



Consulting & Engineering

ENTEC AG
Bahnhofstr. 5
CH-9000 St. Gallen
Switzerland

Tel: +41 (71) 228 10 20
Fax: +41 (71) 228 10 30
e-mail: main@entec.ch
URL: www.entec.ch

Schlussbericht

Pilotprojekt COANDA Feinrechen für kleine Wasserkraftanlagen

St. Gallen, 18. Dezember 1998

ENTEC AG
Beratung & Engineering
Bahnhofstr. 5, 9000 St. Gallen
Tel. 071 - 228 10 20
Fax 071 - 228 10 30

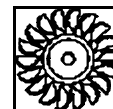
Hans Marugg & Partner
Ingenieure ETH/SIA
Engadinstr. 12, 7000 Chur
Tel. 081 252 44 79
Fax 081 252 58 64

DIS Projekt-Nr.: 21'299
DIS Vertrags-Nr.: 62'045



*Das Aktionsprogramm Energie 2000
Energie-Partnerschaft, die nachhaltig wirkt.
Wir machen mehr - mit aller Energie.*

Bundesamt für Energie
Programm Kleinwasserkraftwerke



Inhalt:

1. ZUSAMMENFASSUNG.....	3
1.1 AUSGANGSLAGE	3
1.2 DER INNOVATIVE COANDA RECHEN	3
1.3 VERSUCHSRESULTATE IM PILOTPROJEKT	4
1.3.1 Funktion des Rechens im Betrieb	4
1.3.2 Wirtschaftlichkeit.....	4
1.3.3 Einschränkungen.....	5
1.4 UMSETZUNG DER RESULTATE.....	5
2. VORHABEN UND ZIELSETZUNG.....	7
2.1 METHODIK	7
2.2 ZU BEANTWORTENDE FRAGEN	7
2.3 EIGENSCHAFTEN DES COANDA RECHENS.....	8
2.4 PILOTINSTALLATION	9
3 ERGEBNISSE DER BETRIEBSUNTERSUCHUNG.....	10
3.1 BETRIEB BEI LAUBANFALL.....	10
3.2 WINTERBETRIEB.....	11
3.3 ZUSTAND DER ANLAGE NACH DER SCHNEESCHMELZE	12
3.1 SANDABSCHIEDUNG	12
3.4.1 Analyse der Ablagerungen	13
3.4.2 Interpretation der Resultate.....	13
3.4.3 Notwendigkeit eines Sandfanges bei Verwendung eines COANDA-Rechens.....	13
3.5 SCHLUCKVERMÖGEN DES RECHENS	14
3.6 HOCHWASSER, EXTREMER GESCHIEBEEINTRAG.....	16
3.7 EINFLUSS AUF DIE JAHRESPRODUKTION	16
3.8 INVESTITION UND DEREN WIRTSCHAFTLICHKEIT	17
3.9 ABNÜTZUNG DES RECHENPROFILS	18
3.10 OEKOLOGISCHE ASPEKTE.....	18
3.11 EINSATZGRENZEN.....	19
4. AUSLEGUNG VON COANDA FASSUNGSBAUWERKEN	20
4.1 AUSLEGUNGSWASSERMENGE UND GEFÄLLEBEDARF	21
4.2 GESTALTUNG DES BAUWERKES.....	21
5. VERGLEICH MIT ANDEREN FASSUNGSTYPEN	22
5.1 VERGLEICH MIT DEM TIROLERWEHR.....	22
5.2 TABELLARISCHER VERGLEICH VERSCHIEDENER FASSUNGSTYPEN	24
6. UMSETZUNG DER RESULTATE.....	25
ANHANG 1: BILDDOKUMENTATION	27
ANHANG 2: MASSSKIZZEN	28
ANHANG 3: PUBLIZIERTE ARTIKEL	29

1. Zusammenfassung

1.1 Ausgangslage

Schwemmgut und andere im Wasser suspendierte Partikel welche natürlicherweise in Gewässern vorkommen, sind in Fassungen von Wasserkraftwerken unerwünscht da sie eine Beeinträchtigung der Anlagenzuverlässigkeit und der Wirtschaftlichkeit darstellen. Die Zuverlässigkeit der Anlage wird tangiert weil Verengungen in den wasserführenden Teilen der Anlage verstopfen können und damit die Anlage zum Stillstand kommt. Die Wirtschaftlichkeit wird eingeschränkt, weil vorzusehende Einrichtungen zur Schwemmgutabweisung oder –entfernung die Investitionskosten ansteigen lassen und weil notwendige Reinigungsarbeiten Aufwand bedeuten und zu Stillstandszeiten führen. Ueberdies kann der Sandanteil im Wasser zu rascher Abnutzung von Leitapparaten und Laufrädern führen.

Konventionelle Methoden mit diesen Problemen umzugehen sind Lochbleche oder Stabrechen und Rechenreinigungsanlagen um Schwemmgut abzuweisen und zu entfernen. Die heutige Gewässerschutzgesetzgebung sieht vor, dass entferntes Schwemmgut nicht wieder dem Gewässer beigegeben werden darf. Es fallen also zusätzliche Entsorgungskosten an. Mit Sandfängen und Spülvorrichtungen wird versucht, schwimmende Partikel abzulagern und periodisch aus dem Sandfang zu entfernen oder kontinuierlich auszuspülen. Die richtige Dimensionierung eines Sandfanges ist schwierig und die entstehenden Bauwerke sind häufig äusserst aufwendig. In dieser Situation sind neue Ansätze gesucht.

1.2 Der innovative COANDA Rechen

Aus Amerika ist die innovative Technologie des COANDA-Feinrechens bekannt. Es handelt sich um einen Feinrechen für Wasserfassungen welcher selbstreinigend und fast vollständig unterhaltsfrei ist. Er hält mehr als 90% des Schwemmgutes im Wasser von mehr als 0.5 mm Grösse von der Fassung fern. Trotz dem engen Stababstand hat der Rechen ein verhältnismässig hohes Schluckvermögen. Grundsätzlich besteht damit die Möglichkeit, die Wasserfassung von Kleinwasserkraftanlagen wirtschaftlich zu bauen und zu betreiben. Rechenreiniger, Sandfänge und die Schwemmgutentsorgung können im Idealfall entfallen. In der Schweiz war bisher der COANDA-Rechen unbekannt. Aufgrund der interessanten Eigenschaften wurde deshalb eine Pilotanlage realisiert.

Der COANDA oder "Aqua-shear" Feinrechen nutzt den physikalischen Coanda-Effekt, wonach strömendes Wasser die Tendenz hat einer festen Oberfläche zu folgen. "Aqua-shear" bezieht sich auf den Umstand, dass die quer verlaufenden Rechenstäbe so angeordnet sind, dass jeder Stab einen Teil des Wasserstrahls abschert und ins Innere der Zulaufkammer leitet. Feststoffe hingegen fallen ungehindert über die Oberfläche des Rechens.

Diese Arbeit ist mit Unterstützung des Bundesamtes für Energie entstanden. Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Der COANDA Feinrechen benötigt aufgrund seiner Konstruktion und Funktionsweise ein Gefälle von 1.3 m. Um den damit verbundenen Leistungsverlust einer Wasserkraftanlage in Grenzen zu halten, kommt der Rechen hauptsächlich in Anlagen mit grösserem Gefälle in Frage. Das Schluckvermögen beträgt nach Literaturangaben 140 l/s pro Laufmeter Rechenbreite.

Der Einbau des COANDA-Rechens erfolgt ähnlich wie beim Tirolerwehr oder dem Sohlrechen, quer zur Fliessrichtung. Bei grösseren Gewässern ist aber auch der Einbau in eine Seitenentnahme denkbar.

1.3 Versuchsresultate im Pilotprojekt

Das Projekt bezweckte, in einem bestehenden Kleinkraftwerk im Gebirge auf 1850 mÜM eine Pilotinstallation eines COANDA Rechens vorzunehmen und dessen Funktion und Eignung während mindestens einem Jahr zu untersuchen. Als Resultat wurden dabei klare Aussagen über die Möglichkeiten und Grenzen des Einsatzes von COANDA Rechen, unter schwierigen Gebirgsbedingungen, erwartet. Ein Vergleich in Bezug auf Investitions- und Betriebskosten mit konventionellen Fallrechen war Bestandteil der Studie.

Während der Versuchsperiode vom Oktober 1997 bis Mitte November 1998 wurde die Pilotinstallation im Betrieb beobachtet und verschiedene Messungen wurden durchgeführt.

1.3.1 Funktion des Rechens im Betrieb

Erste Betriebserfahrungen zeigten, dass eine gleichmässige Anströmung des Rechens über seine ganze Breite wichtig ist, damit das Schluckvermögen nicht beeinträchtigt wird. In der Pilotinstallation erfolgt die Zuströmung leicht seitlich. Es wurden deshalb oberhalb des Rechens Leitbleche montiert. Danach konnte im Verlauf der einjährigen Beobachtungsphase festgestellt werden, dass der COANDA Rechen die Erwartungen hinsichtlich Schluckvermögen, Laubabscheidung, Sandabscheidung und dem Verhalten im Winterbetrieb voll erfüllt.

Zur Untersuchung der Sandabscheidung wurde das Reservoir entleert. Es wurde eine mehrere Zentimeter tiefe Ablagerung von Feinschlamm festgestellt. Proben des abgelagerten Materials, deren Zusammensetzung und Körnung, wurden analysiert. Das Resultat: Nur ca. 6% des Eintrages ist grösser als 0.5 mm, aber kleiner als 1.0 mm. Damit ist der COANDA-Rechen gleichwertig wie ein Sandfang, ausser der letztere wird sehr aufwendig gebaut.

1.3.2 Wirtschaftlichkeit

Der COANDA Feinrechen benötigt aufgrund seiner Konstruktion und Funktionsweise ein Gefälle von 1.3 m. In der Situation in Hinterrhein entstand kein Gefällsverlust gegenüber vorher. Der zusätzliche Gefällsbedarf für die Fassung konnte zwischen der Fassung und dem Reservoir kompensiert werden. Die Nennleistung blieb damit unverändert.

Andererseits zeigte der Vergleich, dass im Falle des COANDA Rechens in einem Betriebsjahr ein einziger Betriebsunterbruch zur Reinigung des Reservoirs nötig war, während die Anlage vorher im Herbst jeweils vier mal zur Laubentfernung und zweimal zusätzlich zur Entfernung von Sand im Reservoir stillgelegt wurde. Einschliesslich dem Entleervorgang und dem Neustart nach der Befüllung bedeutete dies jeweils einen durchschnittlichen Betriebsunterbruch von sechs Stunden. Der resultierende vorherige Ausfall von ca. 7'200 kWh, entspricht dem Mehrertrag mit dem COANDA-Rechen von rund 0.6% Prozent der durchschnittlichen Jahresarbeit.

Monetär ausgedrückt und unter Berücksichtigung des Reinigungsaufwandes, schliesst die Jahresrechnung des Kraftwerkes um etwa Fr. 3'000 besser ab. Die Investitionskosten von Fr. 15'000 sind damit innerhalb von 5 Jahren amortisiert.

1.3.3 Einschränkungen

Um den mit dem höheren Gefällsbedarf der Fassung verbundenen Leistungsverlust einer Wasserkraftanlage in Grenzen zu halten, kommt der Rechen hauptsächlich in Anlagen mit grösserem Gefälle in Frage. Nimmt man die Mehrproduktion von 0.6% im Falle der Pilotanlage zum Masstab, so würde ein Gefällsverlust der gleichen Grösse die Produktionsmenge unverändert lassen.

Bei einem zusätzlich benötigten Gefälle von 70 Zentimetern gegenüber einer konventionellen Fassung, ergibt sich ein Gefälle von 117 m als Anwendungsgrenze bezüglich einer neutralen Energiebilanz. Rechnet man den eingesparten Reinigungsaufwand mit ein, dürfte sich die Anwendungsgrenze wirtschaftlich betrachtet im Bereich von ca. 40 m Bruttogefälle bewegen. Damit wird klar, dass die Anwendung des Standard-COANDA-Rechens vorzugsweise bei Kleinkraftwerken und Wasserfassungen im Gebirge liegt.

Aufgrund dieser für Anlagen im Mittelland relativ ungünstigen Verhältnisse wurde im Ansatz untersucht, wie COANDA Rechen mit weniger Gefällsverlust eingesetzt werden könnten. Verschiedene Abklärungen und Rückfragen beim Hersteller ergaben, dass auf den Beschleunigungsbogen im oberen Bereich des Rechens nicht verzichtet werden kann. Dieser wird benötigt, um das Wasser mit ausreichender Geschwindigkeit auf den Rechen auftreffen zu lassen. Es wurde dagegen vermutet, dass es möglich sein sollte, die Anzahl Querprofile zu reduzieren. Dies führt zu einem geringeren Gefällsbedarf und gleichzeitig zu einer Reduktion des Schluckvermögens.

Eine weitere Einschränkung ergibt sich aus dem Umstand, dass das Schluckvermögen des Rechens stark von den Einbaubedingungen abhängt. Die Anwendung ist deshalb im einzelnen sorgfältig zu planen.

1.4 Umsetzung der Resultate

Die Umsetzung der Resultate ist im Gang. Um die Erfahrungen mit dem COANDA Rechen einer interessierten Oeffentlichkeit bekannt zu machen, wurden verschiedene Artikel in Branchenzeitschriften veröffentlicht. In zwei konkreten Fällen wurden für Interessenten Abklärungen durchgeführt.

Detaillierte Information über das Pilotprojekt ist auch über das Internet zugänglich. Weil das Vorhabens durch den Pilotprojekt- und Studienfonds des VSE unterstützt wurde, darf auch damit gerechnet werden, dass die Versuchsergebnisse über die Informationskanäle des VSE Verbreitung finden.

2. Vorhaben und Zielsetzung

Die Pilotinstallation wurde durch den Umbau einer bestehenden Fassung und den Einbau des COANDA Rechens realisiert. Während mehr als zwölf Betriebsmonaten erfolgte dann die begleitende Untersuchung. Im Feldversuch wurde die Eignung des Rechens unter den Einsatzbedingungen im Gebirge untersucht und verifiziert.

2.1 Methodik

Die Funktion des Rechens und der Fassung wurden beobachtet, fotografisch festgehalten und protokolliert. Messungen bezüglich Schluckvermögen, Separationseigenschaften und Selbstreinigungseigenschaften erfolgten periodisch. Dabei wurde anhand der momentanen Turbinenleistung die Durchflussmenge ermittelt.

2.2 Zu beantwortende Fragen

Sandfänge und Rechenreinigungsanlagen, mit der damit verbundenen Rechengutentsorgung, sind in konventionellen Kleinwasserkraftwerken oft kostenintensive Teile, welche die Wirtschaftlichkeit arg beeinträchtigen. Eine bessere Wirtschaftlichkeit von Kleinanlagen kann u.a. mit einer Senkung der Investitions- und Betriebskosten nachhaltig erreicht werden. Auch weniger Stillstandszeiten aufgrund von wegfallenden Unterhalts- und Reinigungsarbeiten sind in diesem Zusammenhang von Bedeutung. Der COANDA Rechen ist im Ansatz eine vielversprechende Lösung dabei.

Die zu beantwortenden Hauptfragen lauteten:

- Wie ist die Wirkungsweise des COANDA Rechens in Bezug auf die Abscheidung von Laub und anderen Feststoffen bei unterschiedlichem Wasserdargebot und inwieweit ist dabei der Rechen selbstreinigend?
- Wie ist die Betriebszuverlässigkeit des COANDA-Rechens in Bezug auf Beschädigung bei Hochwasser und Geschiebetrieb durch herunterfallende Steine und andere Feststoffe?
- Wie sind die ökologischen Auswirkungen?
- Wie ist das Verhalten in Schnee und Eis?
- Bei welchem Nutzgefälle liegt die Wirtschaftlichkeitsgrenze?
- Unterliegt der Rechen einer Abnutzung welche die Funktion beeinträchtigt?
- Wie sieht ein Kostenvergleich mit konventionellen Rechen, unter Einbezug der Investitionskosten und der Betriebskosten, aus?
- Kann eine grössere Jahresarbeit von Kleinkraftwerken, in welchen ein COANDA-Rechen eingesetzt wird, erwartet werden?

Der gewählte Einbaustandort und die geplanten Untersuchungen waren darauf angelegt, diese Fragen beantworten zu können.

2.3 Eigenschaften des COANDA Rechens

Auf der Suche nach Problemlösungen im Bereich Wasserfassungen, Vereisungsprobleme und Schwemmgutentsorgung fanden sich in der Literatur interessante Angaben über den COANDA Rechen. Ursprünglich für Separationsprozesse im Bergbau entwickelt, wurde dieses Prinzip in den achtziger Jahren in Kalifornien für den Einsatz in Wasserfassungen für Kraftwerke weiterentwickelt. Das Prinzip, die Eigenschaften und die Funktion des COANDA-Rechens sind nachfolgend beschrieben.

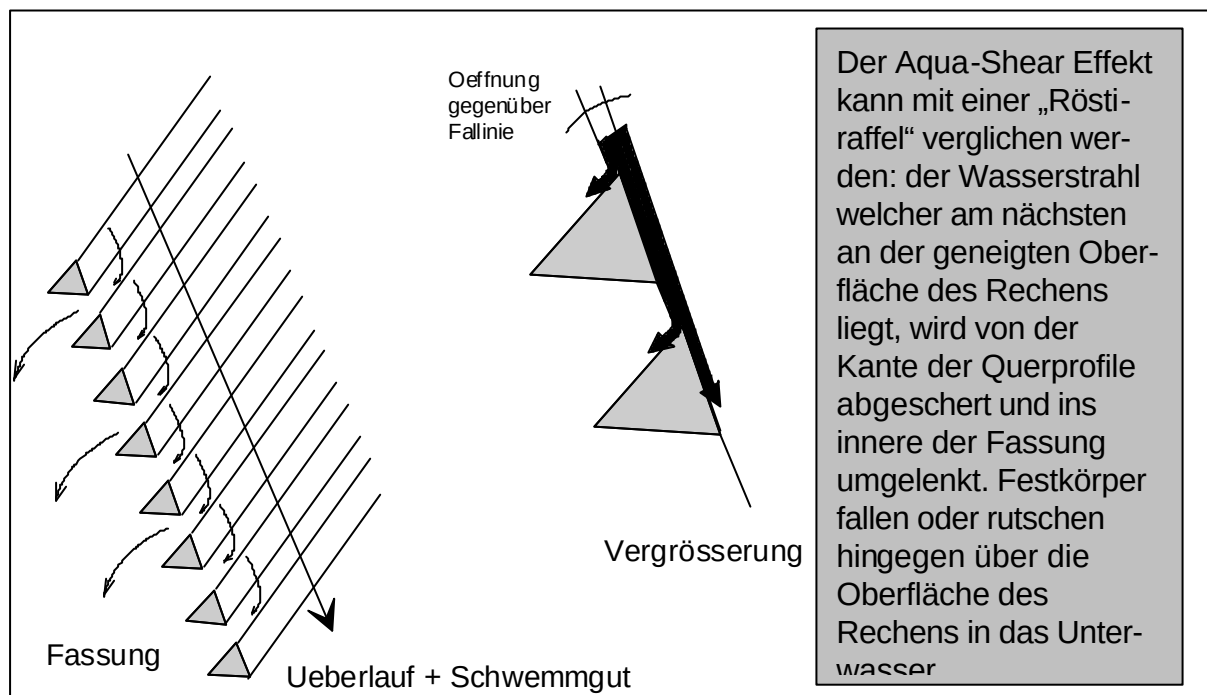


Abbildung 1: Prinzip des COANDA Rechens

Der COANDA oder „Aqua-shear“ Feinrechen erhielt seinen Namen, weil seine Entwickler den physikalischen COANDA-Effekt nutzen, wonach strömendes Wasser die Tendenz hat einer festen Oberfläche zu folgen. „Aqua-shear“ bezieht sich auf den Umstand, dass die quer verlaufenden Rechenstäbe so angeordnet sind, dass jeder Stab einen Teil des Wasserstrahls abscher und ins innere der Zulaufkammer leitet. Durch eine genügende Anzahl von Querprofilen in Fliessrichtung und eine genügende Breite dieser Profile senkrecht zur Fliessrichtung kann so die gewünschte Wassermenge verlustfrei erfasst werden.

Feststoffe hingegen fallen ungehindert über die Oberfläche des Rechens. Bei einem Stababstand von 1 mm werden mehr als 90% der Feststoffe welche grösser als 0.5 mm sind, von der Wasserfassung ferngehalten. Bei einer Wassermenge welche kleiner als das Schluckvermögen des Rechens ist, bleibt das Schwemmgut im unteren Bereich des Rechens liegen. Wird im Verlauf des Betriebs der Anlage der Zulauf grösser als das Schluckvermögen, so wird das liegengebliebene Schwemmgut vom Ueberschusswasser weggeschwemmt.

Es ist zu vermuten, dass sich damit in vielen Fällen ein Sandfang und eine Rechenreinigungsanlage erübrigt. Auch entfielen die Entsorgung von Schwemmgut da dieses nicht aus dem Zulaufwasser entnommen wird. Der Rechen ist selbstreinigend und benötigt praktisch keinen Unterhalt. Auch das Verhalten in Eis und Schnee sollte untersucht werden.

Einschränkung in der Anwendung

Der COANDA Feinrechen benötigt aufgrund seiner Konstruktion und Funktionsweise ein Gefälle von 1.3 m. Um den damit verbundenen Leistungsverlust einer Wasserkraftanlage in Grenzen zu halten, kommt der Rechen hauptsächlich in Anlagen mit grösserem Gefälle in Frage.

Eine weitere Einschränkung ergibt sich aus dem Umstand, dass das Schluckvermögen des Rechens stark von den Einbaubedingungen abhängt. Die Anwendung ist deshalb im einzelnen sorgfältig zu planen.

Der Einbau des COANDA-Rechens erfolgt ähnlich wie beim Tirolerwehr oder dem Sohlrechen, quer zur Fliessrichtung. Bei grösseren Gewässern ist aber auch der Einbau in eine Seitenentnahme denkbar. Das Wasser wird über einen Ueberfall mit Beschleunigungsstrecke geleitet. Die Nennwassermenge wird dabei geschluckt und ein allfälliger Ueberschuss fliesst ungehindert über den Rechen. Damit ist auch ein Weg gefunden, Fische ohne Verletzungsgefahr von der Fassung fernzuhalten.

2.4 Pilotinstallation

Der Rechen wurde anstelle eines herkömmlichen Stabrechens in die bestehende Fassung eingebaut.

Die Installation konnte innerhalb des Budgets realisiert und am 10. Oktober 1997, mit geringfügiger Verspätung gegenüber dem ursprünglichen Plan, in Betrieb genommen werden.

Die bestehende Fassung des Kraftwerkes liegt auf 1850 m ü.M. am Rappierbach und war als Tirolerwehr ausgelegt für ein Schluckvermögen von 140 l/s

Zum Einbau des COANDA-Rechens waren an der Fassung geringfügige Änderungen vorzunehmen. Es wurden Teile des bestehenden Bauwerkes herausgefräst. Verschiedene Höhenkoten waren anzupassen, was eine hydraulische Ueberprüfung unter Einbezug der gesamten Anlage voraussetzte. Aufgrund der durchgeführten Projektierung erfolgte der Einbau des Coandarechens ohne besondere Probleme und mit bescheidenem Aufwand.

Die Auslegung des COANDA Rechens erfolgte gemäss den Angaben des Herstellers für den Standardrechen Typ B, wofür ein Gefälleverlust von 1.27 m in Kauf zu nehmen ist. Die Auslegungswassermenge wird mit 140 l/s pro Meter Breite angegeben, womit im Falle der Pilotinstallation eine Breite von exakt 1.0 m benötigt wurde.

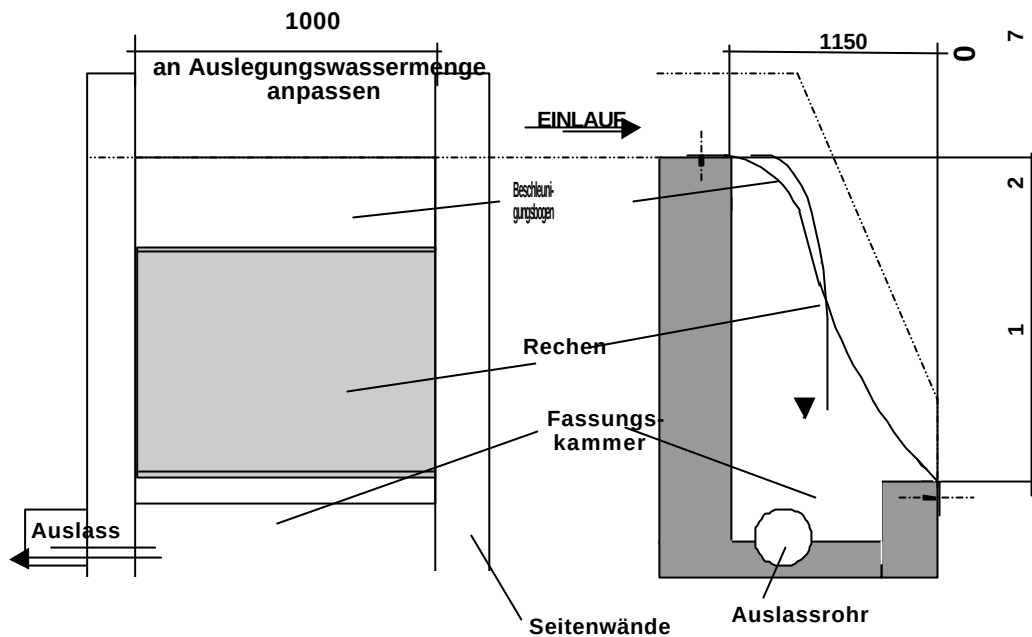


Abbildung 2: Hauptabmessungen des COANDA-Rechens der Pilotanlage

3 Ergebnisse der Betriebsuntersuchung

Erste Betriebserfahrungen zeigten, dass eine gleichmässige Anströmung des Rechens über seine ganze Breite wichtig ist, damit das Schluckvermögen nicht beeinträchtigt wird. In der Pilotinstallation erfolgt die Zuströmung leicht seitlich. Es wurden deshalb oberhalb des Rechens Leitbleche montiert. Im Verlauf der einjährigen Beobachtungsphase konnte festgestellt werden, dass der COANDA Rechen die Erwartungen hinsichtlich Schluckvermögen, Laubabscheidung, Sandabscheidung und dem Verhalten im Winterbetrieb vollumfänglich erfüllt.

3.1 Betrieb bei Laubanfall

Der Zeitpunkt der Inbetriebnahme fiel mit starkem Herbstlaubanfall zusammen. Auch gegen Ende der Versuchsperiode fiel wieder Herbstlaub an. Es wurde festgestellt und dokumentiert, dass alles anfallende Laub, Zweige und anderes Geschwemmsel vollständig von der Fassung abgehalten und über den Rechen ins Unterwasser transportiert wird (siehe auch Bilddokumentation Anhang 1). Die Anlage erlitt in diesem Zusammenhang keinen einzigen Betriebsunterbruch, ganz im Gegensatz zum Betrieb mit dem herkömmlichen Stabrechen.



Abbildung 3:
Komplette Laubabscheidung bei Zufluss < Schluckwassermenge

3.2 Winterbetrieb

Die Gegend des San Bernardino Passes erhielt schon in der dritten Novemberwoche 1997 ausserordentlich viel Schnee, welcher bis in den Frühling liegen blieb. Dadurch wurde die Fassung sehr schwer zugänglich und ein Besuch war nur noch auf Skis möglich. Unter diesen Bedingungen wurden die folgenden Beobachtungen gemacht:

- die Fassung war während des ganzen Winters komplett mit Schnee überdeckt, zeitweise mehrere Meter.
- ca. 10 cm über dem Rechen bildete sich eine solide Eisschicht. Das Zulaufwasser war davon nicht beeinträchtigt und konnte jederzeit ungehindert in die Fassung fließen (siehe auch Bilddokumentation, Anhang 1).

- die Anlage erlitt während dem ganzen Winter keinen Betriebsausfall und das zufließende Wasser konnte vollumfänglich genutzt werden.

Zur Untersuchung des Zuflusses wurde die Schneedecke auf der Fassung entfernt und anschliessend die Eisschicht aufgeschnitten.



Abbildung 4: Freier Zufluss unter der Eisschicht im Winter 97/98

3.3 Zustand der Anlage nach der Schneeschmelze

Während der Schneeschmelze und bei starken Niederschlägen im Frühling war das Bachwasser über längere Perioden stark getrübt. Der Feinrechen verstopfte während der ganzen Periode nie und die guten Selbstreinigungseigenschaften blieben erhalten. Die im Wasser suspendierten Feinanteile wurden in die Fassung und das tiefer gelegene Reservoir eingetragen.

3.1 Sandabscheidung

Während dem Anlagenbesuch am 23.6.98 wurde das Reservoir entleert. Auf dem Reservoirboden war eine mehrere Zentimeter tiefe Ablagerung von Feinschlamm festzustellen. Proben des abgelagerten Materials, deren Zusammensetzung und Körnung, wurden analysiert.

3.4.1 Analyse der Ablagerungen

Maximalkorn	1.5 mm	
Rückstand-Sieb 2,0 mm	0,0	Masse-%
Rückstand-Sieb 1,4 mm	0,1	Masse-%
Verteilung		
Anteil < 2,0 mm	100,0	Masse-%
Anteil < 1,4 mm	99,9	Masse-%
Anteil < 1,0 mm	99,8	Masse-%
Anteil < 0,5 mm	93,9	Masse-%

Tabelle 1: Korngrössenverteilungsverhältnisse

Zusammensetzung:

Die untersuchte Probe besitzt einen grossen Schichtsilikat-Anteil.

Die grösseren Körner bestehen aus Glimmermineralien.

3.4.2 Interpretation der Resultate

Zusammenfassend darf festgestellt werden, dass die Sandabscheidung die Vorgaben des Herstellers übertrifft. Es wird angegeben, dass 90% der Sandkörner von 0.5 mm Grösse abgewiesen werden. Die Analyse ergab einen Masseanteil von 93.9% < 0.5 mm und 99.8% < 1.0 mm. Die Differenz von 5.9% entspricht dem Kornanteil >0.5<1.0 mm welcher insgesamt eingetragen wurde. Geht man davon aus, dass die Korngrössenverteilung im Rappierbach gleichmässig ist, bedeutet dies, dass gut 94% der Partikel >0.5<1 mm abgewiesen werden. Die Untersuchung hat damit wesentliche Erkenntnisse im Zusammenhang mit der Frage der Notwendigkeit eines Sandfangs gebracht.

3.4.3 Notwendigkeit eines Sandfanges bei Verwendung eines COANDA-Rechens.

Die Entfernung von im Wasser suspendierten Feststoffen ist eine äusserst komplexe Aufgabe und es ist deshalb nicht möglich, eine allgemein gültige Antwort zu geben. Immerhin zeigt die relevante Literatur¹, dass Sandfänge für eine Korngrössenentfernung von 0.5 mm schon recht aufwendig sind und generell für eine Korngrösse bis 0.2 mm praktisch in Frage kommen.

Für übliche Ansprüche kann gesagt werden, dass der COANDA Rechen einem Sandfang ebenbürtig ist. Wo die Notwendigkeit besteht noch kleinere Korngrössen auszuscheiden oder abzuweisen ist zusätzlich zum Standard-COANDA Rechen ein Sandfang notwendig. Da dieser aber nur noch die durch den COANDA Rechen passierenden Feststoffe abzusetzen hat, muss weit weniger Festmaterial wieder aus dem Sandfang entfernt werden. Das Ablagerungsvolumen und die Spülvorrichtung können tendenziell kleiner dimensioniert werden.

¹ Mobile barrages and intakes on sediment transporting rivers, Bouvard Maurice, IAHR Monograph series, Brookfield 1992

Es besteht auch die Möglichkeit eine feinere Ausführung des COANDA Rechens, mit einem Stababstand von 0.4 mm oder sogar 0.2 mm einzusetzen. Abgeleitet aus den bisherigen Erfahrungen dürfte damit die Abweisung weit kleinerer Korngrössen möglich sein.

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

Tabelle 2: Feststoffabweisung verschiedener Rechenausführungen

3.5 Schluckvermögen des Rechens

Das Nennschluckvermögen von 140 l/s wurde ursprünglich, unmittelbar nach der Installation, nicht erreicht. Der Grund: die Anströmung (Zulauf) des Rechens war nicht gleichmässig, wodurch auf einer Seite ein Teil des Wassers über den Rechen hinausschoss. Die ungleichmässige Anströmung ist bedingt durch den seitlichen Zufluss des Baches zum Rechen. Zur Verbesserung der Anströmung wurden Leitbleiche montiert



Abbildung 5: Montierte Leitbleiche zur Verbesserung der Anströmung

Damit, d.h. bei gleichmässiger Anströmung des Rechens über seine ganze Breite, wurde das Nennschluckvermögen sogar etwas übertroffen.

Die Messung des Schluckvermögens erfolgte indem die Wassermenge mit der Turbinenleistung korreliert wurde. Dies war möglich, weil die entsprechenden Daten für die Anlage bereits vorlagen. Bei voller Leistung der Anlage schluckt die Fassung 135 l/s, es findet kein Ueberlauf bei der Fassung selbst statt. Bei grösserer Zuflusswassermenge steigt offensichtlich das Schluckvermögen weiter an. Bei gleichem Durchfluss durch die Turbine (entsprechend Volleistung), weist in dieser Situation die Fassungskammer einen Ueberlauf auf (Abbildung 7).



Abbildung 6: Der Zufluss von 140 l/s entspricht dem Schluckvermögen.

Bei einem Zufluss welcher dieser Nennwassermenge entspricht wurde beobachtet, dass in dieser Situation der unterste Bereich des Rechens „trocken“ ist, dass also die Nennwassermenge bereits im oberen Bereich des Rechens absorbiert wird. Bei grösserem Zufluss schluckt der Rechen eine grössere Menge und zusätzlich ist ein Ueberlauf zu verzeichnen.



Abbildung 7: Der Zulauf und das Schluckvermögen sind grösser als 140 l/s.

3.6 Hochwasser, extremer Geschiebeeintrag

Während der Versuchsphase war kein Hochwasser und deshalb auch kein extremer Geschiebeeintrag zu verzeichnen. Bei Abflussverhältnissen in der Grössenordnung von 2 m³/s traten keine Probleme auf.

3.7 Einfluss auf die Jahresproduktion

Das Hauptinteresse galt natürlich der Frage, ob mit dem COANDA Rechen gegenüber einer konventionellen Fassung die Jahresproduktion vergrössert werden kann. Zur Klärung dieser Frage wurde ein Vorher-Nachher Vergleich angestellt.

Der COANDA Feinrechen benötigt aufgrund seiner Konstruktion und Funktionsweise ein Gefälle von 1.3 m. In der Pilotinstallation entstand kein Gefällsverlust gegenüber vorher. Der zusätzliche Gefällsbedarf für die Fassung konnte durch geeignete Umbaumassnahmen erreicht werden. Die Nennleistung blieb damit unverändert.

Andererseits zeigte der Vergleich, dass im Falle des COANDA Rechens in einem Betriebsjahr ein einziger Betriebsunterbruch zur Reinigung des Reservoirs nötig war, während die Anlage vorher im Herbst jeweils vier mal zur Laubentfernung und zweimal zusätzlich zur Entfernung von Sand im Reservoir stillgelegt wurde. Einschliesslich dem Entleervorgang und dem Neustart nach der Befüllung bedeutete dies jeweils einen durchschnittlichen Betriebsunterbruch von sechs Stunden.

Betriebsausfall für Reinigungsarbeiten	Anzahl x Dauer	Summe (h)	Mehrleistung: h x 240 kW
ohne COANDA Rechen	6 x 6 h	36	
mit COANDA Rechen	1 x 6 h	6	
Differenz zugunsten COANDA Rechen		30	7'200 kWh

Tabelle 3: Verbesserung der Jahresproduktion

Es ergibt sich eine Produktionsdifferenz von 7'200 kWh zugunsten des COANDA Rechens. Dies entspricht einem Mehrertrag von rund 0.6 Prozent der durchschnittlichen Jahresarbeit.

3.8 Investition und deren Wirtschaftlichkeit

Die Kosten des Einbaus des COANDA Rechens beliefen sich auf Fr. 15'000.-. Die Einzelkosten sind aus Tabelle 2 ersichtlich. Im Falle eines Fassungsneubaus dürften sich die Mehrkosten gegenüber einer konventionellen Fassung auf maximal Fr. 10'000.- belaufen. Für kleinere, oder grössere Wassermengen sind die Mehrkosten etwa proportional zur Wassermenge kleiner, beziehungsweise grösser.

Pos.	Gegenstand	Umbau Kosten (Fr.)	Mehrkosten Neubau (Fr.)
1	Planung	1'500	
2	Aenderung Fassung	2'000	
3	COANDA Rechen, 1m	7'000	7'000
4	Einbauarbeiten	2'000	1'000
5	Schlosserarbeiten	2'500	
	Total	15'000	8'000

Tabelle 4: Investitionskosten

Die Auswirkungen auf die Jahresrechnung des Kraftwerkes sind positiv. und setzen sich zusammen aus der grösseren Jahresarbeit bedingt durch weniger Produktionsausfall und dem dabei eingesparten Arbeitsaufwand.

Pos.	Ertrag/Kostenart	Kostensatz Tarif (Fr.)	Mehrertrag (Fr.)
1	Arbeitseinsparung 30 h	60	1'800
2	Mehrproduktion 7'200 kWh	0.16	1'152
	Total ca.		3'000

Tabelle 5: Mehrertrag/Einsparungen beim Anlagenbetrieb

Unter Berücksichtigung des Reinigungsaufwandes, schliesst die Jahresrechnung des Kraftwerkes um etwa Fr. 3'000 besser ab. Die Investitionskosten von Fr. 15'000 sind damit innerhalb von 5 Jahren amortisiert. eine vergleichbare Situation vorausgesetzt, würde bei einem Neubau die Mehrinvestition in knapp drei Jahren amortisiert.

3.9 Abnützung des Rechenprofils

Betrachtet man die Bauweise und das Funktionsprinzip des COANDA-Rechens, so ist es denkbar, dass die Profilkante welche den Wasserstrahl absichert durch im Wasser vorhandene Festkörper einer Abnützung unterworfen ist. Es erscheint auch als wahrscheinlich, dass durch die Abnützung der Profilkante das Schluckvermögen beeinträchtigt wird.



Abbildung 8: Detailansicht der Rechenquerprofile nach einem Betriebsjahr

Nach einer einjährigen Betriebsdauer konnte in der Pilotanlage weder eine Abnützung der Profilkante noch eine Reduktion der Schluckwassermenge festgestellt werden. Zumindest für die Dauer der bisherigen Beobachtung hält der COANDA Rechen also den rauen Bedingungen der Pilotanlage stand. Aufgrund der vorgefundenen Materialzusammensetzung ist dies nachvollziehbar. Das vorkommende Material ist nicht von extremer Härte wie etwa Quarzsand welcher eher in Gletschergewässern vorkommt, obwohl der Zulauf etwa zur Hälfte aus Gletscherwasser besteht.

3.10 Ökologische Aspekte

Der Räppierbach ist kein Fischgewässer. Die folgenden Aeusserungen basieren deshalb nicht auf Beobachtungen im Feldversuch sondern sind der Literatur² entnommen.

Fische werden im wesentlichen mit geringer Verletzungsgefahr von der Fassung abgehalten. Dies gilt auch für Fingerlinge. Es ist bekannt, dass Fische beim passieren des COANDA Rechens bei extrem niedrigem Abfluss Schaden nehmen können, wenn sie auf den in diesem Fall trockenen unteren Bereich des Rechens fallen. Das Problem kann indes damit gelöst werden, dass Niedrigabfluss mit einer einfachen Vorrichtung

² „The application of COANDA Effect Screens in SHP“, Brown A., Wales 1997

oberhalb des Rechen auf die Mitte des Rechen konzentriert wird. Umweltschutzbehörden³ äussern sich positiv zum COANDA Rechen, wo dieser bekannt ist.

Der Umstand, dass beim COANDA Rechen kein Geschwemmsel aus dem Wasser entnommen wird, macht den Rechen „oekologischer“ als die übliche Entfernung von Rechengut und dessen Entsorgung, da der Eingriff im Wasserlauf weniger rigoros ist.

3.11 Einsatzgrenzen

Um den mit dem höheren Gefällsbedarf der Fassung verbundenen Leistungsverlust einer Wasserkraftanlage in Grenzen zu halten, kommt der Rechen hauptsächlich in Anlagen mit grösserem Gefälle in Frage. Nimmt man die Mehrproduktion von 0.6% im Falle der Pilotanlage zum Masstab, so würde ein Gefällsverlust der gleichen Grösse die Produktionsmenge unverändert lassen.

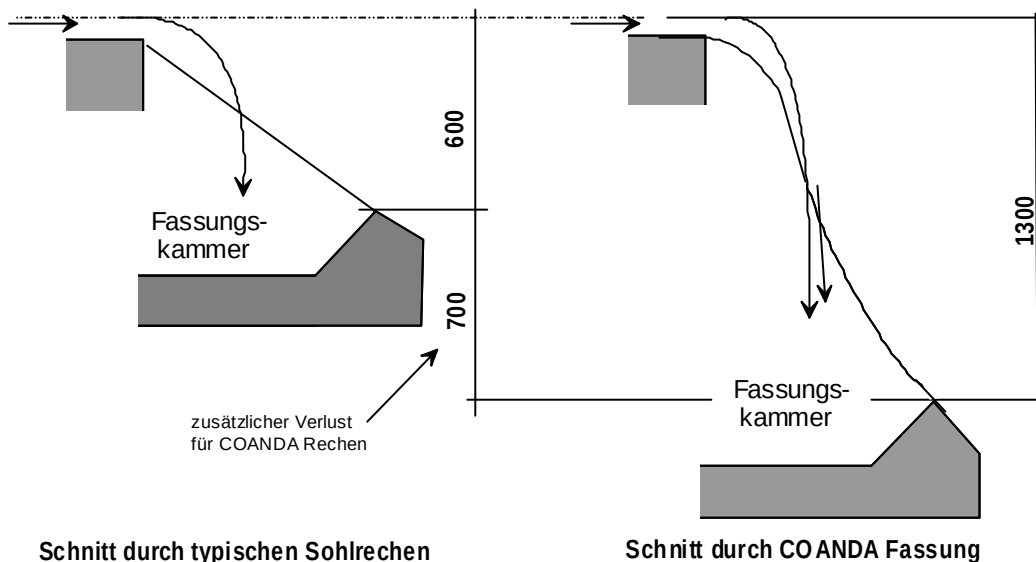


Abbildung 9: Gefälle mehrbedarf von 70 cm beim Standard COANDA Rechen

Bei einem zusätzlich benötigten Gefälle von 70 Zentimetern, entsprechend 0.6% des Gesamtgefälles, gegenüber einer konventionellen Fassung, ergibt sich ein Gefälle von 117 m als Anwendungsgrenze bezüglich einer neutralen Energiebilanz. Rechnet man den eingesparten Reinigungsaufwand mit ein, dürfte sich die Anwendungsgrenze wirtschaftlich betrachtet im Bereich von ca. 40 m Bruttogefälle bewegen. Damit wird klar, dass die Anwendung des Standard-COANDA-Rechen vorzugsweise bei Kraftwerken und Wasserfassungen im Gebirge liegt.

Aufgrund dieser für Anlagen im Mittelland relativ ungünstigen Verhältnisse wurde im Ansatz untersucht, wie COANDA Rechen mit weniger Gefällsverlust eingesetzt werden

³ U.S. Fish and Wildlife Service, in „Air & Space Magazine“, Aug./Sept. 1989, U.S. Army Corps of Engineers, Public Notice No. 9000108, Sacramento, CA 95814-4794

könnten. Verschiedene Abklärungen und Rückfragen beim Hersteller ergaben, dass auf den Beschleunigungsbogen im oberen Bereich des Rechens nicht verzichtet werden kann. Dieser wird benötigt, um das Wasser mit ausreichender Geschwindigkeit auf den Rechen auftreffen zu lassen. Es wurde dagegen vermutet, dass es möglich sein sollte, die Anzahl Querprofile zu reduzieren. Dies führt zu einem geringeren Gefällsbedarf und gleichzeitig zu einer Reduktion des Schluckvermögens.

Gegenüber der Standardauslegung des COANDA Rechens kann damit das für den Betrieb des Rechens benötigte Gefälle um 50 cm reduziert werden. Die Baubreite muss gleichzeitig um etwa 60% vergrössert werden, da das spezifische Schluckvermögen in dieser Grössenordnung abnimmt.

Gegenüber einer konventionellen Fassung ergibt sich damit noch einen Mehrbedarf von ca. 20 cm Gefälle. Die Grenze des Anwendungsbereichs in Bezug auf eine mindestens neutrale Energiebilanz kommt damit in den Bereich von 35 m zu liegen. In wirtschaftlicher Hinsicht kann die verkürzte Ausführung des COANDA Rechens schätzungseise ab einem Bruttogefälle von mehr als 20 Meter interessant sein.

Es muss an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass es sich beim verkürzten COANDA Rechen beim Schluckvermögen um eine Schätzung handelt. Dieses, aber auch die Geschwemmselabscheidung und Selbstreinigungseigenschaften sind bisher noch nicht durch Feldversuche abgesichert.

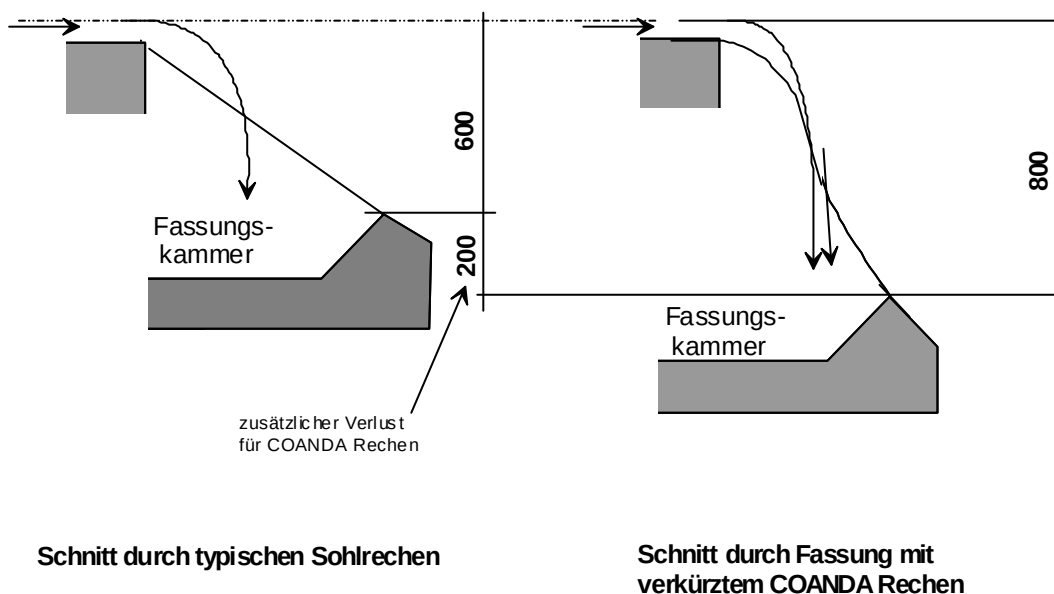


Abbildung 10: Gefälle mehrbedarf von 20 cm beim verkürzten COANDA-Rechen

4. Auslegung von COANDA Fassungsbauwerken

Aus dem Feldversuch und den gemachten Untersuchungen, lassen sich einige Hinweise für die Auslegung von Fassungen mit Coanda Rechen ableiten. Dabei sind nicht nur

Richtlinien für die Auslegung mit dem Standard-Rechen von Interesse. Für verschiedene Bedürfnisse, wie die Abscheidung von kleineren Festkörpern als 0.5 mm und dem Einsatz bei einem Nutzgefälle von weniger als 100 m, sind Angaben zu modifizierten Bauarten des COANDA Rechens nützlich.

4.1 Auslegungswassermenge und Gefällebedarf

Da eine gewisse Abnutzung der Rechenstäbe trotz des positiven Feldversuchs nicht ausgeschlossen werden kann, muss damit gerechnet werden, dass das Schluckvermögen über einige Betriebsjahre abnimmt. Es scheint deshalb angebracht, generell einen Zuschlag von 20% vorzusehen. Damit ergibt sich die Auslegungsbreite W zu:

$$W = 1.2 * Q_n / q_s$$

wobei: W Auslegungsbreite in m
 Q_n Auslegungswassermenge in l/s
 q_s spezifische Schluckwassermenge pro m Breite

Der Gefällebedarf ergibt sich durch die Wahl des Standard- oder des verkürzten Rechens.

Rechenausführung	Stababstand (mm)	Gefällebedarf (m)	q_s (l/s)	Bemerkung
Standard, Typ B	1.0	1.3	140	
verkürzte Ausführung, Typ B	1.0	0.8	60	*
feine Ausführung	0.4	1.3	93	*
sehr feine Ausführung	0.2	1.3	70	*
feine Ausführung, verkürzt	0.4	0.8	40	*
sehr feine Ausführung, verkürzt	0.2	0.8	30	*

* q_s bisher nicht durch Feldversuch gesichert

Tabelle 6: Auslegungsparameter für verschiedene COANDA Ausführungen

4.2 Gestaltung des Bauwerkes

Bei der Gestaltung von COANDA Fassungen sind im wesentlichen drei Punkte zu beachten:

- Genügende Tiefe der Fassung
- Genügende Ueberdeckung des Auslaufrohres
- Sauber ausgeführte Einlaufstrecke

Eine hydraulisch sorgfältig ausgeführte Einlaufstrecke ist vorteilhaft.

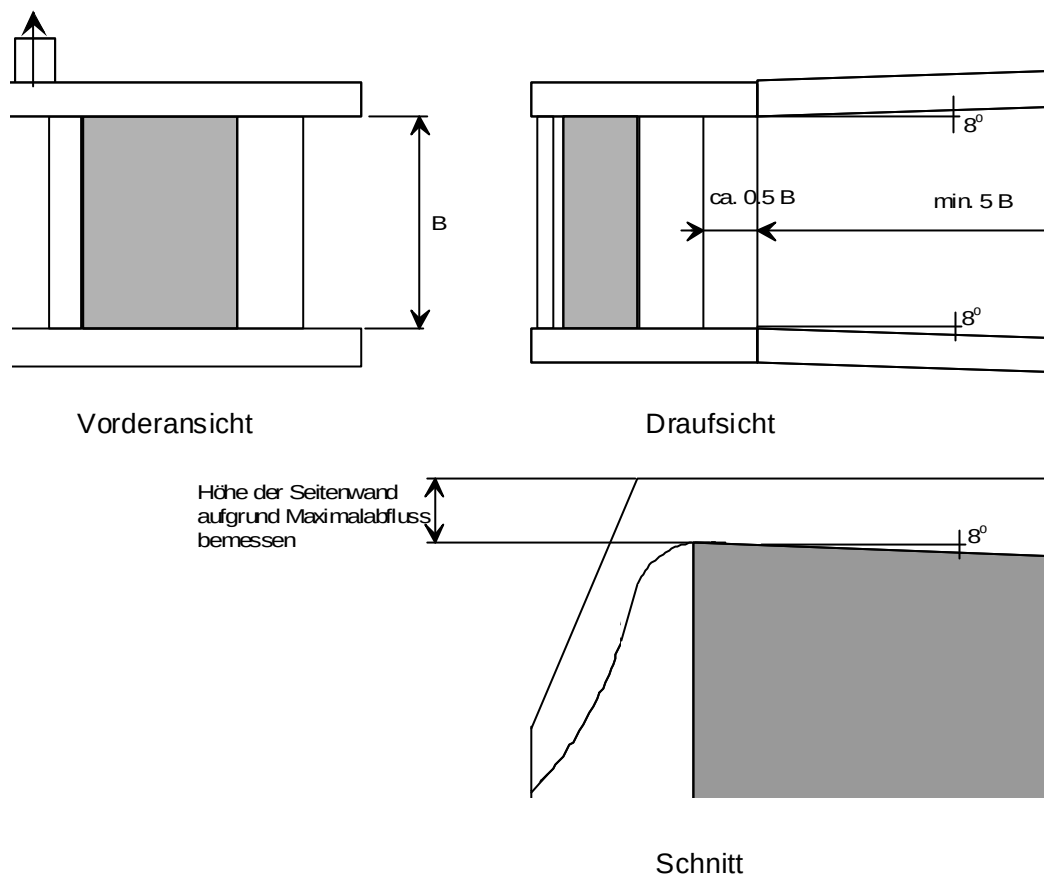


Abbildung 11: Einlaufstrecke für gleichmässige Rechenanströmung

Genügende Tiefe der Fassung

Der Wasserstand in der Fassung muss bei Nennabfluss unter der unteren Kante des Rechens liegen. Andernfalls überläuft die Fassung durch den unteren Teil des Rechens.

Genügende Ueberdeckung des Auslaufrohres

Damit im Abflussrohr keine Druckschwankungen entstehen, muss dieses jederzeit genügend mit Wasser überdeckt sein.

Die richtige Auslegung, Konzeption und Projektierung sollen in jedem Fall durch ausgewiesene Fachleute erfolgen.

5. Vergleich mit anderen Fassungstypen

5.1 Vergleich mit dem Tirolerwehr

Der Feldversuch zeigte, dass gegenüber dem vorher installierten Tirolerwehr die Laub- und Feststoffabscheidung entscheidend verbessert werden konnte. Auch im Winterbetrieb hat sich der COANDA Rechen bestens bewährt. Beim Tirolerwehr können, je nach den Frostverhältnissen, einige Probleme auftreten.

Ein genereller Vergleich mit dem Sohlrechen ist schwierig, da die zugrundeliegenden Prinzipien sehr unterschiedlich sind. In der Literatur⁴ sind umfangreiche Abhandlungen über Sohlrechen und Tirolerwehr zu finden, während für den COANDA Rechen nur einige Artikel zur Verfügung stehen. Klar wird jedenfalls, dass die Auslegung eines Sohlrechens weit anspruchsvoller ist als dies beim COANDA Rechen der Fall ist.

Als Hauptvorteil erscheint das wesentlich grössere Schluckvermögen des Tirolerwehrs, welches eine kompakte Fassungsbauweise ermöglicht, gegenüber dem COANDA Rechen. Der Sohlrechen hat bezüglich seiner geometrischen Auslegung drei Freiheitsgrade: Die Breite, die Neigung und die Rechenlänge in Fliessrichtung. Dazu kommt die Form und der Abstand der Rechenstäbe. Dies gibt dem Konstrukteur die Möglichkeit, den Rechen exakt den vorhandenen Bedingungen anpassen zu können. Der Sohlrechen ist damit sehr flexibel und der erfahrene Ingenieur wird in jeder Situation eine gut funktionierende Lösung finden. Fehlt diese Erfahrung jedoch, können viele Fehler bei der Auslegung gemacht werden.

Demgegenüber ist die Auslegung einer Fassung mit COANDA Rechen relativ einfach (siehe Abschnitt 4). Man kommt aber auch hier nicht ohne den ausgewiesenen Fachmann aus. Die Hauptvorteile sind Geschwemm- und Sandabscheidung und der Selbstreinigungseffekt. Der Hauptnachteil das relativ geringe Schluckvermögen. Für eine bestimmte Wassermenge wird gegenüber dem Tirolerwehr ein mehrfaches an Breite für die Fassung benötigt. Etwas verallgemeinert benötigt ein COANDA Rechen gegenüber einem herkömmlichen Stabrechen etwa 80 – 100% mehr Gefälle und die Rechenfläche einschliesslich Beschleunigungsbogen wird ca. 60% grösser.

⁴ u.a. „Die Wasserentnahme aus geschiebeführenden Flüssen,“ Scheuerlein Helmut, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 1984 und „Mobile barrages and intakes on sediment transporting rivers, Bouvard Maurice, IAHR Monograph series, Brookfield 1992, auch: Lauterjung H. und Schmidt G., „Planning of Intake Structures“, GATE, Eschborn 1989



Abbildung 12: COANDA Rechen Fassung mit grosser Breite > 15 m

Die Kosten für den COANDA Rechen sind, bedingt durch den relativ teuren Rechen, höher als beim Sohlrechen oder einem Lochblech. Zudem dürfte die Lebensdauer unter derjenigen des Sohlrechens liegen.

5.2 *Tabellarischer Vergleich verschiedener Fassungstypen*

Im Rahmen einer Studie zur Sanierung einer existierenden Fassung wurden verschiedene Fassungsvarianten miteinander verglichen, mit dem Ziel, den Fassungstyp mit dem geringsten Unterhaltsaufwand zu eruiieren. Verglichen wurde der existierende Stabrechen mit dem Coanda-Rechen und einem eingetauchten Lochblech. Die nachfolgende Tabelle basiert auf dieser Untersuchung und berücksichtigt allgemein bekannte Eigenschaften der verschiedenen Fassungstypen. Ausschlaggebend für die Wahl eines bestimmten Fassungstypes sind in jedem Fall die spezifischen Anforderungen der betroffenen Fassung.

Eigenschaften	COANDA Rechen	Eingetauchtes Lochblech	Stabrechen	Bemerkungen
Laubabscheidung	++	+	–	Stabrechen: ungeeignet
Sandabscheidung	++	---	---	Lochblech und Stabrechen: ungeeignet
Probleme bei Eisbildung	++	+	–	Lochblech: Bedingung ist genügende Ueberdeckung
Selbstreinigung	++	---	–	Lochblech: benötigt Spülvorrichtung Stabrechen: gut bei richtiger Auslegung und Konstruktion
Funktionssicherheit	++	–	+	Lochblech: Bedingung ist eine zuverlässige Spülvorrichtung
Investitionskosten	–	–	+	Investitionskosten müssen den Betriebskosten gegenübergestellt werden
Gefällebedarf	---	–	+	COANDA: Nachteil kann durch verkürzten Rechen abgeschwächt werden.
Platzbedarf	---	+	++	Stabrechen bietet die grösste Flexibilität
Lebensdauer	–	+	+	COANDA: Die Lebensdauer ist u.U. durch reduziertes Schluckvermögen eingeschränkt

Tabelle 7: Vergleich verschiedener Fassungstypen

6. Umsetzung der Resultate

Die Umsetzung der Resultate ist im Gang. Um die Erfahrungen mit dem COANDA Rechen einer interessierten Öffentlichkeit bekannt zu machen, wurden verschiedene Artikel in Branchenzeitschriften veröffentlicht. In zwei konkreten Fällen wurden für Interessenten Abklärungen gemacht, einerseits für den Ersatz in einer bestehenden Fassung mit einem COANDA Rechen, im andern Fall für einen Neubau.

Detaillierte Information über das Pilotprojekt wurde auch über das Internet zugänglich gemacht.

Durch die Unterstützung des Vorhabens durch den Pilotprojekt- und Studienfonds des VSE darf auch damit gerechnet werden, dass die Versuchsergebnisse über die Informationskanäle des VSE Verbreitung finden.

Die eigentliche Vermarktung des COANDA-Rechens kann nun, nachdem das Pilotprojekt positive Resultate erbracht hat, in Angriff genommen werden. Die Firmen Hans Marugg und Partner und die ENTEC AG werden sich in Zukunft in eigener Regie mit dieser Aufgabe befassen.

Anhang 1: Bilddokumentation

Anhang 2: Massskizzen

Anhang 3: *Publizierte Artikel*