



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und
Kommunikation UVEK

Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung

Schlussbericht 15.12.2016

Optimierung der Coanda-Rechen für Schweizer Gewässer





HTW Chur



Institut für Bauen
im alpinen Raum

Datum: 15. Dezember 2016

Ort: Bern

Auftraggeberin:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm „Wasserkraft“
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Kofinanzierung:

Hochschule für Technik und Wirtschaft HTW
Institut für Bauen im alpinen Raum IBAR
Pulvermühlestrasse 80
CH – 7000 Chur

www.htwchur.ch

Auftragnehmer/in:

Hochschule für Technik und Wirtschaft HTW
Institut für Bauen im alpinen Raum IBAR
Pulvermühlestrasse 80
CH – 7000 Chur

www.htwchur.ch

Autor/in:

Prof. Dr. Imad Lifa, HTW Chur
Franco Schlegel, HTW Chur
Sascha Dosch, HTW Chur

Imad.Lifa@htwchur.ch
Franco.Schlegel@htwchur.ch
Sascha.Dosch@htwchur.ch

BFE-Bereichsleitung:

Dr. Michael Moser

Michael.Moser@bfe.admin.ch

BFE-Programmleitung:

Dr. Klaus Jorde

Klaus.Jorde@kjconsultin.net

BFE-Vertragsnummer:

SI/501288-01

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

Bundesamt für Energie BFE

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen; Postadresse: CH-3003 Bern
Tel. +41 58 462 56 11 · Fax +41 58 463 25 00 · contact@bfe.admin.ch · www.bfe.admin.ch



Zusammenfassung

Die Fassung von 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 Arbeit wurden verschiedene in Betrieb stehende Anlagen analysiert. Dabei konnten die bekannten Vorteile bestätigt werden, wie zum Beispiel das Fernhalten eines grossen Anteils von Geschwemmsel vom Triebwassersystem, Selbstreinigung des Rechens, geringe Betriebs- und Wartungskosten, 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. Die aktuell verfügbaren Rechentypen weisen vermutlich noch technologisches Entwicklungspotential auf – betreffend Erhöhung der spezifischen Schluckfähigkeit, Verbesserung der Dauerhaftigkeit und Erhöhung des Abweisungsgrades. Diese Optimierungen sollten Gegenstand von weiterführenden Forschungsarbeiten sein.

Résumé

En Suisse, l'aménagement d'installations hydroélectriques sur des torrents de montagne le plus souvent à haut débit est, la plupart du temps, réalisé au moyen de prises d'eau du type "par en-dessous" (prises tyroliennes). Depuis quelques années des prises d'eau Coanda sont également de plus en plus souvent utilisées. Dans le cadre de ce travail, différentes installations actuellement en fonctionnement ont été analysées ce qui a permis de confirmer leurs atouts principaux (une grande partie des déchets flottants est tenue à l'écart du système d'eau turbinée, auto-nettoyage de la prise d'eau, faibles coûts de fonctionnement et de maintenance, investissements réduits en cas de renoncement à un dessableur, ichtyocompatibilité). Des essais sur le terrain ont cependant montré que les hypothèses, largement partagées, concernant le degré de rejet des matières solides sont trop élevées, d'où des prises de mesures souvent nécessaires visant à rejeter les fines. Les types de prises d'eau disponibles actuellement présentent vraisemblablement un potentiel d'accroissement technologique non négligeable en ce qui concerne l'augmentation de la capacité de débit, l'amélioration de la durabilité et l'augmentation du degré de rejet. Ces optimisations devraient faire l'objet de travaux de recherche complémentaires.

Abstract

In Switzerland, hydropower plants at mountain torrents with heavy bedload are mostly constructed with a Tyrolean Weir. For several years now, Coanda screens have been increasingly applied as an alternative solution. The present research project analyses several existing hydropower plants where Coanda screens are installed. Some of the known advantages of Coanda screens could be confirmed: reduction of bedload, self-cleaning capacity, low maintenance cost, spar of a sand trap and fish migration. However, the field experiments also showed some different results: The prevalent assumptions regarding the deposit grad of solids through the screen are too high. A higher amount of fine solids than assumed pass the screens. Further measurements for the reduction of fine solids often stay necessary. The types of Coanda screens currently available bear a high potential for further technological development. The experiments indicate that the injectivity, performance and durability of Coanda screens can be increased. The optimising of Coanda screens should therefore be continued in further research projects.



1.	Inhaltsverzeichnis	
2.	Zusammenfassung	6
3.	Ausgangslage	8
4.	Ziel der Arbeit	12
5.	Grundlagen-Randbedingungen	15
5.1	Wasserfassungen an Gebirgsbächen	15
5.1.1	Typen von Wasserfassungen	15
5.1.2	Erfordernisse der Gewässer- und Fischökologie an Wasserfassungen	17
5.2	Bekannte Vor- und Nachteile des Coanda-Rechens	18
5.2.1	Bekannte Vorteile des Coanda-Rechens	18
5.2.2	Bekannte Nachteile des Coanda-Rechens	19
5.3	Rechenhersteller und Vertriebsfirmen	19
5.3.1	Bezeichnungen	19
5.3.2	Funktionen, Zweck	19
5.3.3	Rechenhersteller	20
5.4	Kurzbeschreibung der Rechentypen, Dokumentationen der Rechenhersteller	21
5.4.1	Coanda-Rechen der Firma Andaco GmbH (Aquashear Coanda Screns, Dulas Ltd)	21
5.4.2	Coanda-Rechen der Firma Wild Metal GmbH	23
5.4.3	Coanda-Rechen der Firma Stocker Mechatronik GmbH	23
5.4.4	Coanda-Rechen der Firma HOEHENERGIE	25
5.5	Forschungsberichte	25
5.5.1	Kapazitätstests	25
5.5.2	Feststofftests	27
5.6	Patente	29
5.7	Verbreitung des Coanda-Rechens in Europa und Übersee	29
5.7.1	Übersicht der Coanda-Rechen in der Schweiz	29
6.	Konzept-Anlagenbeschrieb	30
7.	Vorgehen / Methode	31
7.1	Arbeitsphase 1: Grundlagen	31
7.2	Arbeitsphase 2: Analyse von 22 Anlagen	31
7.3	Arbeitsphase 3: Abweisungsgrad der Feststoffe	31
7.3.1	Feldversuch Mühlbach, Oberschan (SG)	32
7.3.2	Probenahme Samina, Frastanz (A)	34
7.3.3	Probenahme Palüdbach, Brand (A)	35
7.4	Arbeitsphase 4: Echtzeit-Schwebstoff-Monitoring	37
7.5	Arbeitsphase 5: Hydraulische Modellversuche zur Feststoffabweisung	37
8.	Ergebnisse / Erkenntnisse	38



8.1	Arbeitsphase 1: Grundlagen	38
8.2	Arbeitsphase 2: Analyse von 22 Anlagen	38
8.2.1	Kurzbeschreibung der begangenen Anlagen	39
8.3	Arbeitsphase 3: Abweisungsgrad der Feststoffe (2016)	43
8.3.1	Feldversuch Mühlbach, Oberschan (SG)	43
8.3.2	Probenahme Samina, Frastanz (A)	47
8.3.3	Probenahme Palüdbach, Brand (A)	48
8.4	Zusammenfassende Ergebnisse und Planungshilfen	49
8.4.1	Volle Schluckfähigkeit erfordert eine gleichmässige Anströmung	49
8.4.2	Stirn- oder Seitenentnahme	50
8.4.3	Schutzeinrichtungen für Geschiebe- und Holztrieb	50
8.4.4	Verschleiss der Rechenstäbe	52
8.4.5	Verkalkung der Rechenstäbe	53
8.4.6	Vereisung des Coanda-Rechens im Winter	53
8.4.7	Fischaufstieg und Fischabstieg	53
8.4.8	Verlegung des Bachlaufs infolge Hochwasserereignis	54
9.	Diskussion / Würdigung der Ergebnisse / Erkenntnisse	55
9.1	Forschungsergebnisse	55
9.1.1	Arbeitsphase 1: Grundlagen Beschaffung. Internationale Recherche. Physikalische und numerische Modelle	55
9.1.2	Arbeitsphase 2: Analyse und Dokumentation von 22 Coanda-Rechen	56
9.1.3	Arbeitsphase 3: Ermittlung des Abweisungsgrads von Feststoffen in Betrieb stehender Coanda-Rechen im Feldversuch	58
9.1.4	Verzicht auf Arbeitsphase 4: Echtzeit-Schwebstoff-Monitoring	61
9.1.5	Arbeitsphase 5: Hydraulische Modellversuche zur Feststoffabweisung	62
9.1.6	Weiterbildungsveranstaltung im Frühjahr 2017	62
10.	Schlussfolgerungen	63
11.	Ausblick, nächste Schritte nach Projektschluss	66
11.1	Wissens- und Technologietransfer im 2017	66
11.2	Ausblick und Anschlussprojekte	66
12.	Referenzen	67
12.1	Literatur	67
12.2	Abbildungsverzeichnis	68
12.3	Tabellenverzeichnis	70
13.	Anhang	70



2. Zusammenfassung

Sanierungen, Aus- und Neubauten von Wasserkraftanlagen haben in der Schweiz sowohl wirtschaftlich als auch umweltverträglich zu erfolgen. Eine wichtige Ingenieuraufgabe betrifft die zweckmässige Gestaltung der Wasserfassungen an den meist geschiebereichen Schweizer Gebirgsbächen. Seit einigen Jahren werden dafür neben den üblichen Fallrechen (Tirolerwehre) vermehrt auch Coanda-Rechen eingesetzt. Die Erfahrungen mit den Coanda-Rechen sind dabei sehr verschieden. Zwar sind zahlreiche Herstellerprospekte und auch vereinzelte wissenschaftliche Studien über Coanda-Rechen zu finden, umfassende hydraulische Modellversuche, insbesondere zum Ausscheidungsgrad von Feststoffen, sowie systematisch aufgebaute Planungshilfen, welche auch die natürlichen Randbedingungen berücksichtigen, gibt es jedoch nicht.

Während in Amerika und in Neuseeland die innovative Technologie des Coanda-Feinrechens recht bekannt ist, wurde diese in der Schweiz lange eher zögerlich angewendet. Eine erste Pilotanlage in der Schweiz wurde durch „Energie 2000“ gefördert und 1998 am Rappierbach in der Gemeinde Hinterrhein GR erstellt. Bis Ende 2016 wurden in der Zwischenzeit ca. 50 Anlagen in der Schweiz erstellt, das sind jedoch deutlich weniger Anlagen als z.B. in Österreich oder im Südtirol.

Wichtigste Erkenntnisse des Forschungsprojekts und Empfehlungen für die Praxis:

- **Rechenhersteller / Rechentypen:** Die internationale Recherche ergab, dass weltweit rund ein Dutzend Firmen Coanda-Rechen herstellen. Davon gibt es wenige patentierte Typen. In der Schweiz stellt aktuell keine grössere Firma Coanda-Rechen her. 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 von Schwemmgut (Geschwemmsel) vom Triebwassersystem, Selbstreinigung des Rechens, geringe Betriebs- und Wartungskosten, bei Verzicht auf einen Sandfang geringere Anlagekosten, Fischfreundlichkeit).
- **Spaltweite und Abweisungsgrad von Feststoffen:** Im Rahmen eines Feldversuchs am Coanda-Rechen am Mühlbach (Oberschan, SG; Spaltabstand 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 der ganze bzw. der halbe Spaltabstand des Rechens sind, ist somit ungünstiger als von den Rechenherstellern in ihren Werbebroschüren suggeriert.



- **Spaltweite und Anordnung eines Sandfangs:** Feststoffe, die ins Triebwassersystem gelangen, können dort Abrasionschäden 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. Da das Grenzkorn für Sandfänge in der Schweiz bei 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 kleineres, spülbares Absatzbecken nach dem Coanda-Rechen zu empfehlen. Spaltweiten von 0.2 mm verstopfen erfahrungsgemäss rasch durch Feinsand und sind für geschiebeführende Gewässer daher nicht zu empfehlen.
- **Wassermenge:** Ein Schwachpunkt des Coanda-Rechens ist die im Vergleich zu einem Tirolerwehr relativ geringe spezifische Schluckfähigkeit, die stark von der Spaltweite und der Bauhöhe des Rechens abhängig ist (je nach Modell 50 bis 250 l/s/m). Damit ergeben sich bei grösseren Fassungen grossen Rechenbreiten. So erfordert die derzeit europaweit grösste Wasserfassung mit einem Coanda-Rechen (Fassungsmenge 4'000 l/s bei St. Leonhard am Pitzbach, Tirol) eine Rechenbreite von 25 m. Mit einem Tirolerwehr kann demgegenüber eine deutlich grössere spezifische Wassermenge bis ca. 2'000 l/s/m gefasst werden.
- **Anströmung:** Wichtig ist eine Beruhigung der Wasseroberfläche bzw. eine gleichmässige Anströmung des Coanda-Rechens, damit die im Vergleich zu einem Tirolerwehr 10- bis 20-mal kleinere spezifische 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.
- **Fallhöhenverlust:** 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 und ist bei Hochdruck-Kraftwerken wirtschaftlich unbedeutend.
- **Geschiebe:** Für ein einwandfreies Funktionieren ist stets das Gesamtsystem „Wasser und Geschiebe“ zu betrachten und eine massgeschneiderte konstruktive Ausgestaltung der Fassung zu wählen. Zum Schutz des feingliedrigen Rechens vor grobem Geschiebe und Treibgut hat sich die Vorschaltung eines robusten Grobrechens bzw. eines Tirolerwehrs gut bewährt. Zur Spülung des Geschiebes sind diverse konstruktive Massnahmen denkbar, wie z.B. der Bau eines Klappschützenwehrs, die Anordnung einer separaten Spülschütze, der Einbau von Spülrohren oder der Einbau einer Spülrinne quer zur Flussrichtung unmittelbar vor der Fassungsschwelle.



- **Konzeption der Wasserfassung:** Wasserfassungen an Gebirgsbächen gehören strömungs-technisch zu den anspruchsvollsten Wasserbauten. Nichtdurchdachtes Design des Einlaufbauwerks führt zu einem Verlust an Stromerzeugung und zu erhöhten Wartungskosten. Das Finden des besten Designs 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 Planungshilfen gegeben, die dem projektierenden Ingenieur eine optimale Anordnung der wasserbaulichen Strukturen ermöglichen sollen.
- **Fischabstieg:** Der Coanda-Rechen erlaubt es - im Gegensatz zum Tirolerwehr mit seinen grossen Spaltweiten - den Fischen und Wassertieren ohne Schaden zu nehmen darüber abwärts zu gleiten. Damit die Fischmigration flussabwärts erfolgreich verläuft, ist neben einer ausreichenden Restwasserdotations unmittelbar unterhalb dem Coanda-Rechen ein genügend grosses, ständig wasserführendes Becken mit einer Wassertiefe von mindestens 30 bis 50 cm anzuordnen. Für den Fischaufstieg ist der Coanda-Rechen ungeeignet, da der zu überwindende Höhenunterschied in der Regel zu gross ist. Hierfür müssen auch beim Coanda-Rechen die bekannten Anlagen wie bspw. Fischtreppe erstellt werden.
- **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 (z.B. durch eine längere Beschleunigungsplatte oder eine optimierte Formgebung des Rechens und der Rechenstäbe), die Verbesserung der Festigkeit und Dauerhaftigkeit der feingliedrigen Rechenkonstruktion (z.B. gegen abrasiven, quarzhaltigen Sand mittels einer materialtechnologischen Innovation) und die Optimierung des Rechens im Hinblick auf eine Verbesserung des Abweisungsgrads feiner Partikel (damit auf einen Sandfang verzichtet werden kann).

3. Ausgangslage

Coanda-Rechen sind Feinrechen mit scharfkantigen, horizontalen Stäben mit geringen Spaltweiten. Sie nutzen den vom rumänischen Physiker Henry Coanda (1886 – 1972) entdeckten „Coanda-Effekt“ sowie den „Aquashear-Effekt“ (Abscher-Effekt). Sie werden schon seit einigen Jahrzehnten vor allem in den USA im Bergbau eingesetzt und eignen sich für eher kleine Wassermengen. Die Spaltweiten liegen im Bereich von ca. 0.2 - 2.0 mm, so dass Treibgut und Geschwemmsel weitgehend vom Triebwassersystem ferngehalten wird. Unter Umständen kann auf eine Rechenreinigungsanlage und auf einen Sandfang verzichtet werden, wodurch sich Bau- und Betriebskosten von Wasserkraftwerken reduzieren lassen.

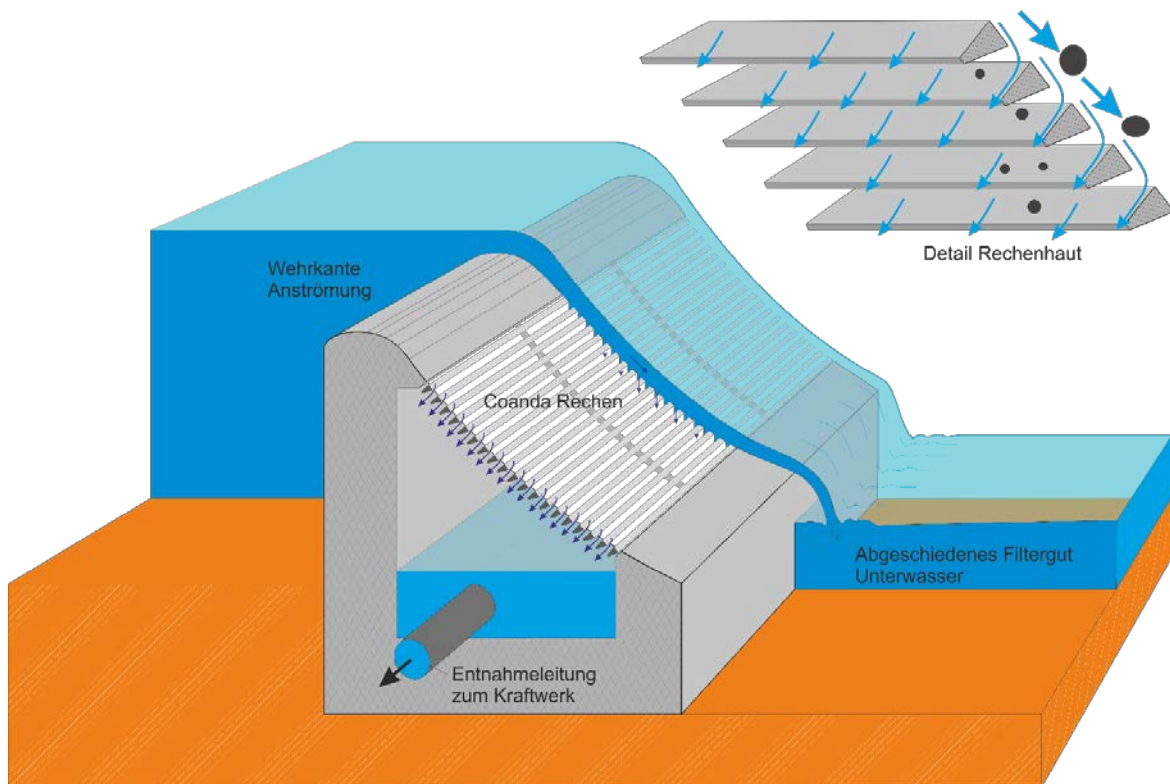


Abbildung 1: Prinzipskizze eines Coanda-Rechens

Seit einigen Jahren werden Coanda-Rechen in der Schweiz vermehrt als Alternative bei Fassungen für Wasserkraftwerke an Bergbächen anstelle von traditionellen Fallrechen (sog. Tirolerwehren) eingesetzt. Die Erfahrungen der selbstreinigenden Coanda-Rechen sind dabei sehr verschieden. Problematisch sind beispielsweise der Abrieb und der Verschleiss der scharfkantigen Profile, so dass die Rechen häufig ausgewechselt werden müssen (Lebensdauer ca. 10 bis 15 Jahre), oder die Schluckfähigkeit laufend abnimmt. Demgegenüber gelten die Rechen als wartungsarm und fischfreundlich. Zwar sind zahlreiche Herstellerprospekte und auch vereinzelt wissenschaftliche Studien über Coanda-Rechen zu finden, umfassende hydraulische Modellversuche und systematisch aufgebaute Planungshilfen, welche auch die natürlichen Randbedingungen berücksichtigen, gibt es jedoch nicht.

Abbildung 2 zeigt wie beim Coanda-Rechen das beruhigte Wasser mit gleichmässiger Überströmung über einen abgerundeten Wehrkörper fliesst. Zuerst strömt das Wasser über eine glatte Platte (Beschleunigungsplatte) und wird dabei beschleunigt. Dann wird das Triebwasser über quer zu dessen Fliessrichtung angeordnete, filigrane Rechenstäbe entnommen. Dabei wird der Wandhaftungseffekt, der sogenannte Coanda-Effekt, ausgenutzt. Die scharfkantigen Stäbe sind leicht schräg angeordnet (ca. 3° bis 6° Neigung), wodurch das Stabprofil in das überfliessende Wasser hineinragt und beim Wasserstrom jeweils ein Teil abgeschert wird (aquashear).

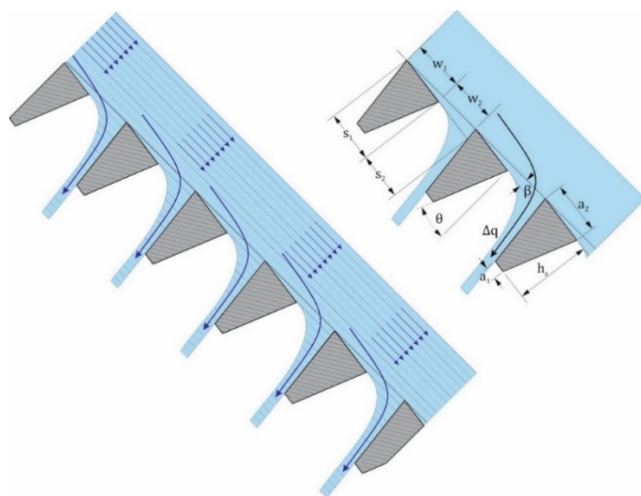


Abbildung 2: Funktionsprinzip des
Coanda-Rechens

Durch den Coanda-Effekt folgt das strömende Wasser der Oberfläche und fliesst in einen Sammelkanal, von wo es der Druckleitung zugeführt wird. Welcher Anteil der Fassungsmenge auf den Coanda-Effekt und welcher Anteil auf den aquashear-Effekt zurückzuführen ist, bleibt schwierig abzuschätzen. Der Coanda-Rechen ist je nach Hersteller und Typ ca. 45 cm bis 199 cm hoch. Das spezifische Schluckvermögen beträgt je nach Typ und Spaltweite ca. 50 bis 300 l/s pro Meter Rechenbreite. Durch die geringe Spaltweite wird der grösste Anteil der Sedimente sowie das Geschwemmsel gar nicht mitgefasst und verbleibt im Bachbett. Es kann oft auf einen Sandfang verzichtet werden. Ein Rechen mit einem Stababstand von 1.0 mm hält gemäss Angaben der Hersteller 90% der Feststoffe im Wasser von mehr als 0.5 mm Grösse von der Fassung fern. Zudem ist der Coanda-Rechen grösstenteils selbstreinigend, da das auf dem Rechen liegenbleibende Treibgut und Laub durch das Überschusswasser mitgerissen wird. Es kann somit auf eine Rechenreinigungsanlage verzichtet werden.

Während in Amerika und in Neuseeland die innovative Technologie des Coanda-Feinrechens recht bekannt ist, wird diese in der Schweiz immer noch eher zögerlich angewendet. Eine erste Pilotanlage in der Schweiz wurde durch „Energie 2000“ gefördert und 1998 am Rappierbach in der Gemeinde Hinterrhein GR erstellt (Entec AG, Hans Marugg & Partner AG, 1998). Bis Ende 2016 wurden in der Zwischenzeit ca. 50 Anlagen in der Schweiz erstellt, das sind jedoch deutlich weniger Anlagen als z.B. in Österreich oder im Südtirol. In Kreisen von Ökologie und Fischerei haben die in der Schweiz installierten Coanda-Rechen als ausgesprochen fischfreundliche Wasserfassungen raschen Anklang gefunden, da infolge des geringen Stababstands von 0.2 bis 3 mm die Fische vom Triebwassersystem ferngehalten werden und zudem der Fischabstieg über den Rechen im Gegensatz zum traditionellen Tirolerwehr mit seinen deutlich grösseren Spaltweiten problemlos möglich ist.

Bei Wasserfassungen mit einem Coanda-Rechen ist im Gegensatz zum traditionellen Tirolerwehr mit seinen grösseren Spaltweiten die eine Migration von Fischen und kleineren Gewässerlebewesen > 0.2 bis 3 mm je nach Spaltweite abwärts problemlos möglich. Auch Holz, Laub, Moos und sonstiges Geschwemmsel wird mit dem Fliessgewässer über den Rechen weitertransportiert, s. Abbildung 5.

Insgesamt zeigte sich bei Gesprächen mit Ingenieuren und Kraftwerksbetreibern, dass der Coanda-Rechen selbst in Fachkreisen nicht immer bekannt ist, oder dass noch gewisse Ressentiments dem Rechen gegenüber bestehen, welche wohl auf die wenigen Praxiserfahrungen mit diesem Rechentyp zurückzuführen sind.



Abbildung 3: Coanda-Rechen (engl. Coanda screen) am Forks of Butte Creek, einem kleinen Nebenfluss des Sacramento Rivers, nahe der Stadt Paradise, Kalifornien (USA).

Kraftwerks-Betreiber: Synergics. Inbetriebnahme 1991. Fassungsart: Seitenentnahme. Gemäss Literatur derzeit weltweit grösster Coanda-Rechen mit einer Schluckfähigkeit von ca. $6 \text{ m}^3/\text{s}$, Rechenbreite 47 m. Quelle: Wahl, 2003, S. 35

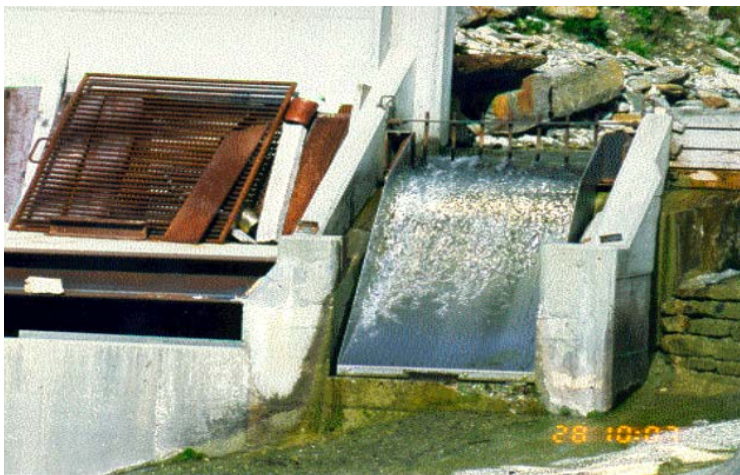


Abbildung 4: Pilotprojekt Coanda-Rechen am Rappierbach bei Hinterrhein GR. Erster Coanda-Rechen in der Schweiz. Inbetriebnahme 1998

Fassungsart: Stirnentnahme. Fabrikat: Dulas Ltd., Typ AB, Schweizer Vertrieb: Firma Andaco GmbH, Kapazität 140 l/s, Spaltabstand 1 mm, Rechenbreite 1.0 m. Quelle: Entec AG, Marugg & Partner AG, 1998, S. 15

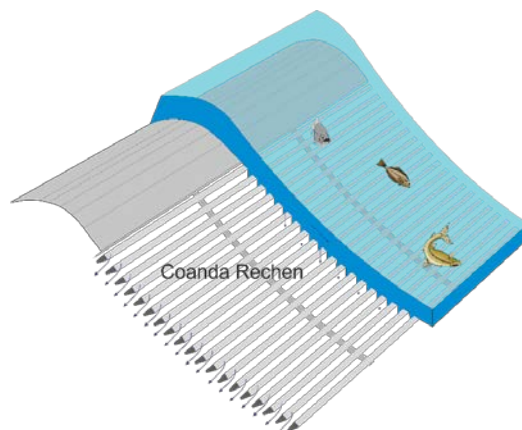


Abbildung 5: Gefahrloser Fischabstieg



4. Ziel der Arbeit

Im Rahmen des Forschungsprojekts werden nach einem umfassenden Literaturstudium ausgewählte Anlagen in der Schweiz und im nahen Ausland (Alpenanrainer Österreich, Deutschland, Italien) in Bezug auf die Betriebserfahrungen analysiert und daraus Empfehlungen für die Planung und Projektierung abgeleitet. In wissenschaftlicher Hinsicht bildeten die diversen hydraulischen Modellversuche und Modellierungen (ohne Schwebstoffmessungen) des bekannten "Bureau of Reclamation", Denver, Colorado, eine wichtige Grundlage für das Projekt. Bisher wurden in wasserbaulichen Modellversuchen insbesondere Kapazitätstests durchgeführt wurden und noch keine aussagekräftige Daten zum Siebrückstand von Feststoffen unter natürlichen Randbedingungen ermittelt. Es soll deshalb der Abweisungsgrad der Feststoffe in Feldversuchen bei ausgewählten in Betrieb stehende Anlagen ermittelt werden. Das Zielpublikum sind in erster Linie projektierende Ingenieure sowie in zweiter Linie die Rechenhersteller.

Das vorliegende Forschungsprojekt ist eine Fortsetzung und umfassende Weiterentwicklung des "Pilotprojekts COANDA Feinrechen für kleine Wasserkraftanlagen" aus dem Jahre 1998, welches im Rahmen des Programms "Energie 2000" vom BFE gefördert wurde (Schlussbericht: Entec AG, Hans Marugg & Partner AG, 18.12.1998). In der Zwischenzeit wurden in der Schweiz ca. 50 Anlagen, im alpinen Raum ca. 200 bis 300 Coanda Rechen in Betrieb genommen. Im Rahmen der Arbeit wurde eine aktuelle Übersicht der bekannten in der Schweiz und im nahen Ausland bis Ende 2016 installierten Anlagen erstellt.



Abbildung 6: Aktuell europaweit grösster Coanda-Rechen bei St. Leonhard am Pitzbach (Tirol).

Fassungstyp: Seitenentnahme. Fabrikat: Wild Metal GmbH, Typ Grizzly Power Optimus, Kapazität 4'000 l/s

Wasserfassungen an Gebirgsbächen stellen strömungstechnisch eine grosse Herausforderung für die projektierenden Ingenieure. Das Design des Einlaufbauwerks ist entscheidend für die Produktivität des Kraftwerkes und die notwendige Wartung am Gewässer (Allfälliges Ausbaggern von Geschiebe). Daher ist stets das Gesamtsystem „Wasser und Geschiebe“ zu betrachten. Das Finden des besten Designs 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. Bei den begangenen Anlagen wurden unterschiedlichste Fassungstypen angetroffen, welche sich aus den lokalen Gegebenheiten ergaben. Die verschiedenen Möglichkeiten wurden analysiert um dem projektierenden Ingenieur eine optimale Anordnung der wasserbaulichen Strukturen zu ermöglichen.

Neue Rechenhersteller sind in den letzten 20 bis 30 Jahren mit konstruktiven Verbesserungen in den Markt eingetreten. Zahlreiche Herstellerprospekte sind zwar zu finden, umfassende Vergleiche verschiedener Typen fehlen jedoch. Eine Übersicht der tätigen Rechenhersteller mit ihren Produkten fehlte bisher und wurde daher erstmals erbracht.

Bei diesem Forschungsprojekt sind keine Verbesserungen der Wirkungsgrade von Wasserkraftanlagen zu erwarten. Allerdings könnten erhebliche Ersparnisse an den Anlagenkosten erzielt werden. Die Errichtung eines Sandfangbeckens wird bei Hochdruck-Kraftwerken gegebenenfalls überflüssig, falls der Abweisungsgrad der Feststoffe ausreichend ist. Demzufolge würden weniger bauliche Eingriffe erforderlich sein und Entnahmestellen an schwer erreichbaren Gebieten wären einfacher zu erstellen.



Abbildung 7: Abrasion des
Turbinenlaufrades

Abrasion durch Feststoffe können bei Hochdruck-Kraftwerken zu grossen Schäden führen. Es interessiert diesbezüglich insbesondere die Frage, ob und unter welchen Bedingungen durch den Einsatz eines Coanda-Rechens auf die Anlage eines konventionellen Sandfangbeckens verzichtet werden kann, wodurch die Anlagekosten erheblich gesenkt werden könnten, s. Abbildung 7.



Die Kraftwerksbetreiber sind gemäss den gemachten Erfahrungen in Bezug auf den Coanda-Rechen immer noch eher skeptisch eingestellt, da in der praktischen Anwendung infolge fehlerhaften Engineerings leider auch diverse Rückschläge aufgetreten sind. Da gemäss unserer Recherche aktuell in der Schweiz und auch international kein ähnlich gelagertes Forschungsprojekt existiert, welches die aufgeworfenen Forschungsfragen beantworten und die teilweise berechtigten Bedenken der Kraftwerksbetreiber entkräften kann, war mit dem vorliegenden Projekt diesbezüglich mehr Klarheit zu schaffen.

Im Rahmen der Arbeiten wurden auch zahlreiche nationale und internationale Kontakte mit Kraftwerks-Betreibern, Rechenherstellern und Stahlwasserbauern, Fischereibiologen, Fachverbänden und Forschungsanstalten hergestellt. Dies ist von besonderer Wichtigkeit im Hinblick auf den anzustrebenden Wissens- und Technologietransfer.



5. Grundlagen-Randbedingungen

5.1 Wasserfassungen an Gebirgsbächen

5.1.1 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 Fassungstypen. Das Geschiebe muss bei der Fassung abgewiesen werden, jedoch ohne diese dabei zu verstopfen. Hinsichtlich der Entnahmeart 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 relativ geringer Wasserführung ($Q_a < 6 \text{ m}^3/\text{s}$) mit grossem Geschiebeandrang kommt meist eine Sohlentnahme bzw. eine Fallrechenfassung zur Anwendung, die in der Schweiz 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. Die Spaltweiten des Fallrechens liegen im Allgemeinen zwischen 3 und 10 cm. Mit diesem Fassungstyp können hohe spezifische Wassermengen von bis ca. $2 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ gefasst werden. Ein weiterer Vorteil ist, dass die freie Hochwasserabfuhr und die Abfuhr 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 Tirolerwehrs ebenfalls mitgefasst werden, was bei Fischgewässern den Zielsetzungen des Gewässerschutzgesetzes (GSchG) zuwiderläuft.



Abbildung 8: Beispiel eines
Tirolerwehrs am Oberal-
ppass (GR) Quelle: unbe-
kannt

Sandfang

Neben Geschiebe führen Gebirgsbäche auch Feinbestandteile (Schwebstoffe) mit. Ihre mittlere Konzentration kann 2 bis 10 g/l, bei Hochwasser bis zu 50 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). Der Schwebstoffabfluss als Produkt der Schwebstoffkonzentration und der Fliessgeschwindigkeit des Wassers ist allerdings etwa in Gewässermitte am grössten, wie Schwebstoff-Konzentrationsmessungen im gesamten Querprofil gezeigt haben (Grasso et al., 2012). Zum Schutz empfindlicher Anlageteile (Pumpen, Turbinen, Schieber usw.) vor Abschleif werden die gröberen Feststoffkomponenten in Entsander-Anlagen ausgeschieden. Besonders abrasiv auf empfindliche Anlageteile gelten z.B. Quarzkörner. Die schädliche 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 Hochdruckanlagen (Fallhöhe > 50 m) ist es von besonderem Interesse, den meist scharfkantigen, feinkörnigen Sand fernzuhalten. Der gebräuchlichste Sandfang-Typ bei Wasserkraftanlagen ist der Langsandfang. Für die Spülung der Ablagerungen in Entsanderbauwerken wurden diverse Spülsysteme entwickelt (Spülsysteme nach Büchi, Bieri, Dufour, 4S, HSR).

Bei einem Entsandungsverhältnis R_s von 95% werden zur hydraulischen Bemessung des Sandfangs üblicherweise folgende charakteristischen Korngrössen angesetzt (Giesecke, Mosonyi, 2009):

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

Tabelle 1: Charakteristische Korngrössen zur Bemessung von Sandfängen



Bei Hochdruckanlagen mit einer Fallhöhe $h_f > 100$ m kann bei stark abrasivem Gestein eine Herabsetzung bis zu einem charakteristischem Durchmesser von $d_{ch} = 0.05$ bis 0.1 mm notwendig werden. 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 unverhältnismässig grosser Abmessungen, die wegen topografischen und geologischen Beschränkungen sowie unvertretbarem Mehraufwand nicht zu verwirklichen sind, sodass man in einem solchen Fall zu einem Kompromiss gezwungen ist (Giesecke, Mosonyi, 2009; Abgottspon et al., 2016).

5.1.2 Erfordernisse der Gewässer- und Fischökologie an Wasserfassungen

Fassungen und Wehranlagen bewirken einen Unterbruch des Fliessgewässer-Kontinuums. Gemäss dem gültigen Gewässerschutzgesetz (GSchG) ist bei Fischgewässern einer möglichst ungehinderten Fischwanderung flussaufwärts und flussabwärts besondere Beachtung zu schenken. 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 zuflusssdynamische 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 Geschiebehaushaltes
- Eliminierung von Fisch-Wanderhindernissen

Die gesetzeskonforme Umsetzung baulicher Sanierungsmassnahmen von bestehenden Wasserkraftanlagen hat bis 2030 zu erfolgen. Die Wünsche/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. Gegenüber einem Tirolerwehr mit grossen lichten Rechenweiten ist beim Coanda-Rechen der Fischabstieg grundsätzlich möglich.

In der Abbildung 9 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 9: Fassung am
Vallerbach bei Vals, Südtirol

5.2 Bekannte Vor- und Nachteile des Coanda-Rechens

5.2.1 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 Rechenbelegung mit Steinen und Holz. Festgeklemmte Feststoffe werden bei genügendem Abfluss wieder fortgespült. Dadurch sind keine elektrisch betriebenen Reinigungsmaschinen notwendig.
- Minimale Rechenbelegung mit Laub; Sehr wenig Unterhalt notwendig (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



5.2.2 Bekannte Nachteile des Coanda-Rechens

- Schluckfähigkeit bis ca. 140 l/s pro Laufmeter, damit deutlich kleiner als bei Tirolerwehr
- Volle Schluckfähigkeit erfordert eine gleichmässige Anströmung
- Die filigrane Struktur des Feinrechens benötigt einen Schutz gegen grobes Geschiebe und Holztrieb
- Relativ kurze Lebensdauer ca. 15 Jahre; Abrasives Gestein führt im Laufe der Betriebsdauer zu einer Reduktion des Schluckvermögens und eventuell frühzeitigen 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. Aufgrund der Erfahrung hat sich gezeigt, dass die Wirtschaftlichkeit eines Coanda-Feinrechens ab einer Fallhöhe von ca. 30 m gegeben ist; darunter sollte dies überprüft werden.
- In seltenen Fällen Verstopfen des Rechens: Zum Beispiel durch Verkalkung der Rechenstäbe (primär abhängig vom Gesteinstyp), Laubbelegung, Vereisung, Moosbildung

5.3 Rechenhersteller und Vertriebsfirmen

5.3.1 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.

5.3.2 Funktionen, Zweck

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



Abbildung 10: Coanda-Rechen mit obenliegendem Schutzrechen. Suonen-Fassung Obere und untere Bitscheri, Gemeinde Naters, Kt. Wallis, Kapazität 200 l/s, Quelle: unbekannt



Abbildung 11: Grosse Wasserrfassung mit einem Coanda-Rechen in Kanada

Fabrikat: Norris Screen, Brandywine Creek Hydroelectric Project, Kapazität: 4'000 l/s
Quelle: unbekannt

5.3.3 Rechenhersteller

Es wurden die im Markt tätigen Rechenhersteller evaluiert (Tabelle 2). 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 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.

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 elginindustries.com
Hydroscreen Co. LLC	USA (Denver)	hydroscreen.com

Tabelle 2: Hersteller- und Vertriebsfirmen von Coanda-Rechen

5.4 Kurzbeschreibung der Rechentypen, Dokumentationen der Rechenhersteller

Es wurden die Dokumentationen der in Europa tätigen Rechenhersteller beschafft. Für weitere Informationen wird auf die Websites der Rechenhersteller bzw. Vertriebsfirmen verwiesen (siehe Tabelle 2). Im Sinne einer Systemübersicht werden nachfolgend einige Besonderheiten von Rechentypen verschiedener Hersteller von Anlagen beschrieben, welche im Rahmen der Studie besucht und analysiert wurden.

5.4.1 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 Profilabstände betragen je nach Typ 0.2 mm, 0.4 mm, 1mm, 1.5mm und 2 mm. Die Schluckfähigkeit des kleinsten Typs F beträgt für einen Stababstand von 1 mm 35 l/s/m, der grösste Typ K schluckt 250 l/s/m 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 fallendes Geschiebe beschädigt wird, wird der Coanda-Rechen häufig vertikal versetzt zum vorgeschalteten Grobrechen angeordnet. Es wurden im Rahmen der Studie insgesamt 10 Anlagen besucht, in denen Rechen der Andaco GmbH eingesetzt wurden.

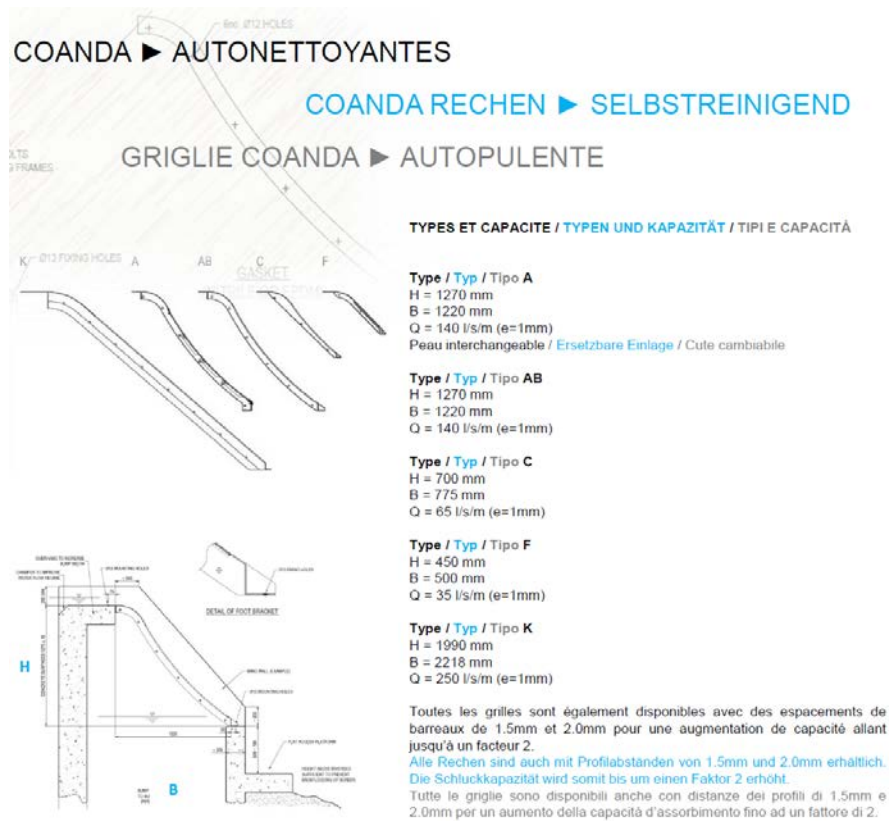


Abbildung 12: Rechen-
typen der Fa. Andaco
GmbH, Internet-Auszug
aus Firmenprospekt.
Der Typ E fehlt im Bild
Quelle: andaco.ch



Abbildung 13: Fassung
am Gorpatbach, Gde
Eischoll (VS). Coanda-
Rechen der Fa. Andaco
GmbH.

Der oben sichtbare
Schutzrechen mit run-
den Stäben ist gegen-
über dem Coanda-Re-
chen versetzt angeord-
net. Das Grobge-
schiebe wird über den
Schutzrechen abge-
führt



5.4.2 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 in Südtirol. Vertrieben wird der patentierte Rechen unter dem Namen „Grizzly Power“. Angeboten werden derzeit im Markt drei Typen mit verschiedenen Schutzrechenausführungen: Grizzly Power Protec, Grizzly Power Titan und Grizzly Power Optimus. Das Innovative am Grizzly-Rechen-System ist, dass der Coanda-Rechen mit einem darüber liegenden, integrierten Schutzrechen ausgeführt wird. Die verfügbaren Profilabstände betragen je nach Typ 0.4 mm, 0.6 mm, 1mm, 1.5mm und 2 mm. Die Schluckfähigkeit des kleinsten Typs Optimus 650 beträgt für einen Stababstand von 0.4 mm 52 l/s/m, der grösste Typ Optimus 2500 schluckt 307 l/s/m bei einem Stababstand von 1 mm.

- Der Grizzly Power Protec eignet sich für Gebirgsbäche mit grosser Geschiebeführung. 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.
- Der Grizzly Power Titan kommt zum Einsatz bei Fischgewässern mit grossen Laubmengen, in denen kein Geschiebetrieb im Bereich der Fassung stattfindet, z.B. beim Abfluss eines Sees. Robuste abgerundete Rippen im Abstand von 19 cm schützen das Feinsieb vor Holzstämmen und Geschwemmsel.
- Der Grizzly Power Optimus ist ohne Schutzrechen ausgeführt und findet seine Anwendung bei einer Wasserrfassung mit einer Seitenentnahme, die durch einen Grobrechen geschützt ist, sowie bei Wasseraufbereitungs- und Fischzuchtanlagen.

Es wurden insgesamt 10 Anlagen besucht, in denen der Grizzly Power-Rechen der Wild Metal GmbH eingesetzt wurden.



Abbildung 14: Grizzly-Rechen der Fa. Wild Metal GmbH; Module mit verschiedenen Schutzrechenausführungen: Grizzly Power Protec (links), Grizzly Power Titan (mitte) und Grizzly Power Optimus (rechts),
Quelle: wild-metal.com

5.4.3 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-Wasserrfassungen mit integriertem 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. Es wurden 2 Anlagen besucht, in denen ein Coanda-Rechen der Fa. Stocker Mechatronik GmbH eingesetzt wurde.

IBEX

Der neue COANDA Rechen mit Drehstäben

Für den extrem harten Einsatz! Wie z.B. bei Granit oder Gletscherschutt.
Durch die symmetrische Stabform ist es bei diesem System möglich, die Profilstäbe dreimal zu wenden.

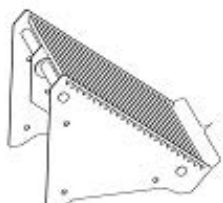


Vorteile

- durch Verdrehen der Stäbe mind. dreimal längere Lebensdauer gegenüber anderen Herstellern
- Profilstäbe aus Baustahl, Edelstahl sowie HARDOX verfügbar
- bei einer Beschädigung können einzelne Stäbe getauscht werden
- durch die sehr starke Ausführung kann in den meisten Fällen auf einen zusätzlichen Grobrechen verzichtet werden

Technische Daten

- Standardhöhen 800 mm bzw. 1200 mm
- Standardbreiten 500 mm und 1000 mm
- Schluckmenge bis zu 120 l/m²



Zur Patentierung beim europäischen Patentamt eingereicht.

Abbildung 15: Neuer Coanda-Rechen IBEX der Fa. Stocker Mechatronik GmbH mit Drehstäben. Auszug aus Firmenprospekt, Quelle: wasser-kraft.npage.at

5.4.4 Coanda-Rechen der Firma HOEHENERGIE

Die Schweizer Fa. HOEHENERGIE vertreibt einen patentierten Coanda-Rechen für Kleinstwasserkraftwerke unter dem Namen DS Avale. Das kleine Modell DS Avale 12/600 (Breite 60 cm, Höhe 60 cm) schluckt max. 40 l/s, das grössere Modell DS Avale 12/1200 (Breite 60 cm, Höhe 120 cm) max. 90 l/s. Die Spaltweite beträgt 1 mm. Speziell ist das Design des Lamellenprofils, und somit gemäss Herstellerangaben ein "Doppeltes Coanda-System". 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.

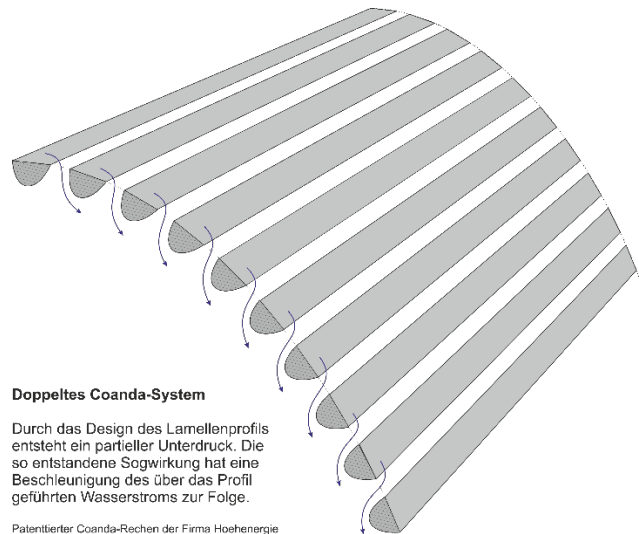


Abbildung 16: Patentierter Coanda-Rechen der Fa. HOEHENERGIE mit dem speziellen Lamellenprofil. Quelle: Bild, Homepage hoehenergie.ch/; Systemskizze, IBAR

5.5 Forschungsberichte

5.5.1 Kapazitätstests

Es wurden alle im Internet verfügbaren wissenschaftlichen Berichte zum Coanda-Rechen beschafft. Das bekannte „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. 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 17: 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)

5.5.2 Feststofftests

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 Feststofftest auch Kapazitätstests sowie Test mit Zugabe von Gras. Dabei wurde eine Modellanlage mit einer Rechenlänge (screen width) von 15 und 45 cm verwendet. Die lichte Weite der Rechenstäbe (screen aperture) betrug 0.2 mm, 0.5 mm und 1.0 mm. Die zugeführte Wassermenge (flow) variierte zwischen 5 bis 30 l/s.



Abbildung 18: Versuchsanlage zur Durchführung von Modellversuchen an der Universität Trondheim, Norwegen (Jenssen und Huber, 2005)

Zugegeben wurde bei den Feststofftests ein Sandgemisch von jeweils 20 kg pro Versuch. Die Korngrössenverteilung des zugegebenen Sands (Summationskurve gemäss Siebanalyse) ist im Bericht nicht ausgeführt, sodass die Ergebnisse nur beschränkt interpretierbar sind. Bei den Versuchen zeigte es sich, dass die Rechen mit 1 mm Spaltweite nur wenig verstopften (clogging of screen). 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 geschiebeführenden Gebirgsbachs ungeeignet ist.



Screen aperture (mm)	Screen width (m)	Flow (l/s)	Exclusion efficiency (%)			Clogging of screen	Bypass flow (l/s)
			$d^1 < \frac{1}{2} \text{ Size}^2$ (%)	$\frac{1}{2} \text{ Size} < d < \text{Size}$ (%)	Total ³ (%)		
1.0	0.45	5	1.4	17.5	18.5	Very little	0
1.0	0.45	30	1.0	41.0	22.5	Very little	0 – 1
1.0	0.15	30	3.9	62.9	28.0	None	0 – 3
0.5	0.45	5	3.9	44.7	51.0	Much	0
0.5	0.45	30	2.6	47.4	51.5	Much	0 – 1
0.5	0.15	25	4.5	50.4	54.0	Medium	0 – 3
0.2	0.45	5	65.2 ⁴	79.1 ⁴	83.0 ⁴	Almost completely	2-3
0.2	0.45	30	47.1 ⁴	63.2 ⁴	72.0 ⁴	Almost completely	27
0.2	0.15	24	34.0 ⁴	61.4 ⁴	69.5 ⁴	Almost completely	23

¹d is particle size in mm

²For the 1 mm aperture screen, size = 1 mm and $\frac{1}{2}$ size = 0.5 mm

For the 0.5 mm aperture screen, size = 0.5 mm and $\frac{1}{2}$ size = 0.25 mm

For the 0.2 mm aperture screen, size = 0.2 mm and $\frac{1}{2}$ size = 0.1 mm

³Total gives the mass ratio of excluded sediment to total mass of sediment fed, also including sediment particles larger than the aperture.

⁴The apparently high efficiency is due to sediment carried by the by-pass flow.

Tabelle 3: Ergebnisse der Sedimenttests gemäss Jenssen and Huber, 2005, S. 6.

- Bei den 3 Versuchen mit 1 mm Spaltweite beträgt der Abweisungsgrad der Sedimente < 1 mm total 18 bis 28 %.
- Bei den 3 Versuchen mit 0.5 mm Spaltweite beträgt der Abweisungsgrad der Sedimente < 0.5 mm total 51 bis 54 %.
- Bei den 3 Versuchen mit 0.2 mm Spaltweite wird der Rechen fast vollständig verstopft und kann fast kein Triebwasser mehr fassen

Begriffe:	Screen aperture	Stababstand, lichte Weite
	Screen width	Rechenlänge
	Flow	Abflussmenge
	Exclusion efficiency	Abweisungsgrad
	Clogging of screen	Verstopfen des Rechens
	Bypass flow	Überströmung des Rechens

Literaturhinweis zur Feststoffabscheidung von Coanda-Rechen:

- Jenssen Lars and Huber Dorothée, 2005: Laboratory Testing of Coanda effect Screens for small hydro intakes, Institutt for Vann- og Miljøteknikk, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norwegen



5.6 Patente

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 besonders die Anordnung des Grobrechens direkt über dem Coanda-Rechen patentiert.

Der Coanda-Rechen „DS Avale“ mit speziellem Lamellenprofil und Einsatzgebiet im Bereich der Kleinstwasserkraft der Schweizer Firma Hoehenergie, Zürich-Altstetten, ist gemäss Fimenprospekt ebenfalls patentiert.

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

5.7 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. 5 bis 10 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.

5.7.1 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 sind. Die Standorte der Schweizer Anlagen und der im nahen Ausland begangenen Anlagen sind in der nachfolgenden Karte sowie im Anhang A ersichtlich. In der Karte sind nicht alle im Anhang aufgeführten Anlagen eingezeichnet, da der Standort teilweise nicht genau ermittelt werden konnte.

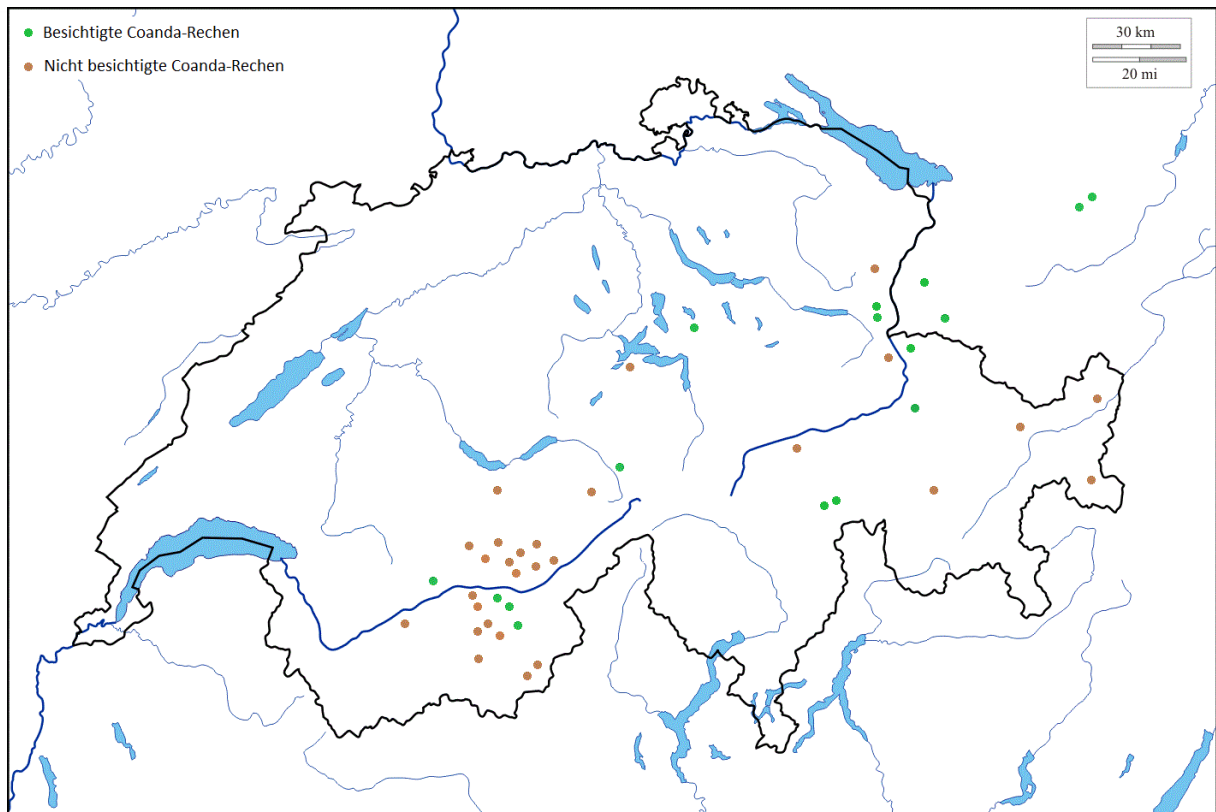


Abbildung 19: Übersichtskarte Coanda-Rechen in der Schweiz und im nahen Ausland, Stand Dez. 2016

6. Konzept-Anlagenbeschreibung

Die Forschungsarbeit hat das Ziel, die bekannten Grundlagen und Erkenntnisse zusammen zu tragen und zu prüfen. Der bisherige Forschungs- und Marktstand ist in den vorhergehenden Kapiteln ersichtlich. In den nächsten Kapiteln werden die neuen Erkenntnisse dieser Forschungsarbeit zusammengefasst sowie Planungshilfen für Ingenieure und Kraftwerksbetreiber erarbeitet.



7. Vorgehen / Methode

Gemäss Forschungsgesuch war ein Vorgehen in 5 Arbeitsphasen geplant. Die Arbeitsphasen 4 und 5 erwiesen sich nach genauerer Betrachtung als zu aufwändig und wurden im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter verfolgt. Sie sind gegebenenfalls Gegenstand von weiterführenden Forschungsarbeiten.

7.1 Arbeitsphase 1: Grundlagen

In einem theoretischen Teil der Arbeit wurden alle verfügbaren Grundlagen (Rechenhersteller und Vertriebsfirmen, Websites, Forschungsberichte und Dokumentationen, Patente) beschafft und eine ausführliche internationale Recherche durchgeführt. Die bekannten Anlagen in der Schweiz und im näheren Ausland wurden in einer Auflistung zusammengefasst. Die Resultate sind dem Kapitel 5 zu entnehmen.

7.2 Arbeitsphase 2: Analyse von 22 Anlagen

In Phase 2 wurden ausgewählte in Betrieb stehende Anlagen begangen und analysiert. Die Aufnahmen vor Ort erfolgten mittels eines standardisierten Aufnahmeblatts, anhand dessen die standortgegebenen Anforderungen und technischen Details der Anlagen ermittelt wurden. Wichtig im Hinblick auf das Optimierungspotential von Coanda-Rechen sind hauptsächlich die Fragen: Was hat sich im Betrieb bewährt? Wo bestehen Schwachstellen und Probleme? Gibt es Verbesserungsmöglichkeiten? Diese Fragen sollen im Rahmen der Auswertung beantwortet werden.

Insgesamt wurden 22 Anlagen in der Schweiz (12), Deutschland (2), Italien (4) und Österreich (4) begangen. Dabei wurden insgesamt 26 Fassungen systematisch erfasst. Die Auswertung erfolgt im Kapitel 8.2, die erfassten Datenblätter befinden sich im Anhang.

7.3 Arbeitsphase 3: Abweisungsgrad der Feststoffe

Um den Verschleiss an den Turbinen zu minimieren, werden bei Hochdruckkraftwerken nach der Fassung in der Regel Kies-/Sandfänge eingebaut. Die Sandfänge werden meist für ein Grenzkorn von 0.2 bis 0.3 mm Grösse dimensioniert, was oft als kritischer Grenzwert für die Abrasion von Pelton-turbinen angesehen wird.

Will man beim Einsatz eines Coanda-Rechens auf einen Sandfang verzichten können, ist von besonderem Interesse, welche Partikelgrössen den Rechen passieren. In Phase 3 wurde daher in Feldversuchen der Abweisungsgrad von Partikeln verschiedenen Korndurchmessers von in Betrieb stehenden Coanda-Rechen ermittelt. Zum Abweisungsgrad der Feststoffe liegen zwar grobe Angaben der Rechenhersteller vor. Systematische Modellversuche und fundierte Aussagen zum Abscheidungsgrad von Sedimenten wurden gemäss aktuellem Kenntnisstand der Verfasser bisher jedoch nicht durchgeführt.

Insgesamt wurden Proben an drei verschiedenen Anlagen genommen. Die Auswertung der Proben erfolgte jeweils am akkreditierten Prüflabor der Baugeologie und Geo-Bau-Labor AG in Chur. Die Versuchsanordnungen sind nachfolgend beschrieben.

7.3.1 Feldversuch Mühlbach, Oberschan (SG)

Die Anlage am Mühlbach bietet aufgrund ihrer Anordnung nahezu ideale Voraussetzungen für die Durchführung von Feldversuchen. Dank Entgegenkommen der Ortsgemeinde Wartau als Betreiberin konnte am 13.10.2016 im Rahmen eines Feldversuches die Anlage gezielt mit einer vorher definierten Ausgangsmischung beschickt werden. Durch Analyse der den Coanda-Rechen nicht passierten Kornverteilung kann eine direkte Aussage über den Abweisungsgrad des Rechens gemacht werden.

Anlagenbeschreibung

Die Fassung erfolgt frontal zum Hauptstrom, es ist kein Grobrechen installiert. Die Anlage weist vor dem Coanda-Rechen einen ca. 7 m langen und 1 m breiten Betonkanal auf, welcher zur Beruhigung und Erreichen einer gleichmässigen Anströmung errichtet werden. Die Anlage verfügt über keinen Sandfang. Der 1 m breite Coanda-Rechen wurde für eine Ausbauwassermenge von 100 l/s dimensioniert. Der Rechen ist ein Produkt der Firma Stocker mit einem Stababstand von 1 mm. Die einzelnen Stäbe sind 15 mm breit und aus Baustahl.



Abbildung 20: Übersicht Anlage Mühlbach



Abbildung 21: Zulauf Coanda-Rechen

Versuchsanordnung

Dank des langen Betonkanals kann die Ausgangsmischung vor dem Rechen in den Kanal geschüttet werden und die gleichmässige Beanspruchung des Rechens ist gewährleistet. Um einheitliche Ausgangsparameter zu erreichen wurde der Rechen vorgängig gründlich gereinigt. Danach wurde eine nicht zum Versuch gehörende Ausgangsprobe durchgeführt und der Rechen wieder gereinigt. Nach jeder Probe wurde der Coanda-Rechen auf die gleiche Art gereinigt, so kann von für jede Probe einheitlichen Prüfbedingungen ausgegangen werden. Das Material wurde mit Hilfe eines Schüttbrettes eingebracht, nach dem Rechen wurde das vom Rechen abgewiesene Schüttmaterial in einer mit einer Kunststoffolie verkleideten Wanne aus Metall aufgefangen. Die Kunststoffolie und das enthaltene Schüttmaterial wurden direkt nach dem Versuch in einem Kübel zwischengelagert. Für jede Probe wurde eine neue Kunststoffolie verwendet. Nach Beendigung des Versuchs wurde die insgesamt 10 Proben ins Labor gebracht, wo der im Plastik enthaltene Rechenüberlauf gesammelt und analysiert wurde.

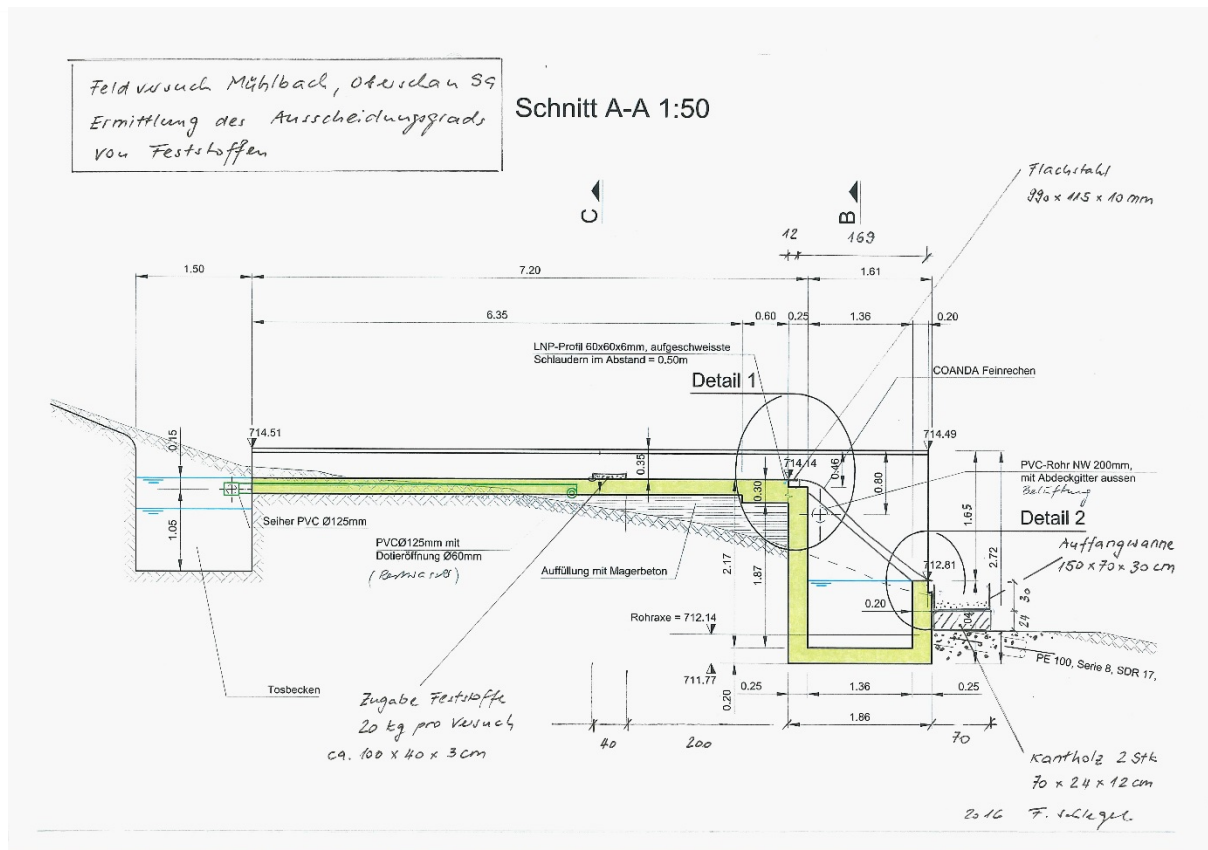


Abbildung 22: Versuchsanordnung Mühlbach, Plangrundlage: Ingenieurbüro Rissi + Partner AG

Beim Versuch hatte der Mühlbach einen Abfluss von ca. 25 l/s, wodurch es kein Überschusswasser gab und das Wasser innerhalb des ersten Drittels des Coanda-Rechens komplett gefasst wurde. Der Versuch wurde mit zwei unterschiedlichen Ausgangsmischungen durchgeführt:

- Sand 0/4 mm, diese Mischung wurde gewählt um möglichst viel Material im für den Versuch interessanten Bereich bis zu einem Durchmesser von 1.0 mm zu haben.
Total 6 Proben durchgeführt
- Kies 0/16 mm, diese Mischung wurde gewählt um natürliche Verhältnisse und die gegenseitige Beeinflussung der Körner zu simulieren
Total 4 Proben durchgeführt

Es wurde eine Korngrößenverteilung bestimmt, anhand derer die Gesamtproben zusammengemischt wurden. Aus den beiden Gesamtproben wurden die einzelnen Proben abgewogen. Bei diesen Proben wurde eine Siebanalyse nach SN EN 933-1 durchgeführt, so dass für jede Probe die effektive Ausgangsmischung bekannt ist. Die Ausgangsproben wurden mit Rohmaterial des Kieswerks Calanda Chur aus der Plessur und dem Rhein gemischt. Jede Einzelprobe hat ein Gewicht von 20 kg.

Nachfolgend die Korngrößenverteilung der beiden Mischungen:



Korngrösse	Sand 0/4 mm	Kies 0/16 mm
Max. Korngrösse	5.0 mm	20.0 mm
< 22.4 mm	100.0 %	100.0 %
< 16.0 mm	100.0 %	98.6 %
< 11.2 mm	100.0 %	86.9 %
< 8.0 mm	100.0 %	72.5 %
< 5.6 mm	100.0 %	56.1 %
< 4.0 mm	98.5 %	46.5 %
< 2.0 mm	77.2 %	34.0 %
< 1.0 mm	52.2 %	22.6 %
< 0.500 mm	26.3 %	11.7 %
< 0.250 mm	9.6 %	4.8 %
< 0.125 mm	3.9 %	2.4 %
< 0.063 mm	2.2 %	1.5 %

Tabelle 4: Korngrössenverteilung Feldversuch Mühlbach

7.3.2 Probenahme Samina, Frastanz (A)

Die Probenahme wurde mit einem Entnahmegerät zur Messung der Schwebstoffkonzentration vorgenommen. Diese Geräte werden auch vom Bundesamt für Umwelt BAFU bei Messstationen in Fließgewässern verwendet.

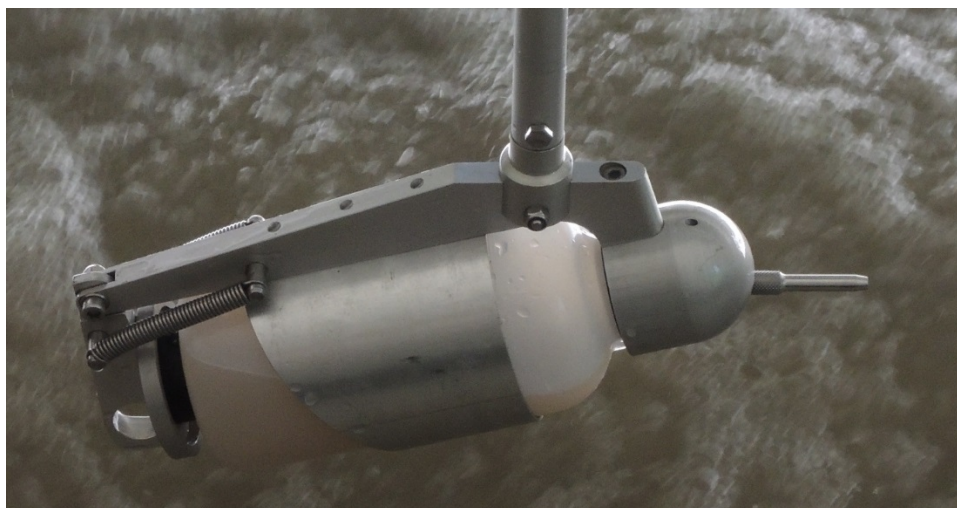


Abbildung 23:
Entnahmegerät
des BAFU

Die Entnahme an der Samina durch Mitarbeiter der HTW Chur erfolgte während des Hochwasserereignisses vom 17.06.2016. Durch die Probenahme während eines Hochwassers wurde ein möglichst grosses Aufkommen von Schwebstoffen erreicht und die Auswertung der Schwebstoffkonzentration zeigt einen Extremfall.

Anlagenbeschreibung

Die E-Werke Frastanz betreiben an der Samina im österreichischen Bundesland Vorarlberg eine der grössten Wasserfassungen mit Coanda-Rechen im Alpenraum. Die Anlage verfügt über einen 2 x

10.25 m langen Coanda-Rechen mit einer Ausbauwassermenge von total 2'250 l/s. Das Wasser wird der Samina über ein Tiroler Wehr entnommen und seitlich über einen Leitkanal zu den Rechen geführt. Die Rechen sind beidseits dieses Leitkanals angeordnet. Die Fassung des Wassers erfolgt, wenn der Kanal gefüllt ist und das Wasser seitlich wie bei einem Überfall über die Rechen fliesst. Der Leitkanal fungiert somit als Absetzbecken vor dem Coanda-Rechen, bei Bedarf kann der Kanal gespült werden. Der Coanda-Rechen wurde von der Firma Andaco geliefert, der Stababstand beträgt 1.0 mm. Die Samina ist ein stark geschiebeführender Wildbach mit einem Mittelwasser MQ von 1'140 l/s, das Geschiebe beinhaltet sehr abrasive Sande und Quarze.

Zusätzliche Details, Pläne und Fotos zur Anlage sind dem Datenblatt im Anhang zu entnehmen.

Versuchsanordnung

Die Entnahme erfolgte an drei verschiedenen Stellen der Anlage:

- A: bei Seitenentnahme, vor Coanda, total 3 Proben entnommen
- B: in Leitkanal, unmittelbar vor Coanda, total 3 Proben entnommen
- C: vor Triebwasserleitung, nach Canda, total 5 Proben entnommen

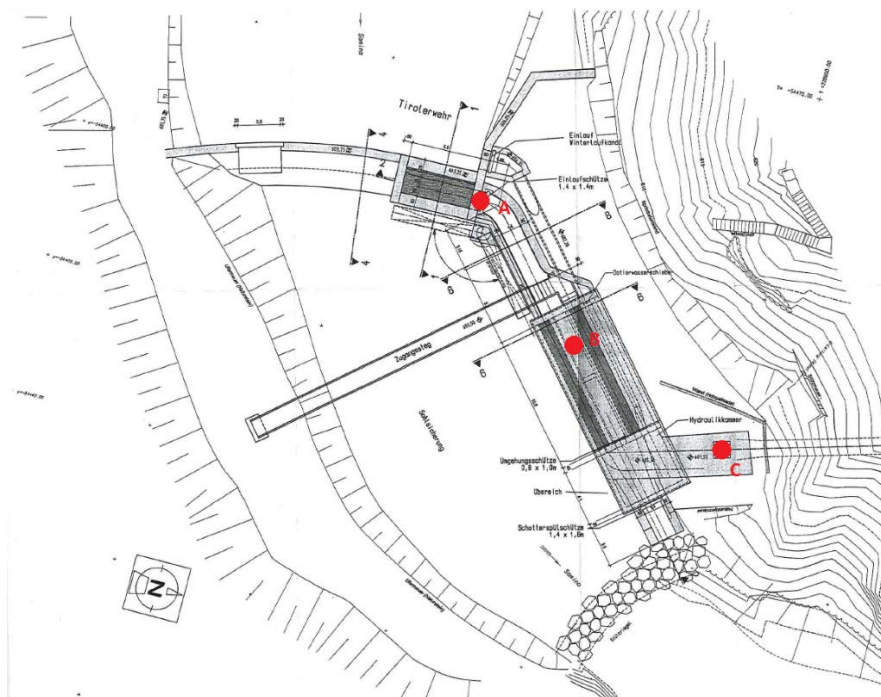


Abbildung 24: Probenahmeplan Samina, Plangrundlage; E-Werke Frastanz

7.3.3 Probenahme Palüdbach, Brand (A)

Am Palüdbach wurde durch den Betreiber eine Probe des sich nach dem Coanda-Rechen im abgelagerten Sandmaterials genommen und zur Auswertung zur Verfügung gestellt. Da keine Probenahme des gesamten Geschiebtriebes über den Coanda-Rechen genommen wurde, kann keine Aussage



über den Abscheidungsgrad des Rechens gemacht werden. Durch die Analyse des abgelagerten Materials kann jedoch die Kornverteilung des Rechendurchgangs ermittelt werden. Die Entnahme des Materials erfolgte durch Mitarbeiter der Gemeinde Brand am 07.09.2016.

Anlagenbeschrieb

Die Anlage befindet sich in Brand im österreichischen Bundesland Vorarlberg. Die Anlage wird durch die Gemeinde Brand betrieben und wurde 2015 fertig gestellt. Der Palüdbach wird an zwei Stellen (Oberstufe und Unterstufe) gefasst. Die Fassung erfolgt frontal zum Hauptstrom mittels eines Tiroler Wehrs. Das Wasser wird vom Tiroler Wehr seitlich weggeleitet und mittels eines Verteilkanals zum Coanda-Rechen geleitet. Die Fassung beim Coanda-Rechen erfolgt, wenn der Kanal gefüllt ist und das Wasser seitlich wie bei einem Überfall über die Rechen fließt. Der Verteilkanal fungiert somit als Absetzbecken vor dem Coanda-Rechen. Die Anlage verfügt über einen 2 x 7.70 m langen Coanda-Rechen mit einer Ausbauwassermenge von total 750 l/s. Der Coanda-Rechen wurde von der Firma Andaco geliefert und hat einen Stababstand von 1.0 mm. Der Palüdbach ist ein geschiebeführender Wildbach, das Mittelwasser MQ bei der Unterstufe beträgt 590 l/s. Der Geschiebetrieb besteht aus durchschnittlich abrasivem Kalkgestein.

Versuchsanordnung

Das abgelagerte Material wurde bei der Fassung Unterstufe entnommen. Die Probenahme erfolgte im Oberwasserbecken unmittelbar nach dem Coanda-Rechen und vor dem Einlauftrichter zur Triebwasserleitung.

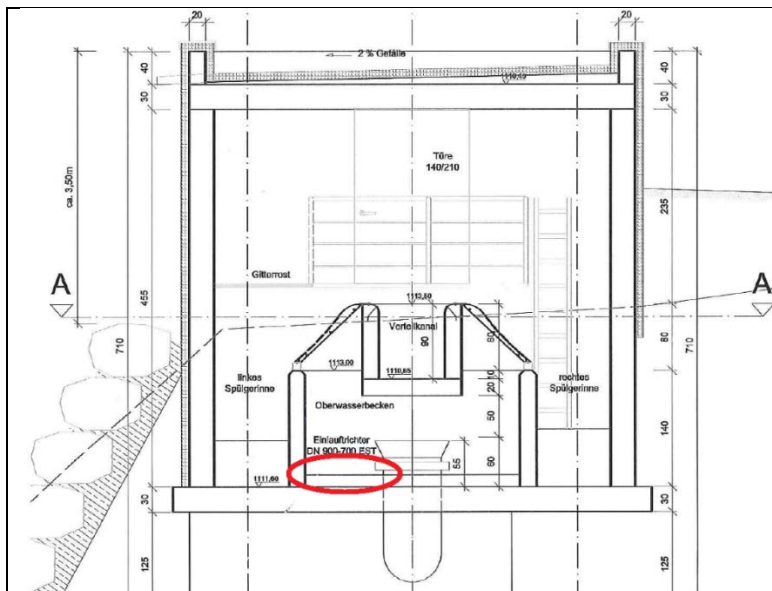


Abbildung 25: Probenahmeplan
Palüdbach, Plangrundlage;
Breuss Mähr Bauingenieure
GmbH



7.4 Arbeitsphase 4: Echtzeit-Schwebstoff-Monitoring

In dieser Arbeitsphase war für einen ausgewählten Rechen ein automatisches Echtzeit-Schwebstoff-monitoring vor und nach dem Rechen angedacht. Ein solches Monitoring wurde in der Schweiz im Rahmen eines Forschungsprojekts am KW Fieschertal erstmals durchgeführt (Publikation siehe „Wasser Energie Luft, Heft 1/ 2016, S. 9 – 24“).

Es handelt sich hierbei um ein technisch sehr anspruchsvolles Verfahren. Die Repräsentativität der Messungen, insbesondere im turbulenten Oberwasser eines geschiebeführenden Wildbachs kann nicht gewährleistet werden. Dadurch können die aufkommenden Schwebstoffe nicht ermittelt werden. Die Installation einer Messeinrichtung im Unterwasser des Coanda-Rechens ist technisch machbar und wurde im erwähnten Forschungsprojekt am KW Fieschertal erfolgreich durchgeführt. Es bedarf eines baulichen und betrieblichen Eingriffs in die Triebwasserleitung und setzt das Einverständnis des KW-Betreibers voraus.

Aufgrund der fehlenden Daten aus dem Oberwasser könnte jedoch keine Aussage über die Wirkungsweise des Coanda-Rechens gemacht werden, weswegen auf die Ausführung eines Echtzeit-Schwebstoff-Monitorings im Rahmen dieser Arbeit verzichtet wurde.

7.5 Arbeitsphase 5: Hydraulische Modellversuche zur Feststoffabweisung

Als Option zum Echtzeit-Schwebstoff-Monitoring wurde die Durchführung hydraulischer Modellversuche aufgeführt. Der Rechen soll dabei mit einem definierten Feststoff-Gemisch beaufschlagt werden. Im Rahmen einer vertieften Machbarkeitsstudie zu einem hydraulischen Modellversuch hat sich gezeigt, dass der Aufbau einer Versuchsrinne mit 0.5 bis 1.0 m Breite sehr kostspielig und deutlich teurer ist als in unserer Offerte geschätzt wurde. Insbesondere die Bereitstellung einer notwendigen Pumpleistung in der Grössenordnung von 100 l/s bedarf einer leistungsfähigen und teuren Anlage.

Solche hydraulischen Modellversuche wären weiterhin interessant und könnten zur Optimierung der Coanda-Rechen beitragen. Die ideale Abmessung und Anordnung der einzelnen Rechenstäbe in Bezug auf die Schluckfähigkeit und die Feststoffabweisung des Coanda-Rechens wurde bisher nicht wissenschaftlich untersucht und könnte Gegenstand einer weiterführenden Forschungsarbeit sein.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde auf die Ausführung von hydraulischen Modellversuchen verzichtet.



8. Ergebnisse / Erkenntnisse

8.1 Arbeitsphase 1: Grundlagen

Die Ergebnisse sind im Kapitel 5 zusammengefasst.

8.2 Arbeitsphase 2: Analyse von 22 Anlagen

Insgesamt wurden 22 Anlagen in der Schweiz, Deutschland, Italien und Österreich begangen. Dabei wurden besonders Wert auf das Anlagenkonzept und die Erfahrungen im Betrieb gelegt. Es zeigt sich grundsätzlich, dass jede Anlage an die standorttypischen Anforderungen angepasst werden muss und keine Patentlösung möglich ist. Insbesondere die Anströmungsverhältnisse sind zu beachten um eine gleichmässige Überflutung des Coanda-Rechens zu erreichen und unerwünschte Auflandungen zu vermeiden.

Nr.	Ort	Land / Kanton	Gewässer	In-betrieb-nahme	Lieferant Rechen	Aus-bau-was-ser-menge [l/s]	Re-chen-breite [m]	Sta-bab-stand [mm]	Brutto-fall-höhe [m]	Sand-fang	Bemer-kung
1a	Brand	Österreich	Palüdbach	2015	Andaco	270	6.16	1.0	230.0	nein	Fassung Oberstufe
1b	Brand	Österreich	Palüdbach	2015	Andaco	750	15.40	1.0	68.0	nein	Fassung Unterstufe
2	Buchs	St. Gallen	Tobelbach	2005	Andaco	390	3.58	1.0		ja	
3	Eischoll	Wallis	Dorfbach	2014	Andaco	280	2.00	1.0	550.0	nein	
4	Eischoll	Wallis	Gorpat-bach	2014	Andaco	280	2.00	1.0	650.0	ja	
5	Frastanz	Österreich	Samina	2003	Andaco	2'250	20.50	1.0		ja	Leitkanal
6	Guttannen	Bern	Hostet-bach	2016	Wild Me-tal	400	3.40	0.6	376.8	ja	
7	Jenbach	Österreich	Kasbach	2014	Wild Me-tal	430	6.75	1.0		nein	
8	Jenins	Graubün-den	Alpbach	2005	Andaco	60	0.90		918.0	nein	
9	Maiern	Italien	Lazzacher-bach	2012	Wild Me-tal	700	6.75	1.0		ja	
10	Miège	Wallis	La Raspille	2012	Andaco	280	2.00	1.0		ja	für Bewäs-serung
11a	Nufenen	Graubün-den	Prascher-bach	2011	Andaco	94	0.60		360.0	ja	führt zu Sammelbe-cken
11b	Nufenen	Graubün-den	Dorfbach	2011	Andaco	12			360.0	ja	führt zu Sammelbe-cken
11c	Nufenen	Graubün-den	Seeweli-Bächli	2011	Andaco	3			360.0	ja	führt zu Sammelbe-cken
11d	Nufenen	Graubün-den	Hoflibach	2011	Andaco	11			360.0	ja	führt zu Sammelbe-cken
12	Oberschan	St. Gallen	Mühlbach	2010	Stocker	100	1.00	1.0		nein	Feldver-such Sedi-mente

Tabelle 5: siehe Fortsetzung



Nr.	Ort	Land / Kanton	Gewässer	In-betriebnahme	Lieferant Rechen	Ausbauwasser- menge [l/s]	Rechen- breite [m]	Stab- ab- stand [mm]	Brutto- fall- höhe [m]	Sand- fang	Bemer- kung
13	Oberstdorf	Deutsch- land	Bacher- lochbach	2016	Stocker	1'500	11.00	1.0		ja	an Wild- bachsperre
14	Oberstdorf	Deutsch- land	Faltenbach	2011	Wild Me- tal	690	10.00			ja	
15	Pfunders	Italien	Pfunderer- bach	2012	Wild Me- tal	3'450	20.00	0.5		nein	
16	Ratschings	Italien	Valtigel- bach	2010	Wild Me- tal	300	3.40	0.6		ja	
17	Sattel	Schwyz	Steiner Aa	2016	Wild Me- tal	1'250	11.27	0.6	207.0	ja	
18	St. Leon- hard	Österreich	Pitzbach	2017	Wild Me- tal	4'000	25.00	0.4		nein	grösste An- lage euro- paweit
19	Tschiert- schen	Graubün- den	Sagen- bach	2013	Wild Me- tal	700	7.00	0.4		ja	
20	Unterbäch	Wallis	Milibach	2008	Andaco	250	4.50	1.0		nein	
21	Vals	Südtirol	Vallerbach	2012	Wild Me- tal	2'780	16.00	0.5		nein	
22	Anlage 22	Schweiz		1997	Andaco	112	1.00	1.0		nein	anonymi- siert

Tabelle 5: Zusammenfassung begangene Anlagen

8.2.1 Kurzbeschreibung der begangenen Anlagen

Die Anlagen und ihre Betriebserfahrungen werden im folgenden kurz beschrieben, detailliertere Angaben sind den aufgenommenen Datenblättern im Anhang zu entnehmen. Die Nummerierung der Anlagen erfolgte alphabetisch und entspricht der vorhergehenden Tabelle.

1a / 1b: Brand (A), Palüdbach

Die 2015 in Betrieb genommene Anlage besteht aus zwei mittelgrossen Fassungen (Unterstufe und Oberstufe) mit jeweils einem Coanda-Rechen. Die Fassung besitzt keinen eigentlichen Sandfang, jedoch wird diese Funktion teilweise durch den Spülkanal vor dem Coanda-Rechen übernommen. Im Betrieb sind bisher keine Probleme aufgetreten. Bei der Fassung Unterstufe wurden die im Kapitel 8.3.3 beschriebenen Proben entnommen.

2: Buchs (SG), Tobelbach

Die Anlage wurde bereits 2005 erstellt, bisher gab es jedoch keine Probleme mit dem Verschleiss der Rechenstäbe. Direkt vor dem Coanda-Rechen befindet sich ein Staubereich, in dem sich bereits viel Geschiebe absetzt. Trotzdem wird noch viel Feinsand gefasst, welcher sich erst in einem Tagesbecken nach dem Coanda absetzt. Der Betreiber würde aus heutiger Sicht deshalb einen Sandfang erstellen, da die Reinigung des Tagesbeckens aufwendig ist. Der Rechen wird zudem teilweise von Laub belegt, welches von Hand entfernt werden muss.



3: Eischoll (VS), Dorfbach

Die Anlage wurde 2014 erstellt. Für den Unterhalt wurde eine Plattform mit einem Gitterrost direkt unterhalb des Coanda erstellt. Diese behindert jedoch die Selbstreinigung des Rechens und sorgt für eine starke Belegung mit Laub und Geschwemmsel. Dies wird angepasst, ansonsten gibt es keine Probleme im Betrieb.

4: Eischoll (VS), Gorpatbach

Für die Anlage wurde ein grosszügiger Einlaufbereich aus Beton erstellt, welcher für eine gleichmässige Anströmung des Rechens sorgt. Bisher wurden sehr gute Betriebserfahrungen gemacht, einzig im Winter war die Anlage für kurze Zeit vereist.

5: Frastanz (A), Samina

Die Anlage an der Samina gehört zu den grössten Anlagen im Alpenraum. Die Anlage wurde bereits 2003 erstellt. Da die Samina sehr abrasives Material mitführt musste die Coanda-Rechen infolge Verschleiss bereits zweimal ausgewechselt werden. Auch der Einsatz von Coanda-Rechen mit einer härteren Legierung brachte keine Verbesserung. Als Konsequenz wird die Anlage bei Hochwasser jeweils ausser Betrieb genommen, dies ist möglich, da der Coanda seitlich zum Hauptstrom in einem abschiebbarer Leitkanal angeordnet ist. Nach Fertigstellung war zudem die Anströmung zum Rechen nicht befriedigend, weshalb nachträglich eine Buhne erstellt wurde welche das Problem beheben konnte. Bei dieser Anlage wurden die im Kapitel 8.3.2 beschriebenen Proben entnommen.

6: Guttannen (BE), Hostetbach

Die 2016 neu erstellte Anlage weist eine besondere Spülung auf, bei der mittels zwei Spülrohren das vor dem Rechen abgelagerte Material direkt unter dem Rechen weggespült wird. Es wurde zudem seitlich ein Kanal-Notüberlauf erstellt. Bisher wurden im Betrieb keine Probleme festgestellt, einzig der Anschluss des Rechens ist nicht ganz dicht, wodurch es zu leichtem Wasserverlust kommt.

7: Jenbach (A), Kasbach

Die Anlage am Kasbach wird mittels einer Klappenschütze betrieben. Dabei wird der Bach aufgestaut bis dass das Wasser über den rechts angeordneten Coanda-Rechen stürzt. Der Betrieb wurde anfangs durch Veralgung beeinträchtigt, dies konnte behoben werden indem der Rechen mit einem Blech vor Lichteinfall geschützt wurde. Ansonsten wurden keine Probleme im Betrieb festgestellt.

8: Jenins (GR), Alpbach

Die Anlage am Alpbach wird seit über 10 Jahren betrieben, die gemachten Erfahrungen sind bisher positiv. Das Wasser wird zuerst nur über einen Grobrechen gefasst und dann erst zum Coanda-Rechen in einem Fassungsgebäude geleitet. Von dort gelangt es in ein Zwischenspeicher, bevor es genutzt wird. Dadurch können sich mitgeführte Schwebstoffe und Sedimente absetzen, bevor sie in die Triebwasserleitung gelangen.



9: Maiern (I), Lazzacherbach

Die Anlage verfügt über keine Spülvorrichtung, so dass das auflandende Geschiebe nur aufwendig entfernt werden kann. Durch die Ablagerungen erfolgt die Anströmung des Coanda-Rechens teilweise unregelmässig und es wird nicht die ganze Breite des Rechens genutzt. Ein nachträglicher Einbau einer Spülvorrichtung scheint empfehlenswert. Ansonsten wurden keine Probleme im Betrieb festgestellt.

10: Miège (VS), La Raspille

Bei der Anlage an der Raspille wurde der Grobrechen gegen die Fliessrichtung versetzt zum Coanda-Rechen angebracht und ein Betondach über dem eigentlichen Rechen errichtet. Das Geröll fällt nach dem Grobrechen und dem Betondach hinter dem Coanda-Rechen wieder ins Bachbett. Der selbstkonstruierte Grobrechen hat eine kleine Spaltenweite, weswegen es im Winter zu Eisbildung in diesem Bereich kommt. Als Gegenmassnahme ist eine Winterfassung geplant.

11a / 11b / 11c / 11d: Nufenen (GR), diverse Wildbäche

In Nufenen gibt es ein System von total 9 Fassungen, welche an 4 verschiedenen Wildbächen Wasser für die gleiche Anlage fassen. Das Wasser wird zu einem Sammelbecken vor der Triebwasserleitung geführt. Bei den Fassungen wurde teilweise Verschleiss und Verkalkung beobachtet, grundsätzlich verläuft der Betrieb jedoch ohne Probleme. Bei den auf den Rechen montierten Verstärkungsrinnen wurden nachträglich Querschlitze eingebaut, so dass kein Wasser über die Rinnen läuft und somit nicht in den Coanda gelangt.

12: Oberschan (SG), Mühlbach

Die Anlage am Mühlbach weist eine untypische 7 m lange Beruhigungsstrecke vor dem Coanda-Rechen auf. Dadurch eignete sie sich ideal für die hier ausgeführte Feldversuche welche in Kapitel 8.3.1 ausgewertet wurden. Der Rechen wurde aus nicht rostbeständigem Stahl ausgeführt, weswegen er Rost angesetzt hat. Im Betrieb gibt es keine Probleme, es muss lediglich selten die Laubbelegung des Rechens von Hand entfernt werden.

13: Oberstdorf (D), Bacherlochbach

Bei dieser Anlage wurde eine Stahlkonstruktion mit dem Coanda-Rechen an einer bestehenden Wildbachsperre aufgehängt. Das gefasste Wasser wird seitlich abgeleitet und gelangt so in das Triebwassersystem. Die Anlage wurde erst 2016 installiert und zum Zeitpunkt der Begehung gab es noch praktisch keine Betriebserfahrungen. Eine Beschädigung der Aufhängung bei einem starken Geschiebeanfall ist nicht auszuschliessen.



14: Oberstdorf (D), Faltenbach

Bei der Anlagen wurden im Betrieb keine grossen Probleme festgestellt. Bei einem Murgang wurde eines der Coanda-Elemente trotz Grobrechen leicht beschädigt. Beim Grobrechen verkleben sich teilweise Steine zwischen den Stäben, als Reaktion werden bei neueren Modellen die Stäbe jeweils höhenversetzt angeordnet.

15: Pfunders (I), Pfundererbach

Die Anlage gehört mit einer Rechenbreite von 20 m zu den grössten in Europa. Die Anströmung erfolgt frontal, der Rechen wurde quer zum Hauptstrom errichtet. Die Turbinierung des Wassers erfolgt im Tal, zusammen mit dem Wasser der Anlage am Vallerbach. Im Betrieb wurden bisher keine Probleme festgestellt.

16: Ratschings (I), Valtigebach

Die Anlage am Valtigebach wurde quer zum Hauptstrom erstellt. Vor dem Coanda-Rechen gibt es einen kleinen Staubereich, in welchem sich das grobe Geschiebe absetzt. Die Anlage verfügt über keinen Spülschützen, jedoch hat es links vom Rechen einen Überlauf. Bisher gab es keine Probleme im Betrieb.

17: Sattel (SZ), Steiner Aa

Der Coanda-Rechen wurde seitlich hinter einer Verteilrinne angelegt, welche das Wasser beruhigen und gleichmässig auf den Coanda lenken soll. Die Anlage wurde in einer starken Linkskurve der Steiner Aa erstellt, dies wird im engeren Fassungsbereich zu Kiesauflandungen führen und könnte zu starkem Geschiebeandrang am Rechen führen. Als Besonderheit wurde Die Anlage wurde erst 2016 in Betrieb genommen, es können somit noch keine langfristigen Aussagen über den Betrieb gemacht werden. Eine Belegung mit Blätter konnte allerdings festgestellt werden

18: St. Leonhard (A), Pitzbach

Die Anlage am Pitzbach ist mit einer Rechenbreite von 25 m und einer Ausbauwassermenge von 4'000 l/s die momentan europaweit grösste Fassungsanlage mit einem Coanda-Rechen. Das Wasser wird mit einer Schütze aufgestaut und gelangt so zum auf einer Seite angelegten Rechen. Die Coanda-Rechen sind mit senkrechten Grobrechen und einer Tauchwand geschützt. Für die Anlage wurde zudem ein Vertical Slot Fischpass erstellt. Die Inbetriebnahme erfolgt 2017, es kann also noch keine Aussage zum Betrieb gemacht werden.

19: Tschierschen (GR), Sagenbach

Der Coanda-Rechen wurde quer zum Bach im Hauptstrom errichtet. Aufgrund Unsicherheiten betreffend der Wirkung des Rechens wurde zusätzlich ein Sandfang errichtet. Die gemachten Erfahrungen führten dazu, dass bei zukünftigen Anlagen auf den Sandfang verzichtet wird. Aufgrund von Verlandungen musste der Bereich vor dem Rechen teilweise ausgebagert werden, da die seitlich angeord-



nete Spülöffnung nicht alles Material abführen konnte. Im ersten Betriebsjahr wurde zudem eine Verstopfung des Rechen mit Algen beobachtet, in den folgenden Jahren trat dieses Phänomen jedoch nicht mehr auf.

20: Unterbäch (VS), Milibach

Die mittelgrosse Anlage am Milibach wurde 2008 fertig gestellt und konnte bisher ohne Probleme betrieben werden. Die Anlage verfügt über keinen Grobrechen, bisher trat jedoch keine Beschädigung des Coanda-Rechen auf, obwohl der Wildbach durchaus geschiebeführend ist. Als Verbesserungsvorschlag wurde einzig eine Fischaufstiegshilfe erwähnt.

21: Vals (I), Vallerbach

Die Anlage gehört mit einer Rechenbreite von 16 m zu den grössten in Europa. Die Anströmung erfolgt frontal, der Rechen wurde quer zum Hauptstrom errichtet. Bemerkenswert bei der Anlage ist insbesondere der linksseitig erstellte Vertical Slot Fischpass. Die Turbinierung des Wassers erfolgt im Tal, zusammen mit dem Wasser der Anlage am Pfundererbach. Im Betrieb wurden bisher keine Probleme festgestellt.

22: Schweiz, Anlage anonymisiert

Die Anlage wurde auf Wunsch der Betreiberin anonymisiert. Sie gehört zu den ältesten Wasserfassungen mit Coanda-Rechen in der Schweiz. Die Anlage hat sich betreffend des Verschleisses im langfristigen Betrieb bewährt. Auch bei infolge der Höhe der Fassung auftretendem grossem Schneeanfall kam es zu keinem Betriebsausfall.

8.3 Arbeitsphase 3: Abweisungsgrad der Feststoffe (2016)

8.3.1 Feldversuch 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. Dem wurde mit der im Kapitel 7.3.1 beschriebenen Reinigung nach jeder Probe entgegengewirkt.

Die nachfolgenden Diagramme zeigen im Vergleich zueinander die Siebkurven der Ausgangsprobe, des Rechenüberlaufs und des Rechendurchgangs. Die Kornverteilung der Ausgangsprobe ist dem Kapitel 7.3.1 zu entnehmen. Die Werte sind jeweils Mittelwerte.



Probe Sand 0/4 mm

Ø [mm]	Ausgangsprobe		Rechenüberlauf Mittelwert P1-P6		Abweisungs- grad	Rechendurchgang Differenzkurve		
	Fraktio- nen [%]	kumuliert [%]	Fraktio- nen [%]	kumuliert [%]	Fraktionen [%]	Fraktio- nen [%]	kumuliert [%]	kumuliert auf 100%
< 5.6	1.5	100.0	3.7	100.0	1.5	0.0	60.0	100.0
< 4.0	21.3	98.5	52.9	96.3	21.2	0.1	60.0	100.0
< 2.0	13.1	77.2	25.9	43.4	10.4	2.7	59.8	99.7
< 1.4	11.9	64.1	12.7	17.5	5.1	6.8	57.1	95.2
< 1.0	25.9	52.2	4.7	4.8	1.9	24.0	50.3	83.8
< 0.5	16.7	26.3	0.0	0.1	0.0	16.7	26.3	43.8
< 0.25	5.7	9.6	0.0	0.1	0.0	5.7	9.6	15.9
< 0.125	1.7	3.9	0.0	0.1	0.0	1.7	3.9	6.4
< 0.063	2.2	2.2	0.1	0.1	0.0	2.2	2.2	3.6

Tabelle 6: Kornverteilung Feldversuch Mühlbach, Sand 0/4

Die Werte sind Mittelwerte von insgesamt 6 Proben. Der Abweisungsgrad von 40% ergibt sich aus dem Anteil des in der Auffangwanne nach dem Coanda-Rechen wieder gesammelten Schüttmaterials. Von den eingebrachten 20'000 g Schüttmaterial wurde im Mittel 40.3% in der Wanne wieder gesammelt und analysiert, dies entspricht 7'960.2 g. Aus dem Abweisungsgrad ergibt sich das kumulierte Total des Rechendurchgangs von 60%, welches für die Siebkurve auf 100% hochgerechnet wurde.

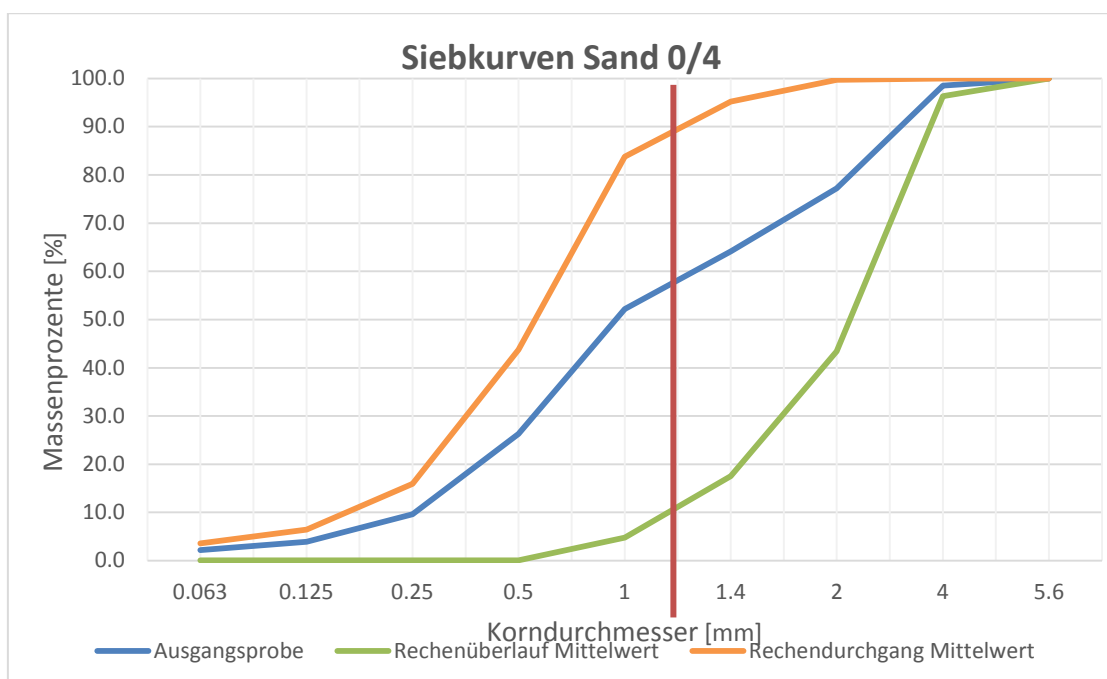


Abbildung 26: Siebkurve Feldversuch Mühlbach, Sand 0/4



Probe Korngemisch 0/16 mm

Ø [mm]	Ausgangsprobe		Rechenüberlauf Mittelwert P8-P12		Abweisungs- grad	Rechendurchgang Differenzkurve		
	Fraktio- nen [%]	kumuliert [%]	Fraktio- nen [%]	kumuliert [%]	Fraktionen [%]	Fraktio- nen [%]	kumuliert [%]	kumuliert auf 100%
< 22.4	1.4	100.0	1.6	100.0	1.1	0.3	30.0	100.0
< 16.0	11.7	98.6	14.5	98.4	10.2	1.5	29.7	99.1
< 11.2	14.4	86.9	20.5	83.9	14.4	0.1	28.2	93.9
< 8.0	16.4	72.5	21.6	63.4	15.1	1.3	28.1	93.7
< 5.6	9.6	56.1	13.7	41.8	9.6	0.0	26.8	89.5
< 4.0	12.5	46.5	17.2	28.1	12.0	0.5	26.8	89.4
< 2.0	11.4	34.0	9.6	10.9	6.7	4.7	26.4	87.9
< 1.0	10.9	22.6	1.1	1.3	0.8	10.1	21.7	72.3
< 0.5	6.9	11.7	0.1	0.2	0.1	6.8	11.6	38.5
< 0.25	2.4	4.8	0.0	0.1	0.0	2.4	4.7	15.8
< 0.125	0.9	2.4	0.0	0.1	0.0	0.9	2.3	7.8
< 0.063	1.5	1.5	0.1	0.1	0.1	1.4	1.4	4.8

Tabelle 7: Kornverteilung Feldversuch Mühlbach, Korngemisch 0/16

Die Werte sind Mittelwerte von insgesamt 4 Proben. Der Abweisungsgrad von 70% ergibt sich aus dem Anteil des in der Auffangwanne nach dem Coanda-Rechen wieder gesammelten Schüttmaterials. Von den eingebrachten 20'000 g Schüttmaterial wurde im Mittel 70.8% in der Wanne wieder gesammelt und analysiert, dies entspricht 14'162.8 g. Aus dem Abweisungsgrad ergibt sich das kumulierte Total des Rechendurchgangs von 30%, welches für die Siebkurve auf 100% hochgerechnet wurde.

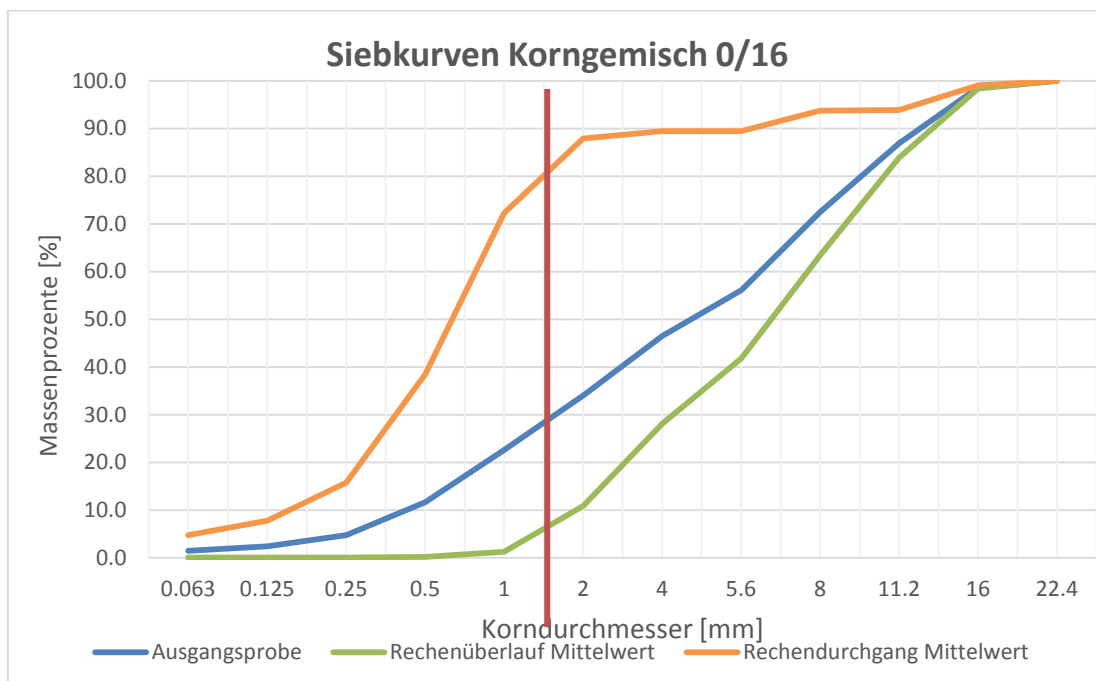


Abbildung 27: Siebkurve Feldversuch Mühlbach: Korngemisch 0/16

Interpretation

Die Feldversuche zeigen, dass der Coanda-Rechen nur einen kleinen Anteil der Fraktionen kleiner als die Spaltbreite = 1.0 mm abhalten kann. Die als Rechendurchgang berechneten Werte der Fraktionen mit einem Durchmesser grösser als die Spaltbreite sind als Verluste infolge des beschriebenen Abprallens und Liegenbleiben 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.

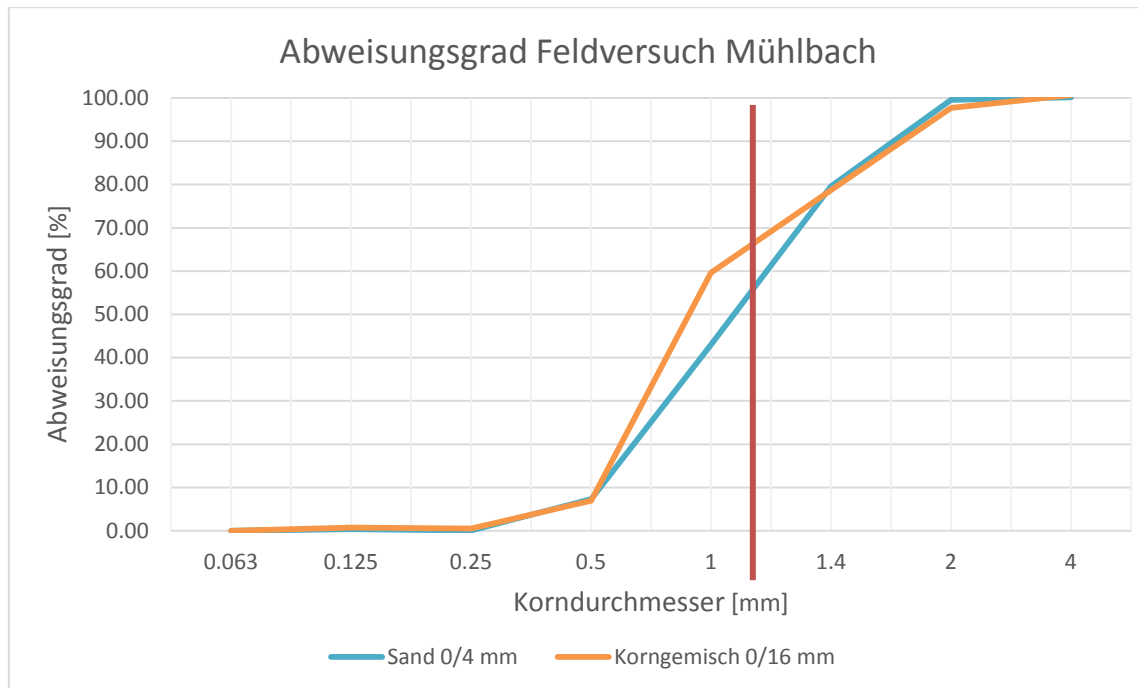


Abbildung 28: Abweisungsgrad Feldversuch Mühlbach

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. Einen Erklärungsansatz für diese verbreitete Annahme bieten die Erkenntnisse aus der Probenahme am Palüdbach (Kapitel 8.3.3). Für die Korndurchmesser über der Spaltweite von 1.0 mm bis 1.4 mm zeigt der Feldversuch einen Abweisungsgrad von 80%, darüber wird nahezu das gesamte Material abgewiesen.

8.3.2 Probenahme Samina, Frastanz (A)

Die beim Hochwasser vom 17.06.2016 entnommenen Proben wurden mittels einer Lasergranulometrie analysiert. Aufgrund der Probenahme war davon auszugehen, dass keine grossen Korndurchmesser mitgefasst werden. Die Analyse hat diese Annahme bestätigt. Die Tabelle zeigt die Kornverteilung an den drei Entnahmestellen, die Werte entsprechen jeweils den Mittelwerten.

Korngrösse [mm]	Summation [%]		
	Entnahmestelle A, bei Seitenentnahme, vor Coanda	Entnahmestelle B, in Leitkanal, unmittel- bar vor Coanda	Entnahmestelle C, vor Triebwasserleitung, nach Coanda
< 2.000 mm	100.00	100.00	100.00
< 1.000 mm	97.92	99.98	100.00
< 0.500 mm	90.46	98.02	99.14
< 0.250 mm	83.64	94.67	97.37
< 0.125 mm	79.21	90.62	94.37
< 0.063 mm	73.31	83.60	87.20
< 0.032 mm	66.05	74.60	76.91
< 0.016 mm	57.30	64.28	65.36
< 0.008 mm	46.08	51.81	52.18
< 0.004 mm	32.39	37.03	36.96
< 0.002 mm	18.79	22.19	21.95
< 0.001 mm	7.54	9.23	9.10

Tabelle 8: Korngrössenverteilung Probenahme Samina

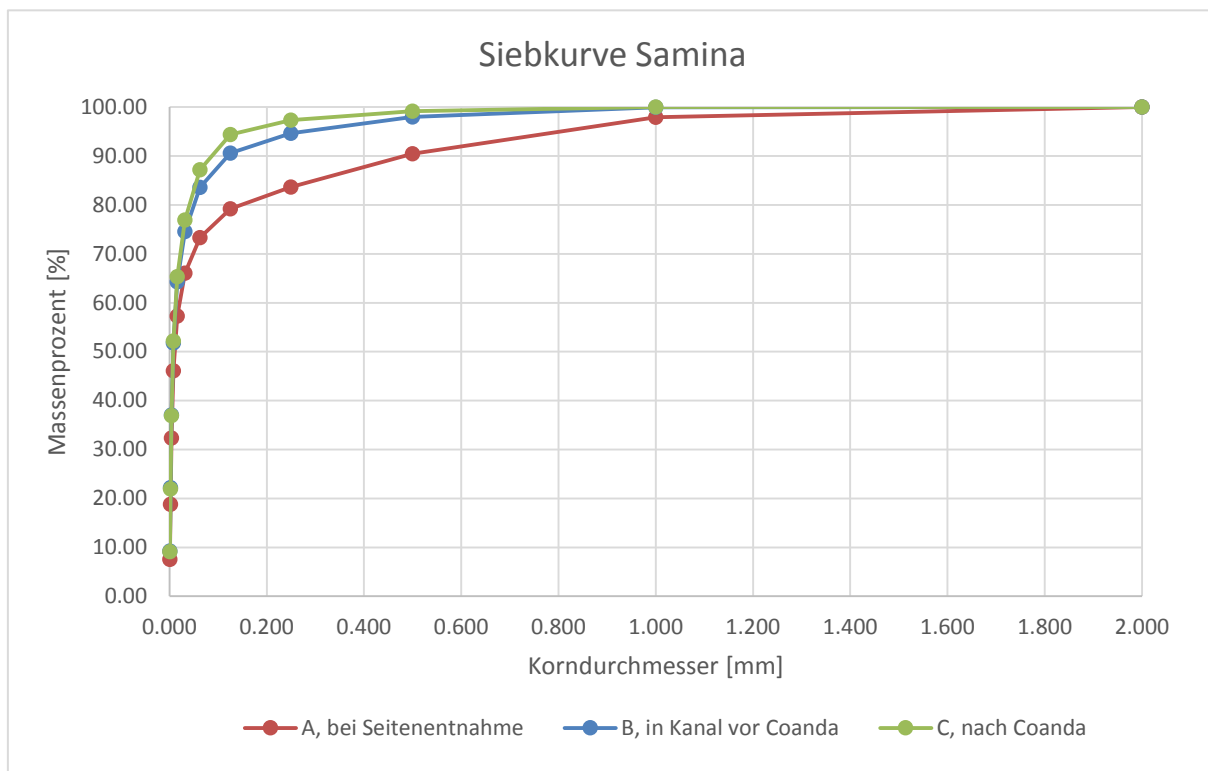


Abbildung 29: Siebkurve Probenahme Samina



Die Verteilung zeigt den Einfluss der Anlagenanordnung mit einem Leitkanal und einem Überfall direkt vor dem Coanda. Dadurch wurde ein Teil des mitgeführten Sandes bereits vor dem Coanda durch Absetzen abgeschieden. Die zusätzlich vom Coanda abgewiesenen Schwebstoffe sind auf die Hochwassersituation und somit den grossen Anteil von über den Coanda abfliessendem Wasser zu erklären. Grundsätzlich lässt sich daraus ableiten, dass bei einem die Kapazität des Coanda-Rechens übersteigendem Abfluss der Abweisungsgrad des Rechens steigt. Dies scheint in Betracht der sonst wie beim Feldversuch am Mühlbach entstehenden Situation mit auf dem Rechen liegenbleibendem Material schlüssig.

8.3.3 Probenahme Palüdbach, Brand (A)

Die von den Mitarbeitern der Anlage enthaltene 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 mm, wobei der Grossteil aus Körnern mit einem Durchmesser kleiner 0.5 mm besteht. Der minimale Anteil an Körnern 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 zurück zu führen.

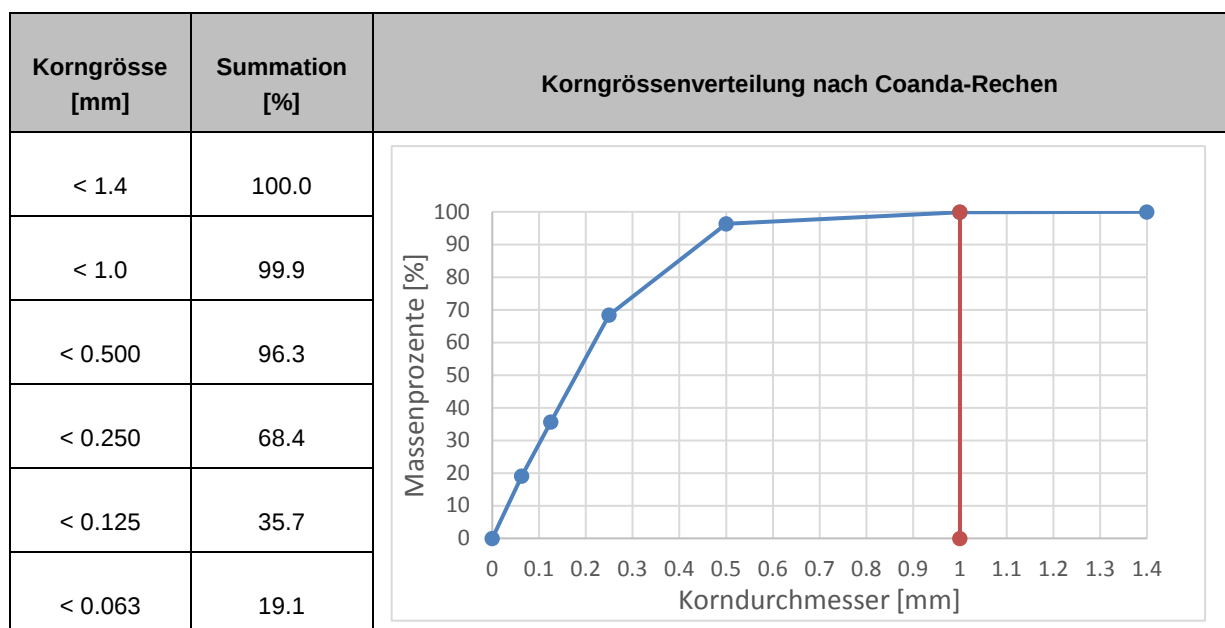


Tabelle 9: Korngrössenverteilung Unterstufe Palüdbach

Dieses Diagramm zeigt gut auf, woher die in der Literatur weiter 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 nicht im Verhältnis auf das 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.

8.4 Zusammenfassende Ergebnisse und Planungshilfen

Im Folgenden werden einige allgemeine Ergebnisse zusammengefasst und allgemeine Planungshilfen gegeben. Es werden für die wichtigsten Schwachstellen und möglichen Probleme bei Coanda-Rechen grundsätzliche Lösungsvorschläge aufgeführt. Da die Lösungsvorschläge zur Optimierung der Coanda-Rechen verschiedenartigste Fachbereiche betreffen, sind im Verlauf der Projektierung entsprechende Fachleute beizuziehen.

8.4.1 Volle Schluckfähigkeit erfordert eine gleichmässige Anströmung

Problematik: Die Schluckfähigkeit des Coanda-Rechens beträgt pro Meter Rechenbreite ca. 110 bis 130 l/s und liegt damit deutlich unter der Schluckfähigkeit von Tirolerwehren. Eine unregelmässige Anströmung des Coanda-Rechens führt zusätzlich zu einer starken Abnahme der Schluckfähigkeit, da der Rechen nicht über seine ganze Breite genutzt wird. Im Gegensatz zum Tirolerwehr mit seiner meist grossen Schluckfähigkeit reagiert der Coanda-Rechen sehr empfindlich auf eine unregelmässige Anströmung und auch auf eine Belegung des Rechens.

Lösungsvorschlag: Eine gleichmässige Anströmung kann am besten durch einen kleinen Aufstau des Gewässers mit der Ausbildung eines horizontalen Wasserspiegels im Oberwasser der Fassung erreicht werden. Der Gewässerstau bewirkt eine Sedimentation der Feststoffe, die durch eine Spülvorrichtung periodisch wieder entfernt werden müssen. Bei sehr steilen Gewässern muss evtl. ein kurzer Leitkanal erstellt werden. Grundsätzlich ist davon abzuraten, den Rechen unmittelbar nach einer starken Kurve des Gewässers anzuordnen, da so keine gleichmässige Anströmung möglich ist. Zusätzlich wird dadurch das grösstenteils im Innern der Kurve geführte Geschiebe lokal verstärkt abgelagert.



Abbildung 30:
Leichter Gewässer-
stau im Ober-
wasser zwecks
gleichmässiger An-
strömung und Ge-
schieberückhalt,
Hostetbach, Gut-
tannen BE



Abbildung 31: Leitkanal für eine gleichmässige Anströmung im sehr steilen Bachgerinne Mühlbach, EW Azmoos, Oberschan SG

8.4.2 Stirn- oder Seitenentnahme

Problematik: Dem projektierenden Ingenieur stellt sich häufig die Frage, ob er den Coanda-Rechen senkrecht (Stirnentnahme) oder längs dem Bachbett (Seitenentnahme) einbauen soll.

Lösungsvorschlag: Es sind grundsätzlich beide Einbauvarianten möglich. Die Wahl des Einbaus hängt von den Platzverhältnissen und der Fassungsmenge ab sowie vom Umstand, ob es sich um einen Neubau oder einen Umbau der Fassung handelt. Bei einem geschiebereichen Bach, welcher insbesondere stark abrasives Material führt, scheint eine Anordnung als Seitenentnahme aus wirtschaftlicher Sicht (Rechenverschleiss) sinnvoller.

8.4.3 Schutzeinrichtungen für Geschiebe- und Holztrieb

Problematik: Die filigranen Rechenstäbe des Coanda-Rechens vermögen starkem Geschiebe- und Holztrieb nicht standzuhalten und können durch schweres Geschiebe beschädigt werden.

Lösungsvorschlag: Die Rechenhersteller haben das Problem erkannt und bieten unterschiedliche Lösungen an. Die Fa. Wild GmbH bietet einen unmittelbar über dem Coanda installierten groben Schutzrechen mit Stäben in Längsrichtung an, der ähnlich einem Tirolerwehr funktioniert und das gröbere Geschiebe fernhält. Die Firma Dulas (Vertriebsfirma Andaco) bietet für diesen Fall einen Coanda-Rechen mit aufgeschweissten Rippen in kleinem Abstand an, welche grobe Feststoffe abhalten sollen.



Die Lösung der Fa. Wild bewährt sich in der Praxis besser. Teilweise erstellen die Betreiber den Schutzrechen in einer Eigenkonstruktion.



Abbildung 32: Geschieb-
schutzrechen, Fabrikat: Wild
Metal GmbH, Typ Grizzly Val-
tigelbach, Ratschings (I)



Abbildung 33: Aufgeschweis-
ste Rippen als Schutz gegen
Treibgut wie Baumstämme

Fabrikat: Wild Metall GmbH

Typ: Grizzly Titan

Quelle: Website Wild Metal
GmbH (www.wild-metal.com)

8.4.4 Verschleiss der Rechenstäbe

Problematik: Bei starkem Kies- und Sandeintrag, und insbesondere stark abrasivem, feinem, hartem Quarzsand, werden die filigranen Rechenstäbe rasch verschlissen. Die Kanten werden abgerundet und die Schluckfähigkeit geht rasch zurück. So müssen beim KW Samina des EW Frastanz die Coanda-Rechen alle 3 – 4 Jahre ausgewechselt werden, was jeweils erhebliche Kosten verursacht. Bei „normaler“ Abnutzung kann mit einer mittleren Lebensdauer von 10 bis 15 Jahren gerechnet, was ebenfalls deutlich unter der Lebensdauer der robusten Tirolerwehre liegt (Lebensdauer 50 – 80 Jahre).

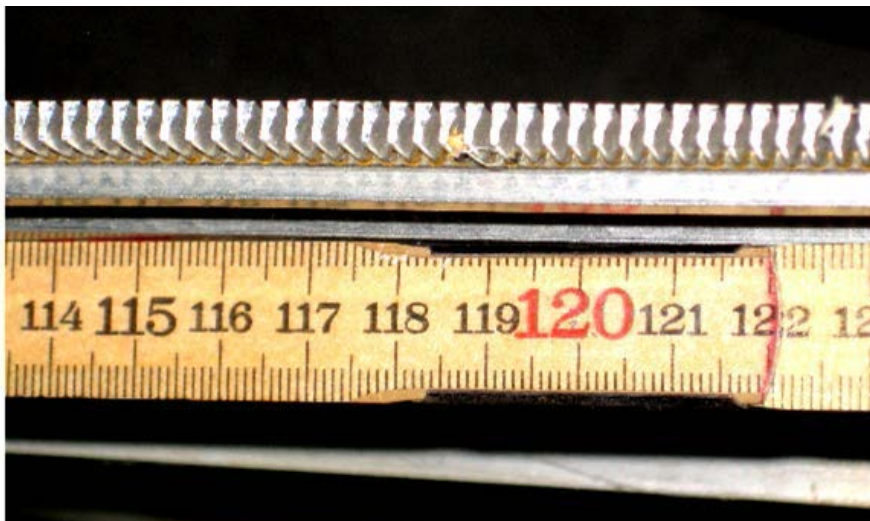


Abbildung 34: Detailansicht Coanda-Rechen;
Der Coanda-Rechen besteht aus scharfkantigen, sehr filigranen Stäben

Lösungsvorschlag zur Materialtechnologie: Ein Lösungsansatz besteht darin, härtere Stähle wie Edelstahl oder Hardox bzw. Stähle mit Zu- oder Auflegierungen zu verwenden. Zu überlegen ist auch, ob es material- und fertigungstechnisch möglich ist, den Coanda-Rechen mit einer Keramik-Beschichtung zu versehen, um die Vorteile von Keramik (abriebfest) und Metall (zäh) zu verbinden (analog der Keramik-Beschichtung von Turbinen).

Lösungsvorschlag zum Betrieb: Ein relativ einfacher Lösungsvorschlag besteht darin, den KW-Betrieb bei stark geschiebeführendem Hochwasser einzustellen und den Coanda-Rechen nicht zu beschießen. Diese Lösung wird beim KW Samina des EW Frastanz angewandt. Nachteilig bei dieser Lösung ist der Betriebsausfall während dem Durchgang der Hochwasserwelle. Für diesen Fall ist eine Konstruktion zu wählen, die den Coanda-Rechen vor Überströmung bei Hochwasser schützt.

Lösungsvorschlag zum Anlagenkonzept: Im Allgemeinen empfiehlt sich immer die Montage eines Schutzrechens über dem Coanda. Bei stark geschiebeführenden Gewässern bietet sich zudem die Ausführung der Fassung als Seitenentnahme an. Bei einer Seitenentnahme kann zusätzlich Geschiebe aussortiert werden, indem das Wasser zusätzlich über einen Überfall zum Coanda-Rechen geführt wird. Falls eine Stirnentnahme unausweichlich oder gewünscht ist, kann viel Material durch die Anordnung eines Beckens vor dem Rechen abgeschieden werden. Dies bedingt jedoch mehr Aufwand zur Wartung.



8.4.5 Verkalkung der Rechenstäbe

Problematik: Bei stark kalkhaltigen Gewässern können Rechen mit geringen Spaltweiten schlimmstenfalls rasch verkalken, sie verstopfen fast vollständig und werden dann unbrauchbar. Die Prognose, ob ein Gewässer zu einer raschen Verkalkung neigt, ist schwierig zu stellen, da dies von verschiedenen Faktoren abhängig ist.

Lösungsvorschlag: Am besten kann abgeklärt werden, ob ein Gewässer zur schnellen Verkalkung neigt, indem man ein Coanda-Rechenelement einige Wochen im betreffenden Gewässer deponiert. Falls eine rasche Verkalkung auftritt, muss das Rechenelement von Hand gereinigt werden. Einzelne Betreiber entfernen den Kalk durch das Einlegen des Rechens in ein Säurebad. Bei dieser Methode kann in der Zwischenzeit ein Ersatzrechen montiert werden, ansonsten beläuft sich der Betriebsunterbruch auf ca. 1 Tag.

8.4.6 Vereisung des Coanda-Rechens im Winter

Problematik: Vereinzelt wurde von Betreiber berichtet, dass der Coanda-Rechen aufgrund seiner geringen Spaltweiten vereisen kann und somit das Schluckvermögen abnimmt. Dies geschieht, wenn der Coanda ungenügend überströmt wird und das auf dem Rechen „liegendebliebene“ Wasser gefrieren kann, so dass sich die Eisdecke auf dem Coanda allmählich schliesst.

Lösungsvorschlag: Vereisung stellt insbesondere bei wenig Abfluss ein Problem dar. Bei genügend Abfluss ist der Coanda von Wasser überdeckt und kann nicht vereisen. Im Winter kann als Massnahme der Rechen teilweise mit Blechen abgedeckt werden und das gesamte Wasser wird mit Leitblechen konzentriert an einer Stelle über den Coanda gelassen. Alternativ kann eine Winterfassung ausgeführt werden, welche das Wasser unter dem Wasserspiegel fasst und zum Coanda leitet, hierfür muss jedoch das Anlagenkonzept entsprechend ausgelegt sein.

8.4.7 Fischaufstieg und Fischabstieg

Problematik: Handelt es sich beim zu nutzenden Bach um ein Fischgewässer, wird neben der gesetzlich vorgeschriebenen Restwasserdotation von den Amtsstellen meist auch eine funktionierende Fischaufstieg und Abstiegshilfe gefordert.

Lösungsvorschlag: Grundsätzlich eignet sich der Coanda-Rechen mit seinen geringen Spaltweiten nur für den Fischabstieg, ein Fischaufstieg ist bei einer Bauhöhe von ca. 1.30 m nicht möglich. Ein Abstieg über den Coanda-Rechen ist für die Fische jedoch nur möglich, wenn im Unterwasser der Bachlauf genügend tief benetzt ist, was nicht bei allen besuchten Anlagen der Fall war. Zudem kann nicht ausgeschlossen werden, dass sich driftende Forellen einer bestimmten Grösse bei einem Stababstand von 30 mm am Grobrechen verletzen. Für den Fischaufstieg ist zusätzlich zum Coanda-Rechen eine separate Fischaufstiegshilfe vorzusehen, entweder eine Aufstiegshilfe technischer Art (z.B. ein Vertical Slot Fischpass, bei knappen Platzverhältnissen) oder ein naturnahes Umgehungsgewässer.



Abbildung 35: Vertical
Slot Fischpass, das Un-
terwasser ist für den
Fischabstieg nicht ideal
gelöst, Vallerbach, Vals
(I)

8.4.8 Verlegung des Bachlaufs infolge Hochwasserereignis

Problematik: An einem Wildbach in Österreich, wurde ein Coanda-Rechen eingebaut. Infolge eines grossen Hochwasserereignisses verlegte der Bach seinen Lauf und umströmte die Fassungsstelle mit dem Coanda-Rechen. Der Betreiber machte die beratende Vertriebsfirma für den entstandenen Sachschaden verantwortlich.

Lösungsvorschlag: Der zuständige Projektingenieur ist dafür verantwortlich, seine Anlage auf das gemeinsam mit dem Bauherrn festzulegende sog. Projekthochwasser zu dimensionieren. Ebenfalls sind die Auswirkungen eines Extremereignisses auf das gesamte Fassungsbauwerk abzuklären. Es ist eine robuste Konstruktion zu wählen, die auch extremen Ereignissen mit grossen Wassermengen, starkem Geschiebetrieb und grossem Holztrieb standhält. Schäden an der Fassung sollen bei Extremereignissen möglichst minimiert werden. Falls im Oberlauf der Fassung eine seitliche Erosionsgefährdung besteht, ist der Bachlauf dort mit künstlichen Einbauten (z.B. Blockwurf, Buhnen usw.) zu sichern.



9. Diskussion / Würdigung der Ergebnisse / Erkenntnisse

9.1 Forschungsergebnisse

Nachfolgend werden die Forschungsergebnisse der einzelnen Arbeitsphasen im Detail beschrieben. Wenngleich das angestrebte Forschungsprogramm aus verschiedenen Gründen nicht im vorgesehenen Umfang durchgeführt werden konnte, kann gesagt werden, dass die Forschungsziele im Wesentlichen erreicht wurden. Es handelt sich um eine von Rechenherstellern unabhängige, grundlegende Arbeit zum Coanda Rechen, die den aktuellen Wissenstand zusammenfasst und neue Daten liefert, insbesondere zum Abweisungsgrad von Feststoffen.

9.1.1 Arbeitsphase 1: Grundlagen Beschaffung. Internationale Recherche. Physikalische und numerische Modelle

Im Rahmen des Projekts wurde unseres Wissens erstmals eine weltweite Übersicht von Rechenherstellern, Rechentypen, Patenten sowie zur Verbreitung des Coanda-Rechens erstellt. Dabei zeigte es sich, dass der in den USA vorerst im Bergbau entwickelte und erstmals 1983 patentierte Rechen nur eine langsame Verbreitung in Europa und im Alpenraum fand. Obwohl in der Schweiz bereits 1998 ein durchaus erfolgreiches Pilotprojekt am Rappierbach (GR) im Rahmen eines „Energie 2000“-Forschungsprojekts durchgeführt wurde, verbreitete sich der Coanda-Rechen schweizweit anfänglich nur sehr zögerlich. In den letzten wenigen Jahren fand dann in der Schweiz eine vermehrte Anwendung des fischfreundlichen und selbstreinigenden Coanda-Rechens statt. Es zeigte sich dennoch, dass in der Schweizer Fachwelt jedoch kaum bekannt ist, dass seit 1998 schon ca. 50 Coanda-Rechen in Betrieb stehen. Ein proaktiver Wissenstransfer unter den KW-Betreibern, projektierenden Ingenieurbüros und Rechenherstellern findet in der Schweiz bisher kaum statt. Auch die zuständigen Amtsstellen von Bund und Kantonen verfügen gemäss unserer Einschätzung noch über wenige Kenntnisse und fundierte Betriebs-Erfahrungen zum Coanda-Rechen. Dies mag unter anderem auch damit zusammenhängen, dass in der Schweiz derzeit nur von einer Kleinfirma (HOEHENERGIE) für Kleinstwasserkraftwerke Coanda-Rechen hergestellt werden bzw. derzeit nur eine in der Schweiz ansässige Vertriebsfirma (Andaco GmbH) Coanda-Rechen vertreibt.

In wissenschaftlicher Hinsicht wurden durch das renommierte „Bureau of Reclamation“, Denver, Colorado (USA), im Rahmen des „Bureau of Reclamation Coanda Program“ mehrere hydraulische Modellversuche (Kapazitätstests, keine Feststofftests) zur Ermittlung der Schluckfähigkeit in Funktion des Stababstands mit unterschiedlichen Rechengeometrien durchgeführt. 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. Einige wenige Feststofftests zur Bestimmung des Abweisungsgrads wurden im Rahmen von Modellversuchen gemäss unserer Recherche bisher nur an der norwegischen Universität Trondheim, Norwegen, im Auftrag der NVE Oslo (Norwegian Resources Water and Energy Directorate) durchgeführt.

Mehrere Patente modifizierter Rechentypen in jüngerer Zeit zeigen, dass der Coanda-Rechen durchaus noch ein technologisches Entwicklungspotenzial verfügt, das sich wissenschaftlich auszuloten lohnt.



9.1.2 Arbeitsphase 2: Analyse und Dokumentation von 22 Coanda-Rechen

Gemäss dem Grundsatz, dass es notwendig und zweckmässig ist, vom Erfahrungsschatz anderer zu lernen, wurden insgesamt 22 installierte Anlagen in der Schweiz, in Österreich, in Italien sowie in Deutschland besucht und analysiert. Anhand eines standardisierten Aufnahmeblattes konnte ein internationaler Erfahrungsschatz von drei im Schweizer Markt bzw. im Alpenraum tätigen Firmen (Andaco GmbH, Wild Metal GmbH, Stocker Mechatronik GmbH) und diversen Rechentypen zusammengetragen werden. Die von unabhängiger Seite, erstellte detaillierte Dokumentation der besuchten Anlagen ist für den KW-Betreiber und den projektierenden Ingenieur von relevantem Wert, auch international gesehen.

Die wichtigsten Erkenntnisse der Analyse und Dokumentation der besuchten Anlagen können wie folgt zusammengefasst werden:

- **Vorteile bestätigt:** Die bekannten Vorteile des Coanda-Rechens konnten weitgehend bestätigt werden (Fernhalten eines grossen Anteils von Feststoffen und Geschwemmsel vom Triebwassersystem, Selbstreinigung des Rechens, geringe Betriebs- und Wartungskosten, bei Verzicht auf einen Sandfang deutlich geringere Anlagekosten, Fischfreundlichkeit, Funktionsfähigkeit bis -20°C).
- **Spaltweiten:** Die in der Praxis am häufigsten verwendeten Spaltweiten betragen 0.4 mm, 0.6 mm sowie 1.0 mm. Spaltweiten von 0.2 mm, 1.5 mm und 2.0 mm wurden bei den besuchten 22 Anlagen nirgends verwendet.
- **Geschiebe:** Es hat sich gezeigt, dass für ein einwandfreies Funktionieren der Fassung stets das Gesamtsystem „Wasser und Geschiebe“ zu betrachten ist und eine massgeschneiderte konstruktive Ausgestaltung der Fassung zu wählen ist. Zum Schutz des feingliedrigen Rechens vor grobem Geschiebe hat sich die Vorschaltung eines robusten Grobrechens bzw. eines Tirolerwehrs gut bewährt. Zur Spülung des Geschiebes sind diverse konstruktive Massnahmen denkbar, wie z.B. der Bau eines Klappschützenwehrs, die Anordnung einer separaten Spülschütze, der Einbau von Spülrohren oder der Einbau einer Spülrinne quer zur Flussrichtung unmittelbar vor der Fassungsschwelle.
- **Konzeption der Wasserfassung:** Wasserfassungen an Gebirgsbächen gehören strömungstechnisch zu den anspruchsvollsten Wasserbauten. Ein nicht optimales Design des Einlaufbauwerks führt zu einem Verlust an Stromerzeugung und zu erhöhten Wartungskosten. Das Finden des besten Designs 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. Eine zentrale konzeptionelle Frage ist, ob die Fassung in Form einer Stirnentnahme oder mit einer Seitenentnahme bzw. in einer Kombination davon erfolgen soll. Die Dokumentation der 22 besuchten Anlagen zeigt die Vielfalt der möglichen Lösungen auf und stellt für den KW-Betreiber und den projektierenden Ingenieur eine wertvolle Planungshilfe zur optimalen Anordnung der wasserbaulichen Strukturen dar.
- **Rechenkapazität:** Für den Anwender ist aufgrund der Angaben in den Firmenprospekten nicht ersichtlich, ob die angegebenen Rechen-Kapazitäten einem Rechen im Neuzustand oder einem bereits abgenutzten Rechen (Abnutzungsgrad?) entsprechen. So hat ein Andaco-Rechen Typ A mit Stababstand 1 mm gemäss Firmenprospekt eine Schluckfähigkeit von 140 l/s/m, Labormessungen ergaben jedoch für einen neuen Rechen dieses Typs eine



Rechenkapazität von bis zu 350 l/s/m. Eine eindeutige Deklaration der vorhandenen bzw. für die Planung einzusetzenden Rechenkapazitäten seitens der Rechenhersteller ist hier wünschbar.

- **Rechen-Verschleiss, Reduktion der Abfluss-Kapazität:** Für die KW-Betreiber sind die aufgelisteten Betriebserfahrungen von besonderem Interesse, wobei darauf hinzuweisen ist, dass erst wenige der 22 besuchten Anlagen langjährige Betriebserfahrungen (> 10 Jahre) aufweisen. Der Erfahrungszeitraum der besuchten bzw. installierten Coanda-Rechen ist somit deutlich kleiner als die mittlere Lebensdauer von hydraulischen Maschinen, die ca. 30 bis 40 Jahren beträgt. Es kann jedoch bereits die eher geringe mittlere Lebensdauer von 5 bis 15 Jahren des feingliedrigen Coanda-Rechens infolge Verschleiss bestätigt werden. In dieser Zeit kann die Kapazität des Rechens um bis zu 70% abnehmen. Im Falle der Samina in Frastanz wurde die Erfahrung gemacht, dass infolge des dort vorhandenen abrasiven, quarzhaltigen Sands bereits ein einziges grosses Hochwasser ausreicht, um die Schluckfähigkeit des Rechens über das zulässige Mass zu reduzieren; der Betreiber dieser Anlage sieht sich daher gezwungen, den KW-Betrieb während einem grossen Hochwasser ganz einzustellen.
- **Grobrechen:** Bei keiner besuchten Anlage wurde eine Beschädigung oder gar Zerstörung des Schutzrechens beklagt, doch wurden vereinzelte Anlagen im Laufe der Zeit baulich angepasst. Im Hinblick auf die Robustheit der Anlagen gegenüber Hochwasser sind je nach Standort wohl nur wenige grosse Ereignisse zu verzeichnen, sodass die Frage der Bewährung des Designs der Anlage sowie der installierten Schutzrechen nicht schlüssig beantwortet werden kann.
- **Notwendigkeit eines Sandfangs:** In Gesprächen mit den KW-Betreibern von Mittel- und Hochdruck-Kraftwerken sowie den projektierenden Ingenieuren kam oft die grosse Unsicherheit zur Sprache, ob im gegebenen Fall ein Sandfang notwendig sei oder nicht. Um auf „Nummer sicher zu gehen“, entschied sich die Bauherrschaft sehr oft zum Bau eines Sandfangs. In dieser Frage besteht somit ein offensichtlicher Klärungs- und Forschungsbedarf im Verständnis der Funktionsweise von Coanda Rechen.
- **Fischauf- und -abstieg:** Handelt es sich beim zu nutzenden Bach um ein Fischgewässer, wird neben der gesetzlich vorgeschriebenen Restwasserdotation von den Amtsstellen meist auch eine funktionierende Fischauf- und -abstiegshilfe gefordert. Grundsätzlich eignet sich der Coanda-Rechen mit seinen geringen Spaltweiten nur für den Fischabstieg, ein Fischaufstieg ist bei einer Bauhöhe von ca. 50 bis 200 cm nicht möglich. Ein Abstieg über den Coanda-Rechen ist für die Fische jedoch nur möglich, wenn im Unterwasser der Bachlauf genügend tief benetzt ist, was nicht bei allen besuchten Anlagen der Fall war. Zudem kann nicht ausgeschlossen werden, dass sich driftende Forellen einer bestimmten Grösse am Grobrechen verletzen. Für den Fischaufstieg ist zusätzlich zum Coanda-Rechen eine separate Fischaufstiegshilfe vorzusehen, entweder eine Aufstiegshilfe technischer Art (z.B. ein Vertical Slot Fischpass, bei knappen Platzverhältnissen) oder ein naturnahes Umgehungsgewässer.



9.1.3 Arbeitsphase 3: Ermittlung des Abweisungsgrads von Feststoffen in Betrieb stehender Coanda-Rechen im Feldversuch

In den Firmenprospekten der Rechenhersteller von Coanda-Rechen wird der hohe Abweisungsgrad der Feststoffe besonders hervorgehoben. So wird im Firmenprospekt der Firma Andaco GmbH gesagt, dass ein Coanda-Rechen mit 1 mm Spaltabstand mindestens 90% der Feststoffe mit einem Korndurchmesser > 0.5 mm von der Fassung fernhält, siehe nachfolgende Tabelle.

Rechenausführung: Stababstand	Feststoff Abweisung $> 90\%$
1.0 mm	0.5 mm
0.4 mm	0.2 mm
0.2 mm	0.1 mm

Tabelle 10: Feststoffabweisung bei verschiedenen Spaltabständen; (Quelle: (Entec AG, Hans Marugg & Partner AG, 1998))

Unzweifelhaft ist, dass ein Coanda-Rechen alle Partikel, die grösser als der Spaltabstand des Rechens sind, vom Triebwasser fernhält. Die von den Rechenherstellern angeführten Angaben zur Feststoffabweisung des Coanda-Rechens gibt jedoch keine Auskunft über die speziell interessierende Frage, wieviel Prozent der für die Abrasion kritischen Partikelgrößen (0.2 bis 0.3 mm) den Rechen tatsächlich passieren oder von ihm abgewiesen werden. Die Versuchs-Idee dieser Arbeitsphase war daher, die Konzentration sowie die Partikelgrösse unmittelbar vor sowie nach dem Coanda-Rechen zu ermitteln. Die Frage des Abweisungsgrads von Feststoffen ist insbesondere für die Frage von Bedeutung, ob bei einer Fassung mit einem Coanda-Rechen für eine Mittel- oder Hochdruckanlage ein Sandfang notwendig ist oder nicht.

9.1.3.1 Feststoff-Feldversuch am Mühlbach, Oberschan (SG)

Diese kleine Anlage mit einem Coanda-Rechen von 1.0 m Breite und einer Spaltweite von 1 mm eignet sich geradezu ideal zur Durchführung von Feldversuchen. Die Anlage besteht aus einem ca. 7 m langen und 1.0 m breiten, horizontalen Betonkanal, in dem das Wasser laminar zum Coanda-Rechen fließt. Es wurden 6 Feststoff-Proben zu 20 kg einer definierten Feststoffmischung 0/4 mm sowie 4 Feststoff-Proben zu 20 kg einer definierten Feststoffmischung 0/16 mm im Oberwasser des Betonkanals zugegeben, die ausgeschiedenen Feststoffe wurden in einer Wanne unterhalb des Coanda-Rechens aufgefangen und deren Kornverteilungskurve im Labor bestimmt (Siebanalyse nach SN EN 933-1). Im Rahmen eines Pilotversuchs wurde das Vorgehen getestet und für zweckmässig befunden.



Zugabe 20 kg definiertester Feststoffmischung

Abfangen der ausgeschiedenen Feststoffe mittels einer Wanne und einer Folie

Abbildung 36: In Situ Versuche am Mühlbach, Oberschan SG.

Ergebnisse des Feststoff-Feldversuchs am Mühlbach

- Die Messergebnisse am Mühlbach haben aufgezeigt, dass rund 40 bis 57% der Feststoffe der Korngrösse kleiner als 1 mm (Spaltabstand) 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 (Ausscheidungsgrad 7%). Der Abweisungsgrad der Feststoffe, die kleiner als der ganze bzw. der halbe Spaltabstand des Rechens sind, ist somit ungünstiger als von den Rechenherstellern in ihren Werbebroschüren suggeriert.
- Das Herunterskalieren der Ergebnisse von einem Rechen mit 1 mm Stababstand auf kleinere Stababstände ist vermutlich fragwürdig, weil die Geometrie der Einzelstäbe, soweit bekannt, nicht mit dem Stababstand korreliert, es gibt da verschiedene Kombinationen von Stabgeometrie und Stababstand. Zudem ist zu erwähnen, dass am Mühlbach ein Coanda-Rechen der Fa. Stocker Mechatronik GmbH installiert wurde, der ca. 10 mal weniger Rechenstäbe aufweist als die üblichen Coanda-Rechen.

9.1.3.2 Feststoff-Feldversuch an der Samina, Frastanz (A)

Wichtigste Voraussetzung für die Durchführung solcher Versuche ist das Auftreten eines grossen geschiebeführenden Hochwassers. Im Jahr 2016 nutzten wir das ca. 10-jährliche Ereignis in der Ostschweiz vom 17.6.2016. Eine erfolgreiche Probenahme durch HTW-Mitarbeiter oberhalb und unterhalb des Coanda-Rechens mit einem Feststoff-Entnahmegesetz des BAFU erfolgte an der Samina bei Frastanz (V), wo ein Coanda-Rechen mit 1 mm Spaltweite installiert ist. Die Samina hatte zum Aufnahmezeitpunkt eine Feststoffkonzentration von ca. 2 g/l. Die Korngrössenverteilung der Feststoffe wurde mittels Lasergranulometrie ermittelt. Die am gleichen Tag geplante Probenahme am Tobelbach



in Buchs (SG) war leider nicht möglich, da das Hochwasser dort bereits abgeklungen war und das Wasser kaum mehr Feststoffe mit sich führte.

Ergebnisse des Feststoff-Feldversuchs an der Samina

- Die Messergebnisse des Feldversuchs an der Samina haben aufgezeigt, dass rund 60% der Feststoffe der Korngrösse kleiner als 1 mm (Spaltabstand) den Coanda-Rechen passieren und somit ins Triebwassersystem gelangen (Abweisungsgrad 40%). 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 der ganze bzw. der halbe Spaltabstand des Rechens sind, ist somit ungünstiger als von den Rechenherstellern in ihren Werbebroschüren suggeriert, vgl. Feldversuch am Mühlbach im vorherigen Abschnitt.
- Es liegen nur Versuchsergebnisse für einen Coanda-Rechen mit 1mm Spaltweite vor. Feldversuche an Coanda-Rechen mit Stababständen von 0.2mm, 0.4mm, 1.5 mm und 2 mm liegen nicht vor und wurden in Rücksprache mit dem Bundesamt für Energie ausgesetzt. Einerseits wurden Rechen mit Spaltweiten von 0.2 mm, 1.5 mm und 2 mm bisher noch nie angetroffen. Die ursprünglich vorgesehene Probenahme durch KW-Personal erwies sich andererseits leider als nicht möglich, da uns mangels Verfügbarkeit nur ein einziges Schwebstoff-Entnahmegerät des BAFU zur Verfügung gestellt werden konnte. Zudem hat sich gezeigt, dass bei einem grossen Hochwasser das KW-Personal mit der Behebung von Stromunterbrüchen und dergleichen dringenden Aufgaben beschäftigt ist und daher verständlicherweise wenig Interesse an der Mitwirkung einer wissenschaftlichen Versuchskampagne zeigt. Das Herunterskalieren der Ergebnisse von einem Rechen mit 1 mm Stababstand auf kleinere Stababstände ist vermutlich fragwürdig, weil die Geometrie der Einzelstäbe, soweit bekannt, nicht mit dem Stababstand korreliert, es gibt da verschiedene Kombinationen von Stabgeometrie und Stababstand.
- Ein systembedingtes, generelles Fragezeichen ist zur angewandten Methodik und zur Repräsentativität der Versuche zu stellen. Einerseits variiert die Feststoffverteilung stark über den Gewässerquerschnitt, wie die diversen Feststoffmesskampagnen der BWG/BAFU zeigen. Diese variiert überdies auch stark mit der Hochwasserwelle, die bei kleinen Einzugsgebieten im Allgemeinen nach wenigen Stunden rasch wieder abklingt. Zudem herrschen bei grossen Hochwassern komplizierte dreidimensionale turbulente Strömungen vor, diese sind des Weiteren bei jeder Fassung je nach Design der Anlage wieder unterschiedlich.
- Die Probenahme im Oberwasser des Coanda-Rechens an der Samina mit der Spaltweite 1mm erfolgte manuell mit einem Schwebstoff-Entnahmegerät an Stange (SGS) des BAFU in stark turbulenter Strömung (Abb. 37). Diese in der Schweiz standardisierte Methode eignet sich für Punktmessungen geschiebeführender Gewässer mit alpinem Charakter. Die Schwebstoffe wurden in einer 1-Liter Plastikflasche gesammelt (rechtes Bild). Die Entnahmeflasche wurde hierzu an einem hydrodynamisch geeignet geformten Körper befestigt, der an einer Stange montiert ist. Die Düsenöffnung beträgt 5 mm. Die Korngrössenverteilung der Feststoffe wurde mittels Lasergranulometrie ermittelt.



Abbildung 37: Probenahme im Oberwasser des Coanda-Rechens an der Samina, Frastanz (AT) beim ca. 10-jährlichen geschiefbeführenden Hochwasser vom 17.6.2016

.Siebanalyse von Feststoffproben am Palüdbach, Brand (AT)

Mittels Siebanalyse nach SN EN 933-1 wurde die Korngrößenverteilung der Feststoffe am Palüdbach, Brand (V) ermittelt, wo uns durch den KW-Betreiber eine entsprechende Feststoffprobe mit Sandfang-Material, welches sich unmittelbar nach dem Coanda-Rechen abgelagert hat, zur Siebanalyse zugestellt wurde. Die Spaltweite des Coanda-Rechens am Palüdbach beträgt 1 mm. Die Analyse zeigt, dass 96% der abgelagerten Körner einen Durchmesser < 0.5 mm aufweisen. Dieser Versuch bringt nur bedingt brauchbare Ergebnisse zum Abweisungsgrad der Feststoffe, da die Kornverteilung der natürlichen Ausgangsmischung nicht bekannt ist. Zumindest kann jedoch eine Aussage über die Kornverteilung des den Rechen passierten Materials gemacht werden.

9.1.4 Verzicht auf Arbeitsphase 4: Echtzeit-Schwebstoff-Monitoring

In dieser Arbeitsphase war für einen ausgewählten Rechen ein automatisches Echtzeit-Schwebstoffmonitoring vor und nach dem Rechen angedacht. Ein solches Monitoring wurde in der Schweiz im Rahmen eines Forschungsprojekts am KW Fieschertal (VS) erstmals durchgeführt. An der Tagung „Schwebstoffe, hydro-abrasiver Verschleiss und Wirkungsgradänderungen an Peltonturbinen“ vom 30. September 2015 in Horw an der Hochschule Luzern (HSLU) wurden die Resultate dieses Projekts einem Fachpublikum präsentiert (Abgottspon et al, 2016, Wasser Energie Luft, Heft 1/ 2016, S. 9 – 24). Es zeigte sich, dass es sich hierbei um ein technisch sehr anspruchsvolles Verfahren handelt. Die Gewährleistung der Repräsentativität der Messungen, insbesondere im turbulenten Oberwasser eines geschiefbeführenden Wildbachs, ist sehr heikel. Die Installation der Messeinrichtung im Unterwasser des Coanda-Rechens bedarf eines grösseren baulichen und somit teuren Eingriffs in die Triebwasserleitung und setzt das Einverständnis des KW-Betreibers voraus. Daher wurde in Rücksprache mit dem Bundesamt für Energie im Rahmen der vorliegenden Studie auf ein Echtzeit-Feststoffmonitoring verzichtet.



9.1.5 Arbeitsphase 5: Hydraulische Modellversuche zur Feststoffabweisung

Als Option wurde im Forschungsvertrag mit dem Bundesamt für Energie die Durchführung hydraulischer Modellversuche aufgeführt. Der Coanda-Rechen sollte dabei mit einem definierten Feststoff-Gemisch beaufschlagt werden. Im Rahmen einer vertieften Machbarkeitsstudie zu einem hydraulischen Modellversuch hat sich gezeigt, dass der Aufbau einer Versuchsrinne mit 0.5 bis 1.0 m Breite sehr kostspielig und deutlich teurer ist als in der Offerte der HTW geschätzt wurde. Insbesondere die Bereitstellung einer notwendigen Pumpleistung in der Grössenordnung von 100 bis 150 l/s bedarf einer leistungsfähigen und teuren Versuchs-Anlage.

Als Ausweichlösung wurden daher in Abstimmung mit dem Bundesamt für Energie Modellversuche am bestehenden Coanda-Rechen am Mühlbach in Oberschan vorgenommen.

9.1.6 Weiterbildungsveranstaltung und Fachtagung im Herbst 2017

Im Rahmen unserer zahlreichen Kontakte hat sich gezeigt, dass seitens von Planern und Elektrizitätswerken in der Schweiz und im nahen Ausland ein sehr grosses Bedürfnis besteht, die Ergebnisse des Forschungsprojekts einem interessierten Publikum zu präsentieren. Angedacht ist eine eintägige Veranstaltung an der HTW Chur mit Fachvorträgen und einer Exkursion zu einem Coanda-Rechen in der Region. Zudem soll den Rechenherstellern im Rahmen einer begleitenden Ausstellung die Möglichkeit geboten werden, ihre Produkte zu präsentieren.



10. Schlussfolgerungen

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

Rechenhersteller, Rechentypen

Die internationale Recherche ergab, dass weltweit rund ein Dutzend Firmen Coanda-Rechen herstellen. Davon gibt es wenige patentierte Typen. In der Schweiz stellt aktuell keine grössere Firma Coanda-Rechen her.

Vorteile Coanda-Rechen bestätigt

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 vollauf bestätigt werden (Fernhalten eines grossen Anteils von Feststoffen und Geschwemmsel vom Triebwassersystem, Selbstreinigung des Rechens, geringe Betriebs- und Wartungskosten, bei Verzicht auf einen Sandfang geringere Anlagekosten, Fischfreundlichkeit, keine Vereisung bis Temperaturen von -20°C).

Spaltweite und Abweisungsgrad von Feststoffen

Im Rahmen eines Feldversuchs am Coanda-Rechen am Mühlbach (Oberschan, SG; Spaltabstand 1 mm) wurde der Abweisungsgrad der Feststoffe mittels Siebanalyse ermittelt. Am Coanda-Rechen an der Samina (Frastanz, Vorarlberg; Spaltabstand 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 (Spaltabstand) 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 der ganze bzw. der halbe Spaltabstand des Rechens sind, ist somit ungünstiger als von den Rechenherstellern in ihren Werbebroschüren suggeriert.

Spaltweite und Anordnung eines Sandfangs

Feststoffe, die ins Triebwassersystem gelangen, können dort Abrasionschäden 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. Da das Grenzkorn für Sandfänge in der Schweiz bei Hochdruck-Kraftwerken (Fallhöhe $> 50\text{ m}$) 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 kleineres, spülbares Absetzbecken nach dem Coanda-Rechen zu empfehlen. Spaltweiten von 0.2 mm verstopfen erfahrungsgemäss sehr rasch durch Feinsand und sind für geschiebeführende Gewässer daher nicht zu empfehlen.



Wassermenge

Ein Problem Punkt des Coanda-Rechens ist die im Vergleich zu einem Tirolerwehr relativ geringe spezifische Schluckfähigkeit, die stark von der Spaltweite und der Bauhöhe des Rechens abhängig ist (je nach Modell 50 bis 250 l/s/m). Mit einem Tirolerwehr kann demgegenüber eine deutlich grössere spezifische Wassermenge bis ca. 2'000 l/s/m gefasst werden. Damit ergeben sich bei grösseren Fassungen grossen Rechenbreiten. So erfordert die derzeit europaweit grösste Wasserfassung mit einem Coanda-Rechen (Fassungsmenge 4'000 l/s bei St. Leonhard am Pitzbach, Tirol) eine Rechenbreite von 25 m.

Anströmung

Wichtig ist eine Beruhigung der Wasseroberfläche bzw. eine gleichmässige Anströmung des Coanda-Rechens, damit die im Vergleich zu einem Tirolerwehr 10- bis 20-mal kleinere spezifische 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.

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 und ist bei Hochdruck-Kraftwerken wirtschaftlich unbedeutend. Aufgrund der Erfahrung bei in Betrieb befindlichen Anlagen hat es sich gezeigt, dass die Wirtschaftlichkeit eines Coanda-Rechens ab einer Fallhöhe von ca. 30 m gegeben ist. Darunter sollte dies überprüft werden.

Geschiebe

Für ein einwandfreies Funktionieren ist stets das Gesamtsystem „Wasser und Geschiebe“ zu betrachten und eine massgeschneiderte konstruktive Ausgestaltung der Fassung zu wählen. Zum Schutz des feingliedrigen Rechens vor grobem Geschiebe hat sich die Vorschaltung eines robusten Grobrechens bzw. eines Tirolerwehrs gut bewährt. Zur Spülung des Geschiebes sind diverse konstruktive Massnahmen denkbar, wie z.B. der Bau eines Klappschützenwehrs, die Anordnung einer separaten Spülschütze, der Einbau von Spülrohren oder der Einbau einer Spülrinne quer zur Flussrichtung unmittelbar vor der Fassungsschwelle.

Konzeption der Wasserfassung

Wasserfassungen an Gebirgsbächen gehören strömungstechnisch zu den anspruchsvollsten Wasserbauten. Schlechtes Design des Einlaufbauwerks führt zu einem Verlust an Stromerzeugung und zu erhöhten Wartungskosten. Das Finden des besten Designs der Wasserfassung ist abhängig von den lokalen Gegebenheiten, dem Gewässercharakter, der Fassungsmenge sowie der Frage, ob ein Neubau bzw. ein Umbau einer Wasserfassung vorzunehmen ist. Im Rahmen der vorliegenden Studie werden diverse mögliche Fassungstypen 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.



Fischwanderung

Fischabstieg: Der Coanda-Rechen erlaubt es - im Gegensatz zum Tirolerwehr mit seinen grossen Spaltweiten - den Fischen und Wassertieren ohne Schaden zu nehmen darüber abwärts zu gleiten. Damit die Fischmigration flussabwärts erfolgreich verläuft, ist neben einer ausreichenden Restwasserdotation unmittelbar unterhalb dem Coanda-Rechen ein genügend grosses, ständig wasserführendes Becken mit einer Wassertiefe von mindestens 30 bis 50 cm anzuordnen. Für den Fischaufstieg ist der Coanda-Rechen ungeeignet.

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 Verbesserung des Abweisungsgrads feiner Partikel (damit auf einen Sandfang verzichtet werden kann) sowie die Erhöhung des spezifischen Schluckvermögens (z.B. durch eine längere Beschleunigungsplatte oder eine optimierte Formgebung des Rechens und der Rechenstäbe). Es wird daher vorgeschlagen, in einem weiterführenden Forschungsprojekt das Entwicklungspotential des Coanda-Rechens weiter auszuloten.



11. Ausblick, nächste Schritte nach Projektschluss

11.1 Wissens- und Technologietransfer im 2017

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. Im Weiteren ist seitens der HTW Chur geplant, zusammen mit einem geeigneten Schweizer Wirtschaftspartner ein weiterführendes KTI-Projekt zum Coanda-Rechen durchzuführen.

Eine bereits fest eingeplante internationale Fachtagung soll an der HTW Chur am 19. Sept. 2017 stattfinden. Hierfür wurde eine grobe Planung erstellt. Das Ziel ist 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.

11.2 Ausblick und Anschlussprojekte

Durch die Bearbeitung dieses Projektes ist dem IBAR Team klar geworden, dass nicht alle Fragen und Ziele erreicht werden können. Die Erhebung von Bestandesfakten hat sich als zeitraubend und teilweise zähe herausgestellt. Viele der Betreiber verfügen nicht über alle erforderlichen Fakten, welches zu Wissenslücken geführt hat. Manche Betreiber waren sehr kooperativ und zeigten echtes Interesse an dieser Forschungsarbeit und vor allem deren Ergebnisse.

Bei den beabsichtigten Laborversuchen haben sich die Faktoren Zeit und Kosten als massgebend herausgestellt. Diese wurden leider sehr knapp im Projektantrag kalkuliert. Trotzdem ist es gelungen, einige Aussagen machen zu können, da die Ergebnisse von zwei Feldversuchen deutliche Resultate lieferten.

Am wichtigsten war die Erkenntnis, 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, die offensichtlich aus einer einzigen Quelle und wissenschaftlich fragwürdig sind. Über drei Jahrzehnte wurden Dimensionierungsgrundlagen gutwillig immer kopiert, ohne die Quelle dieser Grundlagen in Frage zu stellen. Das Projektteam konnte aus Mangel an Ressourcen, die Fragen mit dem Abweisungsgrad von Geschiebe nur zum Teil beantworten. Obwohl keine umfangreichen Antworten geliefert werden können, sind definitive Resultate durch Anschlussforschungen zum Greifen nah.

Zu empfehlen sind weitere Untersuchungen, vor allem als Grosslaborversuche. Hierzu bereitet das IBAR Projektvorschläge vor, die mit dem BFE abgestimmt werden, um Anschlussprojekte aufzubauen. Auf alle Fälle werden Ideen zum Fortführen dieser Forschungsarbeit Anfang 2017 dem BFE vorgelegt. Folgeprojekte müssen sich hauptsächlich mit Versuchen beschäftigen, um den Abweisungsgrad und die reellen Schluckvermögen der Coanda-Rechen ermitteln zu können. Darüber hinaus kann die Konstruktion der Coanda-Rechen wie z. B. Spaltweite und Stabbreite durch Versuche optimiert werden.



12. Referenzen

12.1 Literatur

Fachliteratur, wissenschaftliche Arbeiten

- 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 (www.waterscreen.com)
- 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 Dorothée, 2005: Laboratory Testing of Coanda effect Screens for small hydro intakes, Institutt for Vann- og Miljøteknikk, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norwegen
- Ott, R. F. & Strong, J. J. (1988, October). "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 und 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.

Lehrbücher, Skripts

- Boes Robert, 2013: Wasserbau II. Vorlesungs-Script ETH Zürich
- Giesecke J., Mosonyi E, 2009: Wasserkraftanlagen, Springer-Verlag Berlin, 5. Auflage*
- 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

12.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Prinzipskizze eines Coanda-Rechens.....	9
Abbildung 2: Funktionsprinzip des Coanda-Rechens	10
Abbildung 3: Coanda-Rechen (engl. Coanda screen) am Forks of Butte Creek, einem kleinen Nebenfluss des Sacramento Rivers, nahe der Stadt Paradise, Kalifornien (USA).....	11
Abbildung 4: Pilotprojekt Coanda-Rechen am Rappierbach bei Hinterrhein GR. Erster Coanda-Rechen in der Schweiz. Inbetriebnahme 1998.....	11
Abbildung 5: Gefahrloser Fischabstieg	11
Abbildung 6: Aktuell europaweit grösster Coanda-Rechen bei St. Leonhard am Pitzbach (Tirol).	12
Abbildung 7: Abrasion des Turbinenlaufrades	13
Abbildung 8: Beispiel eines Tirolerwehrs am Oberalppass (GR) Quelle: unbekannt	16
Abbildung 9: Fassung am Vallerbach bei Vals, Südtirol	18
Abbildung 10: Coanda-Rechen mit obenliegendem Schutzrechen. Suonen-Fassung Obere und untere Bitscheri, Gemeinde Naters, Kt. Wallis, Kapazität 200 l/s, Quelle: unbekannt	19
Abbildung 11: Grosse Wasserfassung mit einem Coanda-Rechen in Kanada Fabrikat: Norris Screen, Brandywine Creek Hydroelectric Project, Kapazität: 4'000 l/s Quelle: unbekannt.....	20



Abbildung 12: Rechentypen der Fa. Andaco GmbH, Internet-Auszug aus Firmenprospekt. Der Typ E fehlt im Bild Quelle: andaco.ch.....	22
Abbildung 13: Fassung am Gorpatbach, Gde Eischoll (VS). Coanda-Rechen der Fa. Andaco GmbH.	22
Abbildung 14: Grizzly-Rechen der Fa. Wild Metal GmbH; Module mit verschiedenen Schutzrechenausführungen: Grizzly Power Protec (links), Grizzly Power Titan (mitte) und Grizzly Power Optimus (rechts), Quelle: wild-metal.com	23
Abbildung 15: Neuer Coanda-Rechen IBEX der Fa. Stocker Mechatronik GmbH mit Drehstäben. Auszug aus Firmenprospekt, Quelle: wasserkraft.npage.at	24
Abbildung 16: Patentierter Coanda-Rechen der Fa. HOEHENERGIE mit dem speziellen Lamellenprofil. Quelle: Bild, Homepage hoehenergie.ch/; Systemskizze, IBAR	25
Abbildung 17: Modellversuch am Coanda-Rechen im Bureau of Reclamation, Denver, Colorado (USA) (Wahl, 2003)	26
Abbildung 18: Versuchsanlage zur Durchführung von Modellversuchen an der Universität Trondheim, Norwegen (Jenssen und Huber, 2005)	27
Abbildung 19: Übersichtskarte Coanda-Rechen in der Schweiz und im nahen Ausland, Stand Dez. 2016.....	30
Abbildung 20: Übersicht Anlage Mühlbach	32
Abbildung 21: Zulauf Coanda-Rechen	32
Abbildung 22: Versuchsanordnung Mühlbach, Plangrundlage: Ingenieurbüro Rissi + Partner AG	33
Abbildung 23: Entnahmegesetz des BAFU	34
Abbildung 24: Probenahmeplan Samina, Plangrundlage; E-Werke Frastanz	35
Abbildung 25: Probenahmeplan Palüdbach, Plangrundlage; Breuss Mähr Bauingenieure GmbH	36
Abbildung 26: Siebkurve Feldversuch Mühlbach, Sand 0/4	44
Abbildung 27: Siebkurve Feldversuch Mühlbach: Korngemisch 0/16.....	45
Abbildung 28: Abweisungsgrad Feldversuch Mühlbach	46
Abbildung 29: Siebkurve Probenahme Samina	47
Abbildung 30: Leichter Gewässerstau im Oberwasser zwecks gleichmässiger Anströmung und Geschieberückhalt, Hostetbach, Guttannen BE.....	49
Abbildung 31: Leitkanal für eine gleichmässige Anströmung im sehr steilen Bachgerinne Mühlbach, EW Azmoos, Oberschan SG.....	50
Abbildung 32: Geschiebschutzrechen, Fabrikat: Wild Metal GmbH, Typ Grizzly Valtigelbach, Ratschings (I)	51
Abbildung 33: Aufgeschweisste Rippen als Schutz gegen Treibgut wie Baumstämme	51
Abbildung 34: Detailansicht Coanda-Rechen; Der Coanda-Rechen besteht aus scharfkantigen, sehr filigranen Stäben.....	52
Abbildung 35: Vertical Slot Fischpass, das Unterwasser ist für den Fischabstieg nicht ideal gelöst, Vallerbach, Vals (I)	54
Abbildung 36: In Situ Versuche am Mühlbach, Oberschan SG.	59
Abbildung 37: Probenahme im Oberwasser des Coanda-Rechens an der Samina, Frastanz (AT) beim ca. 10-jährlichen geschiebeführenden Hochwasser vom 17.6.2016	61



12.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Charakteristische Korngrößen zur Bemessung von Sandfängen.....	16
Tabelle 2: Hersteller- und Vertriebsfirmen von Coanda-Rechen	21
Tabelle 3: Ergebnisse der Sedimenttests gemäss Jenssen and Huber, 2005, S. 6.....	28
Tabelle 4: Korngrößenverteilung Feldversuch Mühlbach	34
Tabelle 5: Zusammenfassung begangene Anlagen.....	39
Tabelle 7: Kornverteilung Feldversuch Mühlbach, Sand 0/4	44
Tabelle 8: Kornverteilung Feldversuch Mühlbach, Korngemisch 0/16	45
Tabelle 9: Korngrößenverteilung Probenahme Samina	47
Tabelle 10: Korngrößenverteilung Unterstufe Palüdbach.....	48
Tabelle 11: Feststoffabweisung bei verschiedenen Spaltabständen; (Quelle: (Entec AG, Hans Marugg & Partner AG, 1998).....	58

13. Anhang

- A Liste der in der Schweiz und im nahen Ausland installierten Coanda-Rechen.
Stand November 2016
- B Analyse und Dokumentation von 23 Coanda-Rechen
- C Versuchsdaten Feldversuch Mühlbach, Oberschan (SG)
- D Versuchsdaten Probenahme Samina, Frastanz (A)
- E Versuchsdaten Probenahme Palüdbach, Brand (A)
- F Publikationen der HTW Chur zum Forschungsprojekt Coanda-Rechen