17	23
	Di, 27.08.2019	10	14	24
4	Mi, 28.08.2019	7	17	24
	Do, 29.08.2019	0	24	24

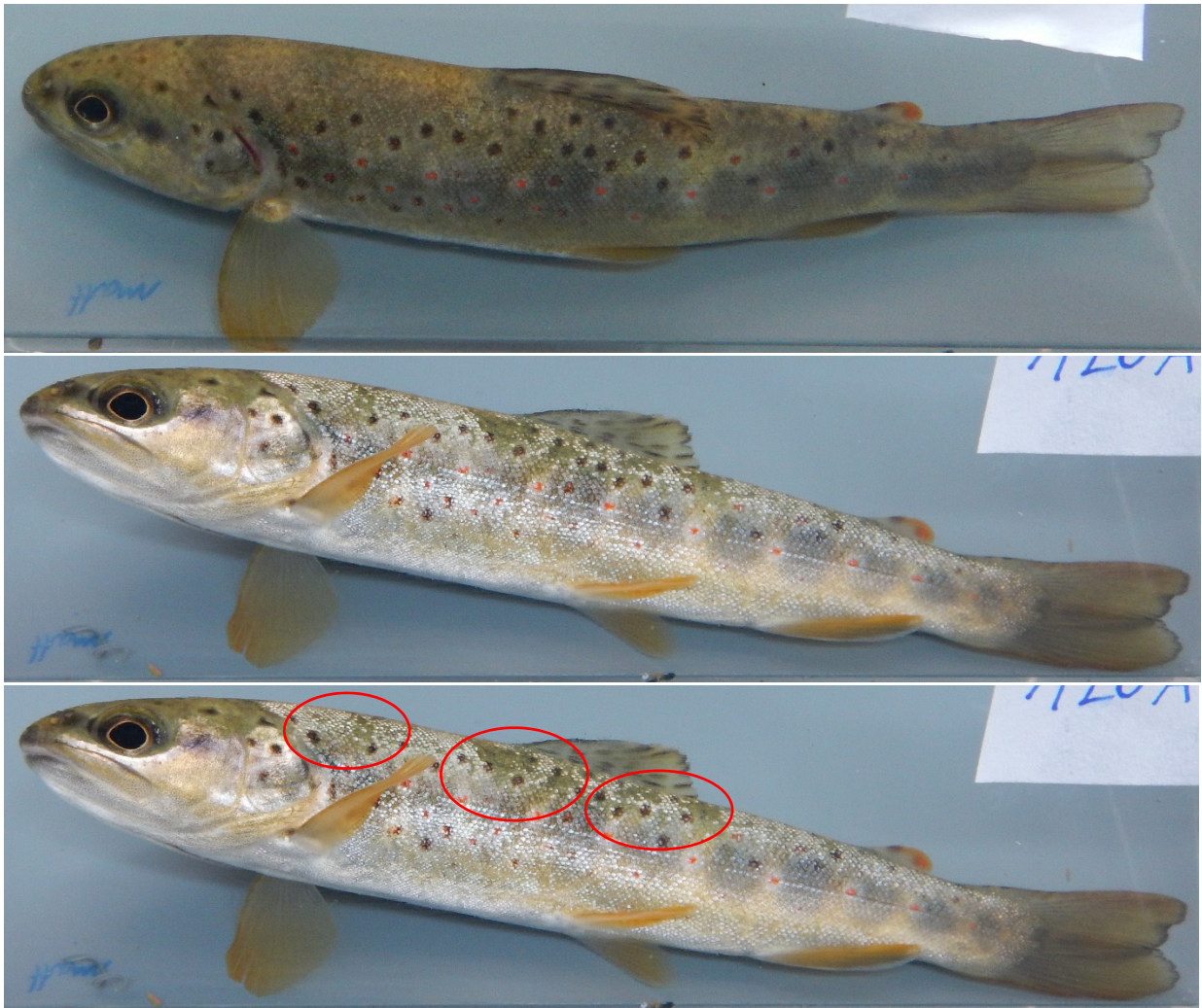


Abbildung 63: Beispiel Kontrollfisch Nr. 1 mit 0.86 % Schuppenverlust, oben vor dem Handling, Mitte nach dem Handling, unten sind die Schuppenverluste rot eingekreist.

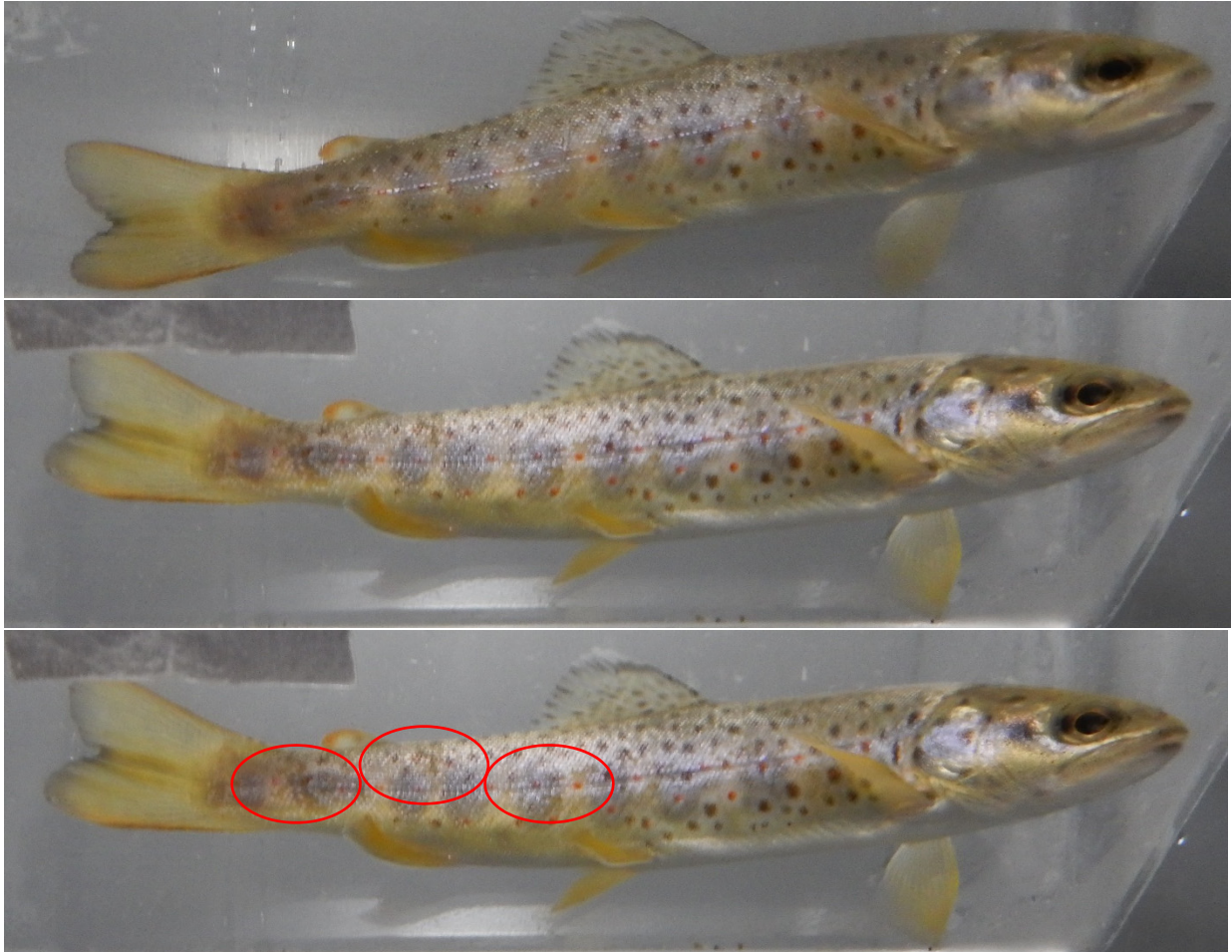


Abbildung 64: Beispiel Rechenfisch Nr. 2 mit 0.80 % Schuppenverlust, oben vor dem Rechenabstieg, Mitte nach dem Abstieg, unten sind die Schuppenverluste nach dem Abstieg rot eingekreist.



Abbildung 65: Beispiel Kontrollfisch Nr. 3 mit 0.70 % Schuppenverlust, oben vor dem Handling, in der Mitte nach dem Handling, unten sind die Schuppenverluste rot eingekreist.



4 Zusammenfassende Ergebnisse und Planungshilfen

Rechenhersteller, Rechentypen

Die internationale Recherche ergab, dass weltweit rund ein Dutzend Firmen Coanda-Siebe herstellen. Davon gibt es wenige patentierte Typen. Die meisten Siebhersteller fertigen auch die gesamten Rechenanlagen. In der Schweiz stellt aktuell keine grössere Firma Coanda-Rechen in industriellem Massstab her. Die Schweizer Firma Höhengenergie stellt Rechen in Kleinserie her. Hier besteht Potential, wenn die Ergebnisse dieser Forschungsarbeit die Skepsis mancher Betreiber hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit der Coanda-Rechen ausräumen.

Schluckvermögen

In der vorliegenden Forschungsarbeit konnten einige der in der Literatur verbreiteten Informationen über den Coanda-Rechen wissenschaftlich nicht belegt werden. Die untersuchten Coanda-Rechen von der Wild Metal GmbH Sb18 0.6 mm bzw. 1.0 mm weisen Schluckvermögen von über 500 l/(s.lfm) auf. Die detaillierten Angaben hierzu befinden sich in Kapitel 3.1.2. Auch der Coanda-Rechen der Firma Höhengenergie vom Typ «Bec de Canard» weist bereits unter nicht optimalen Einbaubedingungen ein Schluckvermögen von über 300 l/(s.lfm) auf. Selbst ohne Überfallwasserdotierung des Unterwassers (Restwasser ist aus ökologischen Gründen ohnehin erforderlich), weisen die beiden Rechen von Wild Metal noch ein Schluckvermögen von 300 l/(s.lfm) auf. Dagegen wird in den Literaturquellen ein Schluckvermögen von 140 l/(s.lfm) angegeben. Diese begrenzte Kapazität ist oftmals der wichtigste Grund dafür, weshalb in der Praxis das Tirolerwehr dem Coanda-Rechen häufig vorgezogen wird.

Auf Basis der Forschungsergebnisse liegt das Schluckvermögen oftmals etwa beim 3-4fachen Wert des angegebenen Schluckvermögens, wenn ein Überfall akzeptiert wird. Dieser Überfall kann allfällig in die ökologisch vorgesehenen Restwassermengen integriert werden und die Rechenbreite reduziert werden. Zu bedenken ist jedoch auch, dass sowohl Verschmutzung als auch Verschleiss einen erheblichen Einfluss auf das Schluckvermögen haben können und bei einer Auslegung mit einem höheren spezifischen Durchfluss dann möglicherweise die Wartungsintervalle der Anlage kürzer werden.

Coanda-Effekt oder Wasser abscheren?

Insgesamt wurden zwölf Rechen mit unterschiedlichen Spaltweiten, Stabgeometrien und Durchflüssen untersucht. Alle untersuchten Rechen haben eine konkave oder gerade Oberfläche und beginnen unmittelbar an der Unterseite der Wehrkrone. Aufgrund dieser Anordnung und Form der Rechenoberfläche kann kein Coanda-Effekt auftreten. Um den Coanda-Effekt auszunutzen, muss der Rechen bereits in der ausgerundeten Krone eines Standardüberfalls beginnen und eine leicht konvexe oder gerade Oberfläche haben, was bei den untersuchten und marktüblichen Rechen nicht der Fall ist. Um die genauen Funktionsmechanismen im Detail untersuchen zu können, ist ein Versuchsstand mit Drucksensoren notwendig. Bei einem allfälligen Folgeprojekt ist dieser Aspekt zu berücksichtigen.

Spaltweite und Anordnung eines Sandfangs

Feststoffe, die ins Triebwassersystem gelangen, können dort Abrasionsschäden an hydraulischen Anlagen verursachen. Will man bei Mittel- und Hochdruck-Kraftwerken auf die Anordnung eines Sandfangs verzichten, so empfiehlt es sich aufgrund unserer Versuche, eine maximale Spaltweite von



0.4 mm zu wählen. Diese neigen jedoch stärker zu Verstopfungen als die Rechen mit 0.6 mm Spaltweite, und haben sich daher in unseren Tests als nicht ideal erwiesen. Da das Grenzkorn für Sandfänge in der Schweiz bei Mittel- und Hochdruck-Kraftwerken (Fallhöhe > 50 m) je nach Fallhöhe üblicherweise 0.2 bis 0.3 mm beträgt, ist bei abrasivem Gestein und grosser Fallhöhe auch für eine Spaltweite von 0.4 mm ein Sandfang oder ein spülbares Absetzbecken nach dem Coanda-Rechen zu empfehlen. Ob ein Sandfang erforderlich ist, muss durch die Ermittlung der kritischen Korngrösse festgelegt werden. Coanda-Rechen mit Spaltweiten von 0.2 mm verstopfen erfahrungsgemäss sehr rasch durch Feinsand und sind für geschiebeführende Gewässer daher nicht zu empfehlen. Ein weiterer Faktor sind Blätter und gemäss Herstellerangaben spezifisch die Stiele von Buchenblättern, welche einen Coanda-Rechen verstopfen können. Gemäss Aussagen von Betreibern sind davon oftmals Rechen mit einer Spaltweite von 1 mm und darüber betroffen. Deshalb werden von den Herstellern meistens Rechen mit einer Spaltweite von 0.6 mm empfohlen, wenn sich Buchen im Einzugsgebiet des Gewässers befinden.

Bei kritischen Verhältnissen in Bezug auf Hydroabrasivverschleiss (z. B. sehr grosse Fallhöhe oder hartes Gestein) kann man also auch bei einem Coanda-Rechen nicht auf einen Sandfang verzichten. Der Vorteil eines Coanda-Rechens ist dann im Wesentlichen die Verringerung des Sedimenteintrags (und damit der Spülungen) gegenüber einem klassischen Fallrechen oder einer üblichen Seitenentnahme. Bei Kraftwerken mit relativ geringer Fallhöhe und weichem Gestein kann ein Rechen mit 0.4 mm Spaltweite jedoch eine Variante sein, um auf den Sandfang zu verzichten.

Abweisungsgrad von Feststoffen

Zur Untersuchung des Abweisungsgrades wurden drei verschiedene Geschiebearten gemäss den natürlich vorkommenden Kornverteilungen in Wildbächen alpiner Räume gewählt. Es handelt sich dabei einerseits um kantiges Korn mit den Korngrössen 0 – 4 mm und 0 – 16 mm sowie um rundes Korn mit der Grösse 0 – 8 mm. Bei relativ geringen Zuflüssen bis zu 260 l/(s.lfm) wird der Abweisungsgrad von der Konzentration des Geschiebes geringfügig beeinflusst. Die allgemein verbreitete Aussage der Hersteller, dass 90% der Körner mit der halben Spaltweitengrösse abgewiesen werden, konnte mit der vorliegenden Arbeit nicht bestätigt werden. Bei kantigem Korn betrug der Abweisungsgrad bei halber Spaltweite maximal 36 % bzw. 38 % für die Standardrechen von Wild Metal mit 0.6 mm bzw. 1.0 mm Spaltweite. Die genauen Abweisungsgrade können in Kapitel 3.2 nachgelesen werden.

Abweisungsgrad bei Hochwasser

Bei Hochwasser muss man unterscheiden, ob der Abweisungsgrad bei höheren Durchflussmengen oder die Abweisung von höheren Geschiebekonzentrationen betrachtet wird.

Höhere Durchflussmengen verbessern den Abweisungsgrad grundsätzlich. Diese Zusammenhänge sind in Kapitel 3.1 dargestellt.

Höhere Geschiebekonzentrationen verschlechtern den Abweisungsgrad. Dieser Umstand tritt allerdings erst bei höheren Durchflussmengen auf. Abbildung 23 zeigt, dass bei geringeren Durchflussmengen der Abweisungsgrad kaum von der Geschiebekonzentration abhängig ist. Bei höheren Durchflussmengen (z.B. 400 l/(s.lfm)) ist die Geschiebeabweisung bei geringen Geschiebekonzentrationen effizienter als bei hohen Geschiebekonzentrationen (vgl. Abbildung 24).

Fallhöhenverlust, Wirtschaftlichkeit



Der Fallhöhenverlust beim Coanda-Rechen von ca. 0.7 bis 2.2 m (je nach Rechentyp) wirkt sich v. a. für Niederdruck-Kraftwerke negativ aus. Bei Hochdruck-Kraftwerken ist sie in der Praxis wirtschaftlich weniger oder gar nicht von Bedeutung. Entscheidend ist, um wie viel der Fallhöhenverlust grösser ist als für Tirolerwehre, denn auch diese haben Fallhöhenverluste gegenüber Seitenfassungen.

Stabform und Einbauwinkel

In den letzten 20 Jahren haben beispielsweise die beiden Hersteller Stocker und Höhenergie die Querstäbe der Coanda-Rechen breiter entworfen und realisiert. Die Rechenstäbe sind ca. 5-10 mm breit und damit um ein Mehrfaches breiter als die übliche Stabbreite der Firmen Wild Metal und Andaco. Dies führt zur Reduktion der gesamten verfügbaren offenen Durchflussfläche und damit zu einem geringeren Schluckvermögen dieser Rechenart. Der Rechen «Bec de Canard» der Firma Höhenergie mit 1.05 mm Spaltweite hat eine maximale Schluckfähigkeit von 344 l/(s.lfm). Dagegen hat der filigrane Rechen Sb18 der Firma Wild-Metall mit 1.0 mm Spaltweite eine Schluckfähigkeit von 520 l/(s.lfm). Dies entspricht 50% mehr Kapazität zu Gunsten des filigranen Rechens. Zu bemerken ist jedoch, dass Rechen mit breiten Stäben wesentlich stabiler sind. Sie benötigen keinen mechanischen Schutz vor Geröll. Die filigranen Rechen sind empfindlich und müssen mit einem grösseren Rechen vor Geröll geschützt werden. Dieser Schutz kann einen bedeutenden Anteil der Anströmungsfläche zum Coanda-Rechen blockieren und die Anströmung durch Verwirbelung stören. Es wird vermutet, dass die Strömungsstörung durch Schutzrechen zur Reduktion der Schluckfähigkeit des filigranen Rechens führt. Damit wären beide Rechenarten hinsichtlich deren Schluckfähigkeit vergleichbarer. Die beschriebene Strömungsstörung durch Schutzrechen wurde im vorliegenden Projekt nicht untersucht. Auch für den Fischabstieg können die Schutzrechen, je nach Bauart, eine zusätzliche Verletzungsgefahr darstellen.

Nach Aussagen der Firma Höhenergie lässt sich das Schluckvermögen des «Bec de Canard» bis auf 400 l/(s.lfm) steigern, wenn der Einbauwinkel 31° betragen würde. Im Versuchsstand der VAW lag der Einbauwinkel bei 38°. Diese Aussage konnte daher mit dem vorliegenden Versuchsstand nicht überprüft werden, da keine Anpassung des Einbauwinkels möglich war. Es stellt sich ausserdem die Frage, ob ein angepasster Einbauwinkel oder ein anderer Anstellwinkel der Rechenstäbe zur Strömung auch bei den filigraneren Rechen, wie zum Beispiel bei der Firma Wild Metal GmbH, zu einer Leistungssteigerung führen.

Auch die Ergebnisse der Untersuchung mit dem abgeklebten Rechen geben Grund zur Annahme, dass mit der Länge der Beschleunigungsstrecke und dem Einbauwinkel noch nicht das Optimum aus Schluckfähigkeit, Abweisungsgrad und Selbstreinigung erreicht wurde. Man muss jedoch auch berücksichtigen, dass eine verlängerte Beschleunigungsplatte auch eine weitere Verringerung der Fallhöhe bedeutet.

Vereisung und Verstopfung

Mit Teilabklebung der Rechen (Spaltweite 1.0 mm) wurde die Verstopfung durch Geschiebe, Laub, Eis und Moos simuliert. Die Abklebung der Rechenoberflächen erfolgte, ausgehend von der Wehrkrone, in Schritten von 12.5 %. Die Abklebung bis zu 25 % des Rechens führte nicht dazu, dass der Rechen eine massgeblich erhöhte Benetzung aufwies. Diese Aussage bezieht sich auf den Anlagendurchfluss bei voller Breite von 269 l/(s.lfm). Man kann daher für die Praxis davon ausgehen, dass in diesem Fall



die Schluckfähigkeit ohne Überfall nicht massgeblich beeinträchtigt ist. Bei einer Abklebung von 37.5 % der Rechenoberfläche verliert der Rechen ca. 3 % seiner Schluckfähigkeit. Ist 50 % der Rechenoberfläche blockiert, ergibt sich eine Reduktion der Schluckfähigkeit von 10 %. Bei Verstopfung von 75 % der Rechenoberfläche reduziert sich die Schluckfähigkeit um 33 %. Offensichtlich führt die Beschleunigung zur Erhöhung der spezifischen Schluckfähigkeit des Rechens bezogen auf die Rechenfläche. Die Ergebnisse diesbezüglich sind in Kapitel 3.1.3 zu finden.

Mit dem Abkleben der Rechenfläche vom oberen Rand beginnend konnte beobachtet werden, dass der Abweisungsgrad mit höheren Fließgeschwindigkeiten erhöht werden konnte und somit in der Verlängerung der Beschleunigungsplatte eine Optimierungsmöglichkeit für den Abweisungsgrad gegeben ist. Dies ist in Kapitel 3.2.4 ersichtlich.

Die Abklebung simuliert eine partielle Verstopfung des Rechens mit Eis, Partikeln, Moos oder Blättern. In der Realität werden diese Stoffe jedoch auch durch ihre Form das Strömungsverhalten beeinflussen. Eine knapp dimensionierte Anlage hat zwar tiefere Errichtungskosten zur Folge, bei Lastfällen mit einem erhöhten Abfluss (z.B. Schneeschmelze oder Starkregenereignisse) fällt allerdings auch deutlich mehr Überwasser an, so dass die Energie nicht vollständig genutzt werden kann. Gemäss Hersteller (Wild Metal) führt eine höhere Beaufschlagung und somit eine tiefere Benetzung auch zu einem höheren Verschleiss der Rechenstäbe. Dies könnte einen frühzeitigen Austausch der Rechenelemente zur Folge haben. Deshalb ist bei jedem Projekt eine gesamtheitliche Betrachtung von technischen, wirtschaftlichen und umwelttechnischen Faktoren unbedingt erforderlich. Dazu gehören Überwasser, Verschleiss, Form der Jahresganglinie, Abrasivität des Geschiebes oder auch die Fallhöhe.

Fischgängigkeit

Im Wesentlichen ergaben die Fischversuche, dass bei den getesteten Rechen (Wild Metal Sb18 1.0 mm und 0.6 mm) keine relevanten Verletzungen beim Fischabstieg zu erwarten sind. Die verwendeten Bachforellen erlitten Schuppenverluste im Bereich von maximal 1% ihrer Körperoberfläche, in den meisten Fällen jedoch sogar weit unterhalb dieses Wertes. Diese Ergebnisse treffen sowohl für einen geringeren Durchfluss von 100 l/(s.lfm) zu, als auch für einen hohen Durchfluss von 300 l/(s.lfm). Da die Verletzungen in erster Linie von der Stabform und dem Anstellwinkel abhängen, ist davon auszugehen, dass ähnlich konstruierte oder baugleiche Siebe anderer Hersteller eine gleichwertige Fischverträglichkeit aufweisen.



5 Schlussfolgerungen

Die wichtigsten Erkenntnisse und Schlussfolgerungen des Forschungsprojekts und die Empfehlungen für die Praxis können wie folgt zusammengefasst werden:

Rechenhersteller, Rechentypen, Spaltweite

Die Versuche konnten zeigen, dass die Rechen mit einer grösseren Spaltweite als 1mm keinen Mehrwert hinsichtlich des Schluckvermögens bieten. Gleichzeitig haben diese Rechen eine schlechtere Abweisungscharakteristik für feine Geschiebefraktionen.

Bei kleineren Spaltweiten (<1.0 mm) zeigte sich, dass der Rechen Sb18 0.4 mm von der Firma Wild Metal mit einer Spaltweite von 0.4 mm vermehrt zum Verstopfen neigte. Deshalb haben sich im Laufe des Forschungsprojektes die Rechen mit 0.6 und 1.0 mm Spaltweite als diejenigen mit den besten Eigenschaften herauskristallisiert. Dies spiegelt die Marktsituation wider, bei Wild Metal werden 52% der Rechen mit der Spaltweite 0.6 mm und 40% der Rechen mit der Spaltweite 1.0 mm verkauft. Das macht aus Sicht der vorliegenden Forschungsergebnisse Sinn. Die Betreiber haben fallweise von Buchenlaub bzw. den Stielen des Buchenlaubes berichtet, welche die Spalte bei den Rechen mit 1.0 mm Spaltweite verlegen können. Dafür weist der Rechen mit 1.0 mm Spaltweite ein höheres maximales Schluckvermögen bei Hochwasser auf als der Rechen mit 0.6 mm Spaltweite. Die Rechen der Firma Wild Metal werden durch die feinen Rechenstäbe leichter durch Geschiebe beschädigt. Deshalb werden hier oftmals Schutzrechen eingesetzt, deren Auswirkung auf Hydraulik und Fischabstieg im vorliegenden Projekt nicht untersucht wurden. Es ist anzunehmen, dass sich diese Schutzrechen – je nach Bauart - in schlechteren Kennwerten hinsichtlich Schluckvermögen, Abweisungsgraden und eventuell auch Fischfreundlichkeit niederschlagen.

Der untersuchte Rechen der Firma Höhenergie mit 1.05mm Spaltweite hat zwar hinsichtlich des maximalen Schluckvermögens und des Abweisungsgrades von Feststoffen nicht so gute Kennwerte wie die vergleichbaren Rechen von Wild Metal. Dieser Rechen konnte jedoch nicht mit dem idealen Einbauwinkel getestet werden. Seine Leistungsfähigkeit steigt daher mit dem idealen Einbauwinkel für diesen Rechentyp noch weiter an. Weiter sind hier die Stäbe so robust ausgeführt, dass auf einen Schutzrechen verzichtet werden kann. Somit stellen die Rechen der Firma Höhenergie eine interessante einheimische Alternative dar.

Schluckvermögen

Das maximal erzielbare Schluckvermögen von bis zu 600 l/s.lfm liegt deutlich höher als die in der Literatur beschriebenen 140 l/s.lfm. Dadurch sind die Rechen deutlich wirtschaftlicher als bisher angenommen. Dieser Faktor kann zur Akzeptanz der Coanda-Rechen als wertvolle und wirtschaftlich Alternative zum Tirolerwehr beitragen. Optimal für den Betrieb von Coanda-Rechen haben sich Durchflüsse von bis zu 300 l/s.lfm erwiesen, ohne den Abweisungsgrad zu beeinträchtigen.

Abweisungsgrad von Feststoffen und Anordnung eines Sandfangs

Mit den genannten, üblichen Rechen von 0.6 mm oder 1.0 mm Spaltweite wird der Verzicht auf einen Sandfang nur bei sehr kleinen Fallhöhen und sehr wenig abrasivem Geschiebe möglich sein. Die



Daten bezüglich der Abweisungsgrade ermöglichen jedoch eine Aussage zur Reduktion der ursprünglichen Geschiebefracht. Basierend auf dieser Reduktion kann der Sandfang dimensioniert werden.

Ausgehend von der Annahme, dass ein Tirolerwehr 100% der Geschiebefraktionen mitfasst, ist also die Dimensionierung der Sandfänge in jedem Fall kompakter und daher kostengünstiger zu realisieren. In jedem Fall wird das Geschiebe mit grösserer Korngrösse als die Rechen-Spaltweite vollständig abgewiesen, sodass je nach Zusammensetzung die massenmässige Reduktion der Geschiebemenge durchaus hoch ausfallen kann. Mindestens für die Wartungsintervalle der Sandfänge sollte die Verwendung eines Coanda-Rechens damit signifikante Auswirkungen haben.

Feststoffe, die ins Triebwassersystem gelangen, können dort Abrasionsschäden an hydraulischen Anlagen verursachen. Will man bei Mittel- und Hochdruck-Kraftwerken auf die Anordnung (Grenzkorn je nach Fallhöhe 0.2-0.3 mm) eines Sandfangs verzichten, so empfiehlt es sich aufgrund dieser Versuche, eine maximale Spaltweite von 0.4 mm zu wählen. Solche Spaltweiten neigen jedoch stärker zu Verstopfungen als die Rechen mit 0.6 mm Spaltweite und haben sich daher in den Untersuchungen als nicht ideal erwiesen. Coanda-Rechen mit Spaltweiten von 0.2 mm verstopfen erfahrungsgemäss sehr rasch durch Feinsand und sind für geschiebeführende Gewässer generell nicht zu empfehlen. Ein weiterer Faktor sind Blätter und spezifisch die Stiele von Buchenblättern. Diese verstopfen gemäss Aussagen von Betreibern oftmals Rechen mit einer Spaltweite von 1 mm und darüber. Deshalb werden beim Vorliegen von solchen Pflanzen im Einzugsgebiet von den Herstellern zumeist Rechen mit einer Spaltweite von 0.6 mm empfohlen. Natürlich gibt es zur Lösung dieser Problematik auch andere technische Lösungen wie z.B. Schwimmbalken, jedoch müssen hier auch immer Abwägungen in Hinblick auf die Wartung und den Unterhalt der Anlage miteinbezogen werden.

Abweisungsgrad bei Hochwasser

Durch die hohe Geschiebekonzentration bei Hochwasserereignissen und die gleichzeitig ungünstigere Abweisungscharakteristik ist betrieblich der Räumung der Sandfänge nach einem derartigen Ereignis besondere Aufmerksamkeit zu schenken, da hier von den sonst im Laufe des Jahres üblichen Wartungsintervalle möglicherweise stark abweichende Werte zu erwarten sind.

Coanda-Rechen ohne Coanda-Effekt

Die Anwendung der Coanda-Rechen ist vermutlich auf den Einsatz von feinen siebartigen zylindrischen Anlagen zurückzuführen, die bei der Miningindustrie in den USA oder Kanada zu Einsatz kamen. Dabei wurden Siebe auf einem rotierenden Zylinder angebracht. Diese Zylinderrechen wurden wie ein Wehr in einem Wasserkanal eingebaut, so dass sie vom Oberwasser überströmt werden konnten. In diesem Fall kann der Coanda-Effekt eintreten. Das fliessende Wasser kann sich an der runden (konvexen) Oberfläche des Siebes bzw. des filigranen Rechens anlegen, so dass ein Unterdruck entstehen kann. Hierdurch liegt ein Coanda-Effekt vor. Daraus resultiert, dass der Begriff Coanda-Rechen lediglich als Name für diese Rechenart geeignet ist. Diese Rechen könnten genauso gut Querstabrechen, Schlitzrechen oder Siebrechen heissen.

Bei den Kapazitätstests für eine Rechenbreite von 1.115 m wurden sämtliche untersuchten Rechen in der Versuchsanlage mit Zuflüssen von 50 bis 300 l/s getestet. Der maximale Durchfluss für einen



Laufmeter betrug daher 260 l/s.lfm. Die getesteten Rechen konnten die gesamte Wassermenge vollständig aufnehmen. Die Benetzung des Rechens lag bei 14% für 50 l/s bis 100% bei 300 l/s. Dies deutet darauf hin, dass eine Schluckfähigkeit von 260 l/s.lfm (entspricht Zufluss von 300 l/s der Versuchsanlage) problemlos ohne Überfall möglich ist. Lediglich die Rechen mit Spaltweiten von 2 und 3 mm wiesen eine Überfallmenge von ca. 2% bei einem Durchfluss von 260 l/s.lfm auf.

Mit der Reduktion der Kanalbreite der Versuchsanlage auf 50 cm konnten Durchflüsse von bis zu 600 l/s.lfm erreicht werden. Durch diesen Umbau konnten die Rechen überflutet werden. Die Überfallmenge lag bei 8 bis 13 % für die Rechen mit filigranen Stäben (Wild Metal) im Vergleich zu 37 % bei dem Rechen mit den breiten Stäben (Höhenergie).

Vereisung und Verstopfung

Die Ergebnisse zeigen, dass durch Beklebung des obersten Rechenviertels die Benetzung der Rechenhaut kaum zunahm, und gleichzeitig der Abweisungsgrad der Feststoffe anstieg. Dies deutet auf eine effizientere Feststoffabweisung und grösseres spezifisches Schluckvermögen durch höhere Fließgeschwindigkeiten über der Rechenhaut hin. Die höhere Effizienz bei der Feststoffabweisung erkauft man sich in diesem Fall jedoch mit einer verringerten Fallhöhe. Die mögliche Verkleinerung der Sandfänge und die Verringerung der Fallhöhe müssen im Einzelfall unter dem Aspekt Wirtschaftlichkeit gegeneinander abgewogen werden. Dies sind qualitative Aussagen auf Basis von Beobachtungen, da mit der bestehenden Anlage zum Zeitpunkt der Abklebungen keine Versuche mit ausreichendem Gesamtdurchfluss durchgeführt werden konnten. Die exakte Untersuchung des Zusammenhanges aus geringerem Schluckvermögen, effizienterer Geschiebeabweisung und verringerter Fallhöhe wäre sinnvollerweise Teil eines Folgeprojektes.

Anströmung

Wichtig ist eine Beruhigung der Wasseroberfläche bzw. eine gleichmässige Anströmung des Coanda-Rechens, damit die Schluckfähigkeit optimal ausgeschöpft werden kann. Bei einer Stirnentnahme, die v.a. für kleinere Gewässer angezeigt ist, kann eine regelmässige Anströmung durch einen leichten Gewässerstau im Oberwasser erzielt werden. In diesem Fall sind u.U. konstruktive Massnahmen zur regelmässigen Spülung der Feststoffe notwendig. Bei sehr starker Geschiebeführung ist der Einstaubereich bei einer Seitenentnahme einfacher zu spülen. Die Zuströmung zum Coanda-Rechen muss gleichmässig sein.

Konzeption der Wasserfassung

Wasserfassungen an Gebirgsbächen gehören strömungstechnisch zu den anspruchsvollsten Wasserbauten. Schlechtes Design des Einlaufbauwerks führt zu einem Verlust der Stromerzeugung und zu erhöhten Wartungskosten. Das optimale Design der Wasserfassung ist abhängig von den lokalen Gegebenheiten, dem Gewässercharakter, der Fassungsmenge sowie der Frage, ob ein Neu- bzw. ein Umbau einer Wasserfassung vorzunehmen ist. Im Rahmen der vorliegenden Studie werden diverse mögliche Fassungsstypen vorgestellt, die dem projektierenden Ingenieur eine optimale Anordnung der wasserbaulichen Strukturen ermöglichen sollen. Eine zentrale konzeptionelle Frage ist, ob die Fassung in Form einer Stirnentnahme oder mit einer Seitenentnahme bzw. in einer Kombination davon erfolgen soll.



Entwicklungspotenzial

Die auf dem Markt seit ca. 10 bis 20 Jahren vorhandenen Rechentypen haben sich insgesamt zwar recht gut bewährt und es konnten mit Ihnen je nach Rechentyp bereits langjährige Erfahrungen im praktischen Einsatz gewonnen werden. Dennoch weisen die aktuell verfügbaren Rechentypen vermutlich noch ein beträchtliches technologisches Entwicklungspotential auf. Wünschenswert ist prioritär eine Erhöhung der spezifischen Schluckfähigkeit unter Beibehaltung einer geringen Spaltweite, die Verbesserung der Festigkeit und Dauerhaftigkeit der feingliedrigen Rechenkonstruktion (z.B. gegen abrasiven, quarzhaltigen Sand mittels einer materialtechnologischen Innovation) zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit, die Optimierung des Rechens im Hinblick auf eine Erhöhung des Abweisungsgrads feiner Partikel (damit auf einen Sandfang verzichtet werden kann) sowie die Erhöhung des spezifischen Schluckvermögens (z.B. durch eine optimierte Formgebung des Rechens und der Rechenstäbe). Es wird daher vorgeschlagen, in einem weiterführenden Forschungsprojekt das Entwicklungspotential des Coanda-Rechens weiter auszuloten.

Fischabstieg

Die Ergebnisse der ethohydraulischen Versuche weisen darauf hin, dass der Fischabstieg über den Coanda-Rechen unproblematisch für die Fische funktioniert und keine relevanten Schäden durch den Rechen an sich zu erwarten sind.

Gleichzeitig müssen für einen fischfreundlichen Abstieg noch die passenden Rahmenbedingungen gegeben sein. Es nützt nichts, wenn der Fisch unbeschadet den Coanda-Rechen passieren kann, nur um sich dann im Unterwasser zu verletzen. Daher muss die Gestaltung des Unterwassers in Übereinstimmung mit den Regeln der Technik erfolgen. Anhaltspunkte hierzu liefert die Checkliste «Wiederherstellung der Fischauf- und –abwanderung bei Wasserkraftwerken» des BAFU.

Erkenntnis

Am wichtigsten war die Erkenntnis, dass alle Akteure im Markt bisher auf dieselben wissenschaftlichen Ressourcen zurückgreifen, deren Wurzeln in der Entwicklungsphase des Coanda-Rechens liegen. Planer, Betreiber und Hersteller stützen sich bei der Dimensionierung der Anlagen mit Coanda-Rechen auf Fakten, die offensichtlich aus einer einzigen Quelle stammen und wissenschaftlich fragwürdig sind. Über drei Jahrzehnte wurden Dimensionierungsgrundlagen kopiert, ohne die Quelle dieser Grundlagen in Frage zu stellen. Das Projektteam konnte neue Daten zum Schluckvermögen, Abweisungsgrad von Feststoffen sowie zur Fischverträglichkeit liefern.



6 Ausblick, nächste Schritte nach Projektschluss

6.1 Wissens- und Technologietransfer

Es wird im Hinblick auf den Wissens- und Technologietransfer als zweckmässig erachtet, die Ergebnisse der Forschungsarbeit im Rahmen von Publikationen, Fachvorträgen und Weiterbildungen den interessierten Fachleuten, Amtsstellen, KW-Betreibern und projektierenden Ingenieurbüros zu präsentieren.

Eine internationale Fachtagung hat an der FH Graubünden im November 2020 stattgefunden. Das Ziel war es, Ämter, Wasserkraftbetreiber, Hersteller von Rechen und Turbinen sowie planende und ausführende Ingenieure zu einem fachlichen Austausch zu bewegen und die Ergebnisse dieses Forschungsprojektes zu präsentieren.

6.2 Ausblick und Anschlussprojekte

Zum Beginn dieser Forschungsarbeit musste das IBAR Team feststellen, dass von manchen Herstellern keinerlei Unterstützung zu erwarten war. Trotzdem wurden von wenigen Herstellern zahlreiche Rechen kostenlos zur Verfügung gestellt. Mit den vorliegenden Ergebnissen wird der Entwurf und die Planung von Wasserkraftanlagen mit Coanda-Rechen vereinfacht. Es konnte nachgewiesen werden, dass das Schluckvermögen dieser Rechen wesentlich höher ist, als bisher angenommen. Diese Erkenntnis wird hoffentlich mehr Betreiber dazu führen, Coanda-Rechen als echte und wirtschaftliche Alternative zu Tirolerwehren zu sehen. Allgemein kann bei der Installation eines Coanda-Rechens und idealen Voraussetzungen auf einen Sandfang verzichtet werden. Bei Mittel- und Hochdruckanlagen sowie bei abrasivem Gestein im Einzugsgebiet muss die kritische Korngrösse bestimmt werden. Sollte dann ein Sandfang erforderlich sein, wird dieser bei der Installation eines Coanda-Rechens weniger oft gespült werden müssen, da mit weniger Geschiebe im Triebwasser zu rechnen ist. Ein weiteres wichtiges Ergebnis für die Praxis ist der Nachweis, dass der Coanda-Rechen an sich, bei passender Gestaltung des Unterwassers, einen schonenden Fischabstieg ermöglicht.

Um alle offen gebliebenen Fragen klären zu können, sind weitere Untersuchungen erforderlich.

Mögliche verbleibende Fragen:

- Kann man den namensgebenden Coanda-Effekt tatsächlich nutzbar machen?
- Wie hoch ist das tatsächliche maximale Schluckvermögen, nicht anhand einer Extrapolation, sondern anhand von Messdaten?
- Wie kann man die Geometrie der Rechen anpassen, um die Leistungsfähigkeit weiter zu erhöhen (Einbauwinkel, Rechengrundform, Stabgeometrie, Länge der Beschleunigungsplatte)?
- Welche Auswirkungen haben allenfalls verbaute Schutzrechen auf das Schluckvermögen und die Fischverträglichkeit?
- Gibt es Materialien, mit denen sich ein Coanda-Rechen kostengünstiger herstellen lässt?
- Was kann der Verschleiss der Rechen verringert werden, und wie hoch ist dieser konkret im Einzelfall?



Die vorliegende Arbeit hat sich mit Rechen von zwei Herstellern beschäftigt. Wie im Vorkapitel beschrieben, ist der bekannte Coanda-Effekt bei den untersuchten Coanda-Rechen nicht nachweisbar. Die Rechen werden konkav oder gerade angeordnet. Die erforderliche konvexe Form einer Oberfläche, um einen Coanda-Effekt hervorzurufen, fehlt bei den heutigen Coanda-Rechen-Konstruktionen völlig. Daher wäre es sinnvoll, die Geometrie und bauliche Anordnung der Coanda-Rechen weiter zu erforschen. Ein flacherer Anstellwinkel beim untersuchten Höhenergie-Rechen steigert gemäss Hersteller sein Schluckvermögen. Deshalb könnten die Untersuchungen des Anstellwinkels zur Steigerung der Leistungsfähigkeit auch der anderen bekannten Coanda-Rechen (z. B. der Fa. Wild Metal) führen. Es wäre interessant herauszufinden, ob eine Rechenhaut aus Lochblech oder Maschengitter zu ähnlichen Resultaten führen würde, wie bei den untersuchten Rechen. Des Weiteren wären Rechen mit konvexen Oberflächen zu entwickeln und zu untersuchen, um den Coanda-Effekt tatsächlich erzielen zu können.

Die maximale Schluckfähigkeit der beiden Rechen von Wild Metal ist bei $Q_{zu} = 600 \text{ l/(s.lfm)}$ noch nicht erreicht und konnte somit auch mit der verschmälerten Anlage nicht bestimmt werden. Um die verschiedenen Rechengemetrien für verschiedenen Betriebslastfälle zu optimieren, wäre ein modularer Versuchsstand nötig, welcher Variationen in Rechenneigung und Zulaufstreckenlänge zulässt sowie Druckmessungen am Überfall ermöglicht. Der Aufbau zum mechanischen Schutz der filigranen Rechen «Grizzly» der Fa. Wild Metal kann zur Verschlechterung der Leistungsfähigkeit der Rechen führen. Dieser Aspekt und das genaue Ausmass der Verminderung des Schluckvermögens sollte in Versuchen getestet werden. In weiteren Forschungsarbeiten könnten Rechen mit unterschiedlichen Oberflächen mit z. B. quadratischen, runden oder schlitzartigen Öffnungen untersucht werden, um kostengünstigere Fertigungsmethoden zu erforschen.

Im Weiteren gibt es seitens der FHGR Vorgespräche, zusammen mit einem geeigneten Schweizer Wirtschaftspartner ein weiterführendes Innosuisse-Projekt zur Verschleissfestigkeit des Coanda-Rechens (Verbesserung mittels Beschichtung) durchzuführen.

Aus Sicht der Ethohydraulik wäre es interessant, den Einfluss eines Schutzrechens (z.B. Wild Metal Grizzly) auf Fischverletzungen zu untersuchen. Zudem könnten auch höhere Fliessgeschwindigkeiten über dem Rechen, wie sie beispielsweise bei Hochwasserabfluss vorkommen, zu bisher noch nicht quantifizierten Fischschäden führen.

Diese weiterführenden Untersuchungen bedingen einen neuen Versuchsstand oder umfangreiche Anpassungen am Modell, welches in den bisherigen Untersuchungen an der VAW verwendet wurde.



7 Referenzen

7.1 Literatur

Fachliteratur, wissenschaftliche Arbeiten

- Bagliniere J-L., Leclerc C. & Richard A., 1986. Comparaison entre l'age et la croissance determines par scalimetrie et otolimetrie chez la truite de mer (*Salmo trutta*). Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems, 301, 56-66.
- Bestgen, K. R., Bundy, J.M., Zelasko, K.A., 2001. Exclusion and survival rates of early life stages of fathead minnows released over inclined wedge-wire screens. Contribution 116 of the Larval Fish Laboratory.
- Bestgen, K. R., Bundy, J.M., Zelasko, K.A., Wahl, T. L., 2004. Effectiveness of high-velocity inclined profile-bar fish screens measured by exclusion and survival of early life stages of fathead minnow. North American Journal of Fisheries Management 24: 1228-1239.
- Buell, J. W., 2000. "Biological Performance Tests of East Fork Irrigation District's Sand Trap and Fish Screen Facility: phase I—1999." Buell and Associates, Final Report to the East Fork Hood River Irrigation District, Parkdale, Oregon.
- Cook Ryan, ohne Jahresangabe. Simply green: Coanda Power Systems for Small Hydro.
- Cox A., Thornton C.L., Turner M.D., 2008: Norris Screen and Manufacturing, Inc. Coanda Intake Design Project Report 2008, Colorado State University, Fort Collins, Colorado
- Entec AG, Hans Marugg & Partner, 1998: Pilotprojekt COANDA Feinrechen für kleine Wasserkraftanlagen, Schlussbericht im Rahmen des Programms „Energie 2000“, 18.12.1998
- Jenssen Lars, Huber Dorothee, 2005: Laboratory Testing of Coanda effect Screens for small hydro intakes, Institutt for Vann- og Miljøteknikk, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norwegen
- Love, D. C. 2016. Manual for aging steelhead trout scales based on scale sampling from Sitkoh Creek, Big Ratz Creek, and other Southeast Alaska streams, 2003-2011. Alaska Department of Fish and Game, Special Publication No. 16-13, Anchorage.
- Ott, R. F. & Strong, J. J., 1988. "Intake Screens for Small Hydro Plants." Hydro-Review, vol. VII, no. V.
- Wahl Tony L., 2013: New Testing of Coanda-Effect Screens Capacities, Bureau of
- Wahl Tony L., 2003: Design Guidance for Coanda-Effect Screens, Bureau of Reclamation, Hydraulic Laboratories, Denver, Colorado
- Wahl Tony L., 2001: Hydraulic Performance of Coanda-Effect Screens, Journal of Hydraulic Engineering, June 2001, 480 - 488
- Wahl Tony L., Einhellig Robert F., 2000: Laboratory Testing and Numerical Modeling of Coanda-Effect Screens, 2000 Joint Conference on Water Resources Engineering and Water Resources Planning & Management, Minneapolis, Minnesota
- Wahl, Tony L., 1995: Hydraulic Testing of Static Self-Cleaning Inclined Screens. Proceedings of the First International Conference on Water Resources Engineering, ASCE, San Antonio, Texas, August 14-18, 1995.



- Nøvik, Hanne & Lia, Leif & Opaker, Henrik, 2014. Performance of Coanda-Effect Screens in a Cold Climate. *Journal of Cold Regions Engineering*. 28. 04014006. 10.1061/(ASCE)CR.1943-5495.0000073.
- Lifa, Imad & Schlegel, Franco, 2017. Optimierung der Coanda-Rechen für Schweizer Gewässer. Bundesamt für Energie BFE, Energieforschung.
- Summerfelt RC, Smith LS (1990) Anesthesia surgery and related techniques. In: Schreck CB Moyle PB, editors. *Methods for Fish Biology*. Bethesda: American Fisheries Society pp. 213–272.

Lehrbücher, Skripts

- Boes Robert, 2013: Wasserbau II. Vorlesungs-Skript ETH Zürich
- Bundesamf für Umwelt, BAFU, Wiederherstellung der Fischeauf- und abwanderung bei Wasserkraftwerken, 2012. Nummer: UW-1210.
- Ebel, G. (2016). Fischschutz und Fischabstieg an Wasserkraftanlagen – Handbuch Rechen- und Bypasssysteme. Ingenieurbioologische Grundlagen, Modellierung und Prognose, Bemessung und Gestaltung. ISBN 9783540437130. 2. Auflage. Büro für Gewässerökologie und Fischereibiologie Dr. Ebel, Halle (Saale).
- Giesecke Jürgen, Mosonyi Emil, 2009. Wasserkraftanlagen., Planung, Bau und Betrieb, 5. Auflage. Springer Verlag Berlin. ISBN 978-3-540-88989-2.
- Lier Peter, Speerli Jürg, M. Niederer Marisa, 2014: Skript Wasserkraftanlagen, HSR, Rapperswil
- Nachtnebel Hans-Peter, 2008: Konstruktiver Wasserbau und Flussgebietsmanagement, Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiver Wasserbau, Vorlesungs-Script Universität für Bodenkultur BOKU, Wien
- Patt Heinz, Gonsowski Peter, 2010: Wasserbau. 7. Auflage, Begründet von Daniel Vischer und Andreas Huber, Springer Verlag, Heidelberg
- Schlegel Franco, 2015: Vorlesungsunterlagen, HTW Chur

Websites von Rechenherstellern:

- Andaco GmbH, andaco.ch
- Aquashear Coanda Screens, Dulas Ltd., aquashear.com
- Bilfinger Water Technologies GmbH, water.bilfinger.com
- Coanda Inc., coanda.com
- Coanda Water Intakes Ltd., coandawaterintakes.com
- Elging Equipment Group, elginwatersolutions.com
- Hoehenergie, hoehenergie.ch
- Hydroscreen Co. LLC, hydroscreen.com
- neromylos Kraftwerksbau & Engineering GmbH, neromylos.com
- Stocker Mechatronik GmbH, wasserkraft.npage.at



- Welco Ltd., welco.ca
- Wild Metal GmbH, wild-metal.com

7.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Tirolerwehr in Kolsassberg (Österreich).....	12
Abbildung 2: Fassung am Vallerbach bei Vals, Südtirol (Italien); Blick gegen die Fliessrichtung.....	14
Abbildung 3: Coanda-Rechen mit obenliegendem Schutzrechen. Suonen-Fassung Obere und untere Bitscheri, Gemeinde Naters, Kt. Wallis, Kapazität 200 l/s, Quelle: unbekannt.....	16
Abbildung 4: Grosse Wasserfassung mit einem Coanda-Rechen in Kanada, Fabrikat: Norris Screen, Brandywine Creek Hydroelectric Project, Kapazität: 4'000 l/s, Quelle: unbekannt	17
Abbildung 5: Fassung am Gorpatbach, Gde Eischoll (VS). Coanda-Rechen der Fa. Andaco GmbH. Der oben sichtbare Schutzrechen mit runden Stäben ist gegenüber dem Coanda-Rechen versetzt angeordnet. Das Grobgeschiebe wird über den Schutzrechen abgeführt	19
Abbildung 6: Grizzly-Rechen der Fa. Wild Metal GmbH; Module mit verschiedenen Schutzrechenausführungen. a) Grizzly Power Protec b) Grizzly Power Titan c) Grizzly Power Optimus. Quelle: wild-metal.com.....	20
Abbildung 7: Coanda-Rechen (QWehr-Rechen Ravensburg) der Fa. Stocker Technik GmbH. Quelle: www.stockertechnik.at21	
Abbildung 8: a) und b) patentierter Coanda-Rechen der Fa. HOEHENERGIE mit dem speziellen Lamellenprofil. Quelle: Homepage hoehenergie.ch. c) Systemskizze Höhenergie (Bec de Canard). d) Systemskizze IBAR (altes System DS Avale)....	22
Abbildung 9: Bec de Canard 1.05 mm Spaltweite, Durchfluss 100 l/s.lfm.....	23
Abbildung 10: Modellversuch am Coanda-Rechen im Bureau of Reclamation, Denver, Colorado (USA) (Wahl, 2003).....	24
Abbildung 11: Versuchsanlage zur Durchführung von Modellversuchen an der Universität Trondheim, Norwegen (Jensen und Huber, 2005); Modell a) in der Seitenansicht und b) in der Aufsicht	25
Abbildung 12: In Situ Versuche am Mühlbach, Oberschan SG.	28
Abbildung 13: Siebkurve Feldversuch Mühlbach: Korngemische Sand 0/4 und Kies 0/16.....	30
Abbildung 14: Abweisungsgrad Feldversuch Mühlebach.....	31
Abbildung 15: Übersichtskarte Coanda-Rechen in der Schweiz und im nahen Ausland, Stand Dez. 2016	33
Abbildung 16: Aufsicht der Versuchsvorrichtung	34
Abbildung 17: Seitenansicht der Versuchsvorrichtung	35
Abbildung 18: Aufbau Versuchsanlage. a) Seitenansicht mit Einlaufbecken aus Stahl am rechten Bildrand. b) Zulauf mit Regulierungsrad (roter Pfeil).	36
Abbildung 19: Zulaufstrecke der Versuchsanlage. Die blauen Pfeile markieren die Fliessrichtung. a) Frontansicht, im Hintergrund befindet sich die Einlaufwanne aus Stahl. Eine hellblaue Styroporplatte schwimmt an der Wasseroberfläche und dient der Wasserberuhigung. b) Aufsicht mit Überfall und eingesetztem Coanda-Rechen.....	36
Abbildung 20: Ablauf im Keller, weisser Geschiebesack ist knapp erkennbar hinter der Schalltafel (roter Pfeil) und Rücklauf (nicht auf dem Bild).....	37
Abbildung 21: Versuchsstand auf 0.5 m verschmälert, blaue Pfeile zeigen die Fliessrichtung an	37
Abbildung 22: Siebkurven des Ausgangsmaterials	39
Abbildung 23: Vergleich reguläre und langsame Geschiebezugabe bei 89.7 l/s.lfm und 1.00 mm Spaltweite	40
Abbildung 24: Vergleich der Abweisungsgrade bei langsamer, regulärer und schneller Zugabe bei 400 l/s.lfm beim Rechen Sb18 0.6 mit 0.6 mm Spaltweite	41
Abbildung 25: Gemittelte Siebkurven des Ausgangsmaterials.....	44
Abbildung 26: Analysensiebmaschine EML 450 Digital Plus T der Marke Haver & Boecker	44
Abbildung 27: Geschiebeaufgabe, die blaue Pfeile markieren die Fliessrichtung. a) mit Eimer und b) mit Geschiebesack	46
Abbildung 28: Die blauen Pfeile markieren die Fliessrichtung des Wassers. a) Geschiebeauffangsack beim Triebwasserablauf b) Wasserkreislauf Unterbecken/Rücklauf. c) Trocknungsöfen	46
Abbildung 29: a) , b) Elektrische Abfischung mittels Anode, Kescher und Eimer.....	47
Abbildung 30: Hälterungsboxen. a) Transportbehälter b) Hälterungsbecken im Labor.....	47
Abbildung 31: Einlesemethodik. a) PIT Tag, welcher den Fischen in die Bauchhöhle eingesetzt wird. b) Einlesegerät zur eindeutigen Identifikation	48
Abbildung 32: Hälterung der Fische. a) Hälterungsbecken mit Aufwachnetzen b) Küvette mit Wasser und Fisch fürs einfachere Fotografieren.....	49
Abbildung 33: Zulauf, Wehr und Kolk mit Netz	50
Abbildung 34: Schuppenverluste wurden mit dem freehand tool markiert (schwach erkennbar sind gelb umkreiste Flächen, mit roten Pfeilen wird darauf hingewiesen); oben : nach dem Versuch, unten : vor dem Versuch	51



Abbildung 35: Gesamtfläche wurde mit dem polygon tool (gelbe Umrandung) beim oberen Bild markiert; **oben**: nach Versuch, unten: vor Versuch 52

Abbildung 36: Klarwasserversuche mit 44.8 l/s.lfm Durchfluss, die blauen Pfeile markieren die Fließrichtung. Die Bilder **a)** bis **f)** zeigen die Überströmung der Standardrechen Sb18 von Wild Metal GmbH mit Spaltweite 0.4 bis 3.0 mm. 54

Abbildung 37: Klarwasserversuche mit 89.7 l/s.lfm Durchfluss, die blauen Pfeile markieren die Fließrichtung. Die Bilder **a)** bis **f)** zeigen die Überströmung der Standardrechen Sb18 von Wild Metal GmbH mit Spaltweite 0.4 bis 3.0 mm. 56

Abbildung 38: Klarwasserversuche mit 134.5 l/s.lfm Durchfluss, die blauen Pfeile markieren die Fließrichtung. Die Bilder **a)** bis **f)** zeigen die Überströmung der Standardrechen Sb18 von Wild Metal GmbH mit Spaltweite 0.4 bis 3.0 mm. 58

Abbildung 39: Klarwasserversuche mit 179.4 l/s.lfm Durchfluss, die blauen Pfeile markieren die Fließrichtung. Die Bilder **a)** bis **f)** zeigen die Überströmung der Standardrechen Sb18 von Wild Metal GmbH mit Spaltweite 0.4 bis 3.0 mm. 60

Abbildung 40: Klarwasserversuche mit 224.2 l/s.lfm Durchfluss, die blauen Pfeile markieren die Fließrichtung. Die Bilder **a)** bis **f)** zeigen die Überströmung der Standardrechen Sb18 von Wild Metal GmbH mit Spaltweite 0.4 bis 3.0 mm. 62

Abbildung 41: Klarwasserversuche mit 269 l/s.lfm Durchfluss, die blauen Pfeile markieren die Fließrichtung. Die Bilder **a)** bis **f)** zeigen die Überströmung der Standardrechen Sb18 von Wild Metal GmbH mit Spaltweite 0.4 bis 3.0 mm. 64

Abbildung 42: Klarwasserversuche mit dem Spezialrechen Sb34 1.0 mm, die blauen Pfeile markieren die Fließrichtung. Die Bilder **a)** bis **f)** zeigen die Überströmung bei unterschiedlicher Durchflussrate. 66

Abbildung 43: Gemessene Schluckfähigkeit Q_s (Kreissymbole) auf der verschmälerten Anlage (maximale Beaufschlagung $Q_{zu} = 600$ l/s.lfm) und empirische Funktionen (gepunktete Linie) für die Abschätzung der maximalen Schluckfähigkeit $Q_{s,max}$. .. 68

Abbildung 44: Drucklinienvergleich der verschiedenen Rechen bei 300 l/s.lfm und 600 l/s.lfm 70

Abbildung 45: Vergleich der Fließgeschwindigkeiten bei 300 l/s.lfm und 600 l/s.lfm Abfluss bei verschiedenen Rechen 71

Abbildung 46: Klarwasserversuche am Rechen Sb18 1.0 von Wild Metal GmbH auf der verschmälerten Anlage, blaue Pfeile markieren die Fließrichtung. **a)** mit Durchfluss 400 l/s.lfm **b)** mit Durchfluss 600 l/s.lfm 72

Abbildung 47: Ermittlung der Schluckfähigkeit bei verlängerter Beschleunigungsstrecke mit halber Abklebung vom oberen Rechenrand für den Rechen Sb18 1.0. **a)** bis **f)** zeigen Fotos mit unterschiedlichen Durchflussmengen..... 74

Abbildung 48: Ermittlung des Schluckvermögens bei schrittweiser Verlängerung der Beschleunigungsstrecke am Rechen Sb18 1.0. Die Fotos a) bis e) stellen eine zunehmende Abklebung dar 75

Abbildung 49: Vergleich Durchflüsse beim Sb18 1.0 mm Rechen mit Kantkorn 0-4 mm 76

Abbildung 50: Abweisungscharakteristik mit dem Vergleich aller Rechen bei 89.7 l/s.lfm 79

Abbildung 51: Abweisungscharakteristik aller Standardrechen (Sb) von Wild Metal bei 89.7 l/s.lfm mit Kant- und Rundkorn 81

Abbildung 52: Abweisungscharakteristik von Rechen unterschiedlicher Hersteller mit Kantkorn 0 – 4 mm 84

Abbildung 53: Abweisungscharakteristik bei Durchflüssen 100 - 600 l/s.lfm beim Rechen Sb18 0.6 mit Kantkorn 0-4 mm ... 85

Abbildung 54: Abnutzung des verschlissenen Rechens mit Spaltweite 0.6 mm Wild Metal (oben) und eines neuen Rechens (unten)..... 87

Abbildung 55: Vergleich der Abweisungsgrade am neuen und am verschlissenen Rechen Sb18 0.6 mit Kantkorn 0 – 4 mm 88

Abbildung 56: Abweisungsgrad von Rundkorn 0 – 8 mm am verschlissenen Rechen Sb18 0.6 89

Abbildung 57: Überströmung bei Abklebung der oberen Rechenhälfte beim Sb18 1.0, Durchfluss 134.5 l/s.lfm 90

Abbildung 58: Abweisungsgrad bei ½- und ¼-Abklebung beim Sb18 1.0, Durchfluss 134.5 l/s.lfm 91

Abbildung 59: Seitliche Abklebung des Rechens Sb18 1.0 jeweils in Drittelschritten. 92

Abbildung 60: Abweisungsgrad bei einer seitlichen Abklebung am 1.0 mm Rechen, Durchfluss 134.5 l/s.lfm 92

Abbildung 61: Gesamtheit der Schuppenverluste aller Fische bei beiden Durchflussraten und beiden Rechentypen..... 96

Abbildung 62: Beispiel Kontrollfisch Nr. 1 mit 0.86 % Schuppenverlust, oben vor dem Handling, Mitte nach dem Handling, unten sind die Schuppenverluste rot eingekreist..... 99

Abbildung 63: Beispiel Rechenfisch Nr. 2 mit 0.80 % Schuppenverlust, oben vor dem Rechenabstieg, Mitte nach dem Abstieg, unten sind die Schuppenverluste nach dem Abstieg rot eingekreist. 100

Abbildung 64: Beispiel Kontrollfisch Nr. 3 mit 0.70 % Schuppenverlust, oben vor dem Handling, in der Mitte nach dem Handling, unten sind die Schuppenverluste rot eingekreist..... 101



7.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Rechentypen der Firma Wild Metal GmbH und ihre Marktanteile.....	9
Tabelle 2: Charakteristische Korngrößen zur Bemessung von Sandfängen (vgl. Giesecke & Mosonyi, 2009)	13
Tabelle 3: Hersteller- und Vertriebsfirmen von Coanda-Rechen.....	17
Tabelle 4: Für das Projekt verwendete Coanda-Rechen.....	20
Tabelle 5: Technische Daten Schluckvermögen der unterschiedlichen Modelle (Höhnenergie-Rechentypen)	22
Tabelle 6: Ergebnisse der Sedimenttests von Jenssen und Huber, 2005. Modifiziert nach einheitlicher Rechenbreite.	26
Tabelle 7: Korngrößenverteilung Unterstufe Palüdbach.....	27
Tabelle 8: Gesamtübersicht aller durchgeführter Versuche	38
Tabelle 9: Angaben zum Versuch verschieden schneller Zugabe	41
Tabelle 10: Verwendetes Ausgangsmaterial	43
Tabelle 11: Durchgeführte Geschiebeversuche	44
Tabelle 12: Überfallwassermenge in l/s der Standardrechen von Wild Metal bei verschiedenen Durchflüssen.....	52
Tabelle 13: Rechenbenetzung der Standardrechen Sb18 bei verschiedenen Durchflüssen	53
Tabelle 14: Maximales Schluckvermögen gemäss den empirischen Funktionen in Abbildung 43 für verschiedene, im hydraulischen Modellversuch getestete Rechentypen	69
Tabelle 15: Abweisungsgrad bis zur halben und bis zur ganzen Spaltweite des Sb18 1.0 Rechens (aufsummiert)	77
Tabelle 16: Abweisungsgrad bis zur halben und bis zur ganzen Spaltweite des Sb18 0.6 Rechens (aufsummiert).*) Die Werte bei den Durchflüssen 400 l/s.lfm und 600l/s.lfm wurden mit der verschmälerten Anlage ermittelt.....	77
Tabelle 17: Abweisungsgrad bis zur halben und bis zur ganzen Spaltweite des Sb18 0.4 Rechens	77
Tabelle 18: Abweisungsgrad bis zur halben und bis zur ganzen Spaltweite des Sb18 1.5 Rechens	77
Tabelle 19: Abweisungsgrad bis zur halben und bis zur ganzen Spaltweite des Sb18 2.0 Rechens	78
Tabelle 20: Abweisungsgrad bis zur halben und bis zur ganzen Spaltweite des Sb18 3.0 Rechens	78
Tabelle 21: Abweisungscharakteristik der Standardrechen von Wild Metal (Sb18) bei 89.7 l/s.lfm für Kant- und Rundkorn. Die Werte sind auf die jeweils halbe oder ganze Spaltweite des jeweiligen Rechens aus dem Diagramm in Abbildung 51Abbildung 1 interpoliert.	81
Tabelle 22: Abflusstiefen und Fließgeschwindigkeiten 2 m oberhalb der Überfallschwelle für beide Rechen Sb18 0.6 und Sb18 1.0.....	93
Tabelle 23: Schwimmdauer für Bachforellen unterschiedlicher Körperlängen für die Zuflussgeschwindigkeiten während den Fischversuchen im verschmälerten Modell (nach Ebel, 2016)	93
Tabelle 24: Verwendete Bachforellen	94
Tabelle 25: Generelles Versuchsprotokoll.....	94
Tabelle 26: Vier Kombinationsmöglichkeiten der beiden Fischgrößenklassen und der beiden Durchflüsse für die zweiseitigen Mann-Whitney-U Tests	95
Tabelle 27: Statistische Auswertung Fischversuche, Untersuchung auf Signifikanz.....	97
Tabelle 28: Schwimmrichtung der Fische über dem Coanda-Rechen	98



7.4 Anhang

Anhang 1: Verzeichnis der im Vorprojekt untersuchten Coanda-Rechen

Anhang 2: Siebkurven Ausgangsmaterial

Anhang 3: Gemessene Abflusstiefen der einzelnen Rechen

Anhang 4: Gemessene Fließgeschwindigkeiten der einzelnen Rechen

Anhang 5: Studie der Firma Höhenergie

Anhang 6: Abweisungsgrade der verschiedenen Rechentypen für Rund- und Kantkorn bei verschiedenen Durchflüssen

Anhang 7: Schuppenverluste der einzelnen Konfigurationen