



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
VIENNA
UNIVERSITY OF
TECHNOLOGY

Diplomarbeit

Master`s Thesis

Bauliche und konstruktive Gestaltung von Buchtenkraftwerken

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom – Ingenieurs

unter der Leitung von

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Peter TSCHERNUTTER

und

Univ. Ass. Dipl.-Ing. Michael PUCHER

Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie – Abteilung Wasserbau

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Thomas MAYR

Matrikelnummer 0226400

Mantlergasse 41/13

1130 Wien

Vorwort

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen bedanken, die mich in meiner Studienzeit unterstützt haben und mir den Abschluss des Studiums durch diese Arbeit ermöglicht haben.

Herrn Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Peter Tschernutter möchte ich für die Entstehung und Betreuung dieser Arbeit danken.

Ganz herzlich möchte ich mich bei Herrn Univ. Ass. Dipl.-Ing. Michael Pucher bedanken. Durch seine ausgezeichnete Betreuung und wertvollen Anregungen hat er das rasche Vorankommen erst ermöglicht. Stets hat er sich für die Lösung allfälliger Probleme und Unklarheiten Zeit genommen.

Weiters bedanke ich mich bei allen Mitarbeitern des Instituts für Wasserbau, die mich stets freundlich und hilfsbereit unterstützt haben. Es herrschte immer eine angenehme Atmosphäre, die ein konzentriertes und produktives Arbeiten erst ermöglichte. Bei den Mitarbeitern der Wasserbaulabors möchte ich mich für die Unterstützung beim Bau des Modells bedanken.

Herzlich bedanken möchte ich mich bei meinen Freunden und Studienkollegen, die mich in meiner Studienzeit begleitet haben. Es sind im Laufe meiner Zeit in Wien viele Freundschaften entstanden, die ich auch in Zukunft nicht missen möchte.

All meinen Verwandten und der Familie meiner Freundin sei an dieser Stelle ein herzlicher Dank für ihre Unterstützung ausgesprochen.

Ein besonderer Dank gilt meinen Eltern, die durch ihre moralische und finanzielle Unterstützung das Studium erst ermöglicht haben. Stets haben sie an mich geglaubt und mich in schwierigen Zeiten aufgebaut.

Ich möchte meinen größten Dank meiner Freundin Bernadette aussprechen, die mir immer ein offenes Ohr schenkt und mir in jeder Lebenssituation zur Seite steht.

Danke!

Kurzfassung

Wasserkraftanlagen dienen schon seit Jahrtausenden der umweltverträglichen Energieerzeugung. Zur optimalen Energieausbeute sind sorgfältige Planungen und meist auch Modellversuche notwendig.

In dieser Arbeit wird auf die bauliche und konstruktive Gestaltung von Buchtenkraftwerken eingegangen. Buchtenkraftwerke gehören zu den Niederdruckanlagen und bilden eine Sonderform der Flusskraftwerke bei der das Krafthaus neben dem Wehr in einer seitlichen Bucht angeordnet ist.

Im allgemeinen Teil werden die verschiedenen Bauteile von Buchtenkraftwerken kurz beschrieben. Insbesondere wird auf deren Auswirkungen auf die Entstehung von Verlusten bei Rohrturbinen eingegangen. Hier spielen die An- und Abströmungsbedingungen eine wichtige Rolle. Durch die seitliche Anordnung des Krafthauses muss die Strömung in Richtung Turbineneinlauf umgeleitet werden. Um diese Strömungsumlenkung möglichst verlustfrei zu gestalten wird der Ausbildung des Kraftwerkstrennpfeilers in dieser Arbeit große Aufmerksamkeit geschenkt.

Der Hauptteil der Diplomarbeit beschäftigt sich mit den Vollmodellversuchen eines geplanten Buchtenkraftwerks. Der Schwerpunkt der Versuche lag in der Verbesserung der Kraftwerkkanalströmung insbesondere durch Variationen in der Trennpfeilergestaltung. Die Ausgangskonfiguration zeigte eine schlechte Anströmung der wehrseitigen Turbine. In einer Reihe von Versuchen wurde die Trennpfeilergeometrie verändert und die daraus resultierenden Anströmungen mit Fotos und gemessenen Geschwindigkeitsverteilungen dokumentiert. Da die Pfeilerbreite nicht vergrößert werden durfte, konnte mit den gängigen Trennpfeilergeometrien nur geringfügige Verbesserungen erzielt werden. Erst die Sonderlösung eines Trennpfeilers mit vorge-setzter Leitwand brachte schließlich eine annehmbare Anströmung an die Turbinen. Weitere Verbesserungen ergaben sich durch die Änderung der Vorboden und Auslaufgeometrie.

Die Ergebnisse aus den Modellversuchen werden detailliert beschrieben, bewertet und Varianten miteinander verglichen. Durch die Anwendung verschiedener Kriterien war es möglich die verschiedenen Trennpfeilervarianten nach der Güte der Anströmung zu ordnen

Abstract

For thousands of years hydroelectric power plants have already been used for environmental friendly energy production. In order to reach an optimal energy output a careful design and usually also model tests are necessary.

This work is concerned with the structural design of bay power plants. Bay power plants belong to the low head power plants and form a special type of run-of-river power plants where the power house is arranged beside the weir in a lateral bay.

In the first part the different components of bay power stations are described. In particular, their effects on the emergence of losses at kaplan turbines with a horizontal axis is investigated. The optimal flow to and from the turbines is here of great importance. Because of the lateral arrangement of the power house, the current flow must be redirected toward the turbine inlet. In order to achieve the flow around the separation pier as loss free as possible great attention is laid on its design.

The main part of the thesis focuses on the full model tests of a projected bay power plant. Emphasis is put on the improvement of the power station inflow conditions, in particular by variations of the separation pier geometry. The original design showed unfavourable inflow conditions of the turbine next to the weir. In a set of model tests the separation pier geometry was changed. The resulting inflow conditions were documented with photos and measured speed distributions. The width of the separation pier could not be increased; therefore only slight improvements could be obtained with standard pier geometries. Only a special solution of the separation pier with an additional guidance wall in front of a separation pier resulted finally in acceptable inflow conditions to the turbines. Further improvements could be obtained by the change of the intake structure and discharge geometry.

Experimental results are documented and evaluated in detail and the different alternatives compared. By using different criteria's it was possible to order the alternatives according to the quality of the inflow conditions.

Inhaltsangabe:

1	Einleitung	1
2	Allgemeines über Niederdruckanlagen	2
2.1	Flusskraftwerke	2
2.1.1	Speziell Buchtenkraftwerke	3
2.1.2	Energieerzeugung und Verluste	4
2.2	An- und Abströmbedingungen an Rohrturbinen	5
2.2.1	Entstehung von Verlusten durch ungünstige Kraftwerksanströmung ..	10
2.2.2	Anforderungen an und Kriterien zur Beurteilung der Güte einer Turbinenanströmung	10
2.2.2.1	Anforderungen seitens der Turbinenhersteller	11
2.2.2.2	Isotachenlinien	13
2.2.2.3	Kriterium nach Fisher und Franke	14
2.2.2.4	Geschwindigkeitshöhenausgleichswert (α - Wert)	14
2.2.2.5	Lage des Schwerpunktes	16
2.2.2.6	Normen	16
2.2.2.7	Wirbelbildung	17
2.2.3	Konstruktive Gestaltung des Trennpfeilers – Stand der Technik.....	18
2.2.3.1	Trennpfeiler nach WITTMANN ET AL. (1954)	18
2.2.3.2	Trennpfeiler nach ROUVÉ (1958)	20
2.2.3.3	Trennpfeileruntersuchungen von GODDE (1994)	24
2.2.3.4	Automatische Strömungsoptimierung von Trennpfeilern (DEMNY 2004).....	25
2.2.3.5	Sonderlösungen von Trennpfeilern	27
3	Modellversuche am KW Gössendorf.....	32
3.1	Einleitung	32
3.1.1	Allgemeines.....	32
3.1.2	Aufgabenstellung	32
3.1.3	Gegenstand und Ziel der Untersuchungen	32
3.2	Modellaufbau/Durchführung.....	33
3.2.1	Modellähnlichkeit.....	33
3.2.2	Wasserversorgung	34
3.2.3	Wasserbaurinne	34
3.2.4	Modellaufbau.....	34

3.2.5	Geschiebe	38
3.2.6	Hydrologische und hydraulische Grundlagen.....	41
3.2.7	Messtechnik	42
3.2.8	Versuchsdurchführung	43
3.2.9	Versuchsprogramm.....	44
3.3	Vollmodellversuche Optimierung Krafthaus.....	45
3.3.1	Urplanung ohne Rechenräger	45
3.3.2	Langer Trennpfeiler ohne Rechenräger und Vorboden Typ 1a.....	51
3.3.3	Urtrennpfeiler mit Nasen ohne Rechenräger Vorboden Typ 1a	52
3.3.4	Urtrennpfeiler mit Rechenräger Vorboden Typ 1a.....	54
3.3.5	Urplanung mit Rechenräger und Nasen, gebauchte Trennwand und Vorboden Typ 1a.....	60
3.3.6	Urplanung mit Rechenräger Nasen und geknicktem Vorboden (Typ 1b)	61
3.3.7	Trennpfeiler mit Nasen und Vorboden (Typ 1b) mit Rechenrageranderungen	62
3.3.7.1	Ausblick auf weitere Varianten	62
3.3.8	Trennpfeiler als Nase mit flach geneigtem unterem Bereich (Vorboden Typ 1b).....	63
3.3.9	Geknickte Pfeilerform.....	64
3.3.10	Aufgesetzte PVC-Nasen und horizontale Leitbleche.....	64
3.3.11	Stärker geneigter elliptischer Pfeiler und horizontale Leitbleche	65
3.3.12	Aufgesetzte, kleine PVC-Nasen und horizontale Leitbleche	66
3.3.13	Pfeiler nach Rouvé mit Nase (R_N).....	67
3.3.14	Vertikale Blechleitwand (LW1) und verlängerter schräger Trennpfeiler (R0) mit Vorboden (VB1b).....	67
3.3.15	Oben geneigter Rechenräger und rundem steilerem Vorboden (Typ VB2), Rouvé Pfeiler (R1) und langer Leitwand (LW2).....	70
3.3.16	Oben geneigter Rechenräger und rundem weniger steilen Vorboden (VB3), Rouvé Pfeiler (R1) und langer Leitwand (LW2).....	73
3.3.17	Oben geneigter Rechenräger und rundem weniger steilen Vorboden (Typ 3), Rouvé Pfeiler (R1) und kurzer Leitwand (LW3)	76
3.3.18	Oben geneigter Rechenräger und rundem weniger steilen Vorboden (VB3), Rouvé Pfeiler (R1) ohne Leitwand	77
3.3.19	Rechenräger laut Plan und rundem Vorboden (VB3), Rouvé Pfeiler (R1), unten angeschnittene Leitwand (LW4).....	81
3.3.20	Oben geneigter Rechenräger und rundem Vorboden (VB3) Rouvé breit und lang (R2) und Leitwand (LW5)	83
3.3.21	Rouvé schmal mit Knick und lang (R3) und neue Leitwand (LW6)	89

3.3.22	Rouvé schmal und mittellang (R4) und Leitwand (LW5)	90
3.3.22.1	Rouvé schmal und mittellang (R4) und neue Leitwand (LW5) bei geringerem Durchfluss	99
3.3.22.2	Urplanung mit Vorboden 3 ohne Leitwand zur Evaluierung des Einflusses der Leitwand auf die Turbine 1 und 2 bei 1MB	100
3.3.22.3	Rouvé schmal und mittellang (R4) ohne Leitwand	105
3.3.23	Überprüfung auf lufteinziehende Wirbel	108
3.3.24	Rouvé Pfeiler (R5) mit Kugelkalotte ohne Leitwand	109
3.3.25	Variantenuntersuchung des Mitteltrennpfeilers	111
4	Konstruktive Optimierung des KW Gössendorf.....	113
4.1	Allgemeine konstruktive Optimierung.....	113
4.2	Hydraulische Optimierung des Krafthauses.....	113
4.2.1	OW-seitiger Krafthautrennpfeiler und Strömungsgleichrichter (Leitwände)	117
4.2.1.1	Variante 1, Empfehlung.....	117
4.2.1.2	Variante 2.....	121
4.2.2	Rechentträger	122
4.2.3	Turbinenzulaufgeschwindigkeiten	122
4.2.4	Injektor bzw. BoatBuster (Eisbaum).....	127
4.2.5	Geschiebeleitschwelle.....	130
4.2.6	Krafthausvorboden	130
4.2.7	KH-Auslaufkanal	130
4.2.8	UW-seitige rechte Auslaufmauer.....	131
4.2.9	UW-seitige linke Ufermauer	131
5	Zusammenfassung.....	133
5.1	Vergleich der gemessenen Trennpfeilervarianten	133
5.2	Erkenntnisse zur Trennpfeilergestaltung - Ausblick.....	137
6	Literaturverzeichnis	139
7	Abbildungsverzeichnis	141
8	Tabellenverzeichnis	147

1 Einleitung

Die nachhaltige Deckung des Energiebedarfs unter Schonung der Umwelt hat sich in den letzten Jahren als zentrale Frage der Menschheit entwickelt. In Zeiten steigender Preise von fossilen Energieträgern, Versorgungsengpässen und steigenden Energieverbrauch gewinnt die Erzeugung von elektrischem Strom aus Wasserkraft wieder zunehmend an Bedeutung.

Besonders in Österreich, als wasserreiches Land, liegt großes Potential in der Energieerzeugung aus Wasserkraft. 2005 lag der Anteil der Wasserkraft an der Erzeugung von elektrischer Energie aus erneuerbaren Energiequellen bei 57% (STATISTIK AUSTRIA 2008).

Beim Bau von neuen Anlagen kann durch sorgfältige Planung der zukünftige Betrieb und besonders die Energieausbeute verbessert werden. Im Rahmen der Ausführungsplanung muss das Bauwerk fast immer in einem Modellversuch überprüft und optimiert werden (GIESECKE ET AL. 2005). Dies ist nötig da sich jedes Bauwerk durch die örtlichen Gegebenheiten von anderen unterscheidet. Jedes Kraftwerk ist ein Prototyp und bei der Anströmung an die Turbinen herrschen komplexe 3-dimensionale Wasserströmungen. Diese Strömungen sind auch heute noch aufwendig und kostenintensiv mit numerischen Programmen zu simulieren. Die einmalige Investition für einen Modellversuch steht dabei in keinem Verhältnis zu den Problemen die ein unzureichend funktionierendes Bauwerk in nachhinein verursachen kann. Änderungen sind nach der Inbetriebnahme meist kostspielig und aufwendig.

Diese Arbeit gliedert sich in einen allgemeinen und einen praktischen Teil.

Im ersten Teil wird ein Überblick über Niederdruckanlagen gegeben, dabei werden speziell Buchtenkraftwerke behandelt. Besonderes Augenmerk liegt bei den Einflüssen für die Turbinenanströmung. Hier spielt der Trennpfeiler zwischen Wehr und Krafthaus eine wichtige Rolle.

Der zweite Teil behandelt einen Modellversuch zum geplanten Kraftwerk Gössendorf an der Mur, südlich von Graz. Diese Versuche wurden im Auftrag der STEWEAG-STEAG GmbH im Wasserbaulabor der TU-Wien durchgeführt.

2 Allgemeines über Niederdruckanlagen

Als Niederdruckanlagen bezeichnet man Laufwasserkraftwerke mit geringen Fallhöhen bis 15m. Sie werden meist im Mittellauf von wasserreichen Flüssen angeordnet. Es kommen vor allem Propeller-, Kaplan-, Rohr-, Straflo- und Durchströmturbinen zum Einsatz. Man unterscheidet grundsätzlich zwischen Flusskraftwerken und Ausleitungskraftwerken (GIESECKE ET AL. 2005).

2.1 Flusskraftwerke

Flusskraftwerke werden direkt in den Flusslauf gebaut. Durch den Aufstau des Flusses wird ein geringer Speicherraum im Oberlauf geschaffen. Besonders geeignet sind Flüsse mit einem geringeren Gefälle von 2‰. Es stehen im allgemeinen Stauwehr und Krafthaus direkt nebeneinander (Abb. 2.1). Das Wehr dient zur Stauhaltung und zur sicheren Hochwasserabfuhr, das Krafthaus zur Energieerzeugung. In Abb. 2.2 sind die wichtigsten Elemente eines Krafthauses abgebildet. Für die prinzipielle Konstruktion von Wehr und Krafthaus wird auf einschlägige Literatur verwiesen. Es sei BLIND (1987) und PRESS (1959) erwähnt.

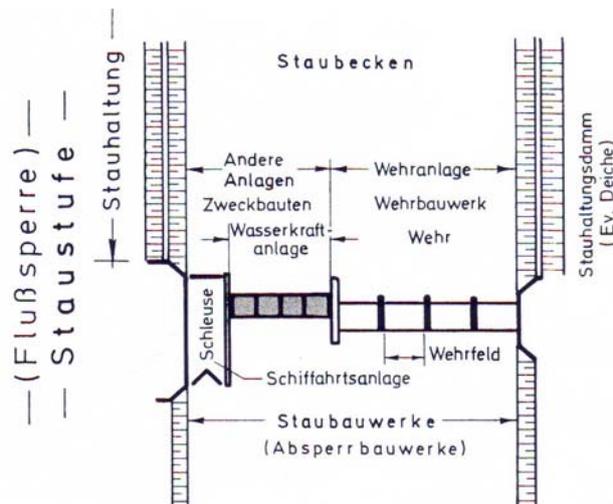
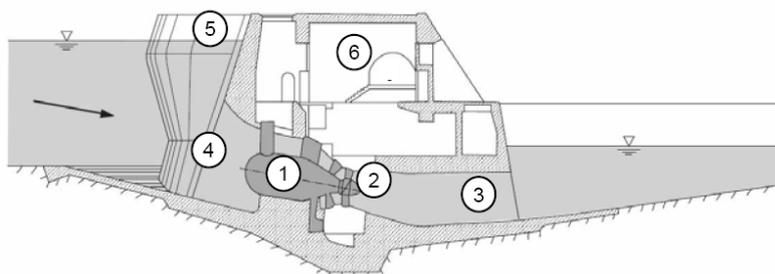


Abb. 2.1: Schematische Darstellung einer Staustufe (BLIND, 1987)



- | | | | |
|---|----------------|---|---------------|
| 1 | Generatorbirne | 2 | Turbine |
| 3 | Saugrohr | 4 | Einlaufrechen |
| 5 | Trennpfeiler | 6 | Wehrgang |

Abb. 2.2: Längsschnitt durch ein Wasserkraftwerk (STROBL ET AL. 2006)

Je nach Anordnung von Krafthaus, Wehranlage und gegebenenfalls Schleuse unterscheidet STROBL ET AL. (2006) folgende Flusskraftwerkstypen (Abb. 2.3):

- a) Blockbauweise bzw. Buchtenkraftwerke
- b) Zweiseitige Kraftwerke
- c) Inselkraftwerke
- d) Pfeilerkraftwerke
- e) Überströmbare Kraftwerke

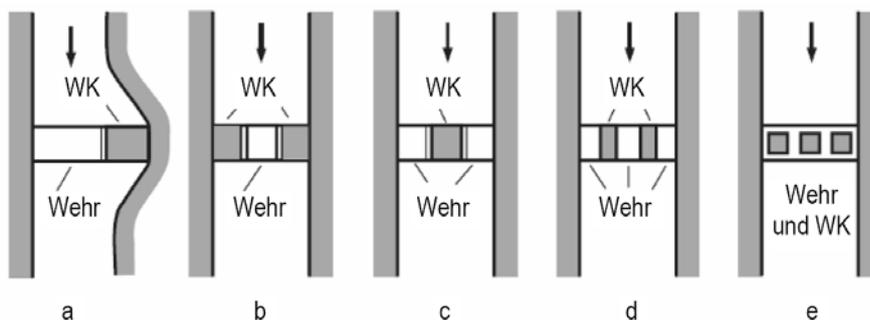


Abb. 2.3: Anordnung von Flusskraftwerken (STROBL ET AL. 2006)

2.1.1 Speziell Buchtenkraftwerke

Buchtenkraftwerke stellen eine Sonderform der Blockbauweise dar, bei der das Kraftwerk in einer künstlich geschaffenen Bucht seitlich des Flusses angeordnet ist.

Es gibt zwei typische Baustellenkonzepte für Laufkraftwerke. Eine Variante ist die Umleitung des gesamten Abflusses während der gesamten Bauzeit und die dadurch mögliche trockene und gemeinsame Errichtung des Krafthauses und der Wehranlage. Als Alternative wird bei beengten Platzverhältnissen zuerst in trockener Bauweise ein Teil bzw. die gesamte Wehranlage errichtet, die später in der Bauphase für das Krafthaus bereits zur Abfuhr des Abflusses dient.

Das Kraftwerk sollte auf der geschiebefreien Außenseite einer Flusskrümmung angeordnet werden. Durch die Verbreiterung des Flussquerschnitts kann das HHQ wie im unverbauten Zustand problemlos abgeführt werden.

Je nach relativer Lage des Kraftwerks zum Stauwerk beschreibt GIESECKE ET AL. (2005) folgende Möglichkeiten (Abb. 2.4):

- a) Krafthaus in Verlängerung des Wehres
- b) vorspringendes Krafthaus
- c) Kraftwerk flussabwärts verschoben

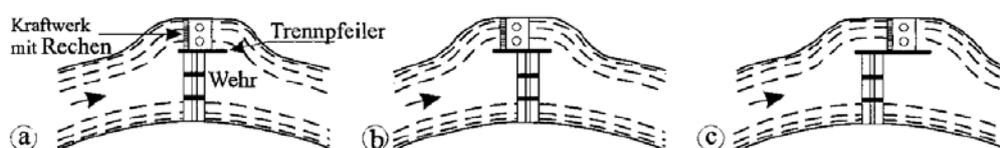


Abb. 2.4: Relative Lage des Kraftwerks zum Stauwerk (GIESECKE ET AL. 2005)

Damit das Kraftwerk gleichmäßig angeströmt wird, sollte die Verziehung der Uferlinie, sowohl auf der Ober- als auch auf der Unterwasserseite ausreichend groß sein. Bei der Anströmung spielen auch die Trennpfeileranordnung, -länge und -form eine wichtige Rolle. Darauf wird in Kapitel 2.2.3 genauer eingegangen.

2.1.2 Energieerzeugung und Verluste

Zur Erfassung der jährlichen Energieausbeute einer Wasserkraftanlage muss die mittlere Überschreitungsdauerlinie des Zuflusses bekannt sein. Aus den Kennkurven des Ober- und Unterwasserstandes lässt sich die Fallhöhendauerlinie ermitteln. Aus Fallhöhendauerlinie und Überschreitungsdauerlinie des Zuflusses ergibt sich die Leistungsdauerlinie. Aus dieser erhält man durch Integration die Jahresarbeit (Abb. 2.3).

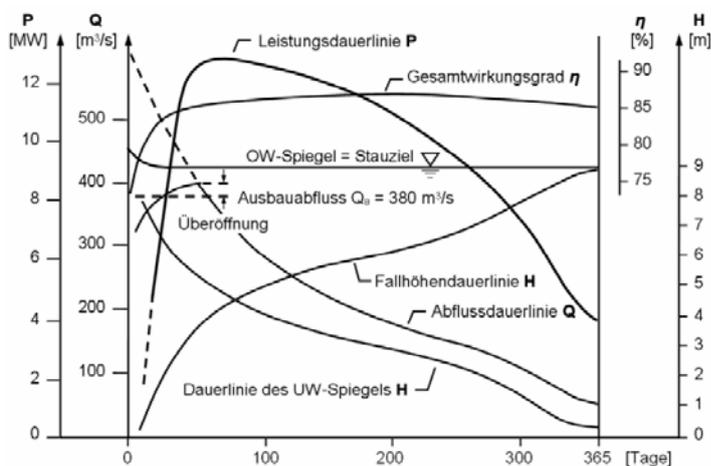


Abb. 2.5 Leistungsplan einer Niederdruckanlage (STROBL ET AL. 2006)

Die Energieerzeugung von Wasserkraftanlagen hängt im Wesentlichen vom Zufluss Q und von der Nettofallhöhe H_N ab (Abb. 2.6). Die Nettofallhöhe H_N ergibt sich aus der Bruttofallhöhe H abzüglich der Verluste. Die Leistung P einer Turbine lässt sich mit folgender Formel berechnen:

$$P = \eta \cdot \rho \cdot Q \cdot g \cdot H_N$$

η	Gesamtwirkungsgrad der Wasserkraftanlage [0,80 – 0,90]
ρ	Dichte des Wassers [kg/m^3]
g	Erdbeschleunigung [m/s^2]
Q	Wasserstrom [m^3/s]
H_N	Nettofallhöhe [m]

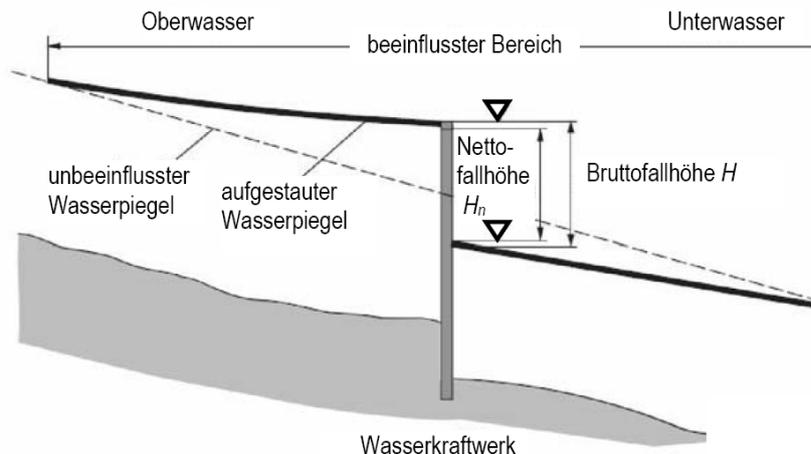


Abb. 2.6: Brutto- und Nettofallhöhe an Wasserkraftanlagen (STROBL ET AL. 2006)

Die Gesamtverluste einer Wasserkraftanlage lassen sich in mechanischen, elektrischen und hydraulischen Verlusten einteilen. In Abb. 2.7 sind die typischen Verluste einer Kleinwasserkraftanlage nach Erlach (1999) aufgetragen. Man kann erkennen, dass es bei den hydraulischen Verlusten zu enormen Leistungseinbußen kommen kann. Hier spielen die Zuströmung mit Einlaufbereich und Rechen sowie der Abströmbereich eine große Rolle. Eine detaillierte Untersuchung und Planung dieser Bereiche im Vorfeld ist zu empfehlen.

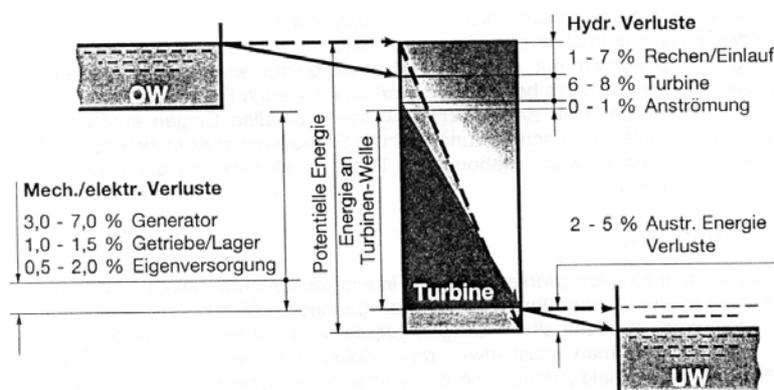


Abb. 2.7: Größenordnung der Einzelverluste in einer Wasserkraftanlage (ERLACH, 1999)

2.2 An- und Abströmbedingungen an Rohrturbinen

Bei Niederdruckanlagen wird das Wasser meist in einem trapezförmigen Flussbett auf das Krafthaus zugeleitet. Bis zur Rechenebene herrscht freier Abfluss, danach fließt das Wasser unter Druck. Bis das Wasser bei der Turbine ankommt muss es mehrere Gerinnegeometrien passieren und wird von verschiedenen Elementen beeinflusst. Das schwankende Wasserdargebot, Revisionsfälle und Wartungsarbeiten führen zu verschiedenen Betriebsfällen, die gewählten Geometrien sind jedoch nicht für alle optimal ausgelegt.

GODDE (1994) und LANG (1999) geben in ihren Arbeiten folgende Strömungs- beeinflussende Elemente an:

- a) Anordnung des Krafthauses
- b) Einlaufsohle
- c) Geschiebeschwelle
- d) Gestaltung des Trennpfeilers (siehe Kap. 2.2.3)
- e) Rechen
- f) Geometrie des Einlaufbereichs
- g) Anordnung des Generators
- h) Gestaltung des Saugschlauchs und Abströmbereiches

ad a) Das Krafthaus wird meist aus wirtschaftlichen und betrieblichen Gründen in Blockbauweise gebaut. Durch die seitliche Anordnung des Kraftwerks kommt es zu einer starken Umlenkung der Zulaufströmung. Daraus folgt oft eine gestörte Strömung im Einlaufbereich. Es kann dadurch zu ungleichförmiger Strömung, Rückströmzonen oder Wirbelablösungen kommen. Der Rechen und die Turbine werden ungleichförmig angeströmt und es kommt dadurch zu erhöhten Verlusten. Durch die Verwendung eines geeigneten Trennpfeilers lassen sich diese Auswirkungen minimieren (siehe Kap. 2.2.3). Um bei der Berechnung der kinetischen Energie von fließendem Wasser eine ungleichmäßige Geschwindigkeitsverteilung zu berücksichtigen wurde der Geschwindigkeitshöhenausgleichswert α (siehe Kap.2.2.2.4) eingeführt.

Bezüglich der Anordnung von Krafthaus- und Wehrachse (siehe Abb. 2.4) gibt es in der Literatur verschiedene Auffassungen. Laut GIESECKE ET AL. 2005 können gute Anströmverhältnisse erzielt werden, wenn die Achsen der Pfeilerköpfe und des Rechens annähernd übereinstimmen, oder das Kraftwerk etwas flussabwärts versetzt gebaut wird (siehe Abb. 2.4). ROUVÉ (1958) schlägt einen breiteren Trennpfeiler vor, je mehr das Krafthaus in Bezug auf das Wehr ins Oberwasser gezogen wird. GODDE (1994) konnte in seinen Versuchen keinen Einfluss auf die Anströmverhältnisse im Bezug auf die Lage des Krafthauses zum Wehr erkennen.

ad b) Der Höhenunterschied zwischen Flusssohle und Turbineneinlauf muss durch einen geneigten Einlaufboden überwunden werden. Durch das Sohlgefälle wird eine Vergrößerung des Fließquerschnitts bewirkt, dadurch kommt es zu einer Verzögerung des Fließvorgangs und die Gefahr von Strömungsablösungen steigt. Besonders die aus dem Krümmungsverlauf des Trennpfeilers resultierende Ablösungstendenz wird verschärft. Der Höhenunterschied zwischen Wehrvorboden und dem Einlaufboden wird durch eine relativ stark geneigte Böschung überwunden. Die seitlich eintretende Strömung wird verzögert und kann zu längs verlaufenden Grundwirbeln und entsprechender drallhafter Zuströmung der Turbinen führen (LANG 1999).

ad c) Unmittelbar vor dem Einlaufboden wird üblicherweise eine Geschiebeschwelle angebracht, diese hat die Aufgabe Geschiebe von den Turbinen freizuhalten. Diese Schwelle verringert lokal den Fließquerschnitt, erhöht die Fließgeschwindigkeit und macht anschließend stärkere Verzögerung notwendig (LANG 1999).

ad e) Am Anfang des Einlaufbereiches ist der Rechen angeordnet. Dieser hat vergleichmäßigen Einfluss auf das Geschwindigkeitsfeld (siehe GODDE 1994), verursacht aber auch teilweise erhebliche Verluste. Wegen der relativ geringen Fallhöhe bei Niederdruckanlagen hat auch ein absolut geringer Fallhöhenverlust eine vergleichsweise große Bedeutung. Der Energiehöhenverlust $h_{v,re}$ des Rechens ist von vielen Faktoren abhängig. Die wichtigsten sind Anströmgeschwindigkeit, Anströmwinkel, Verbauungsgrad, die Rechenverlegung, die geometrische Rechengröße und die Rechenneigung (Abb. 2.8). Zur genauen Berechnung der Verluste wurden bereits verschiedene Formeln entwickelt (GIESECKE ET AL. 2005). Generell steigt der Rechenverlust mit dem Quadrat der Geschwindigkeit:

$$h_{v,re} = \beta \cdot \left(\frac{s}{e}\right)^{4/3} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (\text{KIRSCHMER 1926})$$

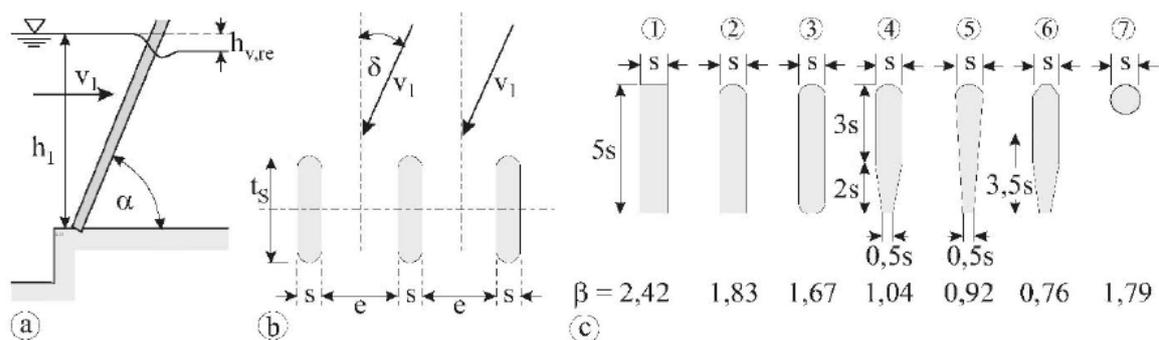


Abb. 2.8: Definitionsskizze zur Rechenverlustberechnung (GIESECKE ET AL. 2005)

Die für den Fall der Schräganströmung entwickelten Formeln von SPANGLER (1928) und ZIMMERMANN (1969) können in der Praxis bis heute keine Anwendung finden, da die Fragen nach Definition und Erfassung von Schräganströmung bislang unbeantwortet geblieben sind (GODDE 1994). HERMANN ET AL. (1998) haben, um den Strömungsvorgang bei einem schräg angeströmten Rechen zu untersuchen, eine Direkte Numerische Simulation (DNS) durchgeführt. In Abb. 2.9 ist das Resultat der Berechnung wiedergegeben.

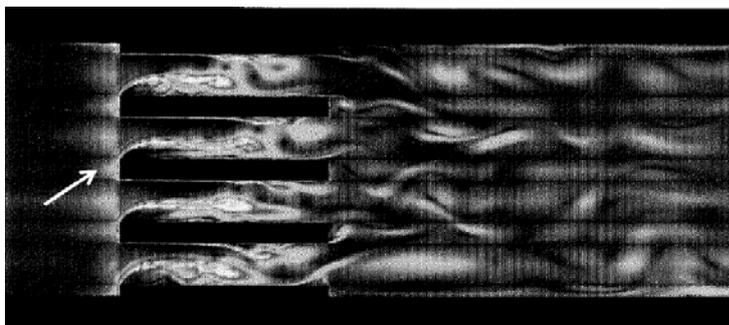


Abb. 2.9: Direkte Numerische Simulation der Strömung durch einen Rechen bei einer Schräganströmung von 45° (HERMANN ET AL. 1998)

Nach Hermann et al. (1998) „bildet sich auf der Luvseite der Stäbe eine extrem zusammengedrückte, kaum sichtbare Scherschicht aus, die ihrerseits höhere Geschwindigkeitsgradienten erzeugt, als sie es im ungestörten Zustand würde. Auf der Leeseite der Stäbe bildet sich eine ausgeprägte Rückströmung aus, die die dortige Wirbelzone weit in den Raum zwischen den Stäben drückt. Dadurch wird die effektive lichte Stabweite verringert und die Durchflussgeschwindigkeit erhöht. Gegenüber der geraden Anströmung sind die Geschwindigkeitsgradienten in der Wirbelschicht wesentlich höher. Die Druckverluste steigen also.“

MEUSBURGER (2002) entwickelte eine neue empirische Formel, die den Verlust am Rechen relativ gut beschreibt. In seiner Formel wird auch der Anströmwinkel δ berücksichtigt. Bei der Rechenverlustberechnung nach MEUSBURGER (2002) wird auf die vollständige Arbeit verwiesen.

ad f) Der Einlaufbereich, mit Einlaufhaube, Sohle und Verziehung vom Rechtecksquerschnitt zum Kreisquerschnitt ist besonders sorgfältig zu konstruieren. Er muss möglichst strömungsgünstig ausgebildet werden, um Energieverluste infolge Strömungsumlenkung und Wirbelbildung zu vermeiden. Es sind gut ausgerundete Formen zu bevorzugen. Durch die Beschleunigung der Strömung in der Verziehung werden Geschwindigkeitsunterschiede abgebaut. Es gilt, dass Verziehungen (Beschleunigungsstrecken) Geschwindigkeitsunterschiede linear und den Turbulenzgrad quadratisch zur Zunahme der mittleren Geschwindigkeit reduzieren. In GODDE (1994) werden verschiedene Varianten untersucht und einander gegenübergestellt. Grundlage für den Vorentwurf bildet der vom Turbinenhersteller vorgegebene Laufraddurchmesser d_1 (STROBL ET AL. 2006). In Abb. 2.10 sind die Regelabmessungen zum Entwurf von Einlaufbereich und Saugrohr einer Rohrturbine dargestellt.

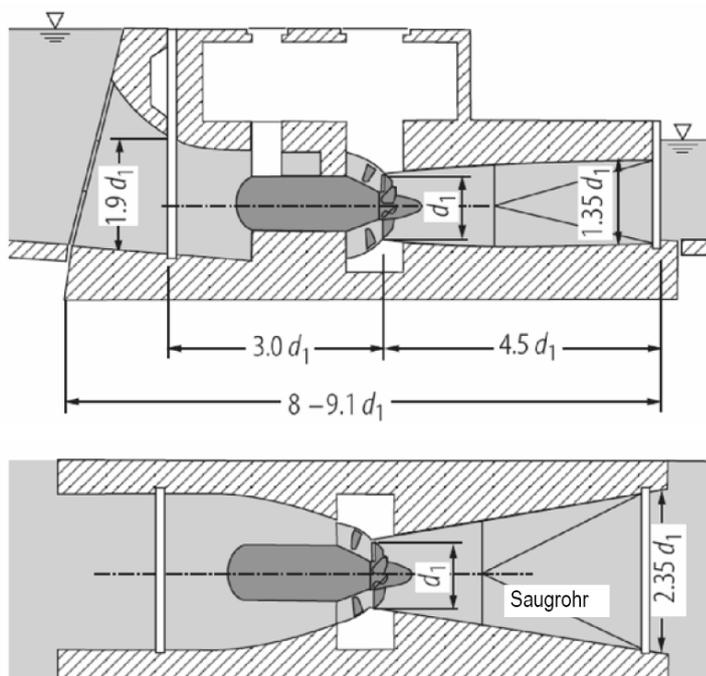


Abb. 2.10: Regelabmessungen einer Rohrturbine (STROBL ET AL. 2006)

ad g) Für die Unterbringung des Generators bzw. des Getriebes stehen mehrere Bauweisen zur Verfügung. Bei Pit- als auch bei Bulb-Turbinen (LANG 1999) liegt der Generator im wasserumströmten Bereich und nimmt unmittelbaren Einfluss auf die Anströmung der Turbine. Es kommt zu einer axialsymmetrischen Aufteilung des Geschwindigkeitsfeldes mit größeren Unterschieden in der Quadrantenbeaufschlagung (GODDE 1994).

ad h) Das Saugrohr (Abb. 2.10) dient der Rückführung der hinter der Turbine vorhandenen kinetischen Energie in mechanische Energie an der Turbine. Das geschieht durch eine allmähliche Querschnittsvergrößerung zwischen Turbine und Auslauf ins Unterwasser. Es verringert sich die Austrittsgeschwindigkeit u . Dadurch wird die verbleibende kinetische Restenergie (Geschwindigkeitshöhe = $u^2/2g$) minimiert und die Nettofallhöhe maximiert. Bei der Gestaltung des Saugrohres ist besonders auf die Vermeidung von Kavitation durch Einhaltung der zulässigen Saughöhe zu achten. Laut GIESECKE ET AL. (2005) liegt der theoretisch zu Verfügung stehende rückzugewinnende Anteil der kinetischen Energie bei 0,5-5% der hydraulischen Energie. Die mittlere Austrittsgeschwindigkeit sollte zwischen 1,4 und 2m/s liegen.

2.2.1 Entstehung von Verlusten durch ungünstige Kraftwerksanströmung

LANG (1999) hat die Entstehung von Verlusten durch ungünstige Kraftwerksanströmung an einen Kraftwerk mit zwei baugleichen Rohrturbinen wie folgt beschrieben: Ab dem Trennpfeilerkopf kommt das Wasser in den näheren Einflussbereich des Kraftwerkes. Bei einer ungünstigen Formgebung des Trennpfeilers bilden sich Ablösungen und es entsteht ein Wirbel. Es kommt zu ersten Verlusten, den „Wirbelverlusten“. Aufgrund der Wirbelbildung wird die Rechenebene der wehrseitigen Turbine ungleichmäßig angeströmt. Es kommt zu überhöhter Anströmung, schräg oder parallel angeströmten Bereichen und Rückströmungen, was wiederum beachtlichen „Rechenverluste“ zur Folge hat. Falls das ungleichmäßige Geschwindigkeitsfeld durch die Verziehung nicht vergleichmäßig wird, kommt es zu „Turbinenverlusten“. Einen Sekundäreffekt bilden Zonen stärkerer Verlegung am Rechen, die zu erneuten „Rechenverlusten“ führen. Die herangetragenen Verschmutzungen konzentrieren sich im Wirbelbereich und können, ausgelöst durch das anlegen und wieder ablösen am Rechen, einen Weg durch die Stäbe finden. Diese Verschmutzungen legen sich am Leit- oder Laufrad an und stören so die Durchströmung der Turbine (siehe Abb. 2.11).

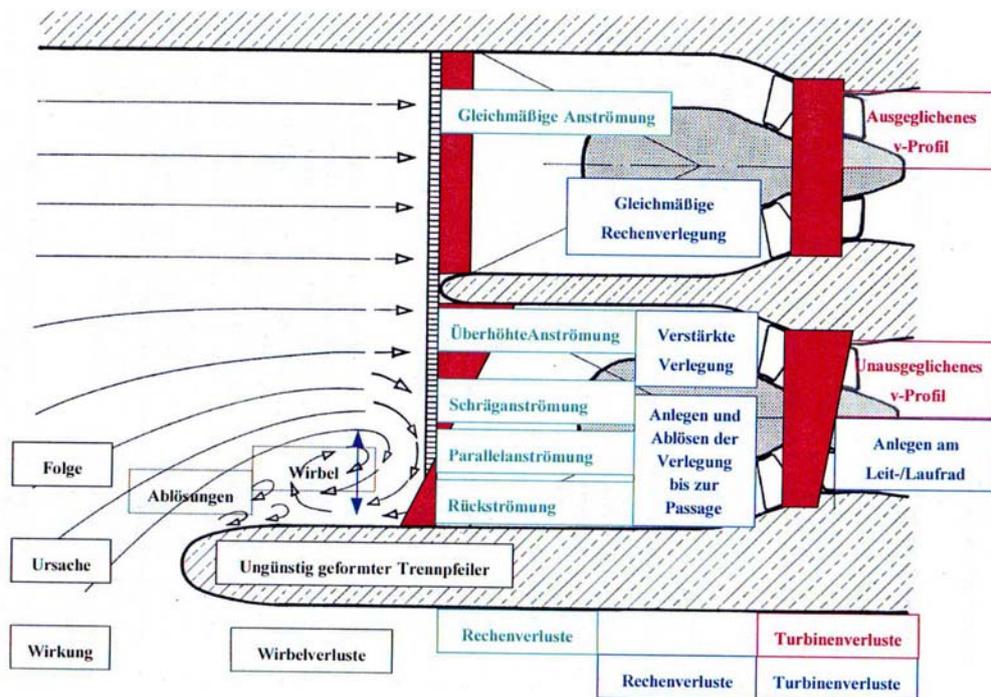


Abb. 2.11 Kraftwerksanströmung und die Entstehung von Verlusten (LANG 1999)

2.2.2 Anforderungen an und Kriterien zur Beurteilung der Güte einer Turbinenanströmung

Zur Beurteilung der Güte einer Turbinenanströmung werden meist Modelluntersuchungen mit Geschwindigkeitsmessungen am Turbineneinlauf durchgeführt. Unter einem Geschwindigkeitsfeld, wird die in einer Ebene senkrecht zur Achse des Gerinnes vorhandene Verteilung der Fließgeschwindigkeitskomponente in axialer Richtung verstanden.

Zur Beurteilung der Qualität der Strömung zu machen stehen folgende Anforderungen und Parameter zur Verfügung (GODDE 1994, LANG 1999).

- Anforderungen seitens der Turbinenhersteller
- Isotachenlinien
- Kriterium nach Fisher und Franke
- Geschwindigkeitshöhenausgleichswert (α - Wert)
- Lage des Schwerpunktes
- Normen
- Wirbelbildung

2.2.2.1 Anforderungen seitens der Turbinenhersteller

Eine geordnete Zuströmung hat große Bedeutung für den Wirkungsgrad und den Betriebsverhalten von Wasserturbinen, denn hydraulische Maschinen werden üblicherweise für ideale Zuströmbedingungen entwickelt. Deshalb werden zur Erfüllung der Garantieverprechen für den Turbinenwirkungsgrad von den Turbinenherstellern Anforderungskataloge für die Turbinenanströmung erstellt. GODDE (1994) gibt in seiner Arbeit eine Auswahl der Anforderungen verschiedener Turbinenhersteller an (Tab. 2.1).

Turbinenhersteller (TH)	TH1	TH2	TH3	TH4	TH5	TH6
Kriterium						
$(V_{\text{lokal}} - V_{\text{mittel}}) / V_{\text{mittel}}$	<10%	<5%	<5%	Abb. 2.13	<15% [*]	<10%
Abweichung der lokalen Strömungsrichtung von der Hauptströmungsrichtung	<5°	-	<5° ^{***}	<5° ^{***}	<10%	<5°
Quadrantenbeaufschlagung im Verhältnis zum Gesamtdurchfluss	25±5%	-	-	25±2,5%	-	25±5%
$V_{\text{Quadrant}} / (0,25 \cdot V_{\text{mittel}})$	-	<5%	-	-	-	-
Beaufschlagung von rechter und linker Einlaufhälfte im Verhältnis zum Gesamtdurchfluss	-	-	50±2,5%	-	-	-
keine Ablösung	x	-	x	x	-	-
keine lufteinziehenden Wirbel	x	-	x ^{***}	x	-	x
keine in den Einlauf hineinreichenden Wirbel	-	x	-	-	-	-
[*] ohne Einbeziehung der Grenzschicht ^{**} darf nicht zu einer Strömungsrotation führen ^{***} kurzzeitige nicht lufteinziehende Wirbel erlaubt x von Turbinenhersteller gefordert - nicht im Anforderungskatalog des Turbinenherstellers aufgenommen						

Tab. 2.1: Anforderungen an die Strömungsqualität seitens der Turbinenhersteller (GODDE 1994)

Die unpräzise Formulierung der Kriterien in Tab. 2.1 zeigt sich im Randbereich des betrachteten Querschnitts (Grenzschichtausbildung). Hier geht die Geschwindigkeit gegen Null, was einer 100%igen Abweichung entspräche. GODDE (1994) empfiehlt daher die Beurteilung des Randbereiches neu zu definieren bzw. aus den Betrachtungen auszunehmen.

In vielen Fällen sind die obigen Anforderungen (Tab. 2.1) nur mit sehr großem Aufwand zu erfüllen. Sie wurden deshalb etwas gelockert beziehungsweise näher an praxisnahe Strömungen angeglichen. Anstatt die Geschwindigkeit an einer Stelle zu betrachten ging man auf einen mehr statistischen Ansatz über (KW 2004):

- 20% aller gemessenen Werte dürfen nicht mehr als 10% vom Mittelwert abweichen
- das Quadrantenkriterium wurde beibehalten
- keine Ablösung im Bereich des Einlaufbauwerkes
- das Kriterium der Winkelabweichung ist in vielen Fällen mit dem Ablösungskriterium identisch

Eine Variante zu den Kriterien in Tab. 2.1 bilden folgende Punkte (KW 2004):

- 50% aller gemessenen werte innerhalb von 5% der mittleren Geschwindigkeit
- von 50 bis 80% der gemessenen Werte gilt ein linearer Verlauf mit einer maximal zulässigen Abweichung von 10%
- für die restlichen 10% gilt wieder ein linearer Verlauf bis maximal 30% Abweichung

Ein flexibleres Anforderungskriterium nach Fisher und Franke wird im Kapitel 2.2.2.3 separat betrachtet.

2.2.2.2 Isotachenlinien

Das erfasste Geschwindigkeitsfeld in axialer Richtung kann mit geeigneter Software in Grafiken dargestellt werden. Diese gestatten eine schnelle Erfassung des Geschwindigkeitsfeldes. Erste qualitative Aussagen wie Gleichmäßigkeit der Strömung oder Unterschiede des Durchflusses durch einzelne Teilflächen lassen sich treffen. Unterdurchschnittlich angeströmte Bereiche (Löcher) lassen sich schnell identifizieren (siehe Abb. 2.12).

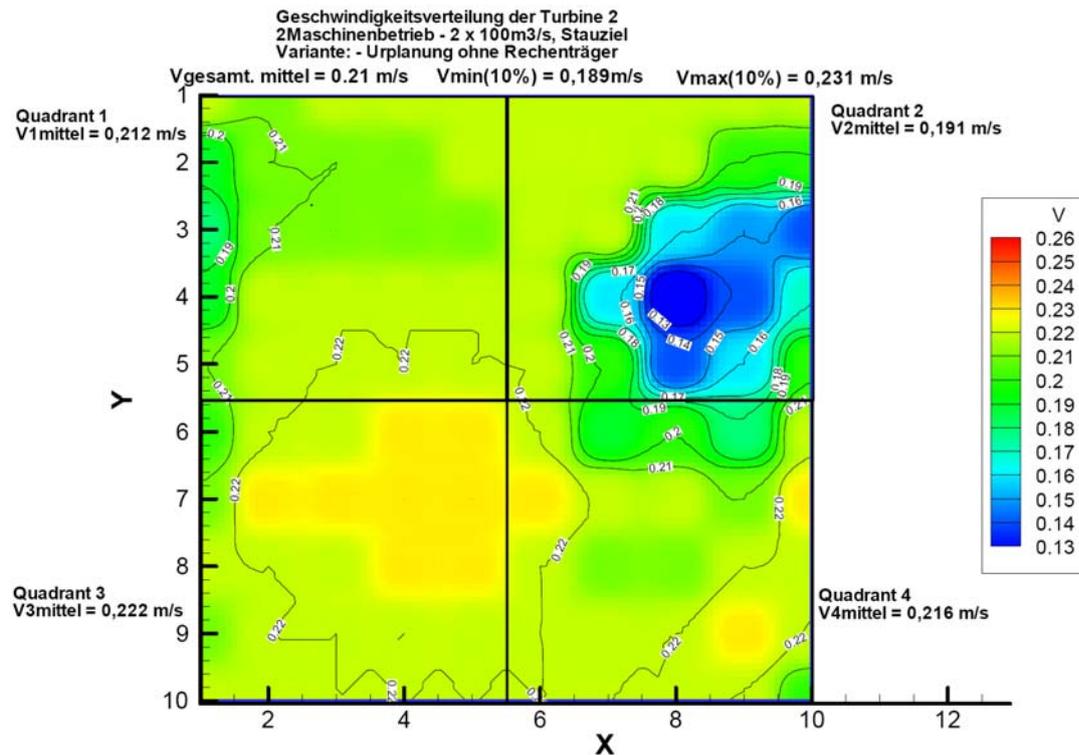


Abb. 2.12: Isotachenlinien eines Geschwindigkeitsfeldes (KW 2008)

2.2.2.3 Kriterium nach Fisher und Franke

Fisher und Franke (aus GODDE 1994) werteten Modellversuche verschiedener Versuchsanstalten aus, die Geschwindigkeitsfelder unterschiedlicher Einlaufgeometrien und Turbinentypen untersucht hatten. Die Geschwindigkeitsfelder wurden in „vermutlich leistungsmindernd“ oder „vermutlich nicht leistungsmindernd“ eingeteilt. Liegen die Werte innerhalb der dargestellten Trompete in Abb. 2.13, ist nach Fisher und Franke nicht mit Leistungsminderung zu rechnen. Das Anforderungsdiagramm setzt die lokale Geschwindigkeitsabweichung vom Mittelwert in Relation zur davon betroffenen anteiligen Querschnittsfläche. Geringere Abweichungen können demnach eine größere Fläche betreffen. Größere Abweichungen sollten sich auf eine kleinere Fläche begrenzen.

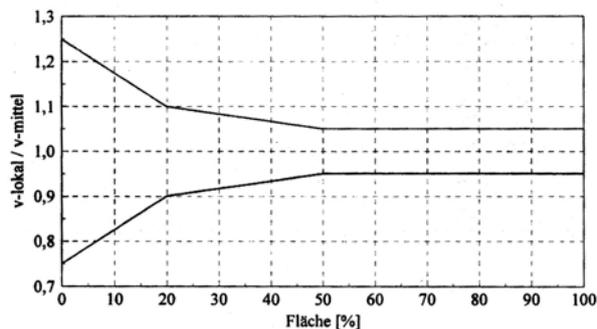


Abb. 2.13: Anforderungsdiagramm nach Fisher und Franke (GODDE 1994)

2.2.2.4 Geschwindigkeitshöhenausgleichswert (α - Wert)

Für den Fall der verlustfreien Potentialströmung berechnet sich die Energiehöhe H_E nach Bernoulli zu:

$$H_E = \frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\gamma} + z \quad \text{wobei} \quad v = \frac{Q}{A} \quad (\text{mittlere Geschwindigkeit})$$

Bei realen Strömungen muss H_E mit den Energieausgleichswerten α (Geschwindigkeitshöhenausgleichswert) und β (Druckhöhenausgleichswert) korrigiert werden. Bei Untersuchungen für Turbinenanströmungen spielt der β - Korrekturwert keine Rolle und kann mit 1 angenommen werden.

Wird die Geschwindigkeit über dem gesamten Querschnitt gleichmäßig verteilt angenommen, so ergibt sich die kinetische Energie zu:

$$E_{kin,theor} = \frac{\rho \cdot dt}{2} \cdot v^3 \cdot A$$

Unter Beachtung der ungleichmäßig verteilten Geschwindigkeiten über den Querschnitt (Abb. 2.14) ergibt sich die tatsächliche kinetische Energie zu:

$$E_{kin,real} = \frac{\rho \cdot dt}{2} \cdot \int v_{(A)}^3 \cdot dA$$

Um die wahre Energiehöhe zu erhalten muss die Geschwindigkeitshöhe in der Formel von Bernoulli mit dem α -Wert korrigiert werden:

$$\frac{E_{kin,real}}{E_{kin,theor}} = \alpha = \frac{1}{v^3 \cdot A} \cdot \int v_{(A)}^3 \cdot dA$$

Mit $v_{(A)} = v + \Delta v$ und $\int \Delta v \cdot dA = 0$ ergibt sich der α -Wert zu:

$$\alpha = \frac{1}{v^3 \cdot A} \cdot \int (v + \Delta v)^3 \cdot dA = 1 + \frac{3}{v^2 \cdot A} \cdot \int (\Delta v)^2 \cdot dA + \frac{1}{v^3 \cdot A} \cdot \int (\Delta v)^3 \cdot dA$$

Der letzte Ausdruck in der Formel für α kann auch vernachlässigt werden.

Der Geschwindigkeitshöhenausgleichswert ist immer größer als 1 und erreicht im Fall der laminaren Rohrströmung den Wert 2. Bei turbulenten Strömungen liegt α zwischen 1,01 und 1,10 (BOLLRICH 2007).

Da die Turbinenhersteller ein möglichst homogenes Geschwindigkeitsfeld verlangen (niedriger α -Wert), ist dieser Parameter geeignet, um Geschwindigkeitsfelder miteinander zu vergleichen (GODDE 1994).

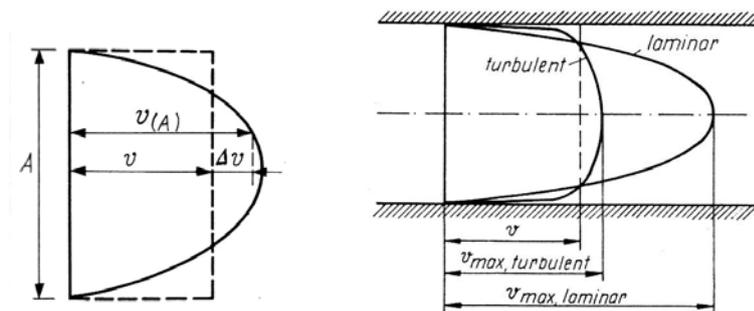


Abb. 2.14: Lokale und mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Fließquerschnitt, Geschwindigkeitsverteilung bei turbulenten und laminaren Rohrströmung (BOLLRICH 2007)

2.2.2.5 Lage des Schwerpunktes

Die Schwerpunktlage eines gemessenen Geschwindigkeitsfeldes gibt ein Maß für die Auslenkung der Strömung aus der Ideallinie an. Zur Ermittlung des Schwerpunktes bildet man den Mittelwert aller Messwerte, die auf vertikalen bzw. horizontalen Linien des gemessenen Gitters liegen. Die so erhaltenen Werte bilden Stützwerte eines Geschwindigkeitsprofils, aus dem sich die Schwerpunktlage in vertikaler bzw. horizontaler Lage ermitteln lässt. Bei der Turbinenanstromung spielt vor allem die Lage des Schwerpunktes des horizontalen Geschwindigkeitsfeldes eine Rolle. Bei ungestörter Strömung liegt dieser in der Symmetrieachse (GODDE 1994).

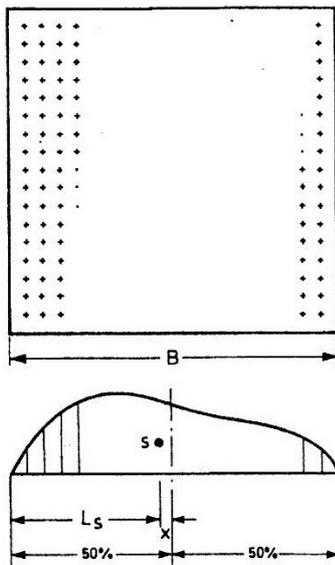


Abb. 2.15: Ermittlung der Schwerpunktlage (GODDE 1994)

2.2.2.6 Normen

Zur Abnahme von Wasserturbinen gibt der weltweit anerkannte IEC-Code 41 (1991) Regeln vor. Dieser ist sehr allgemein gefasst, wobei empfohlen wird ein „möglichst gleichmäßiges Geschwindigkeitsprofil sicherzustellen“. Dies soll durch das „Anbringen geeigneter Führungswände, Tauchdecken, Rechen und Schwimmbretter“ geschehen, „bis die gewünschte Strömungsform erreicht ist“. Bei Messungen im Turbineneinlauf ist es nach diesem Code „notwendig, mit Hilfe temporärer Führungswände und Tauchwänden eine gerade und parallele Strömung über den gesamten Messquerschnitt sicherzustellen“.

Bei ungleichmäßiger Anströmung und rechteckiger Einlaufgeometrie sollen nach IEC-Code 41 die Messpunkte Z der Geschwindigkeit in folgender Bandbreite liegen:

$$24 \cdot \sqrt[3]{A} < Z < 36 \cdot \sqrt[3]{A}$$

A Messquerschnitt in [m²]

Der IEC-Code 60193 (1999) empfiehlt für die Geschwindigkeitsmessungen im Modell, einen Querschnitt vor dem Turbineneinlauf laut Abb. 2.16.

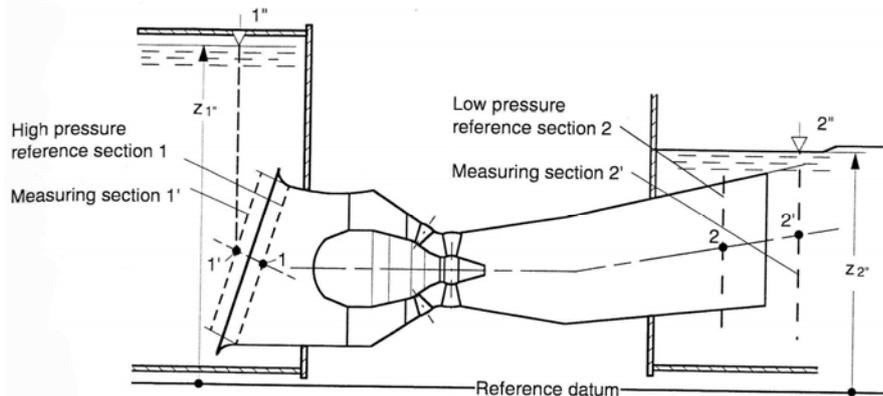


Abb. 2.16: Messquerschnitte bei Turbinenanströmtests (IEC-Code 60193-1999)

2.2.2.7 Wirbelbildung

Die Entstehung von lufteinziehenden Wirbeln im Einlaufbereich ist auf jeden Fall zu vermeiden. In diesem Punkt sind sich auch die Turbinenhersteller einig (siehe Tab. 2.1). Wirbel, die sich bis ans Laufrad durchschlagen äußern sich in besonders harten Schlägen. Bei Modellversuchung hat die Beobachtung von Wirbeln im Einlaufbereich deshalb besonders hohe Bedeutung. Zur Abschätzung der beobachteten Wirbel hat sich eine 6-stufige Klassifizierung der Wirbelstärke bewährt (Tab. 2.2). Im Modellversuch wird eine Wirbelstärke 2 bis maximal 3 als akzeptabel betrachtet (KW 2004).

1		1	zusammenhangslose Wirbel an der Wasseroberfläche
2		2	leichter zusammenhängender Wirbel, leichte Eindellung an der Wasseroberfläche
3		3	stärkere Eindellung, bei Eintrag von Farbstoff deutlich tiefergehender Wirbel sichtbar
4		4	tief gehender Wirbel, zieht leichtes Treibgut ein, jedoch keine Luft
5		5	tief gehender Wirbel, Treibgut wird gefangen, vereinzelte Luftblasen am Ende des Wirbels werden mitgezogen
6		6	durchgehender Wirbelkern

Tab. 2.2: Skalierung der Wirbelstärke (KW 2004)

2.2.3 Konstruktive Gestaltung des Trennpfeilers – Stand der Technik

Der Trennpfeiler stellt bei Buchtenkraftwerken das trennende und zugleich verbindende Bauglied zwischen Wehr und Kraftwerk dar (Abb. 2.17). Er muss das Widerlager für den anschließenden Wehrverschluss sein und den Hohlraum des tiefen Krafthauses vor dem anschließenden Wasserdruck schützen. Daraus ergibt sich eine statisch notwendige Mindestbreite (JAMBER 1956). Bei Kraftwerksbetrieb und geschlossenen Wehrfeldern sind Strömungsumlenkungen nötig, dadurch entstehen Querströmungen und Walzen die zu Fallhöhenverluste führen. Bei Verwendung eines geeigneten Trennpfeilers lassen sich diese negativen Auswirkungen minimieren. Die um den Pfeiler herumgeführte Strömung soll sich an keinem Punkt ablösen und Wirbel bilden können. Je größer die Verzögerung der Strömung ist, desto höhere Anforderungen sind an den Trennpfeiler zu richten. Der Trennpfeiler ist darüber hinaus für eine gleichmäßige Verteilung des zuströmenden Triebwassers auf die Turbineneinläufe zuständig. Speziell die Benachteiligung des wehrseitigen Maschinensatzes soll vermieden werden. Er ist immer in Zusammenhang mit der geneigten Rechenebene und dem Einlaufboden zu sehen (LANG 1999). Die eingangs erwähnte notwendige statische Breite ist meist wesentlich kleiner als die zur Erzeugung einer ablösungsfreien Umströmung des Trennpfeilers notwendige Breite. Aus Kostengründen und Platzmangel wird eine Verbreiterung jedoch öfters gescheut (JAMBER 1956).

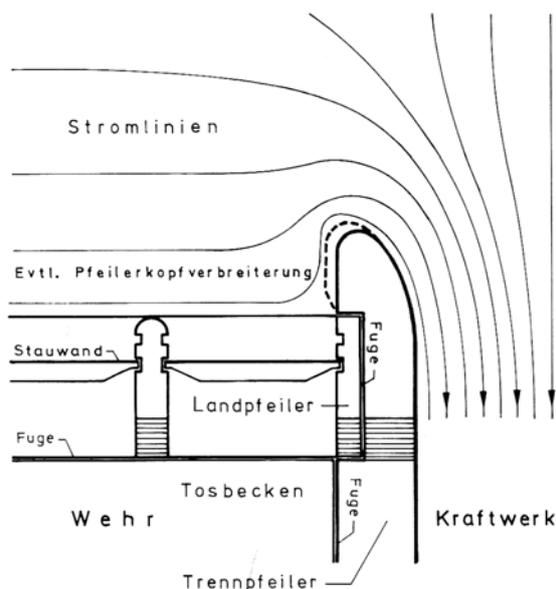


Abb. 2.17: Schematische Darstellung der Trennpfeileranordnung (BLIND 1987)

Erste systematische Modellversuche führten WITTMANN ET AL. (1954) durch. ROUVÉ (1958) entwickelte eine Trennpfeilerform bestehend aus zwei Viertelellipsen, die bis heute in der Praxis Anwendung finden. Darüber hinaus findet man in der Literatur viele Sonderformen.

2.2.3.1 Trennpfeiler nach WITTMANN ET AL. (1954)

WITTMANN ET AL. (1954) gibt in seiner Arbeit den Verlust der wehrseitigen Turbine durch un stabile Anströmung bei ausgeführten Anlagen bis zu 10% an, bei älteren Francisturbinen sogar bis zu 20%. Er entwickelte aufgrund von Versuchsergebnissen an verschiedenen Kraftwerken eine „für alle Laufkraftwerke gültige Trennpfeilerform“.

Für die Ermittlung der nötigen Trennpfeilerbreite sind Modellversuche nötig.

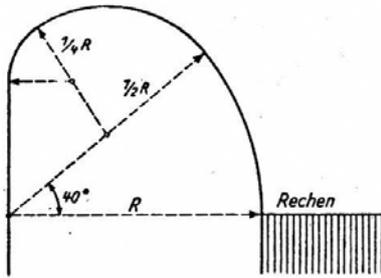


Abb. 2.18: Optimale Trennpfeilerform nach WITTMANN ET AL. (1954)

Je nach relativer Lage des Kraftwerks zum Wehr (siehe Abb. 2.4) gibt es weitere Möglichkeiten der Trennpfeilergestaltung. Ist das Kraftwerk in Bezug auf das Wehr flussabwärts verschoben, kann eine Verlängerung der geraden Flanke des Trennpfeilers oder eine „Ausbeulung“ des Trennpfeilers in Richtung Kraftwerkseinlauf von Vorteil sein (siehe Abb. 2.19). Dadurch kann eine zu große Verzögerung je Wegeinheit ($\Delta v/\Delta s$) und die daraus folgende Ablösung vermieden werden.

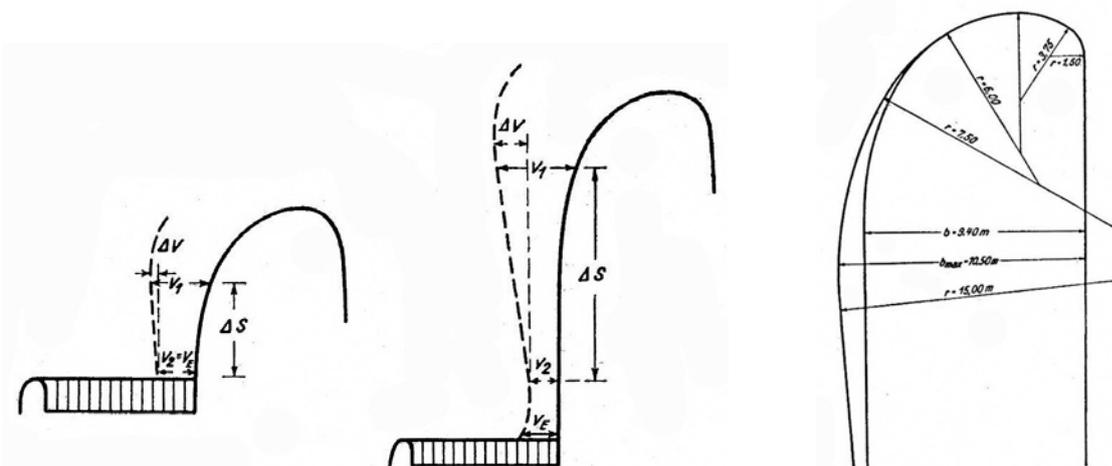


Abb. 2.19: Trennpfeilervarianten nach WITTMANN ET AL. (1954)

Ist das Kraftwerk flussaufwärts verschoben und lässt der Grundriss der gesamten Kraftstufe einen durchgehend breiteren Trennpfeiler nicht zu, ist eine Verbreiterung in Form von Abb. 2.20 nach der Wehrseite möglich. Eine Beeinträchtigung der Wehrleistung ist nicht zu erwarten, da die Querschnittseinengung durch größere Strömungsgeschwindigkeiten entlang der Pfeilerausrundung ausgeglichen wird.

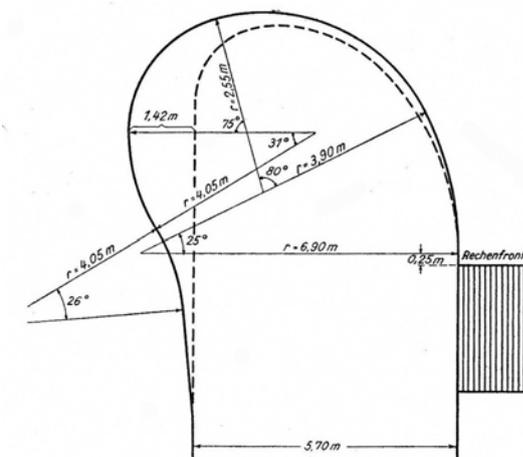


Abb. 2.20: Trennpfeilerverbreiterung in Richtung Wehrfeld (WITTMANN ET AL. 1954)

Um Eis und Geschwemmsel über das Wehr abzuführen kann die Peilerkrone um das erforderliche Maß unter dem Stauziel bleiben. Die Krone sollte jedoch über der Oberkante des Turbineneinlaufs liegen. Je höher desto besser ist die Anströmung der wehrseitigen Turbine (WITTMANN ET AL. 1954).

2.2.3.2 Trennpfeiler nach ROUVÉ (1958)

Bei Trennpfeiler die sich aus verschiedenen großen Kreisbögen zusammensetzen, neigt die Strömung bevorzugt an den Stellen des Radienwechsels zur Ablösung. Hier erfährt die Strömung sprunghafte Geschwindigkeitszunahme (Abb. 2.21). ROUVÉ (1958) definierte aus seinen theoretischen Betrachtungen folgende Eigenschaften der Trennpfeilerform:

- stetiger Übergang der Linienführung im Bereich der 180°-Wendung
- gleichmäßige Änderung der Krümmung oder des Krümmungsradius mit der Forderung eines möglichst großen Radius im Rechenfußpunkt.

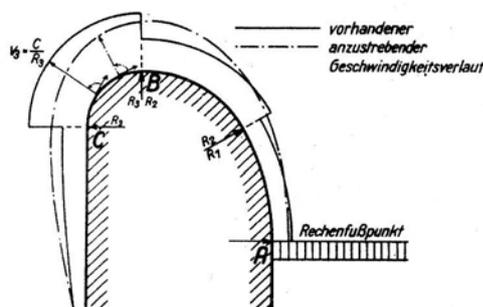


Abb. 2.21: Geschwindigkeitsverlauf am Trennpfeiler aus Kreissegmenten (ROUVÉ 1958)

Die mathematisch nicht erfassbaren maßgebenden Einflüsse für die Form des Trennpfeilers sind:

- Einfluss der Wandreibung auf die Turbulenz
- Ausbauwassermenge
- Lage Wehr-Krafthaus
- Verhältnis der Breiten Wehr und Krafthaus
- Form der OW-Bucht
- Art der Turbinen

Aus den Ergebnissen der Versuche an Teil- und Vollmodellen entwickelte ROUVÉ (1958) eine Trennpfeilerkurve, die aus zwei Viertelellipsen zusammengesetzt ist und somit der Forderung eines stetigen Krümmungsverlaufes entspricht (Abb. 2.22).

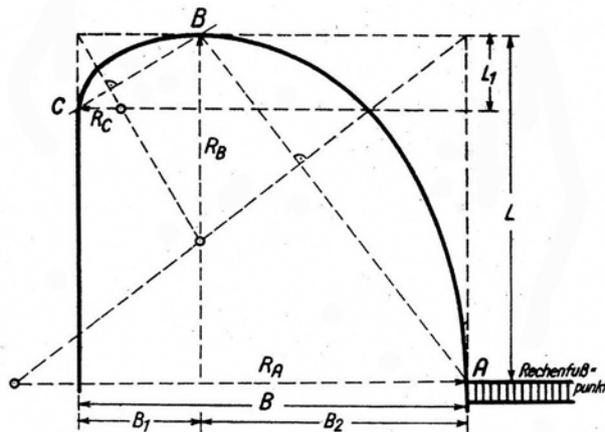


Abb. 2.22: Trennpfeiler nach Rouvé (1958)

Bei der Konstruktion der Trennpfeilerform nach ROUVÉ (1958) müssen folgende Größenordnungen eingehalten werden:

$$0,85 \cdot B \leq L \leq 0,95 \cdot B$$

$$0,28 \cdot B \leq B_1 \leq 0,35 \cdot B$$

$$0,72 \cdot B \leq B_2 \leq 0,65 \cdot B$$

Aus den mathematischen Beziehungen ergibt sich:

$$L_1 = \left(\frac{B_1}{B_2} \right)^2 \cdot L$$

Die Form in Abb. 2.22 baut auf dem als bekannt vorausgesetzten Maß B, der Trennpfeilerbreite, auf. Die erforderliche Trennpfeilerbreite ist abhängig von der Ausbaumengenmenge:

$$B = c \cdot Q^{2/5} \quad 0,7 \leq c \leq 1,4$$

Zur Bestimmung der Konstanten c (siehe Abb. 2.23) wurden zahlreiche Versuchsberichte ausgewertet und Beobachtungen an in Betrieb befindlichen Anlagen durchgeführt. Es werden folgende Einflüsse berücksichtigt:

- Breite und Krümmungsradius der OW-Strecke
- Zentriwinkel der gekrümmten OW-Strecke
- Gegenseitige Lage von Krafthaus und Wehr
- Einfluss der Buchtform k

Der Einfluss der Krafthaus- und Wehrbreite auf die Gestaltung des Trennpfeilers kann vernachlässigt werden.

Als Beispiel wird die Trennpfeilerbreite für das Krafthaus Gössendorf (siehe Kap.3) ermittelt:

Das Kraftwerk befindet sich in einem nahezu geraden Flussabschnitt, die Breite der OW- Strecke beträgt 90m (b_1). Da der Radius r gegen unendlich geht kann keine Verhältnis r/b ermittelt werden. Man verwendet also einen Winkel $\alpha=0^\circ$. Von diesem Punkt aus verfolgt man die Vertikale bis zur Geraden II, da im Beispiel der Trennpfeilerkopf um ca. 6m (l_2) vor den Wehrpfeilerköpfen liegt. Bei einer Breite des Krafthauses von 25m (b_2) ergibt sich ein Verhältnis von l_2/b_2 von 0,24. Der Horizontalen wird bis zur k-Linie 0,3 gefolgt. $k=0,3$ entspricht einer Buchtiefe von 8m. In diesem Beispiel ist die Bucht sehr weit ins Oberwasser gezogen und am Plan kaum zu erkennen. Entsprechend der Neigung der c- Konstanten errechnet sich der Wert zu $c=1,120$. Bei einer Ausbauwassermenge von $200\text{m}^3/\text{s}$ ergibt sich die erforderliche Breite des Krafthaustrennpfeilers zu ungefähr 9,3m. Die tatsächlich vorhandene und vorgesehene Breite beträgt 3 bzw. 4 m

Die strichpunktierte Linie in Abb. 2.23 stellt die Ermittlung der Konstanten c für ein Krafthaus mit folgenden Parametern dar:

- $b_1=200\text{m}$, $r=1800\text{m} \rightarrow r/b_1=9$ $\alpha=31^\circ$
- $l_2/b_2=0$
- $k=0,5$
- $Q=150\text{m}^3/\text{s}$

Daraus ergibt sich ein c -Wert von ca. 1,1 und eine Trennpfeilerbreite von 8,0m.

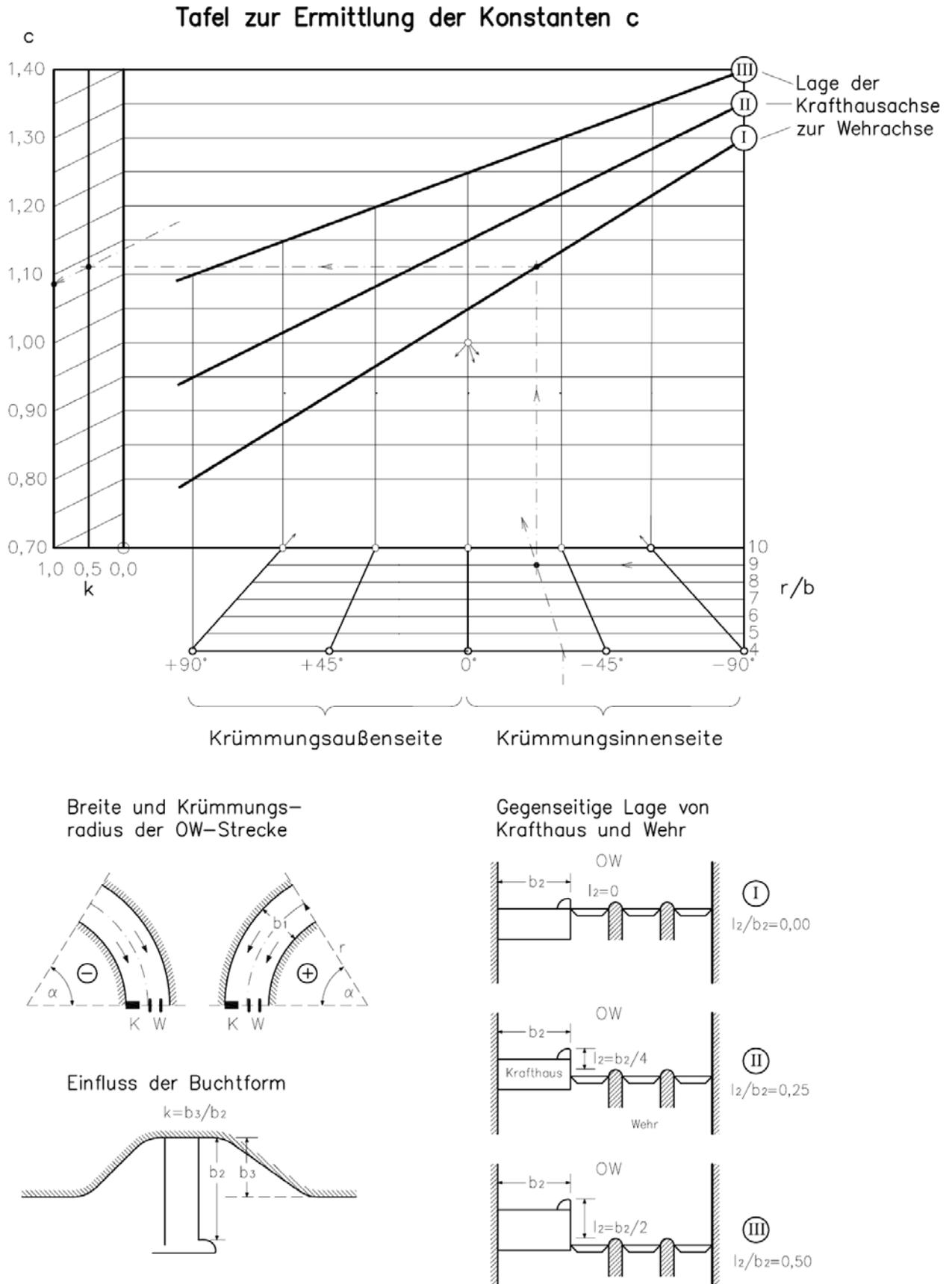


Abb. 2.23: Ermittlung der Konstanten c (ROUVÉ 1958)

2.2.3.3 Trennpfeileruntersuchungen von GODDE (1994)

GODDE (1994) führte mehrere Versuchsreihen zur Turbinenanströmung mit verschiedenen Trennpfeilerkopfgeometrien (siehe Abb. 2.24), Rechengemetrien und Verziefungen durch. Die Schwerpunkte seiner Arbeit sind die Auswirkungen der baulichen Maßnahmen vor der Turbine auf die Strömungsentwicklung und die Auswirkung der erzeugten Strömung auf den Turbinenwirkungsgrad.

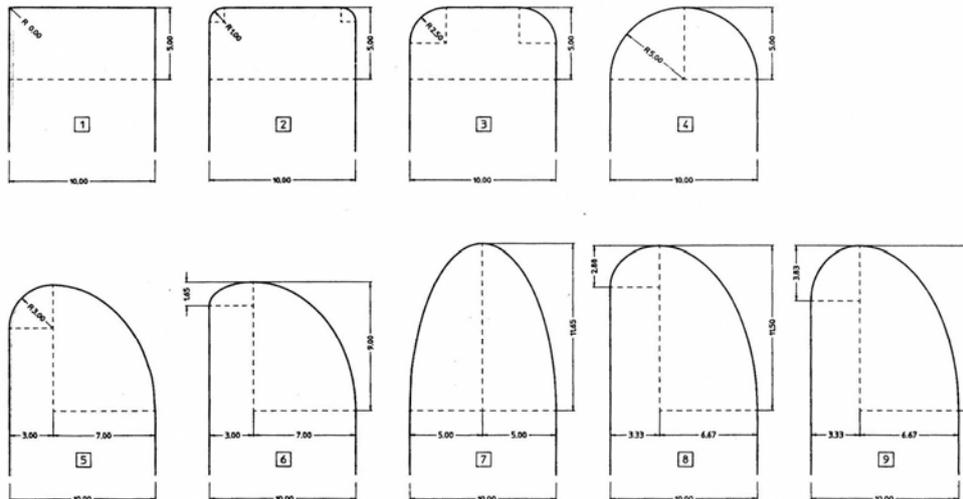


Abb. 2.24: Von GODDE (1994) untersuchte Trennpfeilerformen.

Wie bereits in Kapitel 2.2 erwähnt, hat bei GODDE (1994) die Wehrfeldlage keinen Einfluss auf die Geschwindigkeitsverteilung in der Rechenebene. Sie wirkt sich lediglich auf die Größe der Todwasserzone vor dem Wehrfeld aus (siehe Abb. 2.25). Es konnte in seinem Modell jedoch nur ein kleiner Teil einer „Wehranlage“ nachgebildet werden. Für genauere Aussagen sind Versuche an Vollmodellen nötig.

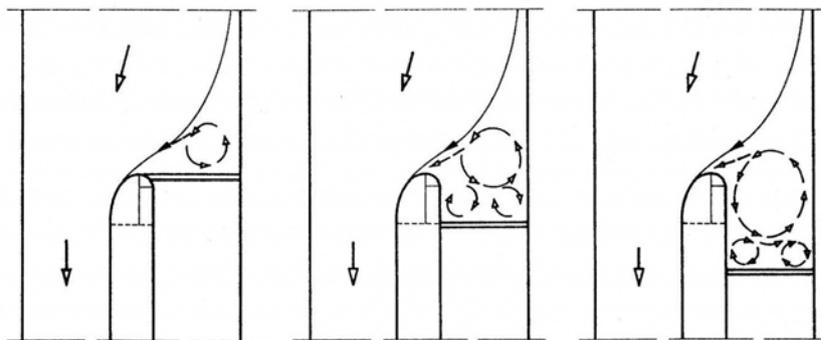


Abb. 2.25: Anströmung bei verschiedenen Wehrfeldlagen (GODDE1994)

Im Gegensatz zu ROUVÉ (1958) hat für GODDE (1994) nur die kraftwerkseitige Abwicklung L' (siehe Abb. 2.26) des Trennpfeilers Einfluss auf die Turbinenanströmung. Bei der Auswertung der erzeugten Geschwindigkeitsfelder der in Abb. 2.24 dargestellten Trennpfeilerformen zeigte sich, dass sich die abgewinkelte Länge L' zur Krümmung und zum α -Wert linear verhält. Die besten α -Werte ($\alpha \sim 1,10$) erreichten die Trennpfeiler 7,8 und 9 (siehe Abb. 2.24). Entscheidend ist, dass bei einer großen Länge L' , der kraftwerkseitige Teil des Trennpfeilerkopfes am Übergang zur Trennpfeilerwand eine geringe Krümmung aufweist. Bei Trennpfeilern aus Viertelellipsen ist dies der Fall, wenn der Radius an dieser Stelle mindestens der zweifachen und die große Halbachse der Viertelellipse mindestens der einfachen Trennpfeilerbreite entspricht.

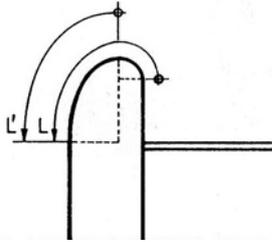


Abb. 2.26: Abgewickelte Längen des Trennpfeilerkopfes (GODDE 1994)

Bezüglich der Auswirkung der Turbinenanströmung auf den Wirkungsgrad ist besonders das Zusammenspiel von Trennpfeiler und Rechen zu sehen. Während bei den Versuchen ohne Rechen die Trennpfeilergestaltung keine Wirkung auf den Turbinenwirkungsgrad zeigte, ist bei den Versuchen mit Rechen sehr wohl eine Leistungssteigerung bei gleichmäßig werdender Anströmung zu erkennen. Die Verluste sind also abhängig vom Winkel der Strömung in Bezug auf die Rechenstabsachse.

2.2.3.4 Automatische Strömungsoptimierung von Trennpfeilern (DEMNY 2004)

Für den Einsatz automatischer Strömungsoptimierung im Wasserbau sieht DEMNY (2004) in der Gestaltung des Trennpfeilers einer Laufkraftwerkanlage ein interessantes Anwendungsgebiet. Die automatische Optimierung der Trennpfeilerform besteht aus 4 Modulen:

- Strömungsmodell
- Zielfunktion
- Optimierungsalgorithmus
- Konturparametrisierung

Für die Modellierung des Strömungsfeldes wird das kommerzielle Programmsystem COMET, Version 2.0, der Firma ICCM, Institute of Computational Continuum Mechanics GmbH, Hamburg eingesetzt. Die Pfeilerumströmung wird mit dem k - ϵ -Turbulenzmodell berechnet. Die räumliche Diskretisierung des Strömungsfeldes erfolgt mit Finiten-Volumen-Netzen (siehe Abb. 2.27).

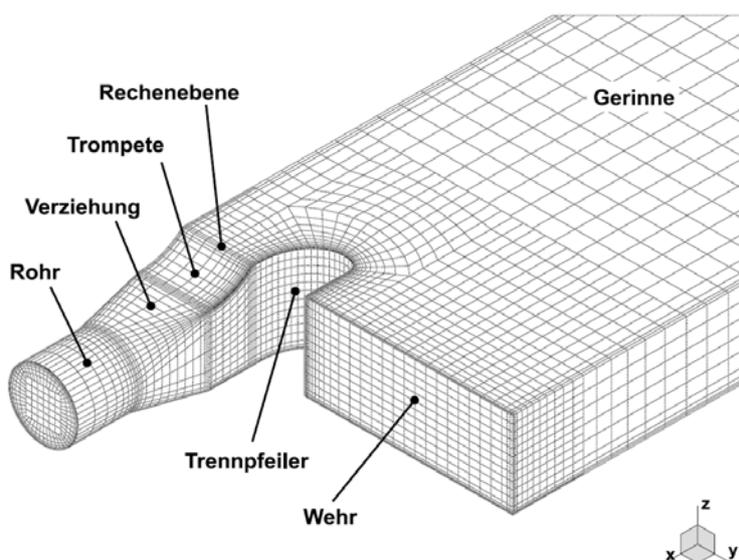


Abb. 2.27: Diskretisierung der Trennpfeilerumströmung mit FV-Netzen (DEMNY 2004)

Im ersten Schritt wird ein Strömungsmodell aufgebaut, verfeinert und auf Modellfehler geprüft. Zielgrößen für die Fehlerberechnung können Geschwindigkeitsaus-

gleichwert, Strömungsverlust oder Rechenverlust sein. Es wird die Strömungsstruktur zwischen Rechnung und Messung verglichen. DEMNY (2004) zieht zur Kalibrierung des Modells die Ergebnisse von LANG (1999) heran (siehe Abb. 2.28).

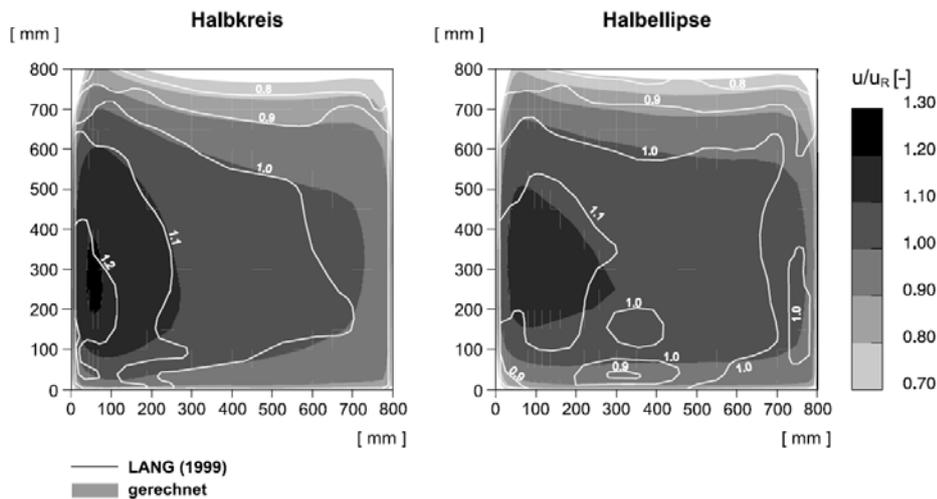


Abb. 2.28: Gerechnete und gemessene Geschwindigkeitsprofile im Rechenquerschnitt (DEMNY 2004)

Als Zielfunktion für die automatische Optimierung der Trennpfeilerkontur wird der Rechenverlust gewählt, dieser zeigt hohe Sensitivität auf Veränderung der Anströmung. Wird der Rechenverlust verringert, sollten sich die Profile für die Längsanströmung und den Strömungswinkel β vergleichmäßigen. Der Winkel β beschreibt die horizontale Abweichung der Strömungsrichtung von der Senkrechten auf der Rechenebene.

Als Optimierungsalgorithmus wird der Quasi-Newton-Algorithmus eingesetzt (siehe DEMNY 2004).

Zur Parametrisierung der Pfeilerkontur werden Bézierkurven verwendet. Diese erlauben bereits mit wenig Unbekannten, die Beschreibung komplexer Strukturen. Zunächst wird nur der Grundriss parametrisiert und optimiert und darauf aufbauend mit einer einfachen Parametrisierung die vertikale Kontur geprüft (siehe Abb. 2.29).

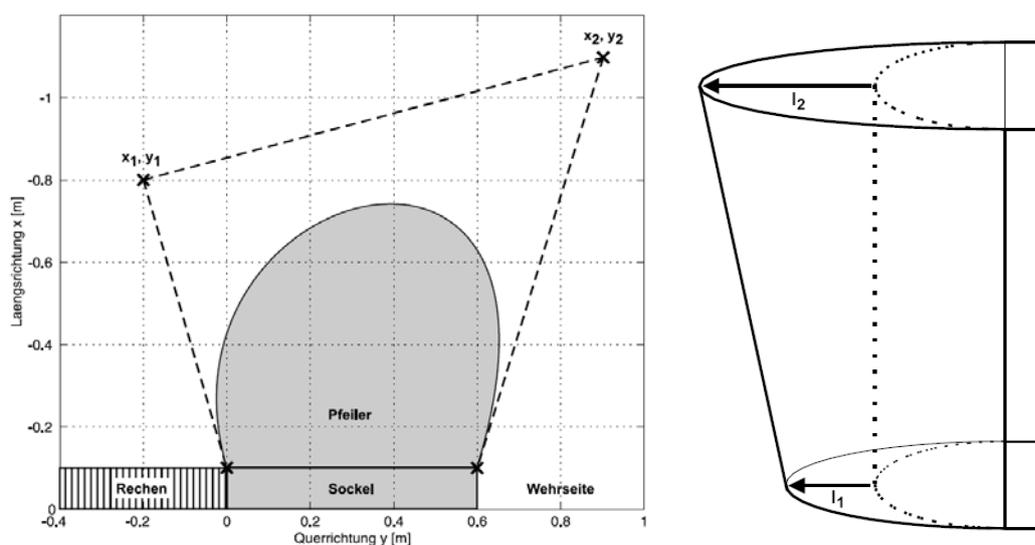


Abb. 2.29: Parametrisierung des Pfeilergrundrisses und der vertikalen Pfeilerkontur (DEMNY 2004)

Die automatische Optimierung des Trennpfeilers ergibt einen Grundriss aus Bezierkurven der in das angrenzende Wehrfeld auskragt und an der Sohle länger ist als am

Wasserspiegel. Mit Berücksichtigung der konstruktiven Aspekte wie Hochwasserschutz, statische Sicherheit und Herstellbarkeit wird die automatisch ermittelte Form etwas vereinfacht. Daraus ergibt sich eine „optimale alternative Kontur“ aus zwei Halbkreisen und einer vertikalen Neigung von 14% (siehe Abb. 2.30).

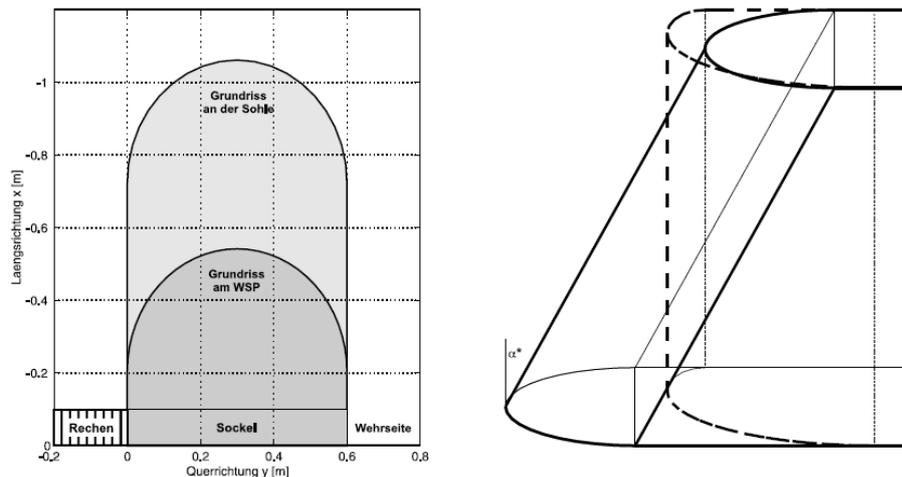


Abb. 2.30: Optimale alternative Trennpfeilerkontur (DEMNY 2004)

2.2.3.5 Sonderlösungen von Trennpfeilern

Aufbauend auf den von WITTMANN ET AL. (1954) und ROUVÉ (1958) entwickelten Trennpfeilerformen ergeben sich viele weitere Sonderformen von Trennpfeilern. Diese wurden meist projektspezifisch mit Hilfe von Modellversuchen entwickelt. All diese voneinander unabhängigen Formen, haben das Ziel die Geschwindigkeitsänderung der Strömung längs des Trennpfeilermantels unter dem kritischen Wert zu halten, bei dem sich eine Ablösung vom Pfeilerumriss ausbilden würde (ROUVÉ 1958).

a) Trennpfeiler mit Leitwand

Es ist in der Praxis oft nicht möglich, die im Modell gefundene, meist außerordentlich große Mindestbreite B_m in der Natur zu verwirklichen. In solchen Fällen ist die Anwendung einer Leitwand berechtigt (siehe Abb. 2.31). Die Leitwand ist so geformt, dass zwischen ihr und dem Pfeiler ein sich von a nach b verengender Schlauch entsteht, der der Verzögerung längs des Pfeilers durch Querschnittsänderung entgegenwirkt. Leitwand und Trennpfeiler ergeben zusammen eine Form die etwa dem Pfeiler der Breite B_m entspricht. Die Leitwandspitze s und das Ende e der Leitwand sollen möglichst strömungsgünstig ausgebildet werden. Diese Forderungen widersprechen sich teilweise:

- Die Verengung von a nach b und die vorgegebene Tangente an der Leitwandaußenseite in s und e' führen am Leitwandende zu einer relativ dicken Breite der Wand. Dagegen soll das Ende e so ausgebildet werden, dass die Wirbelschlepe hinter der Leitwand nicht zu intensiv ausgebildet ist (geringe Breite).
- Um das Zusammenwirken von Leitwand und Trennpfeiler im Schlauch a – b möglichst stetig zu gestalten, sollte die Leitwand möglichst weit um den Pfeiler herumgeführt werden (Lage s'). Andererseits sollte bei geöffnetem Wehr die Spitze s möglichst weit in Richtung Kraftwerk verschoben liegen (Lage s), um ein Absaugen von Wasser aus dem Schlauch a – b in Richtung Wehr zu vermeiden.

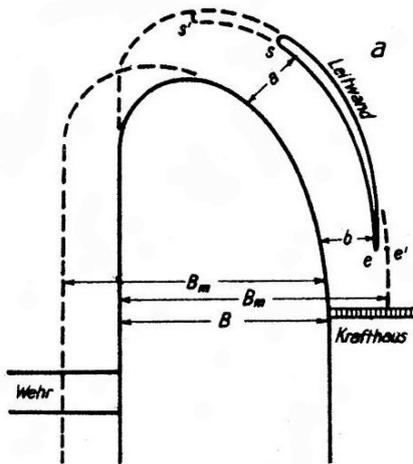


Abb. 2.31: Prinzipskizze Trennpfeiler mit Leitwand (Rouvé 1958)

Eine solche Leitwand kann laut Rouvé (1958) nur für eine Wassermenge strömungsgünstig ausgebildet werden. Dies konnte in den Versuchen am KW Gössendorf bei geringer Versuchsanzahl jedoch nicht nachvollzogen werden. Bei der Reduktion von $200 \text{ m}^3/\text{s}$ (entspricht Q_a) auf $150 \text{ m}^3/\text{s}$ blieben die Ergebnisse relativ gleich (siehe Kapitel 3.3.22.1).

Zum Schutz gegen Eisdruck kann die vorgesezte Leitwand in ihrem oberen Teil (etwa 0,5 bis 1m unter Stauspiegel) mit dem massiven Pfeiler verbunden werden (JAMBER 1956). JAMBER (1956) kam in seinen Modelluntersuchungen zu einem Kraftwerk an der Mosel zu einer Trennpfeilerform mit vorgesezter Leitwand (siehe Abb. 2.32). Durch diese Gestaltung des Trennpfeilers konnte die Bedingung einer möglichst gleichmäßigen Anströmung sowohl der ersten als auch der letzten Turbine befriedigt werden. Für die erste Turbine bleibt die Kürze des Trennpfeilerkernes maßgebend, für die letzte Turbine die künstliche Pfeilerverlängerung durch die vorgesezte Leitwand.

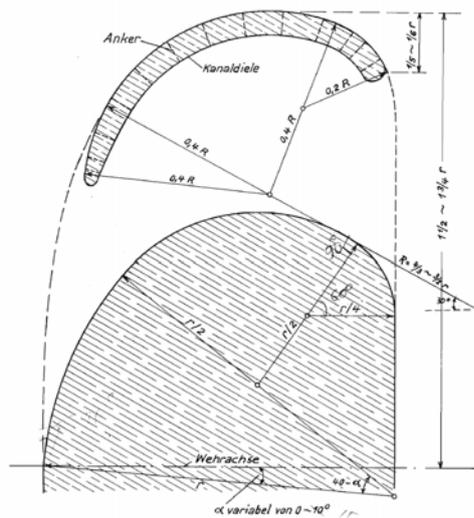


Abb. 2.32: Vorschlag eines Trennpfeilers mit Leitwand an einem Moselkraftwerk (JAMBER 1956)

Die folgenden Abbildungen (Abb. 2.33 und Abb. 2.34) zeigen aktuelle Trennpfeilergestaltungen von Laufkraftwerken in Deutschland, die von E.on bzw. RWE betrieben werden. Laut Auskunft von E.on und RWE hat sich die Pfeilergestaltung mit Leitwänden bewährt und es gibt bis dato keine Probleme mit Geschwemmsel oder Verkrautung.

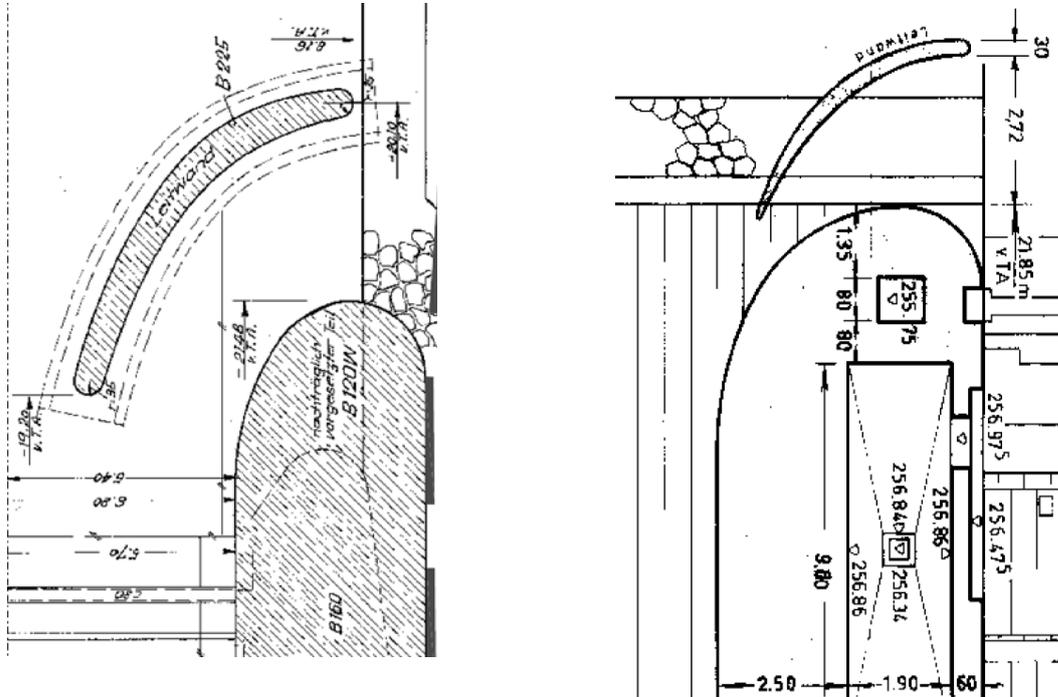


Abb. 2.33: Trennpfeilergestaltung KW-Wipfeld und KW-Hausen (E.on)

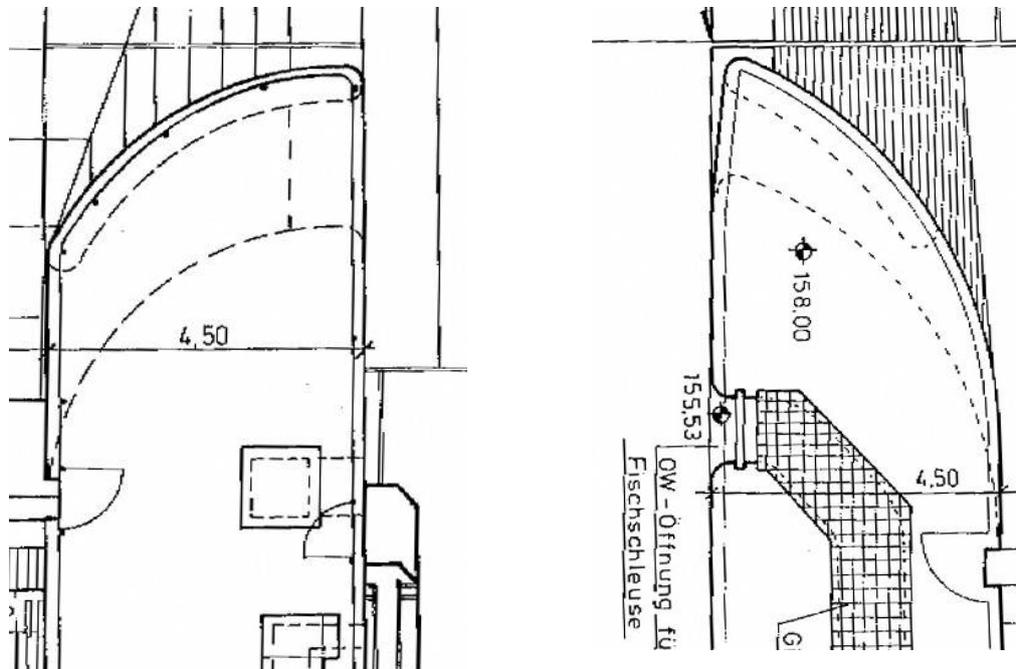


Abb. 2.34: Trennpfeilergestaltung KW-Mettlach und KW-Serring (RWE)

b) Zum Wehr hin auskragender Trennpfeiler

Eine weitere Möglichkeit die ungünstige Anströmung, ausgelöst durch unzureichende Pfeilerbreite, zu verbessern ist die Ausbildung eines in das Wehr auskragenden Trennpfeilers (siehe Abb. 2.35). Die Beschleunigung wird durch die Wahl eines großen Anfangsradius klein gehalten, so dass der Betrag der notwendigen Verzögerung längs des Pfeilers ebenfalls klein sein kann. Bei Einhaltung der geforderten Wehrbreite und Trennpfeilerbreite in Höhe der Wehrachse entspricht die Wirkung des Pfeilerkopfes durch die Auskrägung einem Pfeiler der Breite B_m . Die Wehrseite des Pfeilers lässt sich stets so ausbilden, dass für die Anströmung des Wehres keine Nachteile entstehen (ROUVÉ 1958).

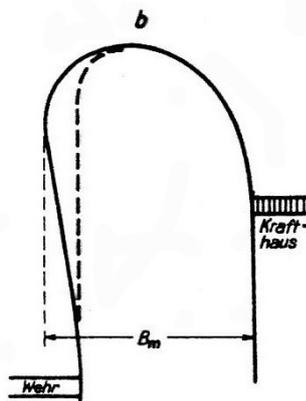


Abb. 2.35: Trennpfeiler mit Auskrägung auf Wehrseite (Rouv  1958)

c) Über H e veränderlicher Querschnitt

Bei der Trennpfeilergestaltung hat nicht nur die Form des Grundrisses sondern auch die vertikale Ausführung Einfluss auf die Turbinenanstromung. Die vertikale Pfeilerkontur kann dabei verschieden geneigt sein (siehe Abb. 2.29).

Ein Beispiel für eine bautechnisch recht aufwendige Form ist der Trennpfeiler in Abb. 2.36.

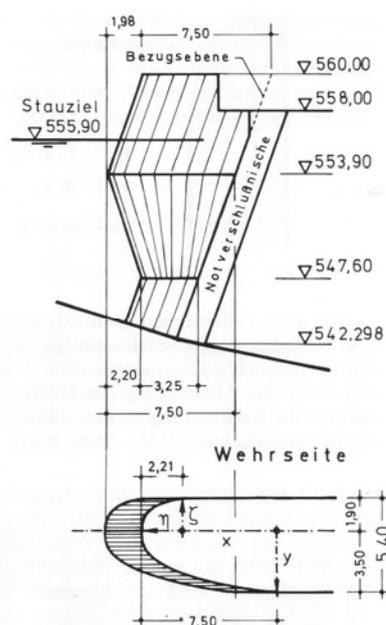


Abb. 2.36: Trennpfeiler an einer Lechstaustufe (BLIND 1978)

d) Drehpfeiler nach Godde (1994)

Ein Ergebnis der Untersuchungen von GODDE (1994) ist die Entwicklung eines sogenannten Drehpfeilers (siehe Abb. 2.37). Sein Kopf besteht aus einem drehbaren Zylinder, dessen Rotation die Grenzschichtablösung verhindert. Durch die Rotation haftet die Strömung an der Trennpfeilerwand und eine starke Schräganströmung wird bei weitem nicht so stark ausgelenkt. Es kommt zu besserer Rechen- und Turbinen-anströmung. Der Nachteil einer solchen Konstruktion sind, höhere Herstellungskosten, konstruktive Fragestellungen bei der Lagerung und der erforderliche Energieaufwand für den Antrieb des Pfeilers.

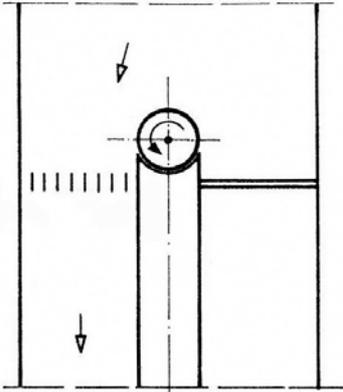


Abb. 2.37: Drehpfeiler nach GODDE (1994)

3 Modellversuche am KW Gössendorf

Die Modellversuche am KW Gössendorf bilden den Hauptteil der Diplomarbeit.

3.1 Einleitung

In den folgenden Kapiteln wird das KW Gössendorf kurz beschrieben. Die Aufgabenstellung und das Ziel der Modellversuche werden angeführt.

3.1.1 Allgemeines

Das Murkraftwerk KW Gössendorf (Mur-km 170,090) soll im Süden von Graz, flussab der A2-Südautobahn, an der Mur errichtet werden. Das Kraftwerk besteht aus einem rechtsufrigen angeordneten Wehr mit drei Wehrfeldern, die mit Segmenten mit aufgesetzter Klappe ausgerüstet werden. Linksufrig schließt an der Wehranlage das Krafthaus mit zwei Maschinensätzen in Form von horizontalen Kaplan-Pit-Turbinen an. Mit einer Fallhöhe von etwa 11 m (bei QA) und einem Ausbaudurchfluss von 200 m³/s ergibt sich eine installierte Leistung von ca. 18,78 MW.

Um die Beibehaltung der Hochwasserabflusssituation in den Vorländern zu gewährleisten sind flussab des KW Gössendorf beidseitig flussmorphologische Aufweitungen des Murprofils und eine Murinsel geplant..

3.1.2 Aufgabenstellung

Die Einreichplanung zum vorliegenden Projekt wurde von der Firma Steweag-Steg GmbH (im folgenden Steweag genannt) auf Basis einer numerischen Berechnung der Firma Hydroconsult GmbH erstellt.

Auf Basis dieser Entwürfe hat die Steweag die TU Wien (Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie) zur Abklärung verschiedener hydraulisch-wasserbaulicher Fragestellungen mit der Durchführung von hydraulischen Modellversuchen beauftragt.

Teilweise wurden Optimierungen bereits im Vorfeld mit Hilfe von Vorversuchen durchgeführt, deren Ergebnisse bereits von der Steweag in deren übergebenen Projektsunterlagen für das Vollmodell eingearbeitet wurden.

3.1.3 Gegenstand und Ziel der Untersuchungen

Für eine Klärung der u.a. Fragen wurde das geplante Projekt mit einer ca. 300 m langen Oberwasser- und einer ca. 300 m langen UW-Strecke der Mur im Vollmodell, in einem großen Maßstab von 1 : 40, nachgebaut. Die Anlage wurde mit allen relevanten Details, wie z.B. Wehrverschlüssen, Turbineneinläufen etc. nachgebildet. Das Modell wurde mit beweglicher Flusssohle und einer beweglichen Rauigkeitsschicht auf den festen Böschungen ausgeführt.

Untersuchungsthemen waren:

- Optimierung der Wehr- und Tosbeckengeometrie
- Hydraulische Optimierung der gesamten Kraftwerksanlage
- Untersuchung der besonderen Problematik der Geschiebedurchleitung Anlandungen im Stauraum und UW, Spülvorgänge)
- Bestimmung des Hochwasserabfuhrvermögens
- Vergleich der Wsp.- Messungen im hydraulischen Vollmodell mit jenen numerischen 2d-Modellrechnung, durchgeführt von der Firma Hydroconsult.

In der Diplomarbeit wird nur auf die hydraulische Optimierung der Kraftwerksanlage eingegangen.

3.2 Modellaufbau/Durchführung

Die Versuche wurden am Freigelände des Wasserbaulabors des Institutes für Wasserbau und Ingenieurhydrologie der TU Wien durchgeführt. Die Untersuchungen erfolgten, aufbauend auf den vom Juli 2007 und vom September 2007 bis Dezember 2007 durchgeführten Vorversuchen, im Zeitraum April bis Juli 2008.

3.2.1 Modellähnlichkeit

Das KW Gössendorf wurde im Maßstab 1:40 eingebaut, wobei die Umrechnung der Naturparameter in die Modellparameter nach dem Froude'schen Modellgesetz erfolgte.

Geometrischer Maßstab, λ :	0,025
Modell Breite, Länge B_M :	$B_M = \frac{B_N}{\lambda}$
Durchfluss Modell, Q_M :	$Q_M = \frac{Q_N}{\lambda^{5/2}}$
Fließgeschwindigkeit Modell, v_M :	$v_M = \frac{v_N}{\lambda^{1/2}}$

Dadurch ergeben sich verschiedene Übertragungsverhältnisse für die verschiedenen Modellparameter:

Massstabsverhältnis		1:	40
Übertragungsverhältnis			
Länge, Breite, Höhe	m	1:	40,0
Fläche	m ²	1:	1600,0
Volumen	m ³	1:	64000,0
Zeit	s	1:	6,3
Geschwindigkeit	m/s	1:	6,3
Beschleunigung	m/s ²	1:	1,0
Abfluss	m ³ /s	1:	10119,3
Abfluss pro Breitenmeter	m ³ /s.m	1:	253,0
Dichte	kg/m ³	1:	1,0

Wobei:

Durchfluss Natur, Q_N
 Fließgeschwindigkeit Natur, v_N

Tab. 3.1: Übertragungsverhältnisse der Modellparameter

Aus dem Froude'schen Modellgesetz ergeben sich die folgenden Modelldurchflüsse im Maßstab 1:40.

	Natur [m ³ /s]	Modell [l/s]
HQ 5000	1854	183
HQ 1000	1629	161
HQ 100	1316	130
HQ 30	970	96
HQ 5	700	69
HQ 1	442	44
Q _A	200	20
MQ	108	11

Tab. 3.2. Modelldurchflüsse nach dem Froude'schen Modellgesetz bei M 1:40

3.2.2 Wasserversorgung

Die Wasserversorgung erfolgte im Kreislaufbetrieb mittels zweier Pumpen, welche das Wasser aus dem 1000 m³ großen Tank im Keller des Labors bezogen. Die jeweils erforderliche Zuflussmenge konnte mittels eines Schiebers, welcher von einem Schaltschrank aus bedient wurde, eingestellt werden.

3.2.3 Wasserbaurinne

Die Versuche wurden in einer Wasserbaurinne mit einer lichten Breite von 3,75 m bzw. 5,0 m, einer lichten Höhe von ca. 0,82 m durchgeführt. Durch den Einlaufbereich samt Wasserzufuhr im Oberwasser und den Sandfang, die Unterwasserklappe und die Wasserrückgabe verblieb von der 28,8 m lichten Länge eine nutzbare Rinne-länge von ca. 22 m (siehe Abb. 3.1) für das Modell.

Die Rinne stand auf einer etwa 0,25 m dicken Betonplatte des Freigeländes. Die Rinne-wände wurden aus Hohlblockziegeln als Mauerwand mit Mörtelfuge errichtet.

3.2.4 Modellaufbau

Auf Grund der schlechten Übereinstimmung des Lageplanes mit den Querprofilen wurden als Grundlagen des Modells der von der Steweag gelieferte Lageplan „AS_GO_KA_Block-Dämme_080227“ verwendet. Für die Höhen wurden die in den Querprofilen angegebene Dammkrone von 332,33m.ü.A und im Unterwasser die Höhen aus dem Geländemodell bzw. den Querprofilen abgeglichen. Der gesamte Modellstand ist in Abb. 3.1 dargestellt. Das Kraffhaus und Wehrmodell wurden auf Basis der Planserien 243 und 17.648 vom Jänner 2008 erstellt (siehe Abb. 3.2 und Abb. 3.3).

Die Flussprofile wurden auf Basis der Datengrundlage alle 40 m in der Natur in der Werkstatt hergestellt und in die bestehende Rinne lage- bzw. höhenrichtig versetzt. Die Böschungen wurden mittels Mauerwerk bzw. Sandfüllungen vorprofiliert und mit einer ca. 10 cm dicken Betonhaut abgezogen.

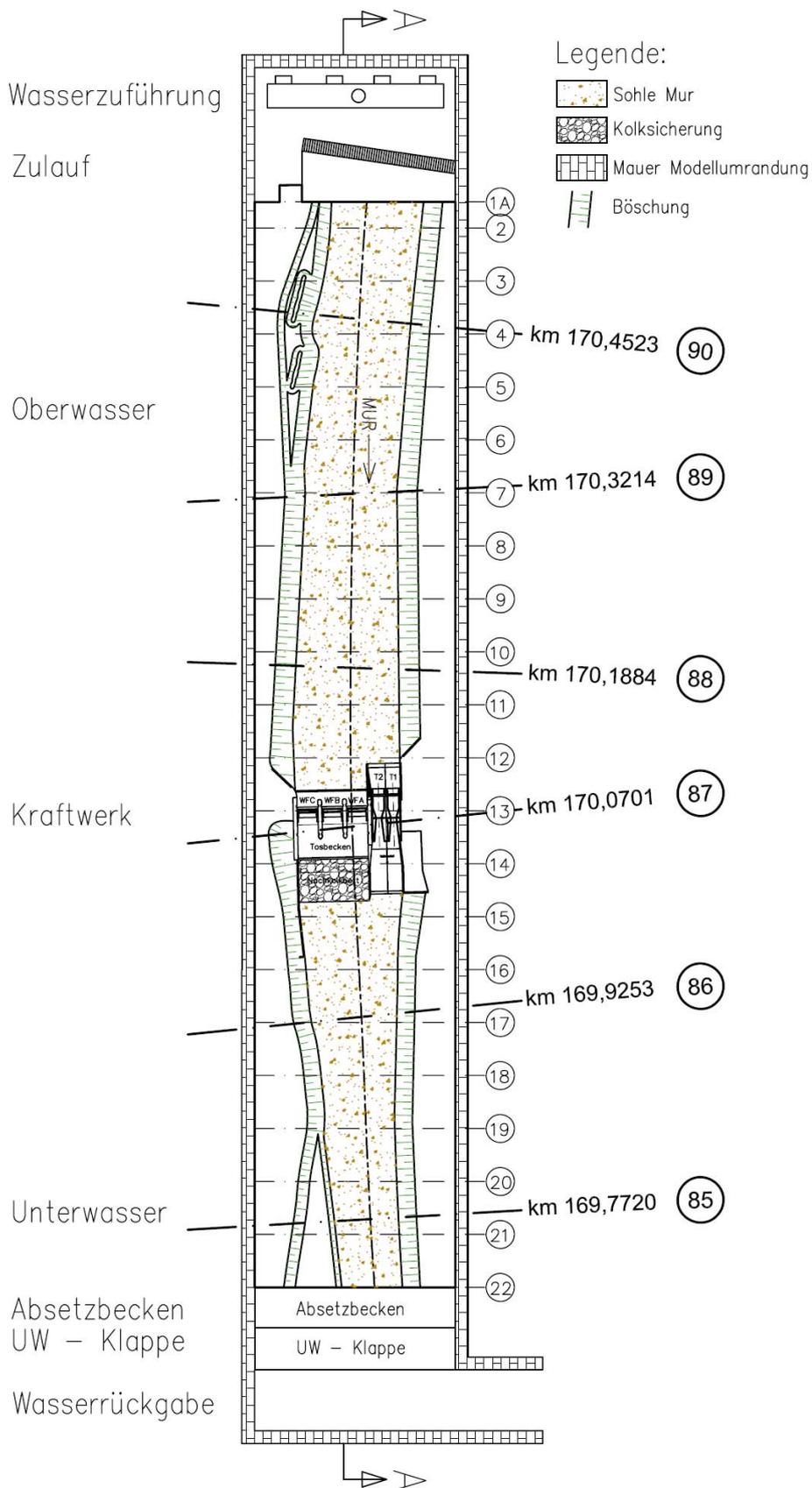


Abb. 3.1: Grundriss gesamter Modellstand Kraftwerk Gössendorf

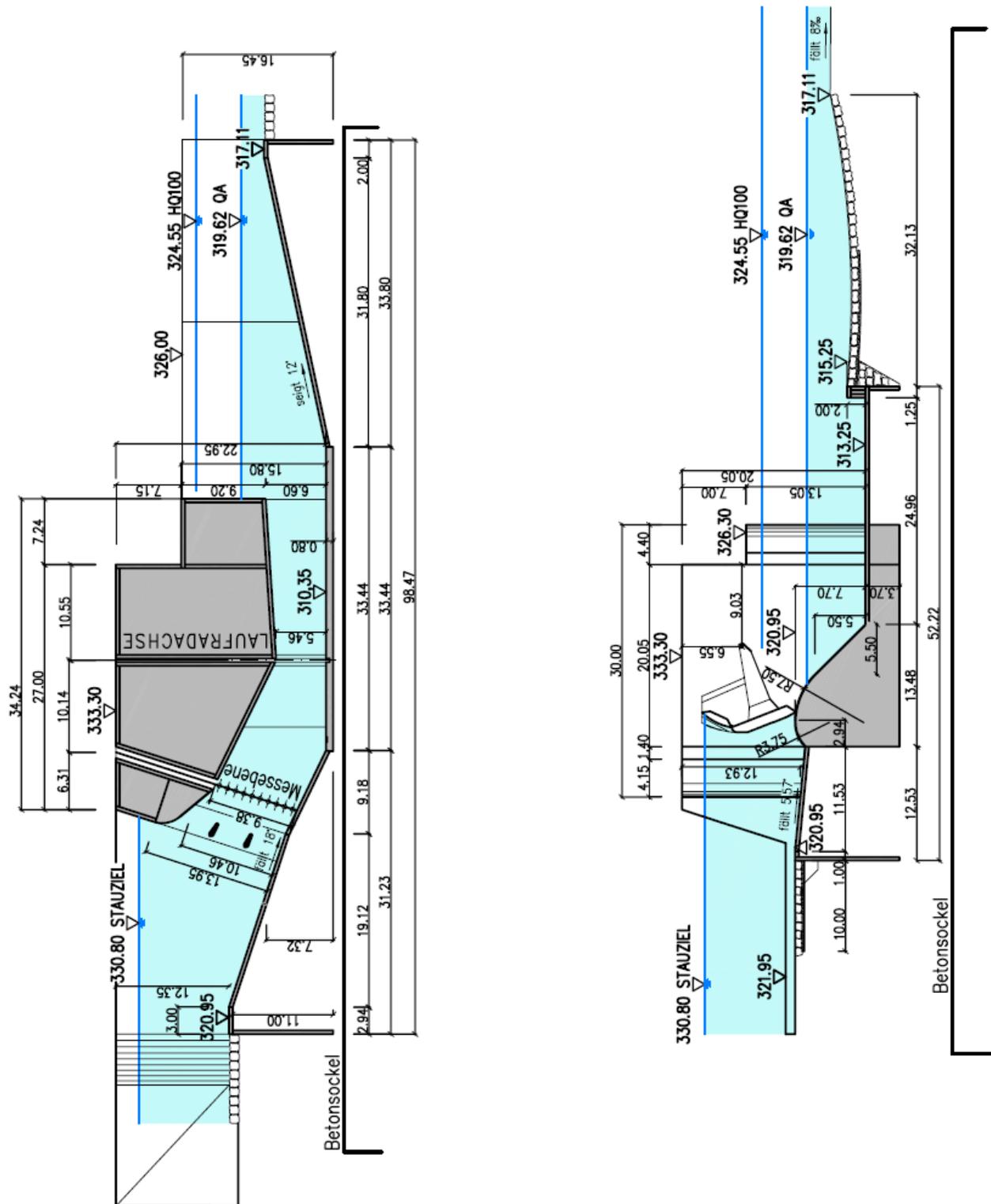


Abb. 3.3: Schnitt Modell Krafthaus und Wehranlage (m Natur)



Abb. 3.4: Ausgangssituation vor Versuchsdurchführung mit Ansicht OW.



Abb. 3.5: Ausgangssituation vor Versuchsdurchführung mit Ansicht UW

3.2.5 Geschiebe

Auf Grund der aus den Versuchen für die Baumleitung Gössendorf gewonnenen Erfahrungen wurde für die Hauptversuche des Vollmodells KW Gössendorf ein größerer Modellsand verwendet (siehe Abb. 3.6 und Abb. 3.7).

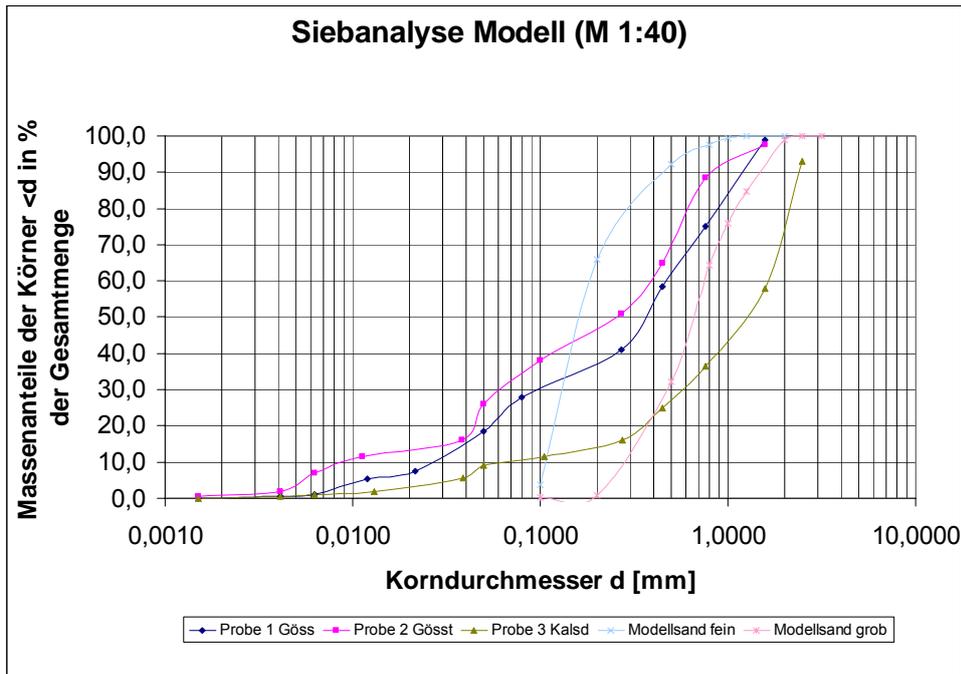


Abb. 3.6: Vergleich der verwendeten Sieblinien mit den umgerechneten Sieblinien im Modell

Bei der Verwendung des feineren Modellsandes kam es wie bei der Baumleitung zur Entstehung von „Riffeln und Dünen“, die eine quantitative Aussage bezüglich der Geschiebeführung im gesamten Bereich nicht zulassen (Abb. 3.8). Qualitativ zeigt sich jedoch, dass es bereits bei geringen Durchflüssen zu Geschiebetrieb kommt.

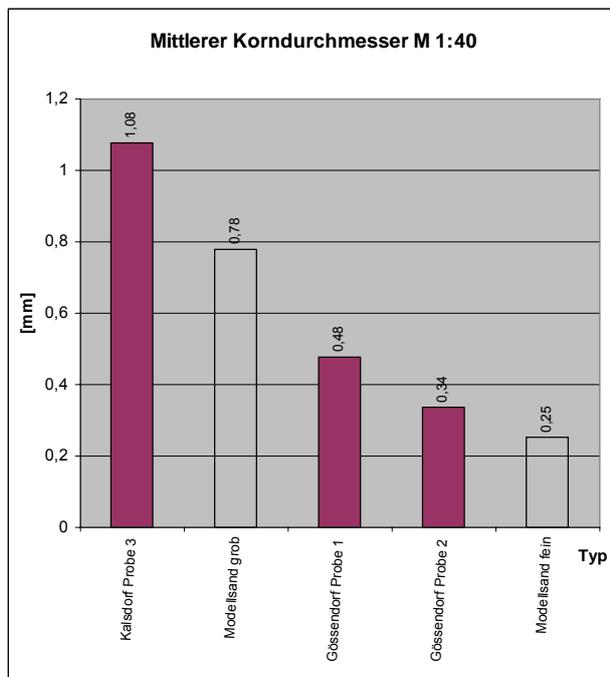


Abb. 3.7: Vergleich der mittleren Korndurchmesser der realen Geschiebeprobe und der Modellsand im M 1 : 40

Der Vergleich der mittleren Durchmesser zeigte, dass die beiden verwendeten Sieblinien den realen Sieblinienbereich recht gut erfassen. Bei der Verwendung des größeren Modellgeschiebes kam es im Modell zu keiner Dünen- bzw. Riffelbildung womit eine qualitative Aussage bezüglich der Geschiebeführung einwandfrei möglich war. Auf Grund der, zwar geringen, Differenz in den Sieblinien waren quantitative Aussagen noch möglich, bedürfen jedoch jeweils einer tiefer gehenden Analyse.



Abb. 3.8: Riffelbildung bei Verwendung des feinen Modellsandes

Die in den von der Stewag übergebenen Querprofilen angegebenen Böschungsteine wurden im Modell in etwa maßstäblich nachgebildet, wobei der vegetative Böschungsschutz mit der Sieblinie $\frac{1}{4}$ dargestellt wurde. Auf Grund des Aufbaues, feste Betonböschung mit lose aufgebrachtter Rauheitsschicht war jedoch eine exakte quantitative Aussage über die Wirksamkeit des Böschungsschutzes nicht möglich.

3.2.6 Hydrologische und hydraulische Grundlagen

Im Versuch wurden die Unterwasserhöhen nach der folgenden Pegelkurve eingestellt.

	Höhe [m.ü.A.]	Abfluss [m ³ /s]
HQ5000	325.41	1854
HQ1000	324.91	1629
HQ100	324	1300
HQ30	323.13	970
HQ5	322.18	700
HQ1	-	442
QA	319.45	200
MQ	318.67	108
NQ	317.78	28

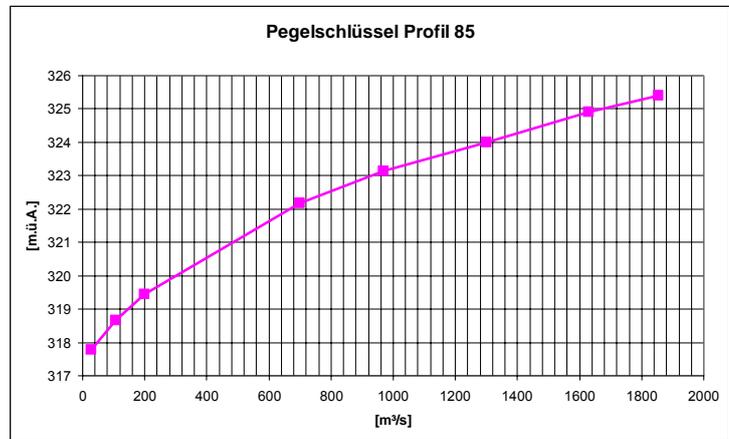


Abb. 3.9: Pegelschlüssel

Weiters wurden vom Auftraggeber auch Hochwasserwellen zur Verfügung gestellt, um möglichst extreme Hochwasserereignisse testen zu können.

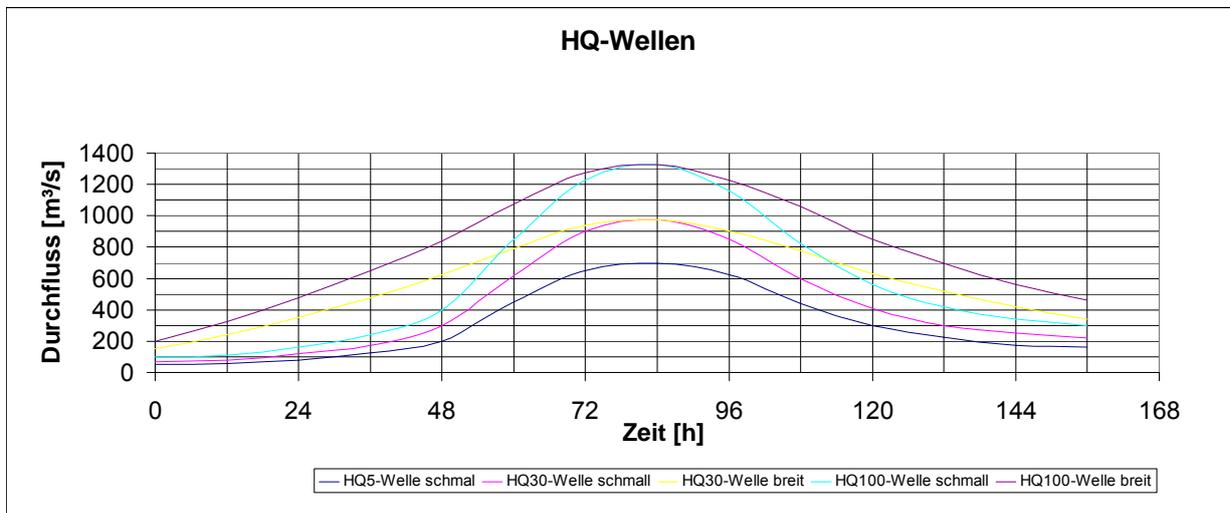


Abb. 3.10: Hochwasserwellen

3.2.7 Messtechnik

Das Modell wurde OW-seitig aus dem Wasserversorgungssystem des Labors mit eingebauten induktiv magnetischen Durchflussmesser (IDM) angespeist. Die Einstellung der Durchflüsse erfolgte mittels eines elektrisch betriebenen Schiebers entsprechend der Anzeige dieses IDM.

Die Messung der Wasserspiegel erfolgte durch eine Ultraschallsonde welche auf einen Messwagen montiert war. Die Gerinnesohle wurde mit ebenfalls 3 auf dem Messwagen montierten Lasersonden (siehe Abb. 3.11) in 10 cm Profilabstand aufgenommen. Mit dem computergesteuerten Messwagen konnte an jedem beliebigen Punkt des Modells eine Messung des WSP oder der Sohle durchgeführt werden. Die Signale der einzelnen Sonden wurden zu einem Messcomputer übertragen und gespeichert. Die einzelnen Versuche wurden zusätzlich durch zahlreiche Fotos und Videoaufnahmen dokumentiert.



Abb. 3.11: Messwagen mit Laser- und Ultraschallsonden

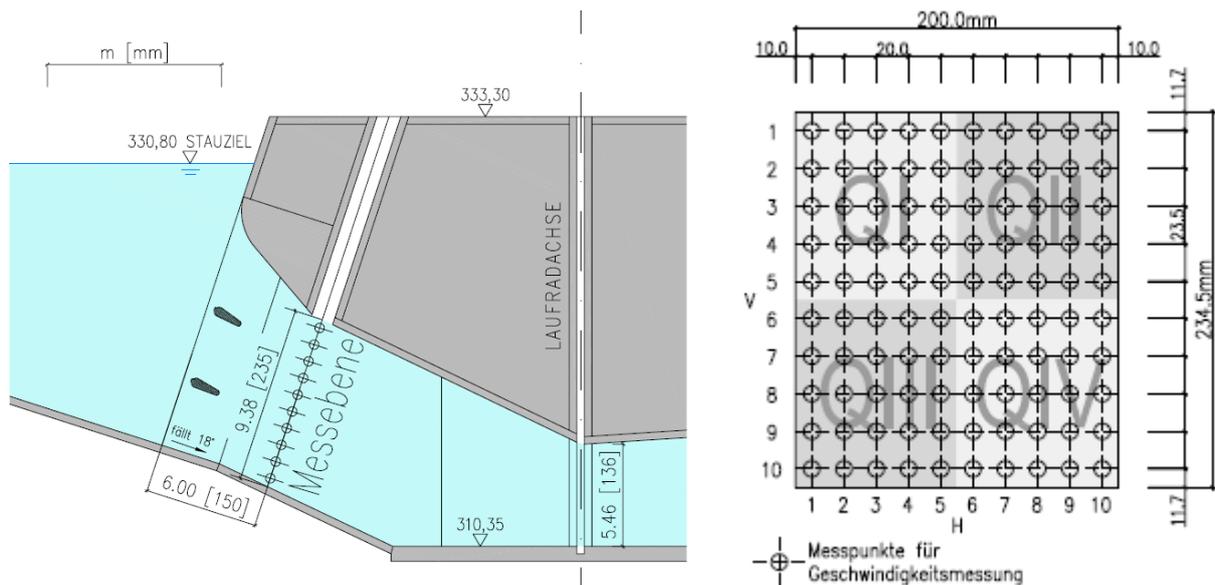


Abb. 3.12: Messebene und Messraster

Die Geschwindigkeiten am Turbinenzulauf wurden in der dargestellten Ebene und Messraster (10 x 10) mittels Geschwindigkeitsflügel (Mittel, Max und Min Werte) aufgenommen (siehe Abb. 3.13). Laut IEC-Norm wären mindestens 102 Messpunkte nötig gewesen (siehe Kap. 2.2.2.6), in diesem Fall genügen jedoch 100 Messpunkte da der Messflügel einen Teil der Messfläche überdeckt. Qualitativ wurde die Strömung mittels Wollfäden und Färbemittel untersucht und dokumentiert.



Abb. 3.13: Geschwindigkeitsmessflügel

3.2.8 Versuchsdurchführung

Generell wurde, für den jeweiligen Versuch, an der Pumpe der jeweils erforderliche Durchfluss eingestellt, wobei die Unterwassertiefe bei allen Versuchen mit Hilfe der Regelklappe am Rinnenende eingestellt wurde. Der Unterwasserspiegel konnte mit Hilfe einer am Modellprofil 21 (Murprofil 85) situierten Ultraschallmesssonde und einer visuellen UW Messstelle exakt auf die vom Auftraggeber vorgegebene Höhe eingestellt werden. Die Füllung des Modells erfolgte mittels einer separaten Füllleitung vom Unterwasser aus.

Durch Regulierung der Durchflüsse an den „Turbinen“ (siehe Laufradebene in Abb. 3.12) mittels der in Abb. 3.14 dargestellten Lochblende (Erhöhen bzw. Erniedrigen der Öffnungsweite) konnte das Stauziel eingestellt und gehalten werden.

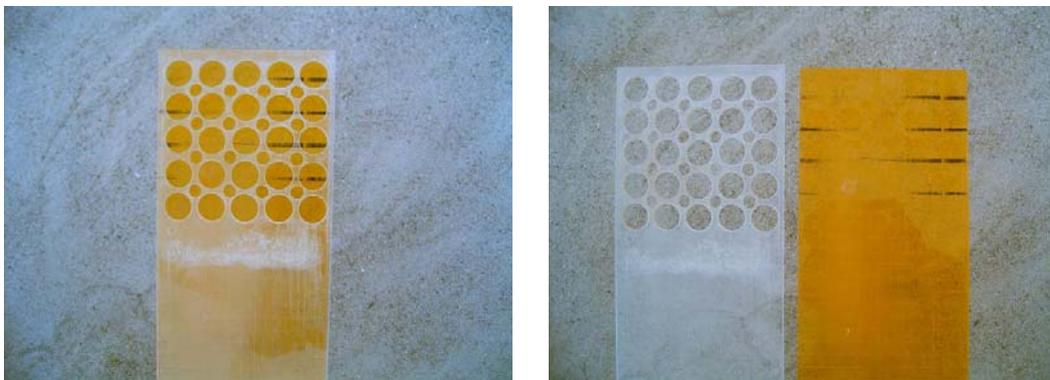


Abb. 3.14: Bild Lochraster/Schieber für Turbinendurchfluss

3.2.9 Versuchsprogramm

Zur Beantwortung der im Kap. 3 angeführten Fragen ergab sich folgendes Untersuchungsprogramm am Vollmodell:

Die Vorversuche begannen im April 2008 mit dem Zweck das hydraulische Verhalten der Anlage kennenzulernen und verschiedene bauliche Varianten wie z.B. Wehrpfeiler, KH-Trennpfeiler, Geschiebeschwelle, KH-Einlauf etc. auszutesten und hydraulisch zu optimieren.

Die Hauptversuche betrafen im Wesentlichen:

- die Messung der Turbineneinlaufgeschwindigkeiten bei Ein- und Zwei- Maschinenbetrieb
- die Bestimmung der hydraulischen Leistungsfähigkeit der gesamten Wehranlage (Bemessungsabfluss HQ_{100}) mit Wasserspiegelmessungen
- die Messung der Durchflusscharakteristiken der Wehrverschlüsse
- die Aufnahme der Sohlen nach Extremabflüssen (HQ_{100} - Welle abgebrochen)
- die Sohlaufnahme nach dem Durchgang einer HQ_{100} - Welle
- Entwicklung einer Spülstrategie zur effektiven Freispülung der Geschiebeeinlaufschwelle bzw. Sandfangs und auch zur Geschiebeabwehr im Krafthausauslaufbereich
- Spülversuche zur Bestimmung der Austragsrate und des Austragsverhaltens aus dem Sandfang bei einer angenommenen HQ_1 Welle

In der Diplomarbeit wird nur auf die Vollmodellversuche im Bezug auf die Krafthausoptimierung mit Schwerpunkt Krafthaustrennpfeiler eingegangen. Für die Ergebnisse aus den Vollmodellversuchen bezüglich Wehranlage, Kolk- und Böschungsschutz und Geschiebe wird auf KW (2008) verwiesen.

3.3 Vollmodellversuche Optimierung Krafthaus

In diesem Kapitel wird die Versuchsgeschichte hauptsächlich betreffend der rein hydraulischen Optimierung des Kraftwerks chronologisch abgearbeitet.

3.3.1 Urplanung ohne Rechenträger

Ausgehend von der Urplanung (siehe Abb. 3.2 und Abb. 3.15) wurde die Anströmung an die Turbinen 1+2 bei Q_A ohne Anbringung der Rechenträger untersucht.



Abb. 3.15: Turbineneinlauf und Wehrfelder Ansicht OW (links) und UW Ansicht (rechts)

Für die Versuche wurde der Durchfluss Q_A eingestellt und das Stauziel mittels Regelung der Lochblendenöffnung am Turbinenquerschnitt gehalten (Abb. 3.16).



Abb. 3.16: Stauhaltung für Messung der Turbinenanströmung

Zur qualitativen Beurteilung und zum Vergleich der Anströmung wurden einerseits die Ausrichtung bzw. Bewegung von Fäden in der Messebene dokumentiert (Abb. 3.17) bzw. in der Messebene an einem 10 x 10 Raster die Geschwindigkeit mittels eines Messflügels aufgenommen und als Isothachenfeld dargestellt (Abb. 3.20 und Abb. 3.21).



Abb. 3.17: Strömungsbedingungen Turbine 2 und 1 beim Urplanungszustand ohne Rechenträger (Fließrichtung von oben nach unten)

Die Turbine 1 wurde, bezogen auf die Stromfäden (Abb. 3.17), mehr oder weniger gleichmäßig angeströmt. Im oberen Drittel richteten sich die Stromfäden, in Fließrichtung betrachtet aus der Turbinenachsenrichtung geringfügig nach links aus. Es kam jedoch zu keinen Abweichungen innerhalb der Stromfäden. Im Gegensatz dazu zeigten die unteren beiden Ebenen ohne Abweichung in die Turbinenachsenrichtung. Diese ruhige Anströmung wird auch durch das gemessene Isothachenfeld (Abb. 3.20), der Auswertung und dem Vergleich mit den Grenzwerten nach Fisher und Franke verdeutlicht (Abb. 3.19).

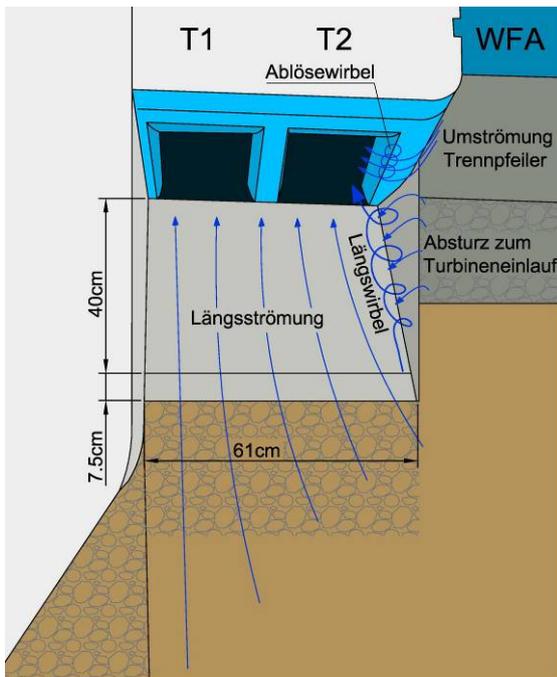


Abb. 3.18: Untersuchte Geometrie und die schematische Darstellung der aufeinandertreffenden Strömungen im Einlaufbereich bei der Urplanung

Bei der Turbine 2 zeigten die Stromfäden (Abb. 3.17) in den verschiedenen Ebenen unterschiedliches Verhalten, wobei auch innerhalb der Strömungsebene die Fließrichtungen von einander abweichen. Die äußeren Stromfäden, benachbart zur Turbine 1, lagen noch relativ ruhig und parallel, während die beiden inneren Stromfäden besonders im halbhohen Bereich recht gut die verwirbelte Anströmung auf die Turbine 2 im Bereich des Trennpfeilers beschrieben. Diese Strömungsverwirbelung resultierte aus der Überlagerung der Längswirbel, im Verschnitt von Vorboden und Trennwand, und der Strömung bzw. Ablösung um den Trennpfeiler. Eine zusätzliche Störströmung stellten die sich nach unten ziehenden Oberflächenwirbel oberhalb der Einlauffecken dar (Abb. 3.18).

Quantitativ sichtbar wurde die schlechte Anströmung auf die Messebene der Turbine 2 durch die Geschwindigkeitsmessung in der Messebene in Abb. 3.21. Die Turbine 2 wurde im Grenzbereich der Quadranten II (Q_{II}) und IV (Q_{IV} entspricht rechter oberer Bereich) schlecht angeströmt. Das Problem der „lufteinziehenden“ Oberflächenwirbel wirkte sich in der Messebene nicht mehr allzu stark aus. In der Geschwindigkeitsverteilung ergab sich ein „Loch“ mit geringen Fließgeschwindigkeiten. Teilweise zeigte sich die turbulente Anströmung nur durch niedrige Minimalwerte (z.B.: X8/Y3 wahrscheinlich durch Oberflächenwirbel). Im Quadrant IV, T2 wurde der Längswirbel nur durch höhere Fluktuationen (Min/Max- Werte) bemerkbar.

Die sogenannte „Quadrantenregel“ ($100\% - v_{quad}/V_m \leq \pm 10\%$) wurde eingehalten, wobei jedoch die Grenzbedingung nach Fischer und Franke bis zu einer Fläche von etwa 30 % nicht eingehalten werden konnte (Abb. 3.19).

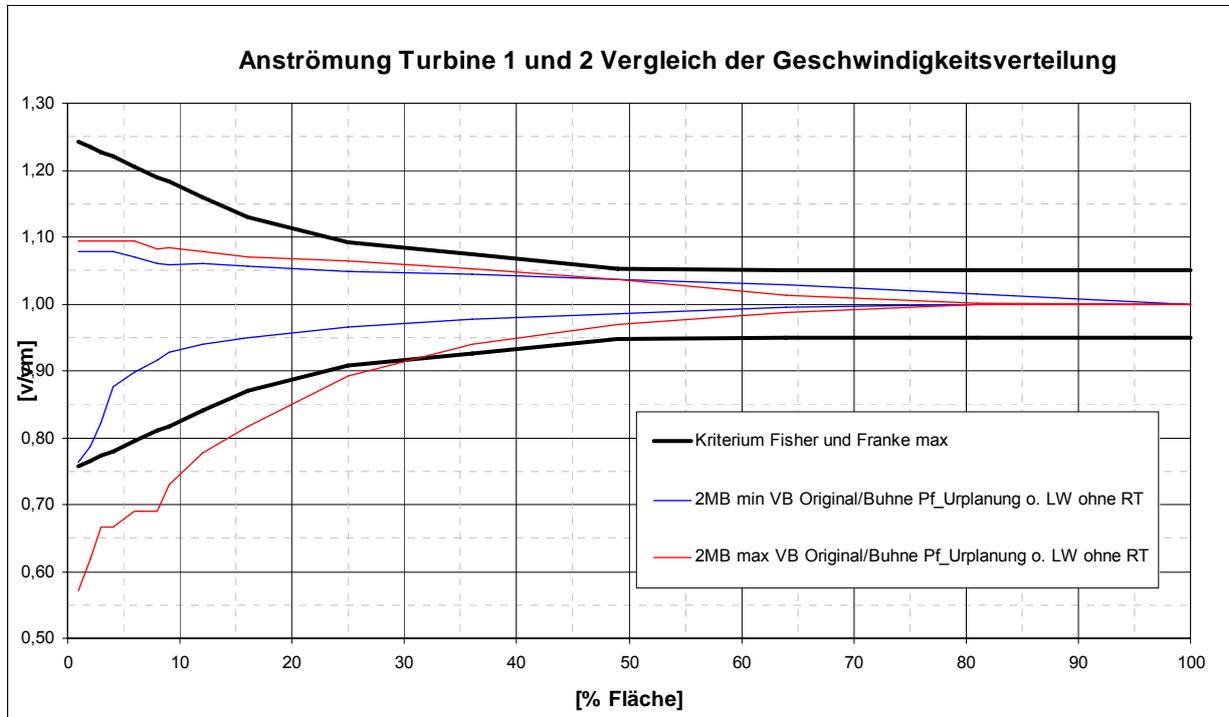
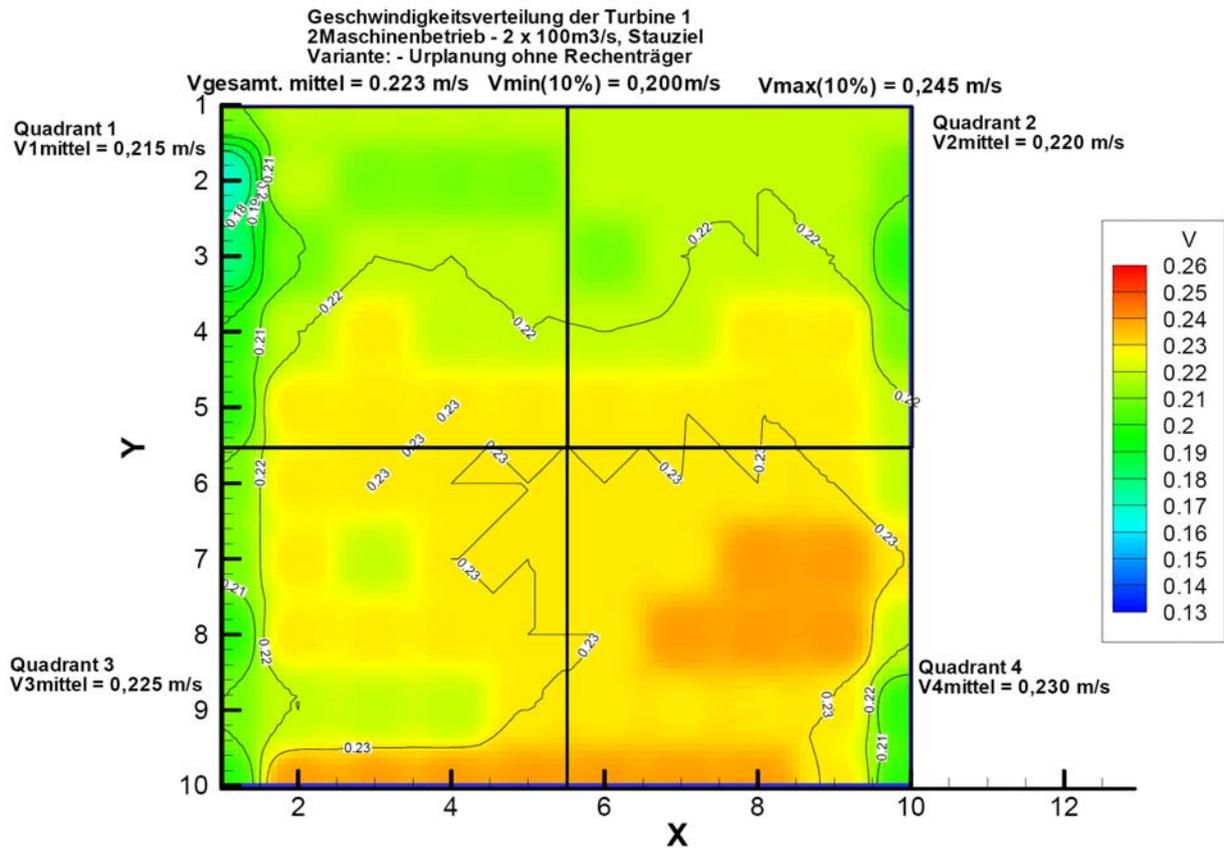


Abb. 3.19: Auswertung und Vergleich der Geschwindigkeitsfelder mit den Grenzwerten nach Fischer und Franke für die Variante „Urplanung ohne Rechenträger“ vom 18.04.2008

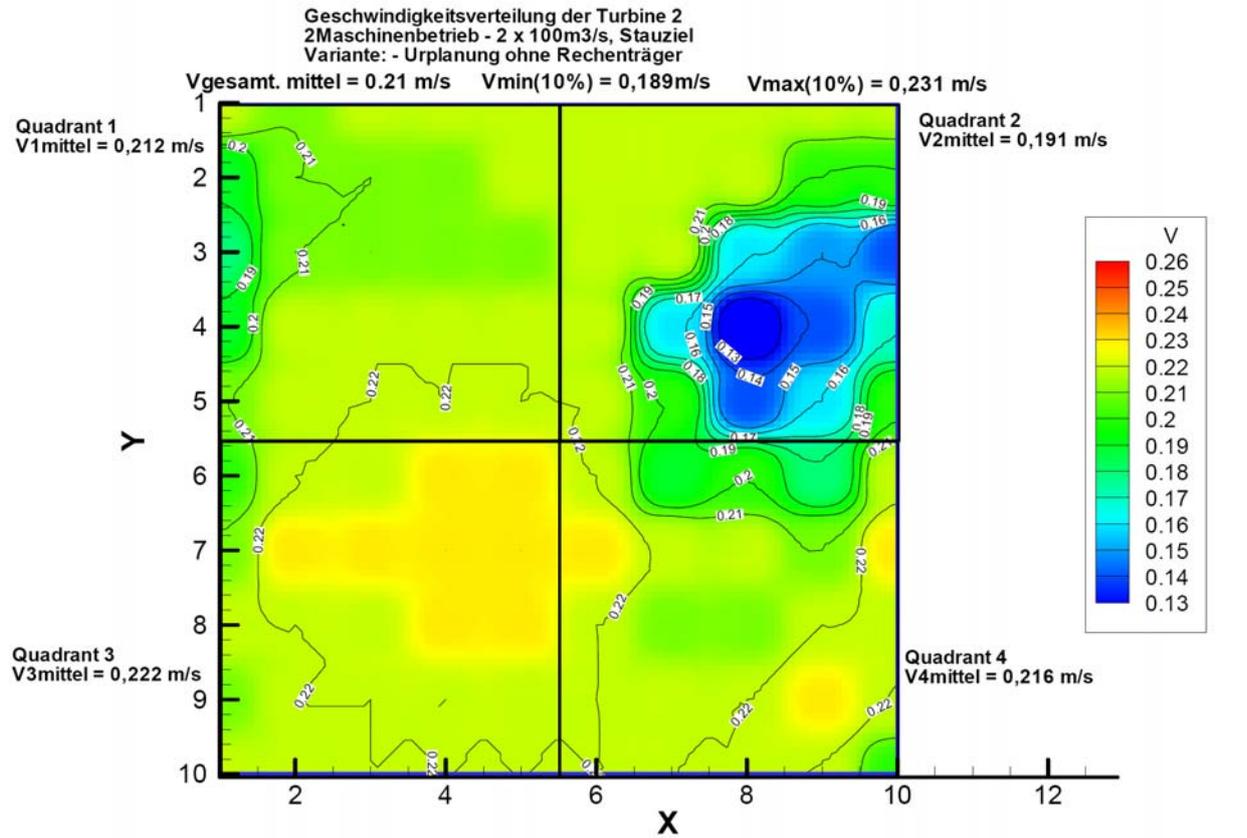


Geschwindigkeitsverteilung der Turbine 1 (2 Maschinenbetrieb - 2 x 100m³/s), Stauziel
 Variante: - Urplanung mit Buhne ohne Rechenträger
 Gemessene Modellwerte

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,210 0,190 0,220	0,220 0,200 0,230	0,220 0,200 0,230	0,220 0,220 0,230	0,220 0,220 0,230	0,220 0,220 0,240	0,220 0,220 0,240	0,220 0,220 0,230	0,220 0,200 0,230	0,220 0,220 0,230
2	0,170 0,160 0,200	0,220 0,200 0,230	0,210 0,200 0,230	0,210 0,190 0,230	0,210 0,200 0,230	0,220 0,200 0,230	0,220 0,220 0,230	0,220 0,200 0,230	0,220 0,220 0,230	0,210 0,190 0,220
3	0,180 0,150 0,220	0,210 0,190 0,230	0,220 0,220 0,230	0,220 0,200 0,230	0,220 0,220 0,230	0,210 0,200 0,230	0,220 0,220 0,230	0,220 0,200 0,230	0,220 0,220 0,230	0,200 0,190 0,220
4	0,200 0,160 0,220	0,220 0,220 0,240	0,230 0,220 0,240	0,220 0,220 0,240	0,220 0,220 0,240	0,220 0,200 0,240	0,220 0,220 0,240	0,230 0,220 0,240	0,230 0,220 0,240	0,210 0,200 0,230
5	0,200 0,170 0,230	0,230 0,220 0,240	0,230 0,220 0,240	0,230 0,230 0,240	0,230 0,220 0,240	0,230 0,230 0,240	0,230 0,220 0,240	0,230 0,230 0,240	0,230 0,230 0,240	0,220 0,200 0,240
6	0,210 0,190 0,230	0,230 0,220 0,240	0,230 0,230 0,240	0,220 0,200 0,240						
7	0,210 0,190 0,230	0,230 0,230 0,260	0,220 0,220 0,240	0,230 0,220 0,240	0,230 0,220 0,240	0,230 0,220 0,240	0,230 0,220 0,240	0,240 0,240 0,260	0,240 0,240 0,260	0,230 0,220 0,240
8	0,200 0,170 0,230	0,230 0,230 0,260	0,230 0,230 0,240	0,230 0,220 0,240	0,230 0,230 0,260	0,230 0,230 0,260	0,240 0,230 0,260	0,240 0,240 0,260	0,240 0,240 0,260	0,220 0,220 0,240
9	0,210 0,190 0,230	0,220 0,220 0,240	0,220 0,220 0,240	0,220 0,220 0,240	0,230 0,220 0,240	0,230 0,230 0,240	0,230 0,230 0,240	0,230 0,230 0,240	0,230 0,230 0,240	0,200 0,190 0,230
10	0,200 0,160 0,230	0,240 0,230 0,260	0,240 0,230 0,260	0,240 0,230 0,260	0,240 0,230 0,260	0,240 0,240 0,260	0,240 0,230 0,260	0,240 0,230 0,260	0,230 0,230 0,260	0,200 0,190 0,220

Quadrant 1 V1mittel 0,215	<table border="1" style="margin: auto;"> <tr><th colspan="2">Mittelwert</th></tr> <tr><td>Min. Wert</td><td>Max. Wert</td></tr> </table>	Mittelwert		Min. Wert	Max. Wert	Quadrant 2 V2mittel 0,220
Mittelwert						
Min. Wert	Max. Wert					
Quadrant 3 V3mittel 0,225		Quadrant 4 V4mittel 0,230				
Vgesamt, mittel 0,223		Vmin(10%) 0,200 Vmax(10%) 0,24486				

Abb. 3.20: Geschwindigkeitsverteilung Turbine 1 beim Urplanungszustand ohne Rechenträger



Geschwindigkeitsverteilung der Turbine 2 (2 Maschinenbetrieb - 2 x 100m³/s), Stauziel
 Variante: - Urplanung ohne Rechenträger
 Gemessene Modellwerte

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
1	0,220 0,200 0,240	0,210 0,200 0,230	0,220 0,220 0,230	0,220 0,200 0,230	0,220 0,220 0,230	0,220 0,220 0,240	0,220 0,220 0,230	0,220 0,220 0,230	0,220 0,200 0,240	0,220 0,200 0,230	0,220 0,220 0,230	I
2	0,190 0,190 0,220	0,210 0,190 0,230	0,210 0,200 0,230	0,210 0,200 0,230	0,220 0,220 0,240	0,220 0,220 0,230	0,220 0,220 0,230	0,220 0,170 0,230	0,220 0,170 0,230	0,200 0,190 0,220	0,200 0,160 0,200	II
3	0,180 0,160 0,200	0,210 0,190 0,230	0,210 0,200 0,230	0,210 0,200 0,230	0,210 0,190 0,230	0,220 0,200 0,230	0,220 0,170 0,230	0,160 0,120 0,220	0,150 0,110 0,170	0,140 0,120 0,170	0,140 0,120 0,200	III
4	0,190 0,170 0,230	0,220 0,200 0,230	0,220 0,200 0,230	0,220 0,200 0,230	0,220 0,200 0,240	0,220 0,190 0,240	0,160 0,120 0,230	0,120 0,090 0,170	0,140 0,110 0,190	0,170 0,120 0,200	0,170 0,120 0,200	IV
5	0,210 0,200 0,230	0,220 0,200 0,230	0,220 0,220 0,240	0,220 0,200 0,240	0,220 0,220 0,240	0,220 0,200 0,240	0,200 0,150 0,230	0,200 0,090 0,220	0,160 0,130 0,220	0,200 0,130 0,240	0,200 0,130 0,240	
6	0,200 0,170 0,230	0,220 0,220 0,240	0,220 0,220 0,240	0,230 0,220 0,240	0,230 0,220 0,240	0,220 0,200 0,240	0,190 0,120 0,230	0,200 0,150 0,230	0,180 0,150 0,240	0,220 0,190 0,260	0,220 0,190 0,260	
7	0,210 0,190 0,230	0,230 0,220 0,240	0,230 0,220 0,240	0,230 0,230 0,240	0,230 0,230 0,240	0,230 0,220 0,240	0,220 0,210 0,240	0,220 0,150 0,240	0,210 0,190 0,240	0,230 0,220 0,240	0,230 0,220 0,240	
8	0,220 0,220 0,230	0,220 0,220 0,230	0,220 0,220 0,240	0,230 0,220 0,240	0,230 0,220 0,240	0,220 0,220 0,240	0,210 0,200 0,230	0,210 0,200 0,240	0,220 0,200 0,240	0,220 0,200 0,240	0,220 0,190 0,240	
9	0,210 0,200 0,230	0,220 0,200 0,230	0,220 0,220 0,230	0,220 0,220 0,240	0,220 0,220 0,240	0,220 0,220 0,240	0,220 0,200 0,230	0,220 0,220 0,240	0,230 0,220 0,240	0,220 0,220 0,240	0,220 0,220 0,240	
10	0,220 0,220 0,230	0,220 0,200 0,230	0,220 0,200 0,230	0,220 0,220 0,240	0,220 0,220 0,230	0,220 0,200 0,240	0,220 0,220 0,240	0,220 0,200 0,230	0,220 0,220 0,240	0,200 0,190 0,220	0,200 0,190 0,220	

Quadrant 1 V1mittel	0,212	<table border="1" style="margin: auto;"> <tr><th colspan="2">Mittelwert</th></tr> <tr><td>Min. Wert</td><td>Max. Wert</td></tr> </table>	Mittelwert		Min. Wert	Max. Wert	Quadrant 2 V2mittel	0,1912
Mittelwert								
Min. Wert	Max. Wert							
Quadrant 3 V3mittel	0,222		Quadrant 4 V4mittel	0,2156				
Vgesamt, mittel	0,21		Vmin(10%)	0,18918				
			Vmax(10%)	0,23122				

Abb. 3.21: Geschwindigkeitsverteilung Turbine 2 beim Urplanungszustand ohne Rechenträger

3.3.2 Langer Trennpfeiler ohne Rechenträger und Vorboden Typ 1a

Um die Hochwasserabfuhr im WF A mittels eines ins Oberwasser verlängerten Trennpfeilers zu verbessern wurden einige Vorversuche durchgeführt. Es kam dabei zumindest zu einer Verlagerung der Geschwindigkeitsproblematik. Die Idee zur Verlängerung der Pfeilerform wurde weiterverfolgt und ein neuer, längerer Pfeiler eingebaut (Abb. 3.22 und Abb. 3.46).



Abb. 3.22: Neue Geschiebeschwelle und längerer Trennpfeiler

Im Gegensatz zu den Vorversuchen mit dünnen Platten kam es bei der Variante mit einem langen Trennpfeiler zu einer großen Drallbewegung und optisch zu einer Verschlechterung der Anströmung. Es kam zu einer Rückströmung an der Pfeilerinnen-seite.

3.3.3 Urtrennpfeiler mit Nasen ohne Rechenträger Vorboden Typ 1a

Die Idee mit dem langen Pfeiler wurde daraufhin verworfen und Experimente mit halbkreisförmigen Nasen durchgeführt. Diese wurde jeweils an der Innen- bzw. Außenkante (Typ1, Typ2) des ursprünglich geplanten Pfeilers angebracht (Abb. 3.23, Abb. 3.24 und Abb. 3.26). Stichproben mit dem Geschwindigkeitsmessflügel zeigten, dass sich die schlechten v-Werte der Turbine 2 sich etwas zum Rand des Einlaufs verschieben.

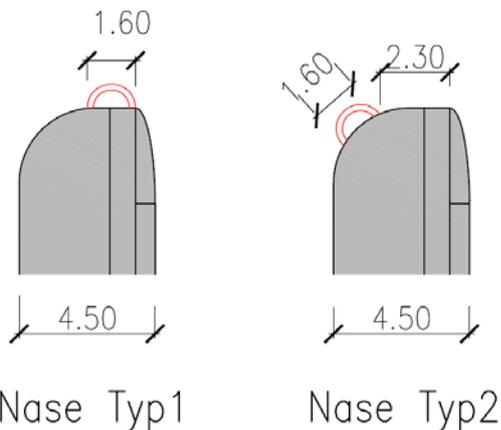


Abb. 3.23: Pfeilergeometrie Nasen

Durch die Varianten mit den „Nasen“ konnte die Geschwindigkeitsverteilung der Variante „ohne Rechenträger“ geringfügig verbessert werden, wobei der Quadrant II weiters eine Schwachstelle blieb.

Die Begründung ist, dass sich durch die Verlängerung des Stromweges die Ablösewirbel bei der Turbine 2 an den Rand drängen ließen. Es wurde jedoch keine vollständige Messung durchgeführt, da die Auswertungen der Stromfäden keine deutliche Verbesserung in Bezug auf die Längs- bzw. Absturzwirbel gegenüber der Vorgängervariante zeigten.



Abb. 3.24: Nase an der Innenkante des ursprünglichen Pfeilers (Typ1)

Turbine 2 gegen Fließrichtung

Turbine 2 nach Rechenebene



oben



mitte



unten

Abb. 3.25: Strömungsbedingungen Turbine 2 bei Nase Typ 1



Abb. 3.26: Nase an der Außenkante des ursprünglichen Pfeilers (Typ2)

Turbine 2 gegen Fließrichtung

Turbine 2 nach Rechenebene

		<p>oben</p>	
		<p>mitte</p>	
		<p>unten</p>	

Abb. 3.27: Strömungsbedingungen Turbine 2 bei Nase Typ 2

3.3.4 Urtrennpfeiler mit Rechenträger Vorboden Typ 1a

Am 23.04 erfolgte der Einbau der Rechenträger laut Planung, unter Beibehaltung der Geschiebeschwelle (Typ1a) aus den vorhergehenden Versuchen (Abb. 3.28 und Abb. 3.29).

Zur Überprüfung ob die Rechenträger einen quantitativen Einfluss auf die Turbinen-anströmung haben, wurde eine vollständige Geschwindigkeitsmessung der Turbinen 1 und 2 vorgenommen um die bisherigen Erkenntnisse zu verdichten und um eine neue Ausgangssituation für zukünftige Verbesserungen zu erhalten.

Mit dem Einbau der Rechenträger wurde die Situation bei der Turbine 2 Quadrant II und IV jedoch im Gegensatz zu den vorhergehenden Varianten wieder verschlechtert, was auch durch die Wiederholung der Varianten mit der „Nase“ nicht verbessert werden konnte.

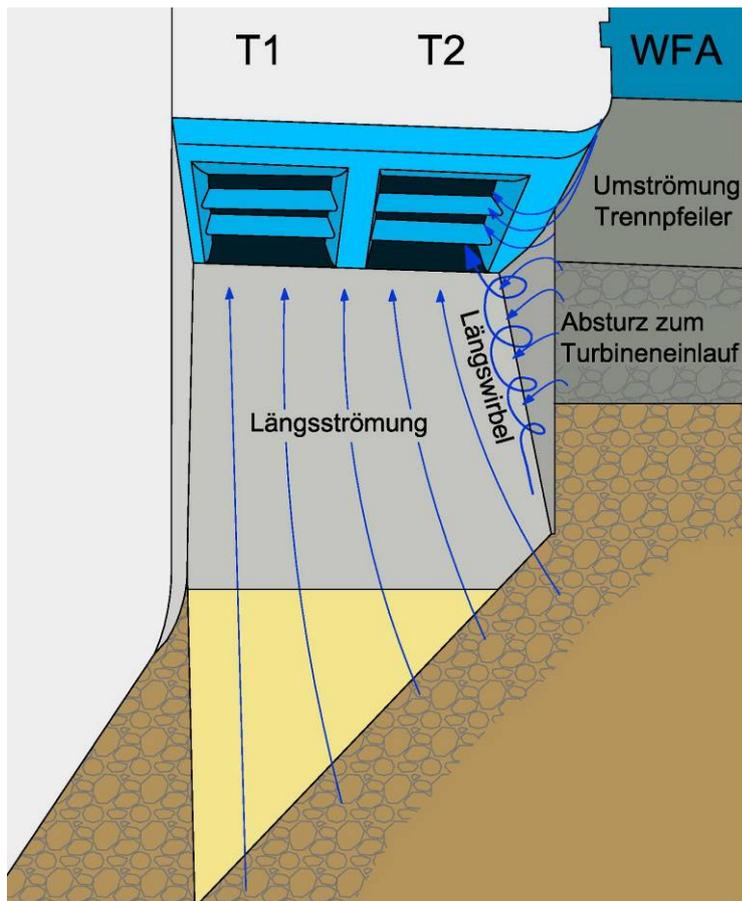


Abb. 3.28: Geometrische Situation und schematische Darstellung der aufeinandertreffenden Strömungen im Einlaufbereich



Abb. 3.29: Turbineneinlauf mit eingebauten Rechenträgern

Der Einfluss der Rechenträger zeigte sich ab der Messebene Y9 in Richtung Einlaufoberkante (Abb. 3.31). Die Verschlechterung gegenüber der Variante „ohne“ Rechenträger betrifft jedoch nur den Quadrant IV und nicht den Quadrant III. Es wird vermutet, dass die oben beschriebene Strömungssituation (siehe auch Abb. 3.28) längs der Schnittlinie Trennwand/Vorboden), durch den unteren Rechenträger gestört wird, die sich sonst im Turbinenvorhof wieder vergleichmäßigen würden.

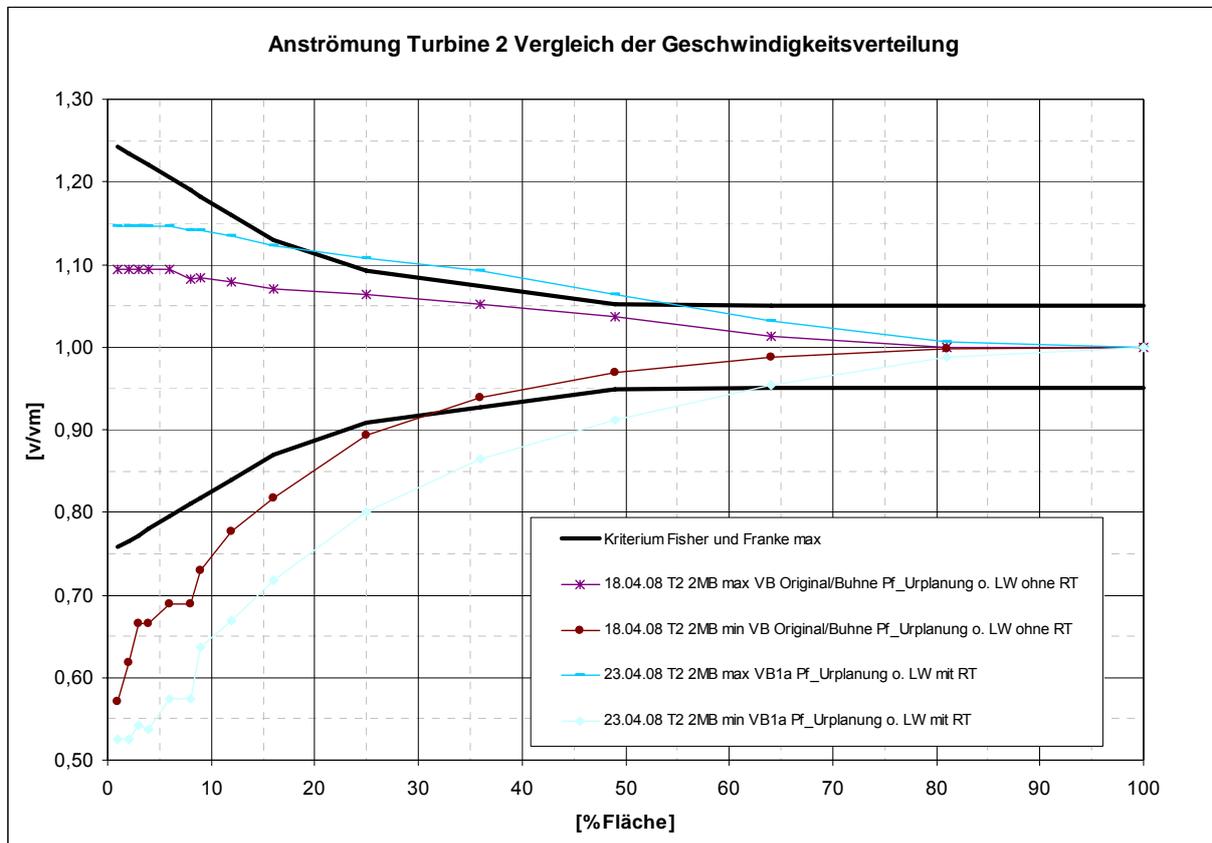


Abb. 3.30: Vergleich der Geschwindigkeitsverteilung Turbine 2 mit und ohne Rechenträger

Es zeigte sich, dass in diesem Bereich die Maxima der v -Werte wie bei der Variante ohne Rechenträger gleich bleiben, aber die Minima sich verringern. Deutlich wird die Verschlechterung der Turbine 2 im Vergleich mit den Grenzwerten nach Fischer und Franke Abb. 3.30.

Zur Lösung des Problems könnte man einerseits die Rechenträger entfernen, was sich aus statisch-konstruktiver Sicht schwer realisieren lässt, andererseits ist in jedem Fall eine neue konstruktive Variante zu suchen, da bereits das qualitative Anströmungsbild schlecht ist.

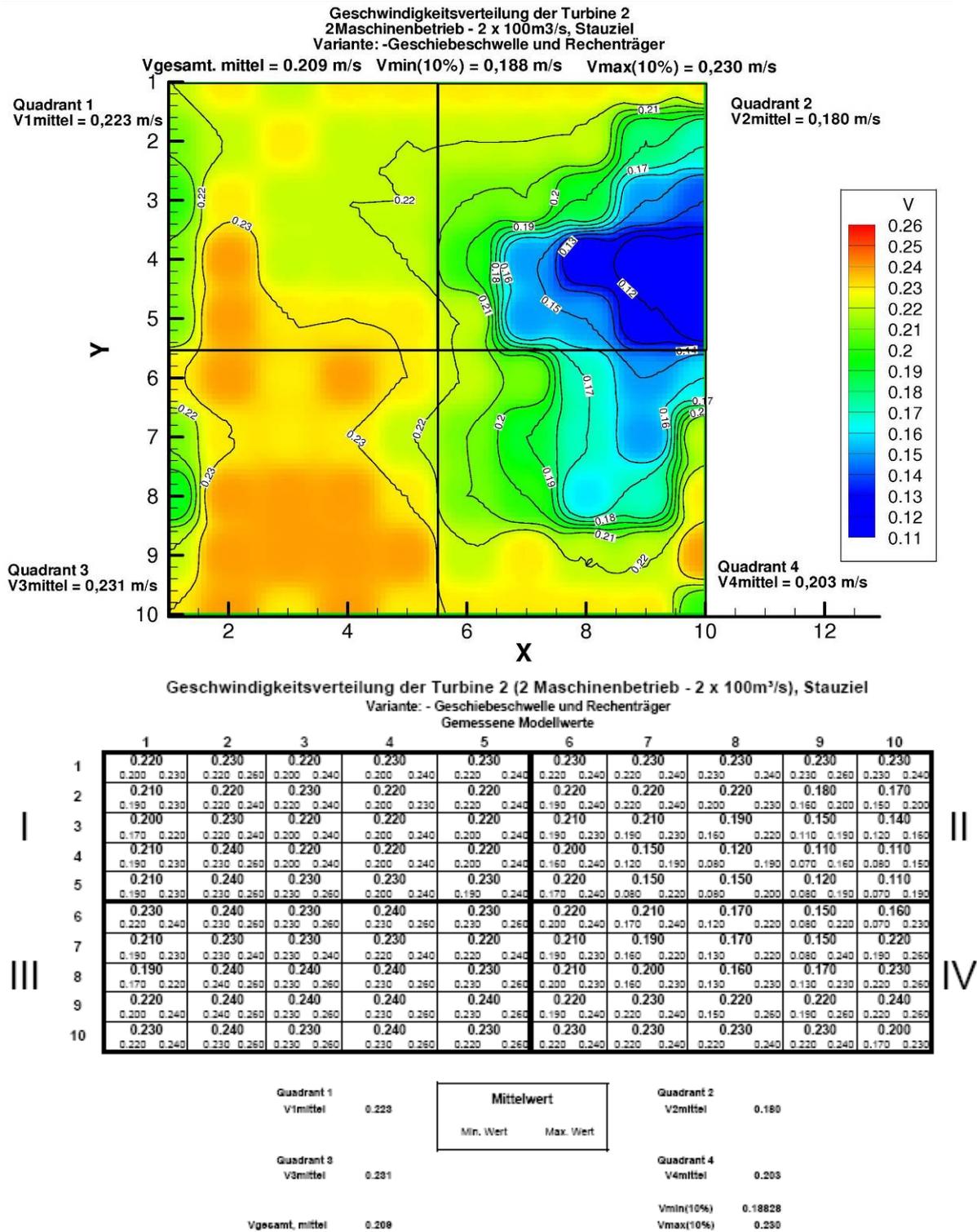
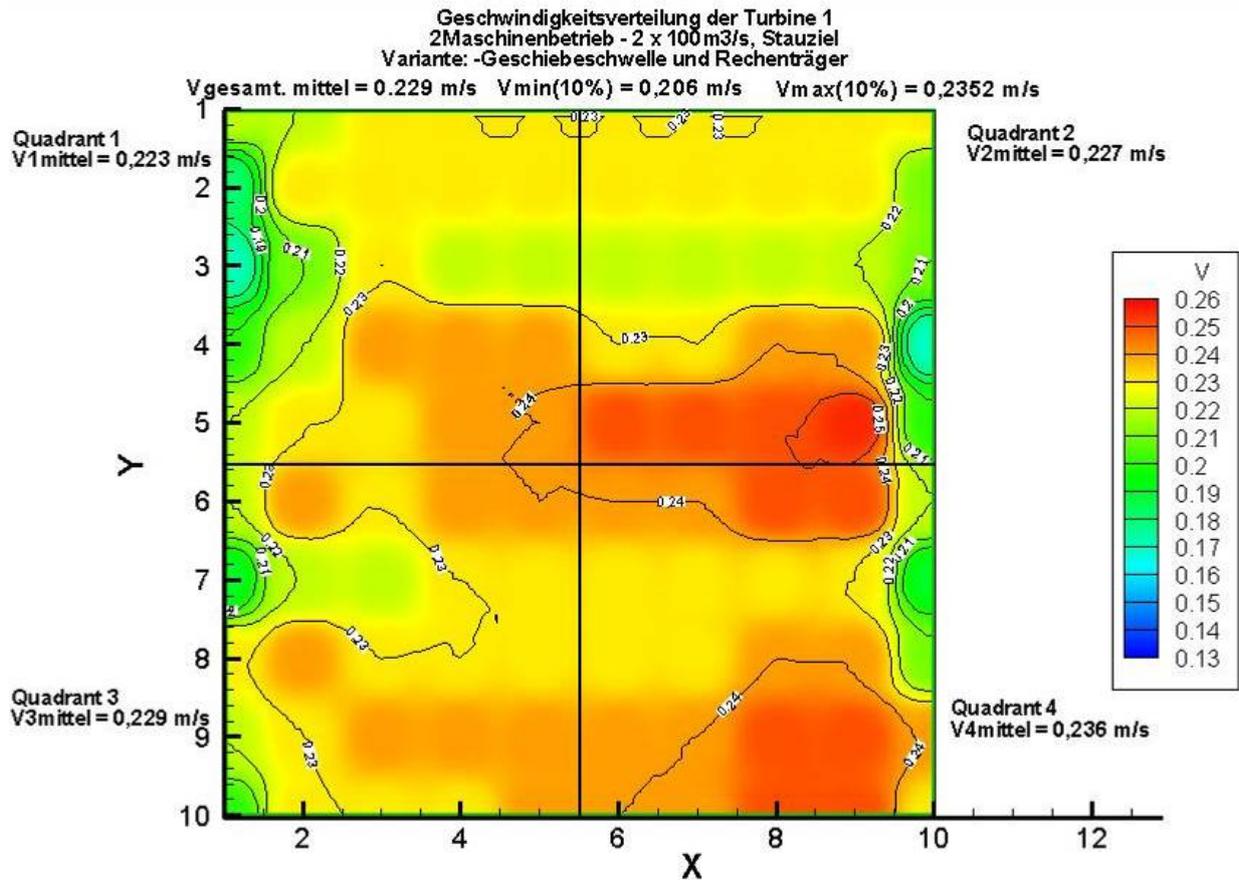


Abb. 3.31: Geschwindigkeitsverteilung Turbine 2 mit Geschiebeschwelle und Rechenträger

Im Gegensatz zu Turbine 2 sieht die Geschwindigkeitsverteilung an der Turbine 1 recht gut aus (Abb. 3.33)



Geschwindigkeitsverteilung der Turbine 1 (2 Maschinenbetrieb - 2 x 100m³/s), Stauziel
 Variante: - Geschiebeschwelle und Rechenräger
 Gemessene Modellwerte

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	0.220 0.220 0.230	0.220 0.220 0.240	0.230 0.220 0.240	0.230 0.230 0.240	0.230 0.230 0.240	0.230 0.220 0.240	0.230 0.230 0.260	0.230 0.220 0.240	0.230 0.220 0.240	0.230 0.220 0.240	
2	0.180 0.160 0.200	0.230 0.220 0.240	0.230 0.220 0.240	0.230 0.220 0.240	0.230 0.220 0.240	0.230 0.230 0.240	0.230 0.230 0.240	0.230 0.220 0.240	0.230 0.220 0.240	0.210 0.190 0.230	
3	0.170 0.150 0.200	0.210 0.170 0.240	0.230 0.220 0.240	0.220 0.220 0.230	0.220 0.220 0.240	0.220 0.220 0.240	0.220 0.220 0.240	0.220 0.220 0.230	0.220 0.220 0.240	0.210 0.200 0.230	II
4	0.200 0.170 0.230	0.220 0.200 0.240	0.240 0.230 0.260	0.240 0.240 0.260	0.240 0.230 0.260	0.230 0.230 0.260	0.230 0.230 0.260	0.240 0.230 0.260	0.240 0.230 0.260	0.170 0.160 0.190	
5	0.220 0.220 0.240	0.230 0.220 0.240	0.230 0.220 0.260	0.240 0.230 0.260	0.240 0.230 0.260	0.250 0.230 0.260	0.250 0.240 0.260	0.250 0.240 0.270	0.255 0.240 0.260	0.200 0.190 0.230	
6	0.220 0.200 0.230	0.240 0.230 0.260	0.230 0.220 0.240	0.240 0.240 0.260	0.240 0.230 0.260	0.240 0.240 0.260	0.240 0.230 0.260	0.250 0.240 0.260	0.250 0.240 0.260	0.220 0.220 0.240	
7	0.190 0.190 0.220	0.220 0.220 0.240	0.220 0.220 0.240	0.230 0.220 0.240	0.230 0.220 0.240	0.230 0.220 0.240	0.230 0.230 0.240	0.230 0.230 0.260	0.230 0.220 0.240	0.190 0.170 0.220	III
8	0.230 0.230 0.260	0.240 0.230 0.260	0.230 0.230 0.260	0.240 0.230 0.260	0.240 0.240 0.260	0.210 0.190 0.240	IV				
9	0.220 0.200 0.240	0.230 0.230 0.240	0.240 0.230 0.260	0.240 0.240 0.260	0.240 0.240 0.260	0.240 0.240 0.260	0.240 0.240 0.260	0.250 0.240 0.260	0.250 0.240 0.260	0.240 0.230 0.260	
10	0.200 0.170 0.230	0.230 0.230 0.240	0.230 0.230 0.230	0.230 0.230 0.240	0.240 0.230 0.260	0.240 0.240 0.260	0.240 0.240 0.260	0.250 0.240 0.260	0.250 0.240 0.260	0.230 0.220 0.240	

Quadrant 1 V1mittel	0,223					Quadrant 2 V2mittel	0,2274
		Mittelwert					
		Min. Wert	Max. Wert				
Quadrant 3 V3mittel	0,229					Quadrant 4 V4mittel	0,2368
Vgesamt, mittel	0,22876					Vmin(10%)	0,206876
						Vmax(10%)	0,261826

Abb. 3.32: Geschwindigkeitsverteilung Turbine 1 beim Urplanungszustand mit Geschiebeschwelle und Rechenräger

Der Einfluss der Rechenräger wurde nur durch die Geschwindigkeitsminima in den Randbereichen sichtbar, an denen man recht gut die Position der Rechenräger feststellen kann.

Durch die Auswertung der Geschwindigkeitsverteilung und deren Darstellung in (Abb. 3.33) wurde sichtbar, dass sich die Anströmung auf die Turbine 1 durch den Einbau der Rechenräger quantitativ nicht merklich ändert.

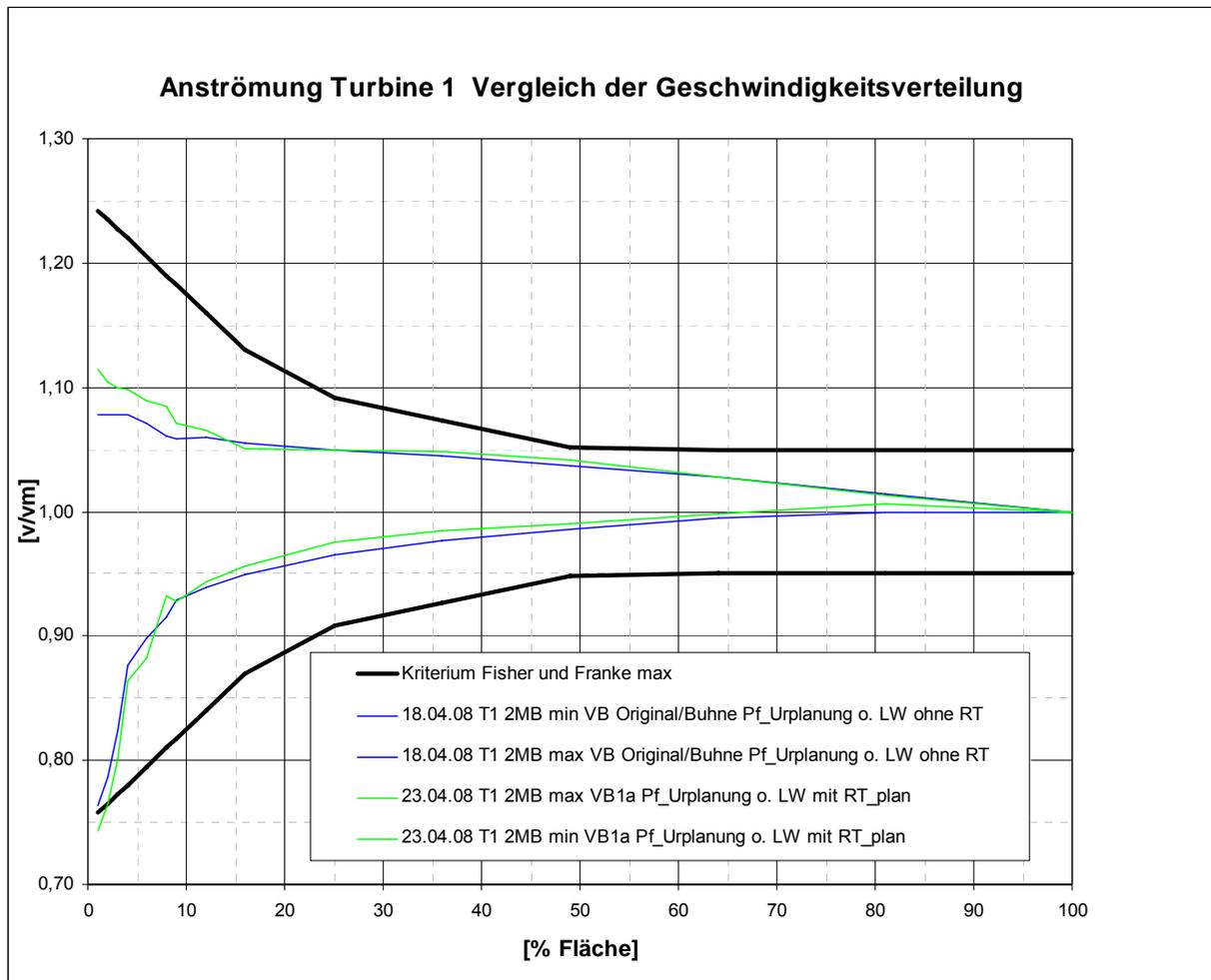


Abb. 3.33: Vergleich der Geschwindigkeitsverteilung Turbine 1 mit und ohne Rechenräger

Da sich bei der Turbine 1 bei den bisher durchgeführten Untersuchungsvarianten qualitativ und quantitativ keine Änderungen ergeben haben wurde in den weiteren Versuchen ein größeres Augenmerk auf die Turbine 2 gelegt.

3.3.5 Urplanung mit Rechenträger und Nasen, gebaute Trennwand und Vorboden Typ 1a

Aus den Ergebnissen der vorhergehenden Versuchen, besonders der Versuche mit Rechenträger heraus, wurde in einem ersten weiteren Schritt die Einlauftrennwand gewölbt ausgeführt und auf den Trennpfeiler eine Nase (PVC Halbkreis \varnothing 6cm) aufgesetzt). Ziel der gewölbten Wand war die positive Beeinflussung der Längswirbel entlang des Verschnittes des Vorbodens mit der Trennwand durch eine Verlängerung des Fließweges. Ebenso sollte der größere Durchmesser der „Nase“ durch die Verlängerung des Fließweges die Strömungsablösung verhindern.



Abb. 3.34: Gewölbte Einlauftrennwand

Die Verbesserungen waren in diesem Fall jedoch nur geringfügig.

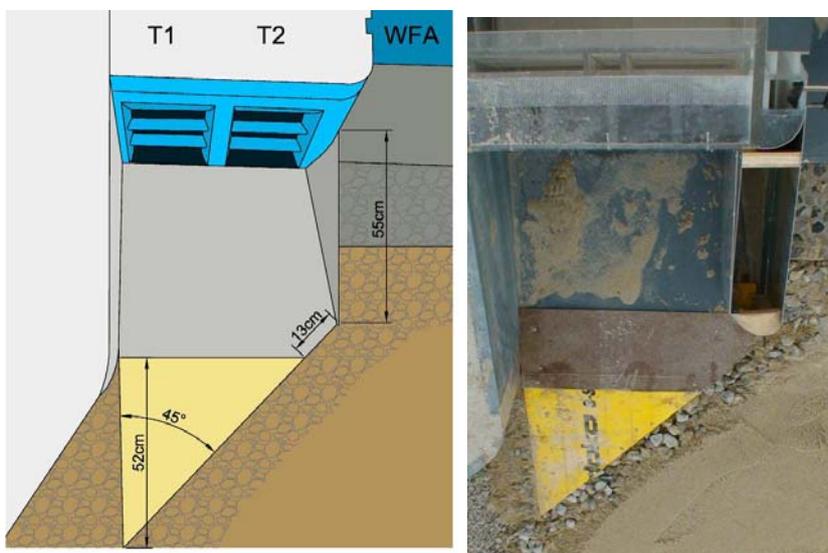


Abb. 3.35: Geschiebeschwelle (mit Vorboden Typ 1). Skizze links und Foto rechts.

3.3.6 Urplanung mit Rechenräger Nasen und geknicktem Vorboden (Typ 1b)

Im nächsten Schritt wurde der horizontale Vorboden im Bereich der Turbine 1 derart verlängert, dass sich ein neuer schräger Verschnitt mit dem vorhandenen Vorboden ausbildet (Abb. 3.36).

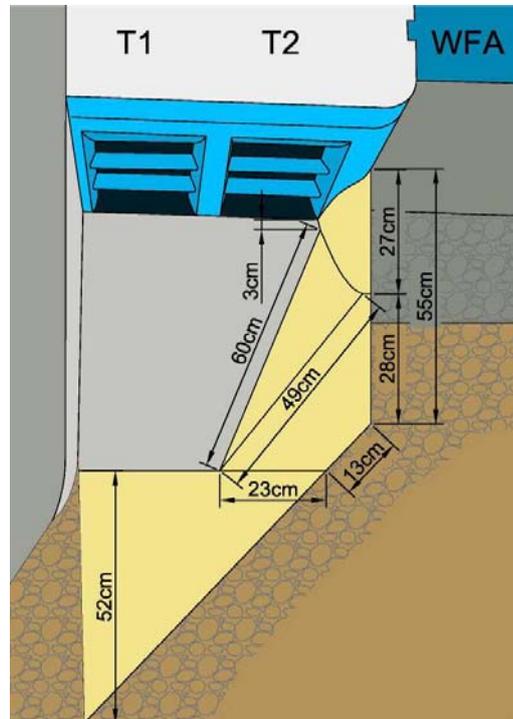


Abb. 3.36: Neuer Vorboden (Typ1b) aus PVC Platten

Dadurch konnten, wie geplant, die in den vorhergehenden Versuchen auftretenden Längswirbel auf einen kleinen Bereich knapp vor der Turbine 2 (Bereich der gebauchten Trennwand) reduziert werden.

Die geringen Geschwindigkeiten am rechten Rand des Quadranten II und IV durch die Ablösung der Strömung um den Trennpfeiler wurde mit den beschriebenen Maßnahmen jedoch nicht behoben. Auch Versuche mit Nasen aus den vorhergehenden Versuchen bzw. einem vertikalen Strebe (Abb. 3.37) zur Stromungsgleichrichtung zwischen den Rechenragern änderten daran wenig.



Abb. 3.37: Vertikale Strebe

3.3.7 Trennpfeiler mit Nasen und Vorboden (Typ 1b) mit Rechenränderänderungen

Versuche mit vorgehaltenen Rechenträgern, deren Neigung verändert wurde brachten geringe Verbesserung der Zuströmung. Daraus entstand die Idee die Rechenträger bei weiteren Versuchen nach Innen zu neigen (Abb. 3.38).

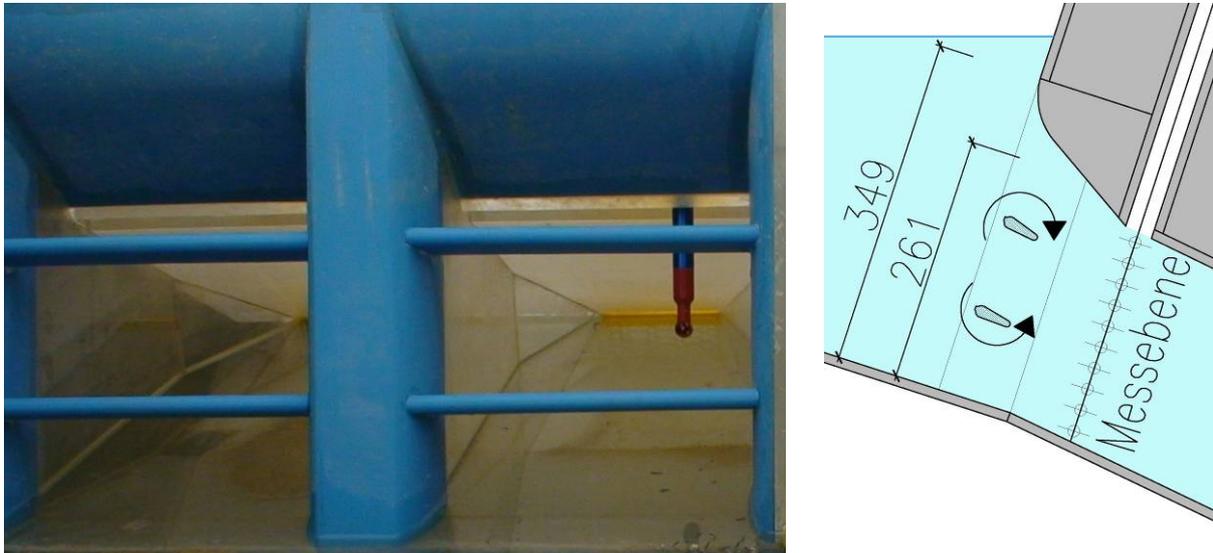


Abb. 3.38: geneigte Rechenträger

3.3.7.1 Ausblick auf weitere Varianten

Aus den Erkenntnissen der vorangegangenen Versuche wurden in weiterer Folge verschiedenste Pfeilerformen gebaut und die Strömung untersucht. Da eine vollkommene Geschwindigkeitsmessung (100 Messpunkte) einer Turbine einen zeitlichen Aufwand von etwa einem halben Tag darstellt, wurde bei den folgenden Pfeilerformen die Anströmung zuerst nur qualitativ betrachtet und die Geschwindigkeiten nur teilweise an ausgewählten kritischen Stellen des schlecht angeströmten Bereiches im Dreieck - Grenze QII/QIV und rechte Berandung - gemessen. Dies ist deswegen möglich, da laut Grenzwert nach Fisher und Franke die Geschwindigkeit an einem Messpunkt um mehr als 15 % von der mittleren Geschwindigkeit abweichen darf. Aus den vorhergehenden Versuchen ergab sich, dass diese minimale zulässige Geschwindigkeit im Bereich von $v > 0,16$ bzw. $0,17$ m/s liegen muss. Varianten, die neben den qualitativen Kriterien diese Minimalbedingung nicht einhalten konnten, wurden nicht weiter vertieft.



Abb. 3.39: Trennpfeiler als Nase mit flach geneigtem unterem Bereich

Bei allen Pfeilerformen, mit Ausnahme der Variante mit der vertikalen Leitwand (dünne Blechlamelle) blieben die Geschwindigkeiten im Randbereich klein. Bei der Variante mit geneigtem Trennpfeiler verbesserte sich der Quadrant II wobei aber der Quadrant IV sich verschlechterte. Bei der Variante mit Nasen war es genau umgekehrt. Versuche Bleche zu biegen, dass der Strömungsabriss verhindert wird oder Bereiche von Pfeilern zu kombinieren scheiterten. Auch ein klassischer kurzer bis mittellanger Pfeiler nach Rouvé mit Nase brachte keine Fortschritte. Nur eine vertikal leicht geneigte und gebogene Blechleitwand brachte eine Vergleichmäßigung der Geschwindigkeiten.

3.3.8 Trennpfeiler als Nase mit flach geneigtem unterem Bereich (Vorboden Typ 1b)

Beim, in der unteren Hälfte, flach geneigten Trennpfeiler ($\varnothing = 6 \text{ cm}$) mit normal geneigten Rechenträgern (Abb. 3.39) konnte die gemessenen Geschwindigkeiten an kritischen Stellen in den Quadranten II und IV leicht erhöht werden. Die geneigte Pfeilerform wurde jedoch in das Geschwindigkeitsfeld übertragen und dort sichtbar, was die Strömungsbeeinflussung des Pfeilers aufzeigte. Es kam vermehrt zu Längswirbelbildungen. Diese Längswirbel waren etwas höher situiert als bei den Versuchen zuvor und verursachten Fluktuationen zwischen den min/max Werten im Randbereich der Turbinenanströmung 1.

3.3.9 Geknickte Pfeilerform

Die aus der Literatur bekannte geknickte Pfeilerform, gedacht zur Beschleunigung der Strömung im kritischen Bereich, brachte keine Verbesserungen.

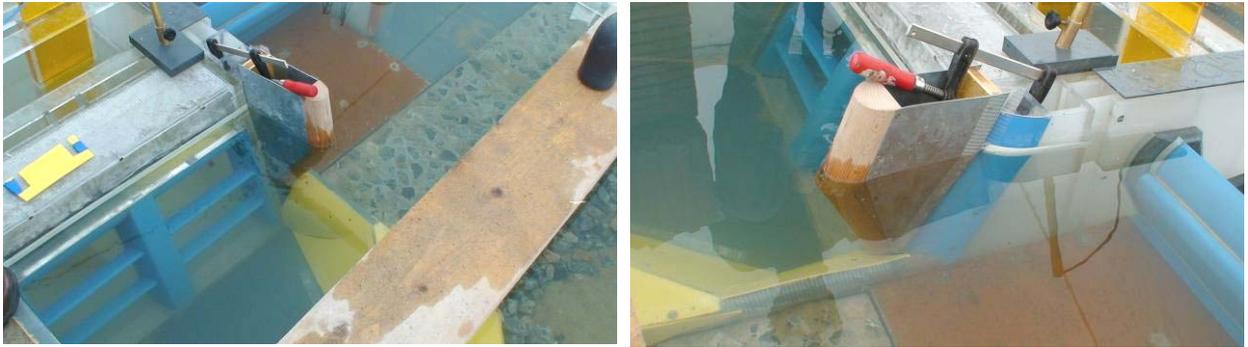


Abb. 3.40: Nach hinten geknickte Pfeilerform

3.3.10 Aufgesetzte PVC-Nasen und horizontale Leitbleche

Um eine Strömungsbeschleunigung im Grenzbereich zwischen Q_{II} und Q_{IV} zu erzielen wurden zwei Leitbleche an der neuen Einlaufftrennwand befestigt (Abb. 3.42). Gleichzeitig wurden die Rechenräger wie zuvor nach innen gedreht.

Das qualitative Strömungsbild zeigte keine Besonderheiten in der Anströmung, worauf eine Messung mit einem groben Raster zur Evaluierung der quantitativen Anströmung durchgeführt wurde.

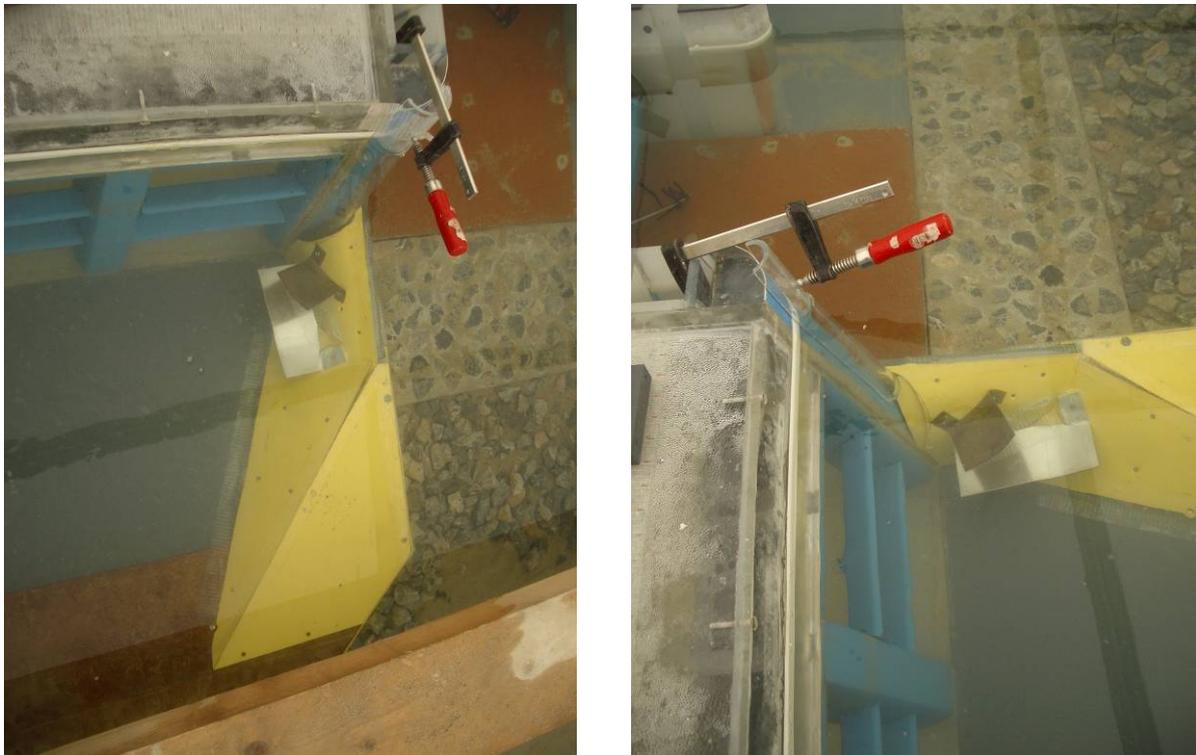


Abb. 3.41: Nasen $\varnothing 3\text{cm}$ an Innen- bzw. Au enkannte und horizontale Leitbleche

Der umgestellte untere Rechenräger beeinflusste die Geschwindigkeiten im Quadrant III und zum Grenzbereich Quadrant IV negativ und wurde daher trotz positiver Beeinflussung des Q_{IV} für die folgenden Versuche wieder auf die Ausgangsplanung zurückgestellt.

Im Quadrant II resultierte die Umstellung des Rechenr agers in besseren Geschwindigkeitswerten, während die Randbereiche des Q_{II} sich nicht merklich verbesserten.

Die Wirkung der Leitbleche war nicht exakt nachvollziehbar.

3.3.11 Stärker geneigter elliptischer Pfeiler und horizontale Leitbleche

Um eine Strömungsbeschleunigung am rechten Randbereich des Quadranten II zu erzielen wurde ein geneigter, elliptischer Pfeiler (annähernd Rouvé Form) eingebaut.



Abb. 3.42: Elliptischer Pfeiler und horizontale Leitbleche

Die beiden Leitbleche an der neuen Einlauffrennwand wurden beibehalten (Abb. 3.42), gleichzeitig wurde der untere Rechenräger wie in der Urplanung gestellt.

Das durch Wollfäden qualitative untersuchte Strömungsbild wurde bei diesem Versuch gegenüber den Vorversuchen verbessert (Abb. 3.43). Die Wollfäden wackelten zwar, richteten sich jedoch fast parallel und nur wenig geneigt zur Turbinenachse aus.

Ein grober Geschwindigkeitsmessraster zeigte, dass die Auswirkung der Blechfl ugel im Q_{IV} geringfügig positiv war im Grenzbereich Q_{III}/Q_{IV} quantitativ sogar negativ war. Hingegen konnte durch die elliptische Form eine Verbesserung im Quadrant II erzielt werden.

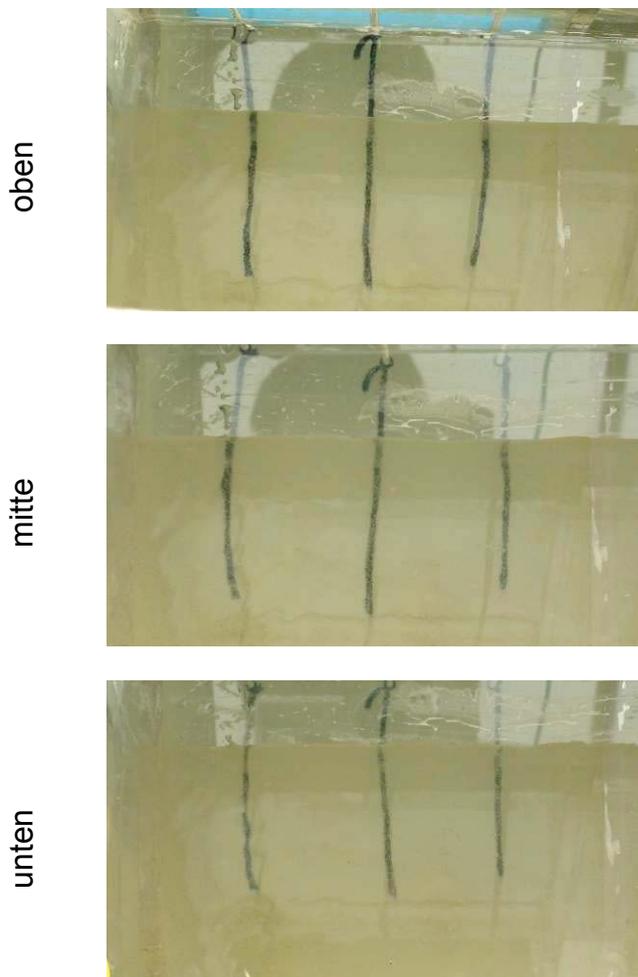
Turbine 2 nach Rechenebene

Abb. 3.43: Strömungsbedingungen Turbine 2, Elliptischer Pfeiler und horizontale Leitbleche

3.3.12 Aufgesetzte, kleine PVC-Nasen und horizontale Leitbleche

Diese Variante wurde durchgeführt, um die Verbesserung durch eine elliptische Pfeilerform quantitativ an ausgewählten Messpunkten zu verdeutlichen und um den negativen Einfluss der waagrechten Leitbleche im Grenzbereich Q_{III}/Q_{IV} zu bestätigen.

3.3.13 Pfeiler nach Rouvé mit Nase (R_N)

Um die in den vorhergehenden Versuchen gewonnene Einsicht, dass die elliptische Form des Trennpfeilers Verbesserungen im Randbereich der Turbine 2 bringen könnte, wurde ein mittellanger vertikaler Pfeiler mit einer Form nach Rouvé untersucht. Es kommt hier zu großen Drallbewegungen mit Umkehrströmungen im Zwickel zwischen Trennpfeiler und Krafthausfront. In kritischen Messpunkten werden Geschwindigkeiten von nur 0,15 m/s im Modell gemessen, was ein Indiz für das Nichteinhalten der Grenzbedingungen nach Fisher und Franke bedeutet.

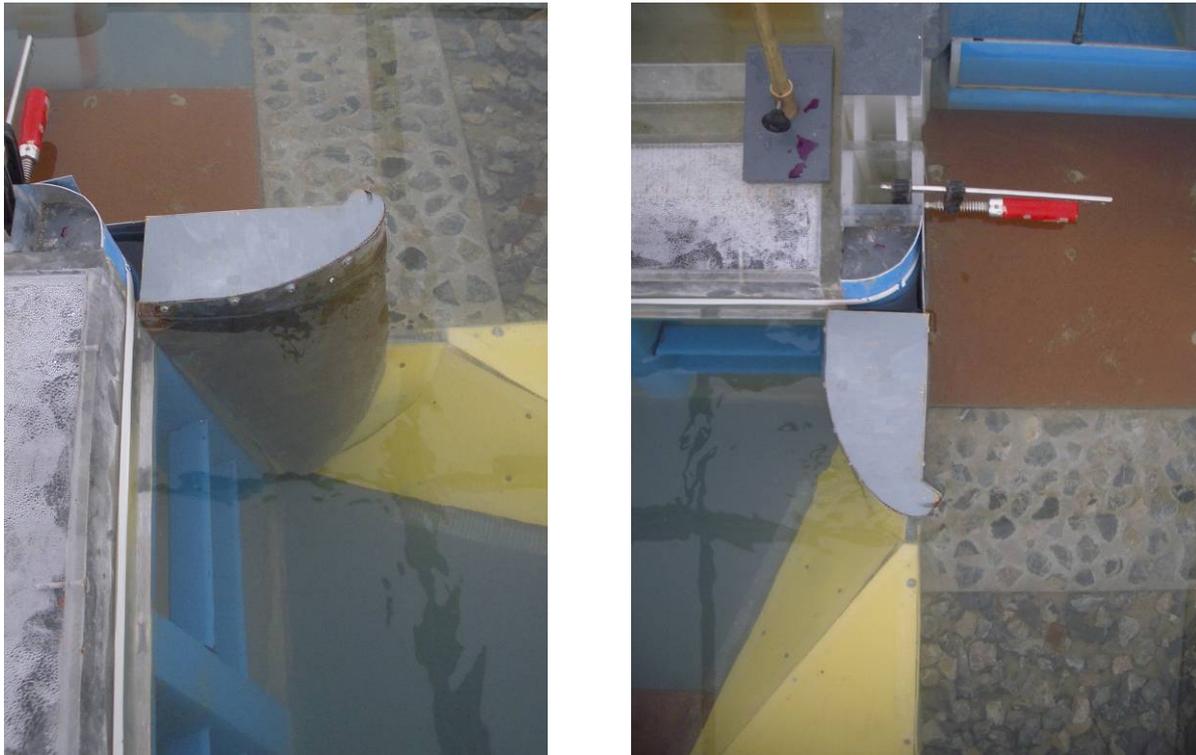


Abb. 3.44: Pfeiler nach Rouvé mit Nase (R_N)

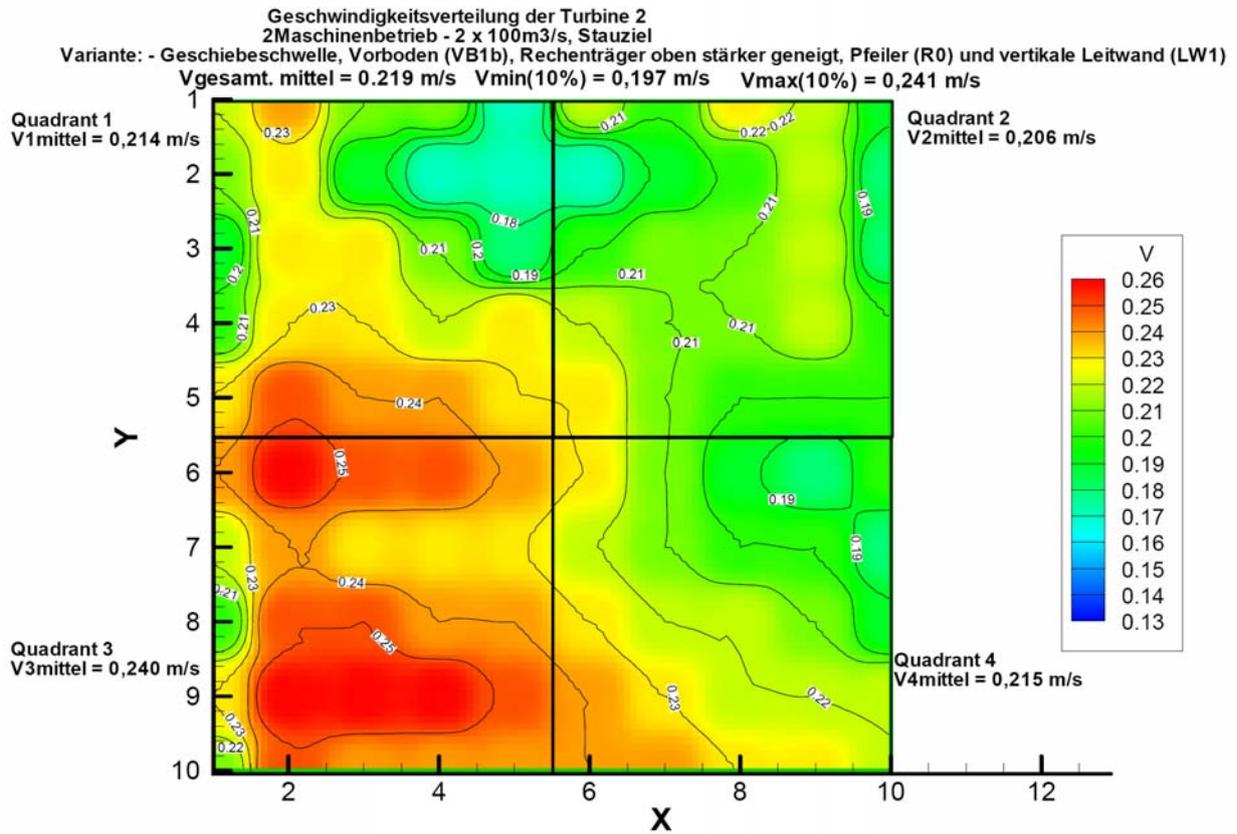
3.3.14 Vertikale Blechleitwand (LW1) und verlängerter schräger Trennpfeiler (R_0) mit Vorboden (VB1b)

Bei dieser Variante wurde ein Mittelweg zwischen dem vorherigen vertikalen und dem stark geneigten ellipsoiden Trennpfeiler untersucht, um die positiven Auswirkungen der einzelnen Varianten zu kombinieren. Die rechte Randzone der Turbine 2 blieben jedoch immer als Schwachstelle vorhanden. Dieses Problem resultierte aus der Tatsache, dass der vorhandene Trennpfeiler schmaler als 5 m in der Natur ist, während Rouvé's Literaturwerte Pfeilerbreiten von 5 bis 12 m ausweisen. Da eine Verbreiterung des Trennpfeilers im untersuchten Fall nicht möglich war und auf Grund der fehlenden Erfolge mit herkömmlichen Trennpfeilerformen, wurden als nächster Schritt verschiedene Varianten von vertikalen Leitwänden untersucht.



Abb. 3.45: Vertikale Blechleitwand (LW1) und verlängerter Pfeiler (R0)

Nach einigem Probieren fand sich die in Abb. 3.45 dargestellte Konfiguration, die qualitativ sehr vielversprechend aussah.



Geschwindigkeitsverteilung der Turbine 2 (2 Maschinenbetrieb - 2 x 100m³/s), Stauziel
 Variante: - Geschiebeschwelle, Vorboden (VB1b), Rechenträger oben stärker geneigt, Pfeiler R0 und vertikale Leitwand (LW1)
 Gemessene Modellwerte

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,220 0,160 0,260	0,240 0,200 0,270	0,210 0,120 0,260	0,210 0,150 0,270	0,170 0,070 0,260	0,220 0,190 0,260	0,200 0,130 0,240	0,230 0,220 0,260	0,220 0,200 0,260	0,190 0,160 0,220
2	0,210 0,170 0,240	0,230 0,200 0,260	0,190 0,120 0,260	0,170 0,110 0,260	0,170 0,070 0,260	0,170 0,070 0,260	0,190 0,190 0,260	0,200 0,120 0,260	0,220 0,190 0,260	0,180 0,150 0,220
3	0,190 0,170 0,230	0,230 0,220 0,240	0,230 0,200 0,260	0,210 0,120 0,260	0,180 0,130 0,260	0,200 0,130 0,260	0,210 0,130 0,240	0,210 0,200 0,240	0,220 0,200 0,240	0,180 0,160 0,230
4	0,200 0,170 0,230	0,230 0,200 0,270	0,230 0,220 0,260	0,220 0,170 0,270	0,230 0,190 0,260	0,220 0,160 0,270	0,210 0,170 0,260	0,210 0,190 0,240	0,220 0,200 0,240	0,200 0,190 0,220
5	0,230 0,230 0,240	0,250 0,230 0,270	0,240 0,230 0,270	0,240 0,220 0,260	0,230 0,200 0,270	0,230 0,230 0,260	0,210 0,170 0,240	0,200 0,170 0,230	0,200 0,170 0,230	0,200 0,170 0,230
6	0,240 0,230 0,260	0,260 0,240 0,270	0,250 0,230 0,270	0,250 0,220 0,270	0,240 0,220 0,260	0,230 0,200 0,260	0,210 0,170 0,240	0,190 0,150 0,230	0,180 0,150 0,220	0,200 0,190 0,230
7	0,220 0,200 0,240	0,240 0,230 0,260	0,230 0,220 0,260	0,230 0,220 0,240	0,230 0,200 0,240	0,220 0,200 0,240	0,210 0,190 0,240	0,200 0,170 0,230	0,200 0,170 0,230	0,180 0,160 0,220
8	0,200 0,170 0,230	0,250 0,230 0,270	0,250 0,240 0,270	0,240 0,200 0,270	0,240 0,200 0,270	0,230 0,200 0,260	0,220 0,170 0,260	0,220 0,200 0,240	0,210 0,190 0,240	0,190 0,160 0,230
9	0,230 0,220 0,260	0,260 0,240 0,270	0,260 0,240 0,270	0,260 0,240 0,270	0,250 0,230 0,270	0,240 0,230 0,270	0,230 0,200 0,240	0,220 0,200 0,240	0,220 0,200 0,260	0,220 0,200 0,260
10	0,210 0,200 0,240	0,250 0,240 0,270	0,240 0,230 0,270	0,240 0,230 0,270	0,240 0,220 0,270	0,240 0,230 0,260	0,240 0,220 0,270	0,230 0,200 0,270	0,230 0,220 0,260	0,220 0,200 0,240

Quadrant 1 V1mittel	0,214	Mittelwert	Quadrant 2 V2mittel	0,2056
		Min. Wert Max. Wert		
Quadrant 3 V3mittel	0,240		Quadrant 4 V4mittel	0,215
Vgesamt, mittel	0,219		Vmin(10%)	0,19701
			Vmax(10%)	0,24079

Abb. 3.46: Geschwindigkeitsverteilung Turbine 2, Vorboden (VB1b), vertikale Blechleitwand (LW1) und verlängerter Pfeiler (R0)

Das Blech wurde etwa ein Meter in der Natur unter dem Stauwasserspiegel geführt, um allfälliges Treibgut nicht im Bereich zwischen Leitwand und Krafthausstirnseite zu fangen.

Qualitativ zeigte die Variante mit vertikaler Blechleitwand (LW1) sehr gute Ergebnisse (Abb. 3.46). Die großen Abweichungen im Bereich Grenze Quadrant I und II lassen zum Beispiel durch den Umstand, dass das Leitblech nicht über zum Stauwasserspiegel hinausragte erklären. Andererseits könnte es sich auch um Abrisswirbel an den Kanten der Leitwand handeln.

Die Grenztrumpete der bezogenen Geschwindigkeiten konnte bei den Minimalgeschwindigkeiten eingehalten werden, bei den Maximalgeschwindigkeiten kam es zu leichten Überschreitungen (Abb. 3.47).

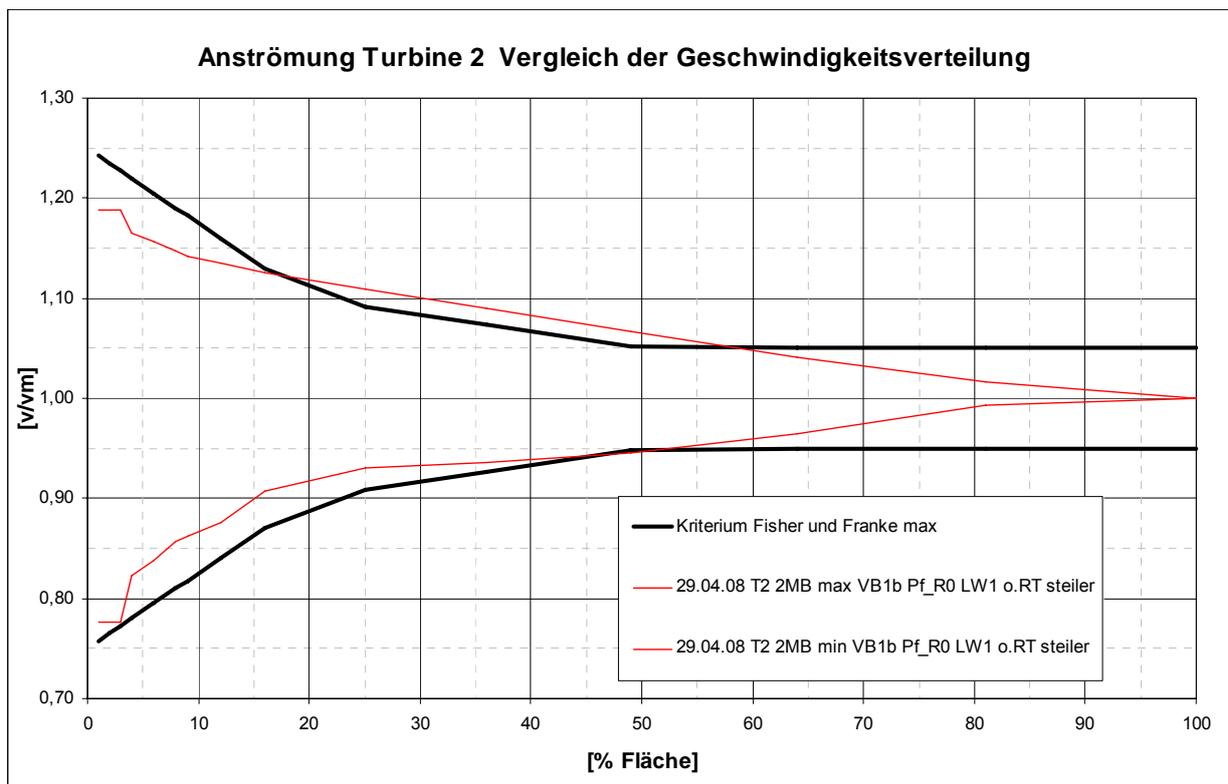


Abb. 3.47: Verteilung der bezogenen Geschwindigkeiten der Turbine 2 mit vertikale Blechleitwand (LW1) und schräger, verlängerter Pfeiler (R0)

3.3.15 Oben geneigter Rechenträger und rundem steilerem Vorboden (Typ VB2), Rouvé Pfeiler (R1) und langer Leitwand (LW2)

Aufgrund der guten Ergebnisse der Variante mit dem provisorischen Vorboden aus PVC wurde dieser Zustand auf eine massive Variante mit Zement umgebaut. Angeregt von einer Arbeit des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Technischen Universität Graz (Optimierung der Zuströmung zu Turbinen am Beispiel KW Rott) (Abb. 3.48), wurde eine runde Schwelle gebaut, welche sich an die Geometrie der Vorgängervariante steiler anpasst (Abb. 3.49). Der obere Rechenträger bleibt etwas steiler geneigt.

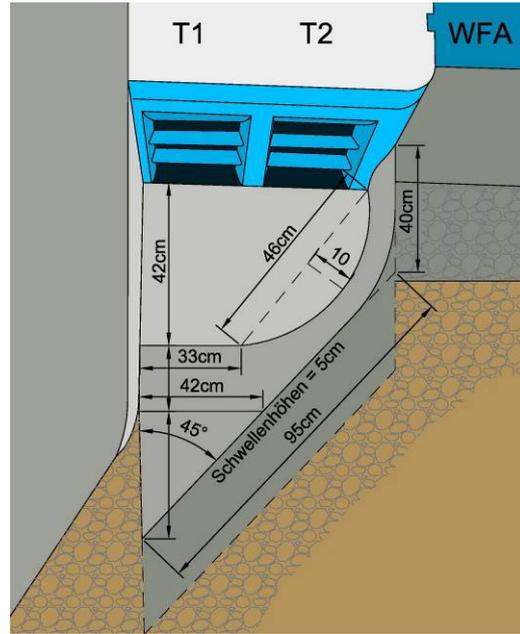


Abb. 3.48: Groschenbeschleue KW Rott (TU Graz)

Abb. 3.49: Neuer Vorboden Gössendorf (Typ VB2)

Die Neigung der Verschwenkung wurde jedoch etwas steiler gewählt. Die ersten Ergebnisse mit neuem Vorboden (Typ 2) waren ernüchternd. Es zeigten sich, wie bei der Urplanungsvariante, umfallende Wirbel am Verschnitt Turbineneinlauf/Schwelle.

Im Vergleich zur letzten Variante wurde ein kurzer Trennpfeiler nach Rouvé (R1) gebaut (Abb. 3.50). Dieser Pfeiler wurde auf Grund der vorhergehenden Erfahrungen und Berichten aus der Literatur ins Wehrfeld A verbreitert. Der Pfeiler wurde angeschnitten, um eine Auflagerfläche für die Dammbalken und der Rechenreinigungsmaschine zu erhalten.

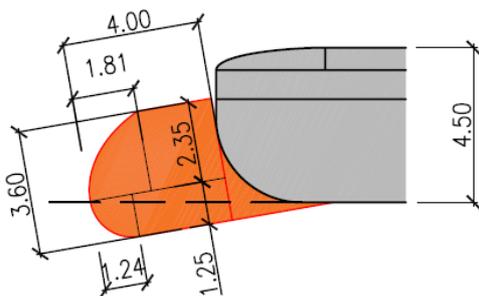


Abb. 3.50: Pfeilergeometrie und Position Rouvé kurz (Typ R1)

Bei dieser Variante wurde die Leitwand im Vergleich zur Vorgängervariante dimensionsgerecht hergestellt und vertikal aufgestellt (Abb. 3.51). Konstruktiv gibt es in der Literatur Leitwände als eigenständiger Bauteil oder Leitwände, die mit dem Trennpfeiler eine Einheit bilden. Hier wurde das System eines eigenen Bauteils gewählt.

Durch die Überschlagswirbel und Abrisswirbel am Übergang Vorboden und Leitwand kam es am Ende der Leitwand jedoch zu starken vertikalen Wirbelströmungen, worauf eine vertiefte quantitative Analyse unterblieb.



Abb. 3.51: Neuer Vorboden (Typ2), kurzer Trennpfeiler nach Rouvé (R1) und langer Leitwand (LW2)

3.3.16 Oben geneigter Rechenträger und rundem weniger steilen Vorboden (VB3), Rouvé Pfeiler (R1) und langer Leitwand (LW2)

Aufgrund der Erfahrungen mit dem Vorbodentyp 2 wurde ein neuer Vorboden (Typ 3) entwickelt. Die Geschiebeschwelle wurde gegen die Fließrichtung um 5cm herausgezogen um eine flachere Neigung des runden Vorbodenbereiches zu erzielen. Die Verschwenkung wurde nach vorne gezogen um annähernd die Bruchlinie des Vorbodentyps 1 nachzubilden und dadurch die Neigung zusätzlich etwas flacher zu gestalten (Abb. 3.52).

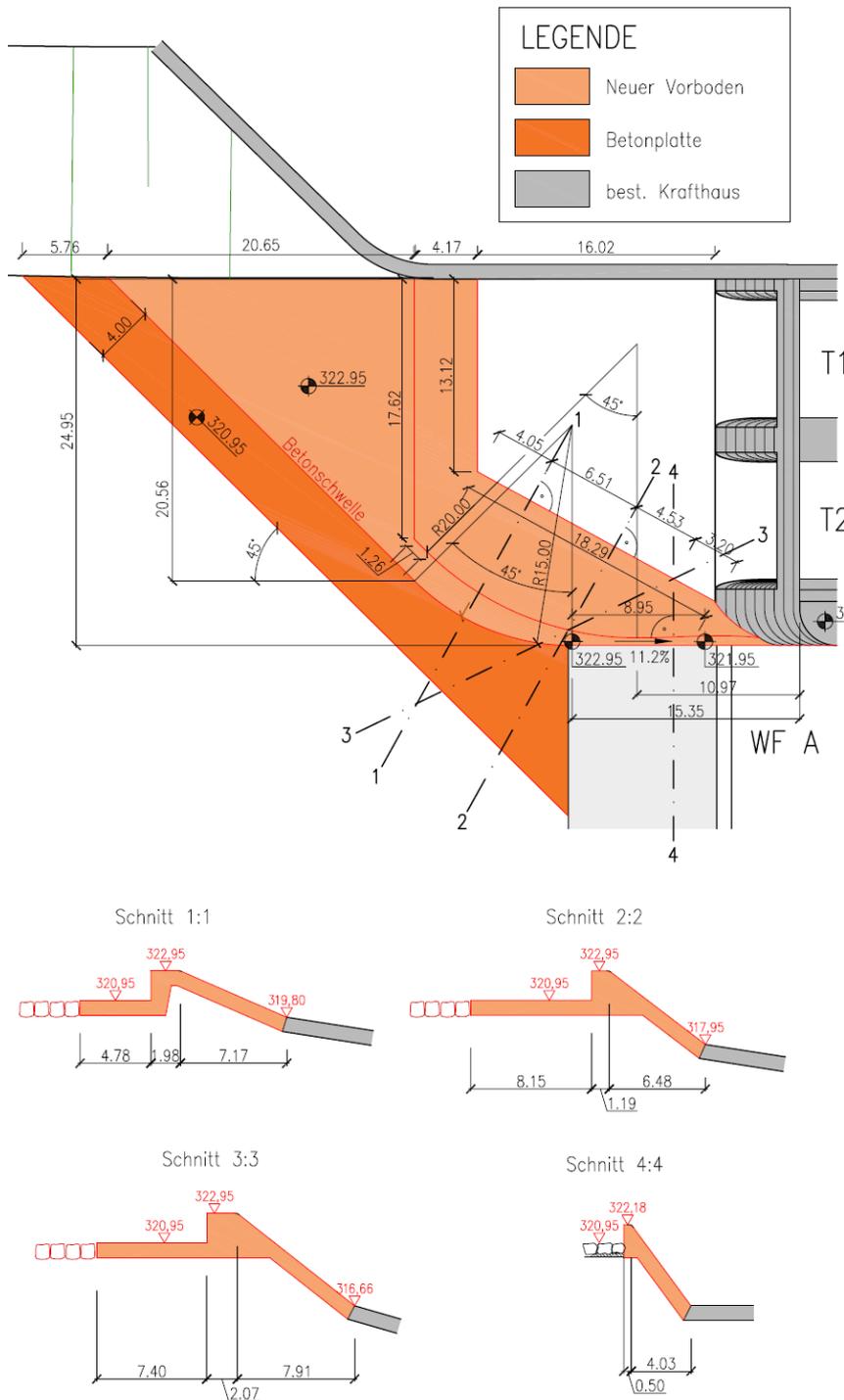
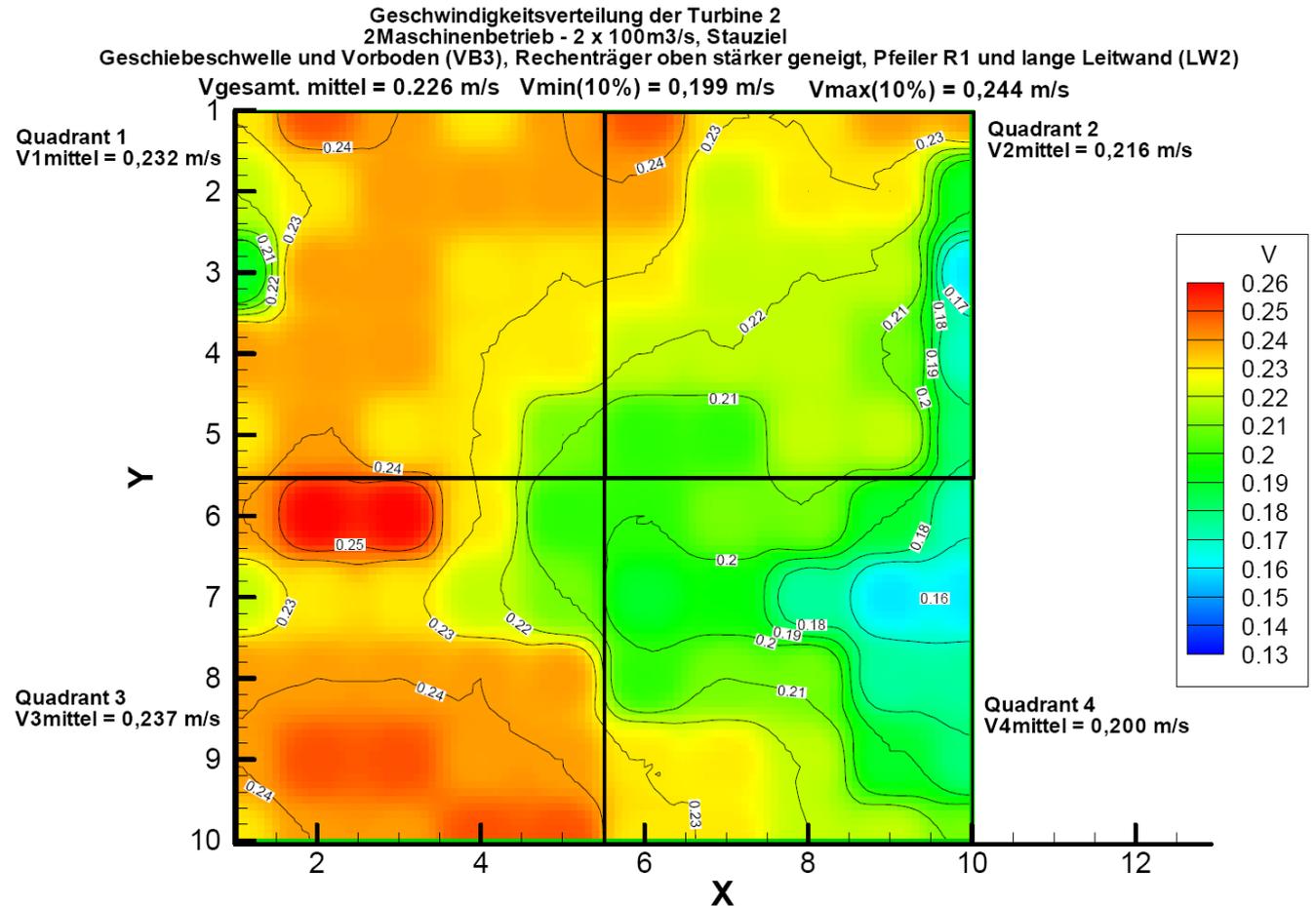


Abb. 3.52: Grundriss und Schnitte neuer Vorboden (VB3)



Geschwindigkeitsverteilung der Turbine 2 (2 Maschinenbetrieb - 2 x 100m³/s), Stauziel
 Variante: - Geschiebeschwelle und Vorboden (VB3), Rechenträger oben stärker geneigt, Pfeiler R1 und lange Leitwand (LW2)
 Gemessene Modellwerte

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,230 0,190 0,260	0,250 0,230 0,270	0,240 0,170 0,280	0,230 0,170 0,270	0,240 0,190 0,270	0,250 0,220 0,270	0,230 0,200 0,260	0,230 0,260 0,270	0,240 0,220 0,270	0,240 0,230 0,260
2	0,220 0,200 0,240	0,230 0,220 0,260	0,240 0,230 0,260	0,240 0,230 0,240	0,240 0,220 0,240	0,240 0,220 0,240	0,220 0,200 0,240	0,230 0,200 0,240	0,230 0,190 0,240	0,190 0,150 0,200
3	0,190 0,160 0,230	0,240 0,230 0,260	0,240 0,200 0,260	0,230 0,230 0,240	0,230 0,220 0,240	0,230 0,220 0,240	0,220 0,200 0,240	0,220 0,200 0,240	0,220 0,190 0,240	0,160 0,150 0,200
4	0,240 0,220 0,260	0,240 0,230 0,260	0,240 0,230 0,260	0,230 0,220 0,240	0,230 0,170 0,240	0,220 0,190 0,230	0,220 0,160 0,240	0,220 0,190 0,240	0,210 0,190 0,240	0,170 0,160 0,200
5	0,230 0,220 0,260	0,240 0,230 0,260	0,230 0,230 0,260	0,230 0,220 0,240	0,210 0,170 0,240	0,200 0,190 0,230	0,200 0,160 0,240	0,220 0,190 0,240	0,220 0,190 0,240	0,180 0,160 0,200
6	0,240 0,240 0,260	0,260 0,240 0,270	0,260 0,260 0,270	0,230 0,230 0,240	0,200 0,170 0,240	0,200 0,170 0,220	0,210 0,190 0,240	0,210 0,150 0,240	0,190 0,150 0,240	0,170 0,150 0,220
7	0,220 0,200 0,230	0,230 0,230 0,240	0,230 0,220 0,240	0,220 0,200 0,240	0,210 0,170 0,230	0,190 0,170 0,230	0,195 0,160 0,220	0,175 0,150 0,220	0,160 0,150 0,200	0,160 0,150 0,190
8	0,240 0,230 0,260	0,240 0,230 0,260	0,240 0,230 0,260	0,240 0,230 0,260	0,240 0,220 0,240	0,200 0,160 0,260	0,210 0,160 0,240	0,210 0,170 0,240	0,175 0,130 0,220	0,175 0,150 0,220
9	0,240 0,230 0,270	0,250 0,230 0,270	0,250 0,230 0,270	0,240 0,230 0,270	0,240 0,220 0,260	0,230 0,230 0,260	0,230 0,220 0,260	0,220 0,200 0,240	0,190 0,150 0,230	0,180 0,160 0,220
10	0,230 0,220 0,260	0,240 0,230 0,260	0,240 0,240 0,260	0,250 0,240 0,260	0,250 0,240 0,260	0,230 0,220 0,240	0,230 0,200 0,260	0,220 0,200 0,240	0,220 0,200 0,240	0,210 0,190 0,240

Quadrant 1 V1mittel	0,232	<table border="1" style="margin: auto; border-collapse: collapse;"> <tr> <th colspan="2">Mittelwert</th> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">Min. Wert</td> <td style="padding: 2px;">Max. Wert</td> </tr> </table>	Mittelwert		Min. Wert	Max. Wert	Quadrant 2 V2mittel	0,2164
Mittelwert								
Min. Wert	Max. Wert							
Quadrant 3 V3mittel	0,237		Quadrant 4 V4mittel	0,200				
Vgesamt. mittel	0,221		Vmin(10%)	0,19926				
			Vmax(10%)	0,24354				

Abb. 3.53: Geschwindigkeitsverteilung Turbine 2 , neuer Vorboden (Typ2), kurzer Trennpfeiler nach Rouvé (R1) und lange Leitwand (LW2).

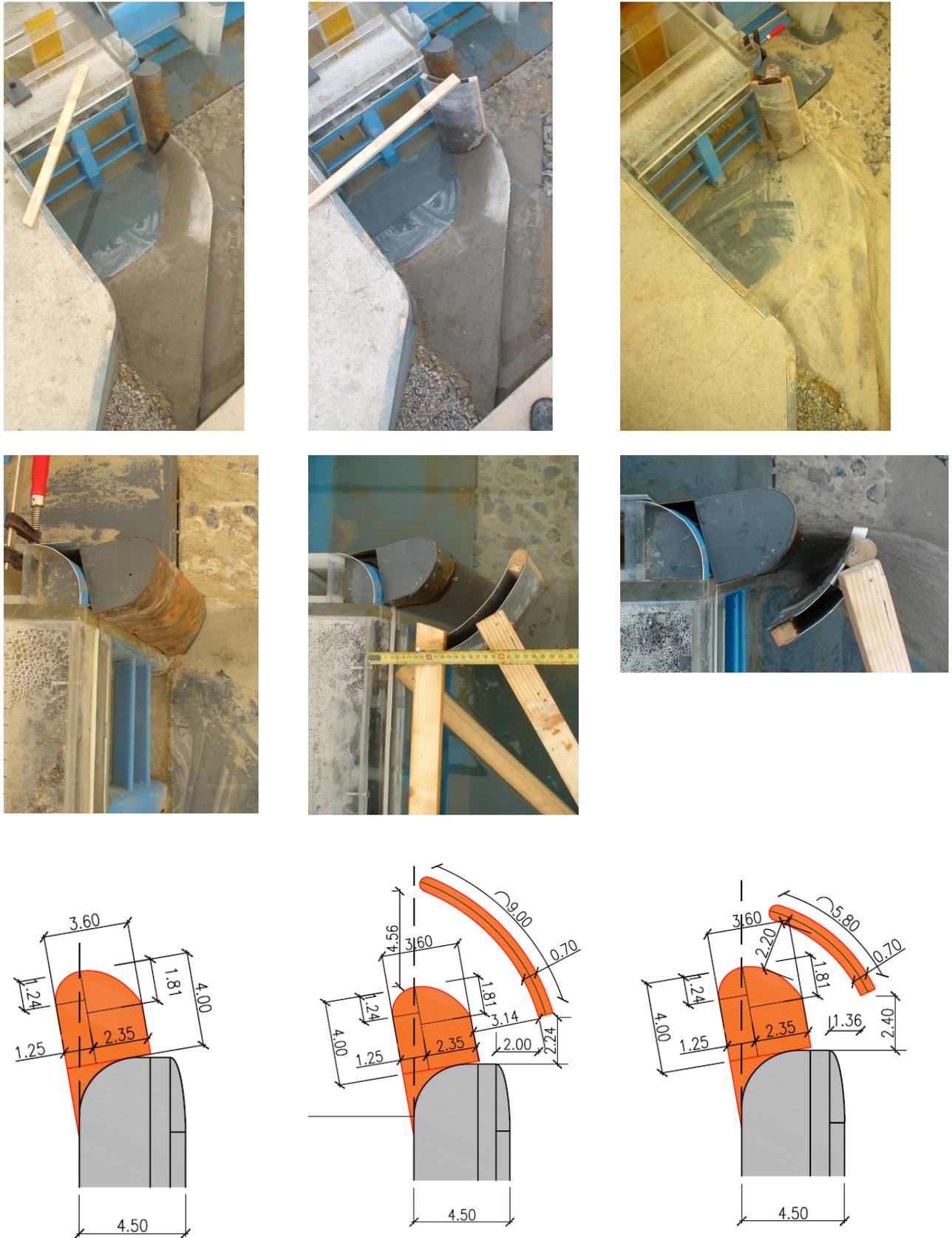


Abb. 3.54: Vergleich der Konfigurationen des Rouvépfeilers (Typ R1) Neuer Vorboden (Typ3), mit LW2 (mitte) und LW3 (rechts)

Durch die lange Leitwand (Abb. 3.54) wurde das Geschwindigkeitsfeld im Vergleich mit der Urplanung stark verbessert, es entstand jedoch ein großer Schatten im Quadrant IV. Durch die vertikale Position wurde jedoch die Anströmung an den QI im Vergleich zur ersten Variante verbessert. (Abb. 3.53). Die Randbedingungen der Grenztrumpete konnten knapp nicht eingehalten werden (Abb. 3.56). Auch bei der qualitativen Anströmung sieht man noch geringfügige Abweichungen in der Messebene (Abb. 3.55).

3.3.17 Oben geneigter Rechenräger und rundem weniger steilen Vorboden (Typ 3), Rouvé Pfeiler (R1) und kurzer Leitwand (LW3)

Zum Vergleich mit der Vorgängerkonfiguration wurde eine zweite Variante mit kurzer Leitwand (LW3) gemessen (Abb. 3.54). Dabei konnten zum ersten Mal die Grenzbedingungen knapp eingehalten werden (Abb. 3.56). Die Geschwindigkeitsverteilung sieht relativ gleichmäßig aus, wobei eine etwas schräg geneigte schlecht angeströmte Stelle sich durch den Q_{IV} bis zum Q_{II} zieht (Abb. 3.53). Im qualitativen Vergleich mit anderen Varianten zeigte diese Variante auch ihre gleichmäßige Anströmung an der Messebene (Abb. 3.55).

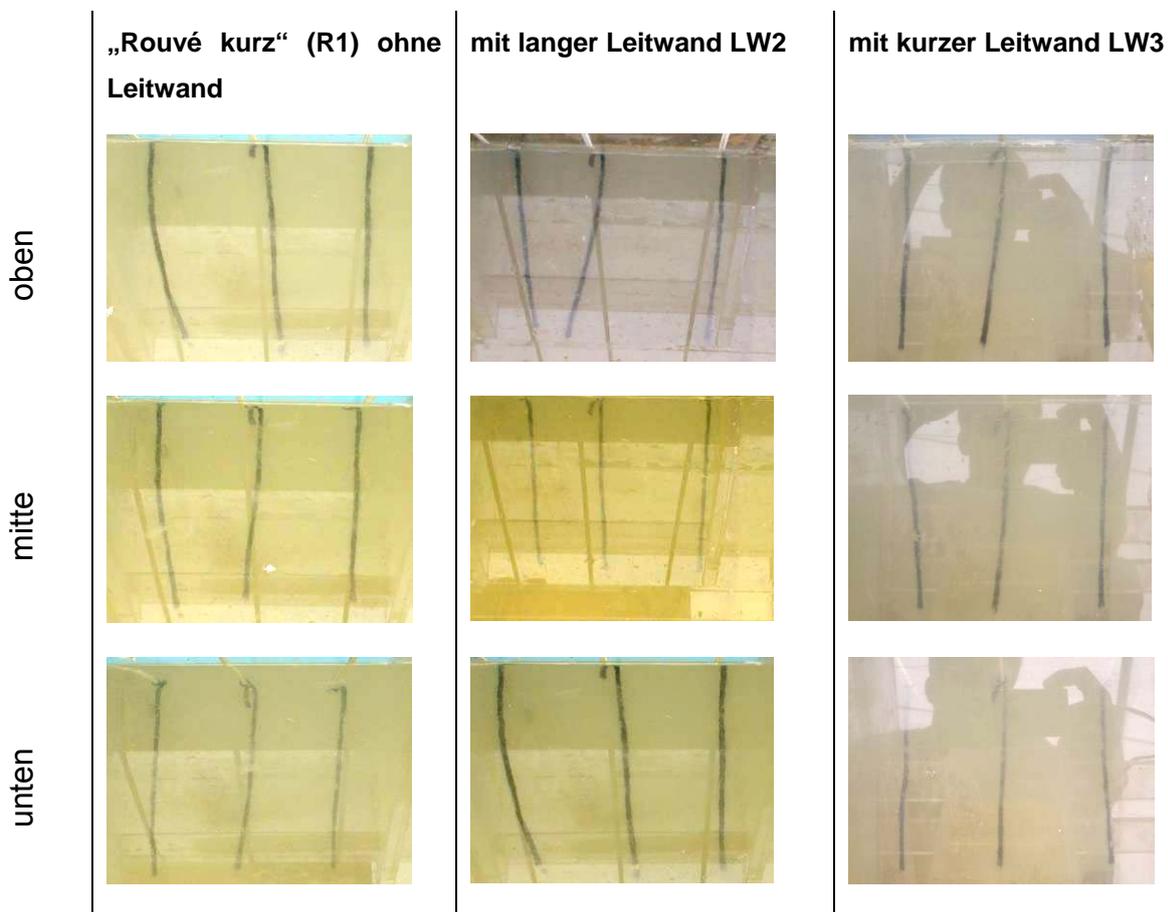


Abb. 3.55: Strömungsbedingungen Turbine 2 gegen Fließrichtung beim Vergleich für Vorboden (Typ VB3)

Bei dieser Konfiguration wurde auch die Stellung des oberen Rechenräger auf die Urplanung zurückgestellt, um quantitativ dessen Einfluss festzustellen. Bereits beim Isothachenbild (Abb. 3.58) sieht man, dass der Q_{II} schlechter angeströmt wird. Diese zwar geringfügige Verschlechterung zeigt auch der Vergleich mit der Grenzwerttrumpete (Abb. 3.56).

3.3.18 Oben geneigter Rechenträger und rundem weniger steilen Vorboden (VB3), Rouvé Pfeiler (R1) ohne Leitwand

Es wurde auch die Variante nur mit kurzem Pfeiler nach Rouvé (R1) gemessen (Abb. 3.59), um einen eindeutigen Variantenvergleich sichtbar machen zu können. Qualitativ wird die Verbesserung in Abb. 3.55 dargestellt.

Besonders interessant wird dieser Vergleich mit der Urplanungsvariante (Abb. 3.17). Die qualitative Verbesserung durch die untersuchten Varianten ist klar in Abb. 3.56 zu sehen.

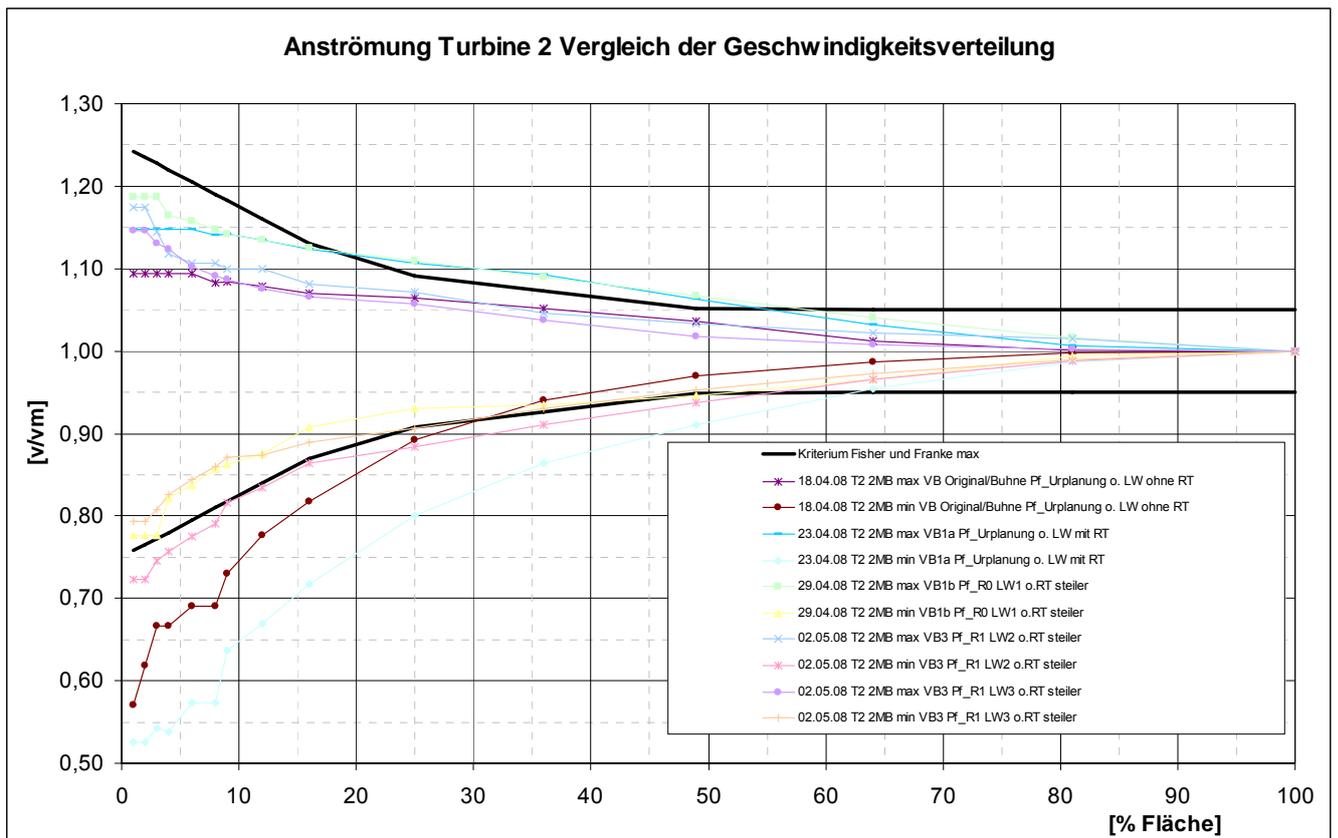
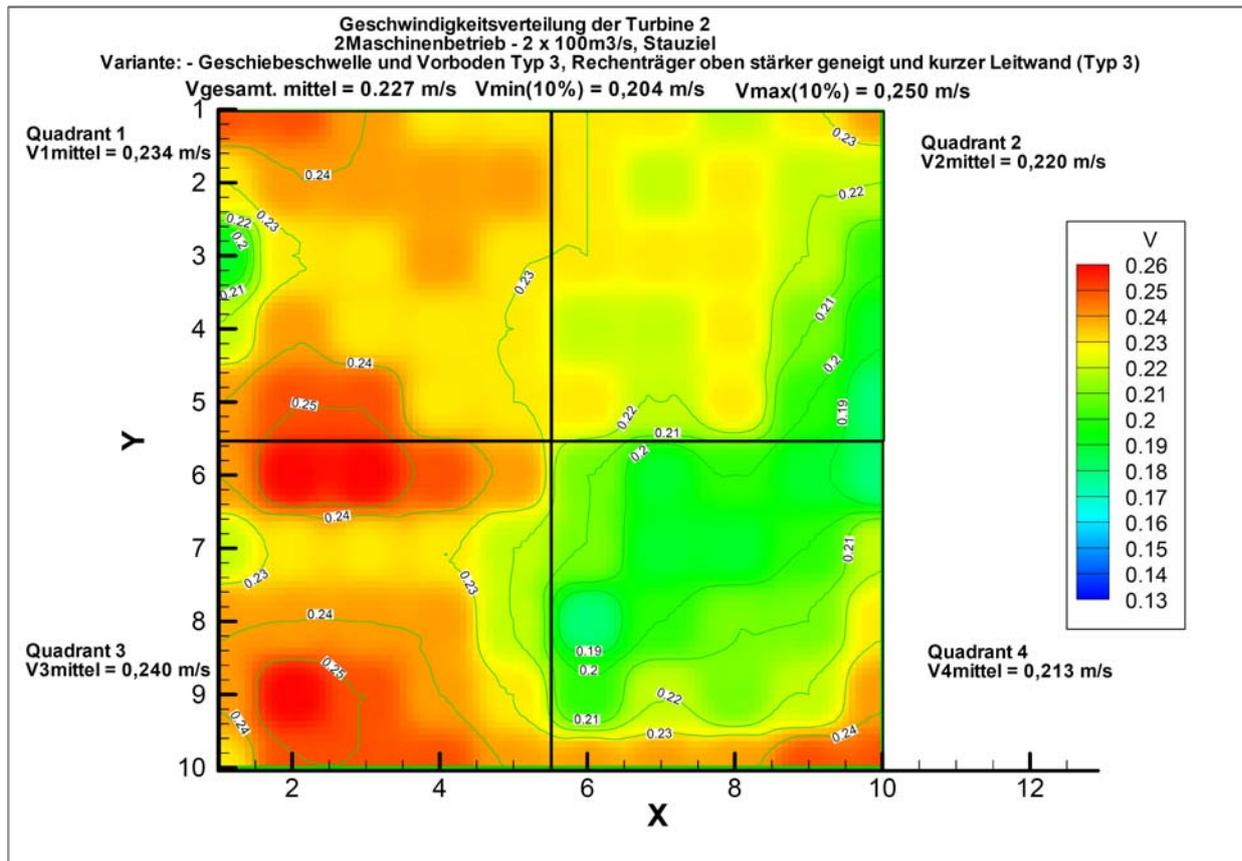


Abb. 3.56: Vergleich der bisherigen Geschwindigkeitsverteilung Turbine 2

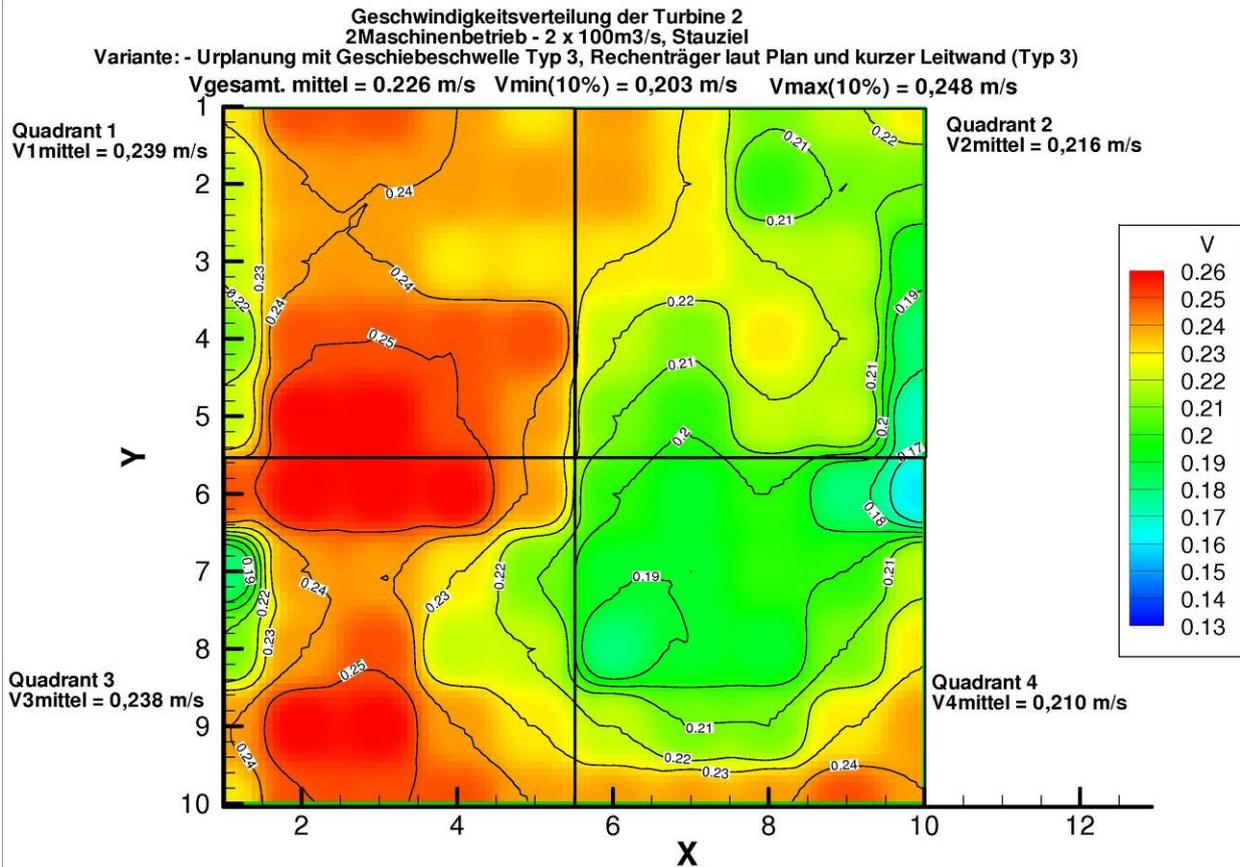


Geschwindigkeitsverteilung der Turbine 2 (2 Maschinenbetrieb - 2 x 100m³/s), Stauziel
 Variante: - Geschiebeschwelle und Vorboden Typ 3, Rechenträger oben stärker geneigt und kurze Leitwand (Typ 3)
 Gemessene Modellwerte

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.250 0.240 0.260	0.250 0.240 0.260	0.240 0.200 0.260	0.230 0.190 0.260	0.230 0.200 0.260	0.230 0.190 0.260	0.230 0.220 0.230	0.220 0.200 0.240	0.230 0.200 0.260	0.240 0.220 0.260
2	0.230 0.230 0.240	0.240 0.230 0.260	0.240 0.230 0.260	0.240 0.240 0.260	0.240 0.240 0.260	0.230 0.200 0.260	0.230 0.190 0.260	0.220 0.200 0.260	0.230 0.200 0.260	0.220 0.200 0.240
3	0.190 0.190 0.220	0.230 0.220 0.260	0.230 0.230 0.240	0.240 0.230 0.260	0.230 0.220 0.260	0.230 0.220 0.260	0.230 0.230 0.260	0.230 0.200 0.260	0.220 0.200 0.240	0.200 0.170 0.220
4	0.220 0.200 0.240	0.240 0.240 0.260	0.230 0.230 0.260	0.230 0.230 0.260	0.230 0.220 0.260	0.220 0.200 0.260	0.220 0.200 0.240	0.230 0.200 0.260	0.210 0.200 0.230	0.190 0.170 0.200
5	0.240 0.230 0.260	0.250 0.240 0.270	0.250 0.240 0.270	0.230 0.230 0.260	0.230 0.220 0.260	0.230 0.220 0.240	0.220 0.200 0.240	0.230 0.200 0.260	0.200 0.160 0.240	0.180 0.160 0.220
6	0.240 0.240 0.260	0.260 0.260 0.270	0.260 0.240 0.270	0.250 0.240 0.270	0.240 0.220 0.260	0.210 0.190 0.230	0.190 0.170 0.230	0.200 0.190 0.230	0.190 0.160 0.220	0.180 0.160 0.220
7	0.220 0.220 0.240	0.230 0.230 0.240	0.230 0.230 0.260	0.230 0.230 0.240	0.220 0.220 0.240	0.210 0.190 0.230	0.190 0.170 0.220	0.190 0.170 0.220	0.200 0.190 0.230	0.220 0.200 0.240
8	0.240 0.230 0.260	0.240 0.230 0.260	0.240 0.230 0.260	0.240 0.220 0.260	0.220 0.160 0.160	0.180 0.150 0.230	0.200 0.170 0.230	0.210 0.170 0.260	0.210 0.190 0.260	0.230 0.220 0.260
9	0.240 0.230 0.260	0.260 0.240 0.270	0.250 0.240 0.270	0.240 0.240 0.260	0.230 0.200 0.260	0.200 0.170 0.240	0.220 0.200 0.240	0.210 0.160 0.240	0.220 0.200 0.240	0.240 0.220 0.270
10	0.230 0.220 0.260	0.250 0.240 0.270	0.250 0.240 0.270	0.250 0.240 0.260	0.240 0.240 0.260	0.240 0.230 0.260	0.240 0.230 0.260	0.240 0.230 0.260	0.250 0.230 0.270	0.250 0.230 0.270

Quadrant 1 V1mittel	0.234	Mittelwert	Quadrant 2 V2mittel	0.2204
		Min. Wert Max. Wert		
Quadrant 3 V3mittel	0.240		Quadrant 4 V4mittel	0.213
Vgesamt, mittel	0.227		Vmin(10%)	0.20421
			Vmax(10%)	0.24959

Abb. 3.57: Geschwindigkeitsverteilung Turbine 2 , neuer Vorboden (Typ3), kurzer Trennpfeiler nach Rouvé (R1), kurze Leitwand (LW3) und Rechenträger oben stärker geneigt.

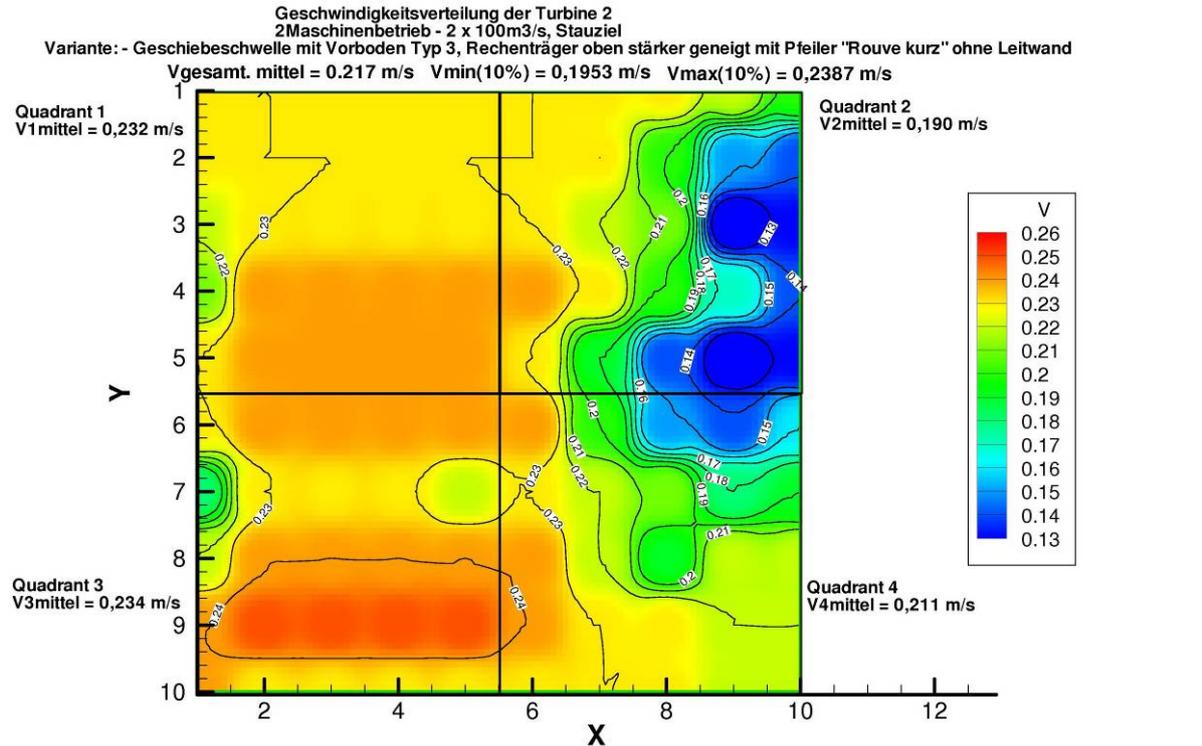


Geschwindigkeitsverteilung der Turbine 2 (2 Maschinenbetrieb - 2 x 100m³/s), Stauziel
 Variante: - Geschlebeschwelle mit Vorboden Typ 3, Rechenträger laut Plan und kurze Leitwand (Typ 3)
 Gemessene Modellwerte

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.230 0.190 0.280	0.250 0.240 0.260	0.250 0.220 0.270	0.240 0.190 0.170	0.230 0.220 0.270	0.240 0.220 0.270	0.230 0.170 0.260	0.210 0.190 0.240	0.220 0.190 0.260	0.230 0.200 0.280
2	0.220 0.200 0.240	0.240 0.230 0.260	0.240 0.220 0.270	0.240 0.190 0.270	0.240 0.230 0.260	0.240 0.230 0.260	0.230 0.200 0.260	0.200 0.150 0.240	0.210 0.170 0.240	0.210 0.190 0.240
3	0.220 0.220 0.240	0.240 0.230 0.260	0.240 0.230 0.280	0.230 0.200 0.260	0.230 0.220 0.270	0.230 0.200 0.260	0.230 0.220 0.240	0.220 0.190 0.260	0.220 0.200 0.240	0.190 0.160 0.240
4	0.210 0.190 0.230	0.250 0.230 0.270	0.250 0.240 0.270	0.250 0.230 0.260	0.250 0.230 0.270	0.220 0.190 0.270	0.210 0.170 0.240	0.230 0.200 0.270	0.220 0.200 0.240	0.180 0.150 0.230
5	0.220 0.200 0.240	0.260 0.240 0.270	0.260 0.240 0.270	0.250 0.240 0.270	0.240 0.200 0.270	0.210 0.160 0.240	0.200 0.170 0.230	0.220 0.200 0.260	0.220 0.190 0.240	0.170 0.160 0.200
6	0.250 0.240 0.270	0.260 0.260 0.280	0.260 0.260 0.270	0.260 0.240 0.270	0.240 0.190 0.260	0.200 0.170 0.240	0.190 0.160 0.230	0.200 0.170 0.230	0.180 0.150 0.230	0.160 0.150 0.190
7	0.180 0.160 0.220	0.240 0.230 0.260	0.240 0.230 0.260	0.230 0.220 0.260	0.210 0.170 0.230	0.190 0.170 0.220	0.190 0.170 0.230	0.200 0.170 0.230	0.200 0.170 0.230	0.220 0.170 0.270
8	0.210 0.190 0.240	0.240 0.230 0.260	0.250 0.230 0.270	0.220 0.170 0.260	0.220 0.190 0.260	0.180 0.150 0.220	0.190 0.160 0.230	0.190 0.160 0.240	0.210 0.190 0.240	0.230 0.200 0.260
9	0.240 0.230 0.260	0.260 0.240 0.270	0.260 0.240 0.270	0.240 0.230 0.260	0.230 0.200 0.260	0.220 0.190 0.240	0.210 0.160 0.240	0.210 0.190 0.240	0.230 0.190 0.260	0.240 0.220 0.270
10	0.230 0.200 0.270	0.250 0.240 0.270	0.250 0.240 0.270	0.250 0.230 0.270	0.240 0.230 0.260	0.240 0.230 0.260	0.240 0.230 0.260	0.240 0.230 0.260	0.250 0.230 0.270	0.240 0.230 0.260

Quadrant 1 V1mittel	0.239	Mittelwert		Quadrant 2 V2mittel	0.2156
		Min. Wert Max. Wert			
Quadrant 3 V3mittel	0.238			Quadrant 4 V4mittel	0.210
Vgesamt. mittel	0.226			Vmin(10%)	0.20322
				Vmax(10%)	0.24838

Abb. 3.58: Geschwindigkeitsverteilung Turbine 2 , neuer Vorboden (Typ3), kurzer Trennpfeiler nach Rouvé (R1), kurze Leitwand (LW3) und Rechenträger laut Plan



Geschwindigkeitsverteilung der Turbine 2 (2 Maschinenbetrieb - 2 x 100m³/s), Stauziel
 Variante: - Geschiebeschwelle mit Vorboden Typ 3, Rechenträger oben stärker geneigt mit Pfeiler "Rouvé kurz" ohne Leitwand
 Gemessene Modellwerte

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.230 0.220 0.260	0.230 0.220 0.260	0.230 0.190 0.260	0.230 0.200 0.260	0.230 0.220 0.240	0.230 0.230 0.260	0.230 0.220 0.260	0.230 0.220 0.260	0.220 0.200 0.230	0.220 0.200 0.230
2	0.230 0.230 0.260	0.230 0.220 0.260	0.230 0.220 0.240	0.230 0.220 0.240	0.230 0.230 0.240	0.230 0.120 0.240	0.230 0.210 0.240	0.200 0.170 0.230	0.150 0.070 0.200	0.140 0.090 0.190
3	0.220 0.200 0.240	0.230 0.230 0.240	0.230 0.230 0.260	0.230 0.230 0.240	0.230 0.220 0.240	0.230 0.220 0.240	0.220 0.200 0.240	0.210 0.190 0.240	0.120 0.070 0.170	0.130 0.110 0.170
4	0.210 0.190 0.230	0.240 0.230 0.260	0.230 0.220 0.260	0.200 0.170 0.230	0.170 0.130 0.200	0.140 0.120 0.170				
5	0.230 0.230 0.240	0.240 0.240 0.260	0.240 0.230 0.260	0.240 0.230 0.260	0.240 0.230 0.270	0.230 0.220 0.260	0.190 0.150 0.240	0.140 0.110 0.200	0.120 0.080 0.170	0.130 0.090 0.160
6	0.230 0.230 0.240	0.240 0.240 0.260	0.240 0.230 0.260	0.240 0.240 0.260	0.240 0.230 0.260	0.240 0.230 0.260	0.200 0.160 0.240	0.150 0.110 0.220	0.140 0.090 0.190	0.160 0.120 0.200
7	0.180 0.160 0.200	0.230 0.230 0.240	0.230 0.230 0.260	0.230 0.230 0.240	0.220 0.220 0.240	0.230 0.220 0.240	0.220 0.220 0.240	0.210 0.160 0.230	0.180 0.150 0.220	0.190 0.160 0.230
8	0.220 0.220 0.240	0.240 0.230 0.260	0.240 0.240 0.260	0.240 0.230 0.260	0.240 0.230 0.260	0.240 0.230 0.260	0.220 0.160 0.240	0.190 0.130 0.230	0.220 0.170 0.240	0.220 0.200 0.240
9	0.240 0.230 0.260	0.250 0.240 0.270	0.250 0.240 0.270	0.250 0.240 0.260	0.250 0.240 0.270	0.240 0.240 0.260	0.230 0.230 0.260	0.230 0.220 0.240	0.220 0.200 0.240	0.220 0.200 0.230
10	0.240 0.240 0.260	0.230 0.230 0.260	0.230 0.230 0.240	0.230 0.220 0.240	0.230 0.230 0.260	0.230 0.230 0.260	0.230 0.220 0.240	0.230 0.220 0.240	0.230 0.200 0.260	0.220 0.220 0.240

Quadrant 1 V1mittel	0.232	Mittelwert		Quadrant 2 V2mittel	0.1904
		Min. Wert Max. Wert			
Quadrant 3 V3mittel	0.234			Quadrant 4 V4mittel	0.211
Vgesamt, mittel	0.217			Vmin(10%)	0.1953
				Vmax(10%)	0.2387

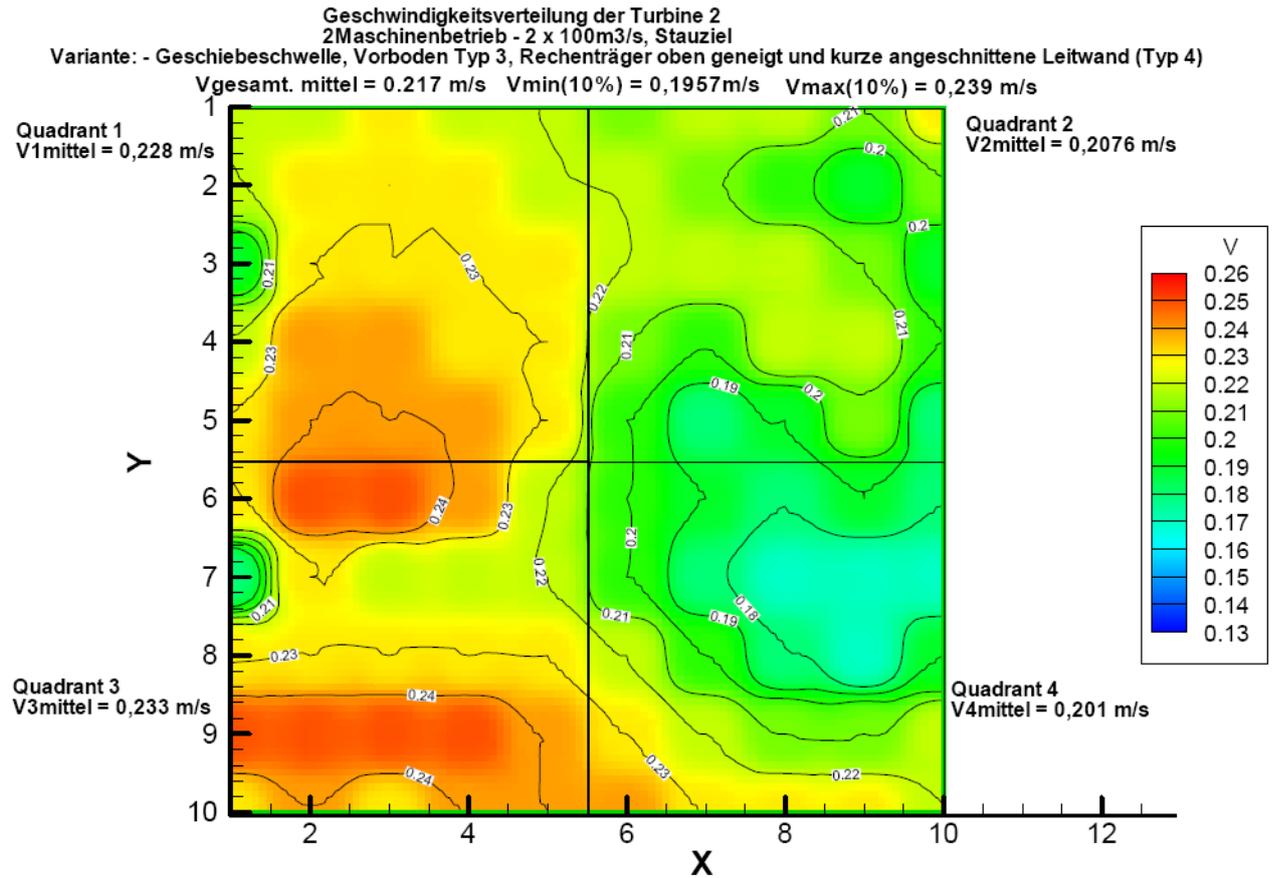
Abb. 3.59: Geschwindigkeitsverteilung Turbine 2 , neuer Vorboden (VB3), kurzer Trennpfeiler nach Rouvé (R1) ohne Leitwand

3.3.19 Rechenträger laut Plan und rundem Vorboden (VB3), Rouvé Pfeiler (R1), unten angeschnittene Leitwand (LW4)

Um den Anströmschatten im Q_{III} zu verringern wurden weitere Varianten mit angeschnittenen Leitwänden ausprobiert (Abb. 3.60). Auch diese konnten die Grenzbedingungen jedoch nicht in allen Bereichen einhalten (Abb. 3.56).



Abb. 3.60: Angeschnittene Leitwand (LW4)



Geschwindigkeitsverteilung der Turbine 2 (2 Maschinenbetrieb - 2 x 100m³/s), Stauziel
 Variante: - Geschiebeschwelle, Vorboden Typ 3, Rechenträger oben geneigt und kurze angeschnittene Leitwand (Typ 4)
 Gemessene Modellwerte

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	0,220 0,200 0,240	0,220 0,160 0,260	0,230 0,190 0,260	0,220 0,170 0,260	0,220 0,170 0,260	0,210 0,160 0,260	0,220 0,160 0,240	0,220 0,190 0,260	0,210 0,190 0,260	0,230 0,220 0,260	I
2	0,220 0,190 0,240	0,230 0,230 0,260	0,230 0,220 0,260	0,230 0,200 0,240	0,220 0,190 0,240	0,220 0,190 0,240	0,210 0,190 0,240	0,200 0,150 0,240	0,190 0,150 0,240	0,210 0,170 0,240	II
3	0,190 0,160 0,220	0,230 0,220 0,240	0,230 0,220 0,240	0,230 0,220 0,240	0,230 0,220 0,240	0,230 0,200 0,240	0,220 0,200 0,240	0,220 0,190 0,260	0,210 0,190 0,230	0,190 0,170 0,220	
4	0,220 0,200 0,230	0,240 0,230 0,260	0,240 0,230 0,260	0,230 0,230 0,260	0,230 0,230 0,260	0,210 0,170 0,240	0,200 0,170 0,240	0,220 0,190 0,240	0,220 0,200 0,240	0,200 0,170 0,230	
5	0,230 0,220 0,240	0,240 0,240 0,260	0,240 0,230 0,260	0,240 0,230 0,260	0,230 0,190 0,260	0,200 0,160 0,240	0,180 0,150 0,230	0,190 0,160 0,230	0,210 0,170 0,230	0,180 0,160 0,220	
6	0,230 0,220 0,240	0,250 0,240 0,260	0,250 0,240 0,260	0,240 0,230 0,260	0,220 0,200 0,240	0,200 0,160 0,240	0,190 0,160 0,220	0,180 0,160 0,220	0,190 0,170 0,230	0,180 0,160 0,220	
7	0,180 0,160 0,200	0,230 0,220 0,260	0,220 0,200 0,240	0,220 0,220 0,240	0,220 0,190 0,240	0,200 0,170 0,230	0,180 0,150 0,220	0,170 0,150 0,220	0,170 0,150 0,200	0,170 0,160 0,200	III
8	0,230 0,200 0,260	0,230 0,230 0,260	0,230 0,230 0,260	0,230 0,230 0,240	0,230 0,220 0,240	0,220 0,200 0,240	0,200 0,130 0,230	0,180 0,130 0,230	0,170 0,130 0,220	0,190 0,160 0,220	IV
9	0,250 0,240 0,260	0,250 0,240 0,270	0,250 0,240 0,270	0,250 0,240 0,260	0,240 0,230 0,260	0,230 0,200 0,260	0,220 0,190 0,240	0,210 0,170 0,240	0,210 0,170 0,260	0,220 0,200 0,230	
10	0,230 0,230 0,240	0,240 0,230 0,260	0,230 0,230 0,260	0,240 0,230 0,260	0,240 0,230 0,260	0,240 0,230 0,260	0,230 0,230 0,260	0,230 0,220 0,240	0,230 0,220 0,240	0,220 0,200 0,240	

Quadrant 1 V1mittel	0,228		
		Mittelwert Min. Wert Max. Wert	
Quadrant 2 V2mittel	0,2076		
Quadrant 3 V3mittel	0,233		
Quadrant 4 V4mittel	0,201		
Vgesamt, mittel	0,217		
		Vmin(10%)	0,19566
		Vmax(10%)	0,23914

Abb. 3.61: Geschwindigkeitsverteilung Turbine 2 , Vorboden (Typ3), kurzer Trennpfeiler nach Rouvé (links), kurze angeschnittene Leitwand und Rechenträger laut Plan

3.3.20 Oben geneigter Rechenträger und rundem Vorboden (VB3) Rouvé breit und lang (R2) und Leitwand (LW5)

Da die bisher beste Variante (siehe Kapitel 3.3.17) von der Steweag bei der Modellvorstellung vom 20.05.2008 aus betriebstechnischen Gründen nicht als optimal empfunden wurde, wurde als weiterer Schritt eine kompakte, rein vertikale Trennpfeilervariante mit integriertem Schlitz vorgeschlagen und untersucht (Abb. 3.64). Die Abb. 3.62 und Abb. 3.63 zeigen bereits ausgeführte Beispiele an der Mosel und an der Saar.

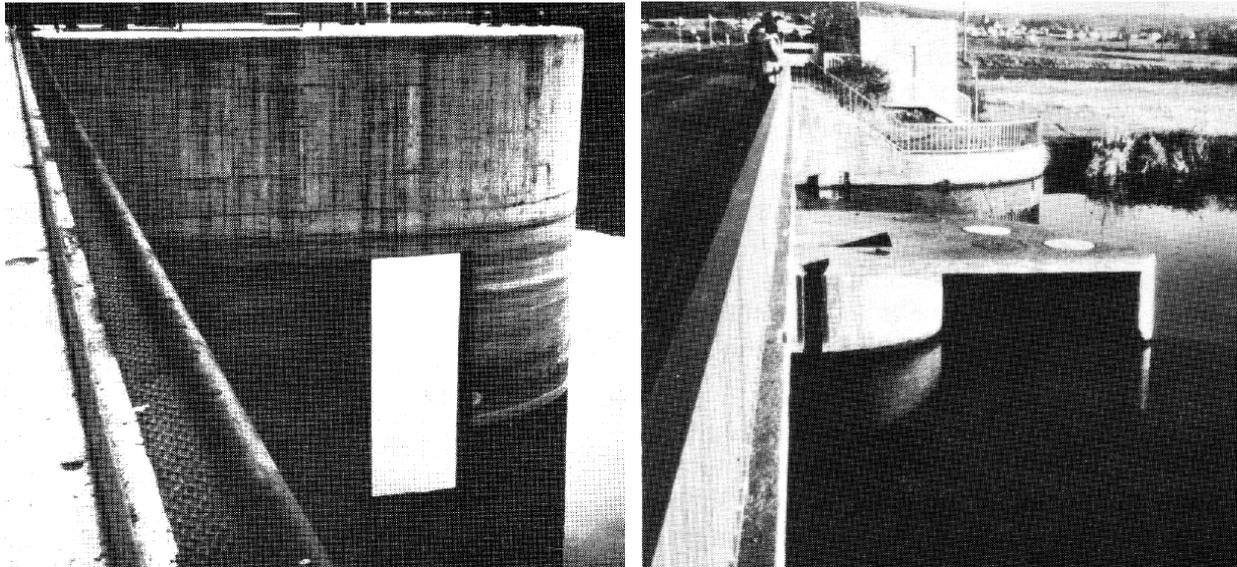


Abb. 3.62: Trennpfeilerkopf mit schaufelförmiger Leitwand an Moselstufe und Staustufe Hausen (BLIND 1987)

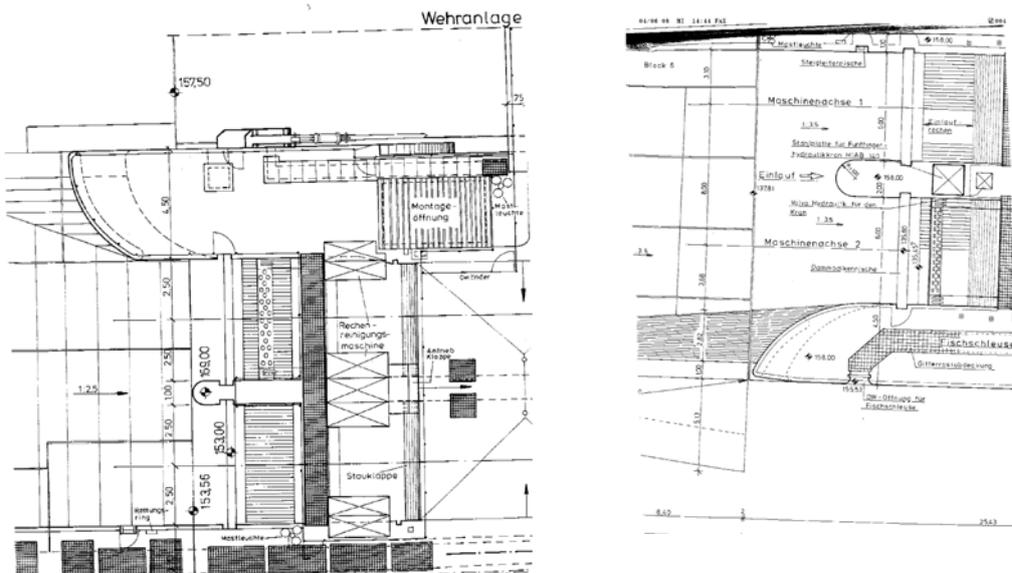


Abb. 3.63: Trennpfeiler mit Leitschaukel Saarkraftwerke Mettlach und Serring (Zur Verfügung gestellt von Fa. RWE)

Der bereits vorhandene lange Trennpfeiler nach Rouvé (R_N siehe Kapitel 3.3.13) wurde für diese Variante leicht adaptiert. Der Trennpfeiler wurde etwas breiter als der bestehende Trennpfeiler ausgeführt. Für diesen Breitengewinn wurde der Pfeiler etwas aus der Flucht in das Wehrfeld A gezogen sowie die für den Rechenreiniger vorgesehene Breite für den Pfeiler verwendet. Diese Variante stellte das Maximum an möglicher Pfeilerbreite, ohne bauliche Umplanung bzw. nicht zu großer Beeinflussung des Wehrfeldes A, dar. Für die Auflagerung von Dammbalken, müsste in der Ausführung eine Dammbalkennische vorgesehen werden. Diese könnte verschließbar ausgeführt werden.



Abb. 3.64: Rouvé lang ohne Nase (R2) und Leitwand (LW5)

Die Leitwand ist auf der Wehrseite durch einen Kreisquerschnitt ($\varnothing 2\text{cm}$) begrenzt und verjüngt sich in Richtung Turbineneinlauf. Ihr Krümmungsradius wird in Richtung Einlauf größer. Die Austrittsbreite wurde geringer gehalten als die Eintrittsbreite, damit ein Düseneffekt erzielt wird.

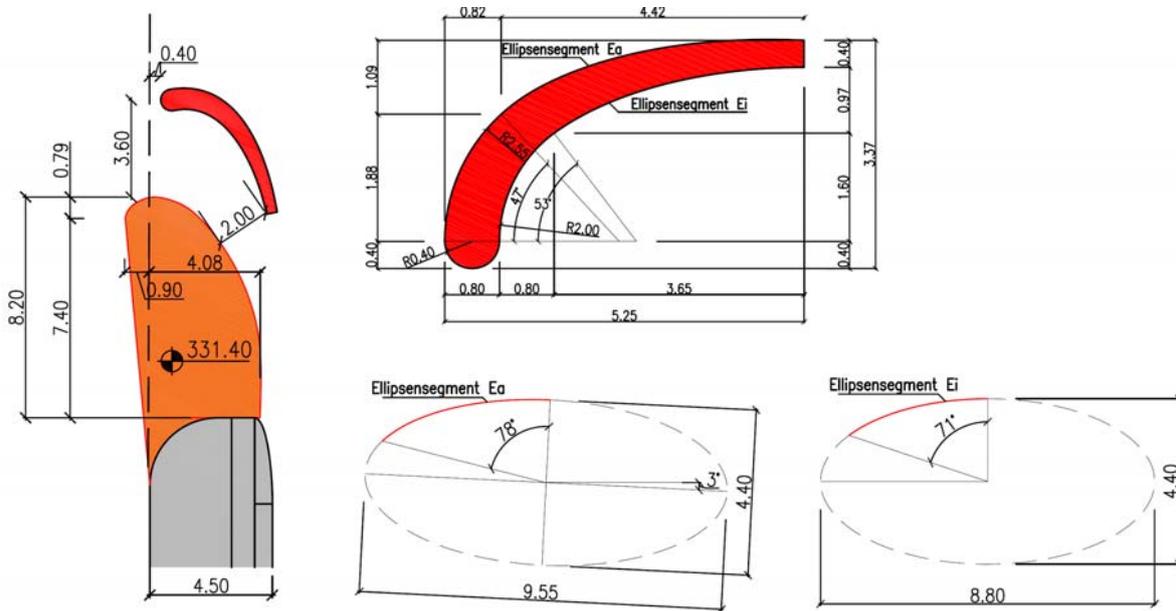


Abb. 3.65: Geometrien der Variante Rouvé lang ohne Nase (R2) und Leitwand (LW5)

Die konstruktiv vorzusehende Geschwemmselabwehr bzw. Verbindungssteg mit Öffnungen (siehe z.B. Abb. 3.62) wurde bei den vorliegenden Versuchen vernachlässigt.

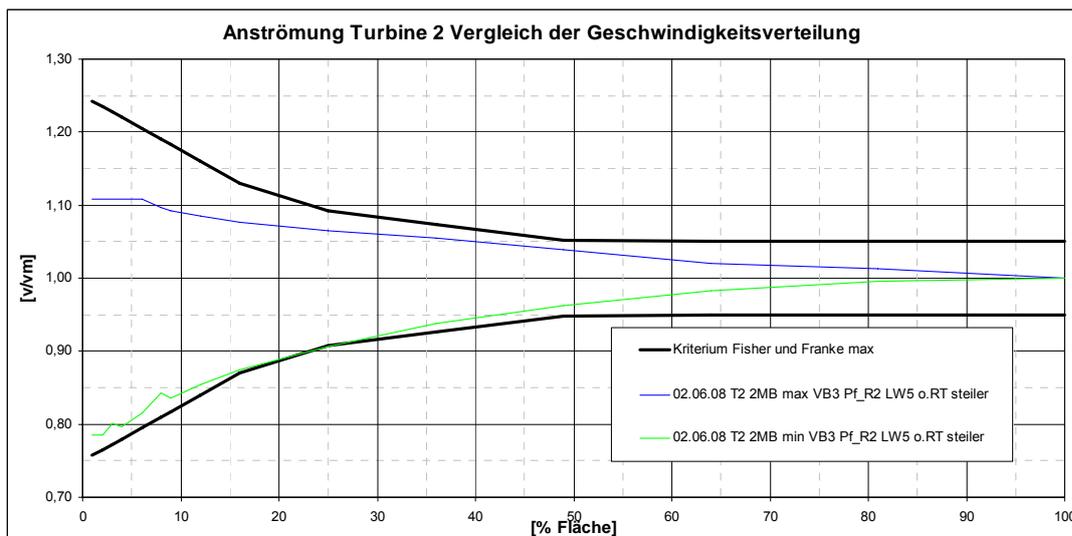


Abb. 3.66: Verteilung der bezogenen Geschwindigkeiten der Turbine 2 neuer Vorboden (VB3), Trennpfeiler (R2) und Leitwand (LW5).

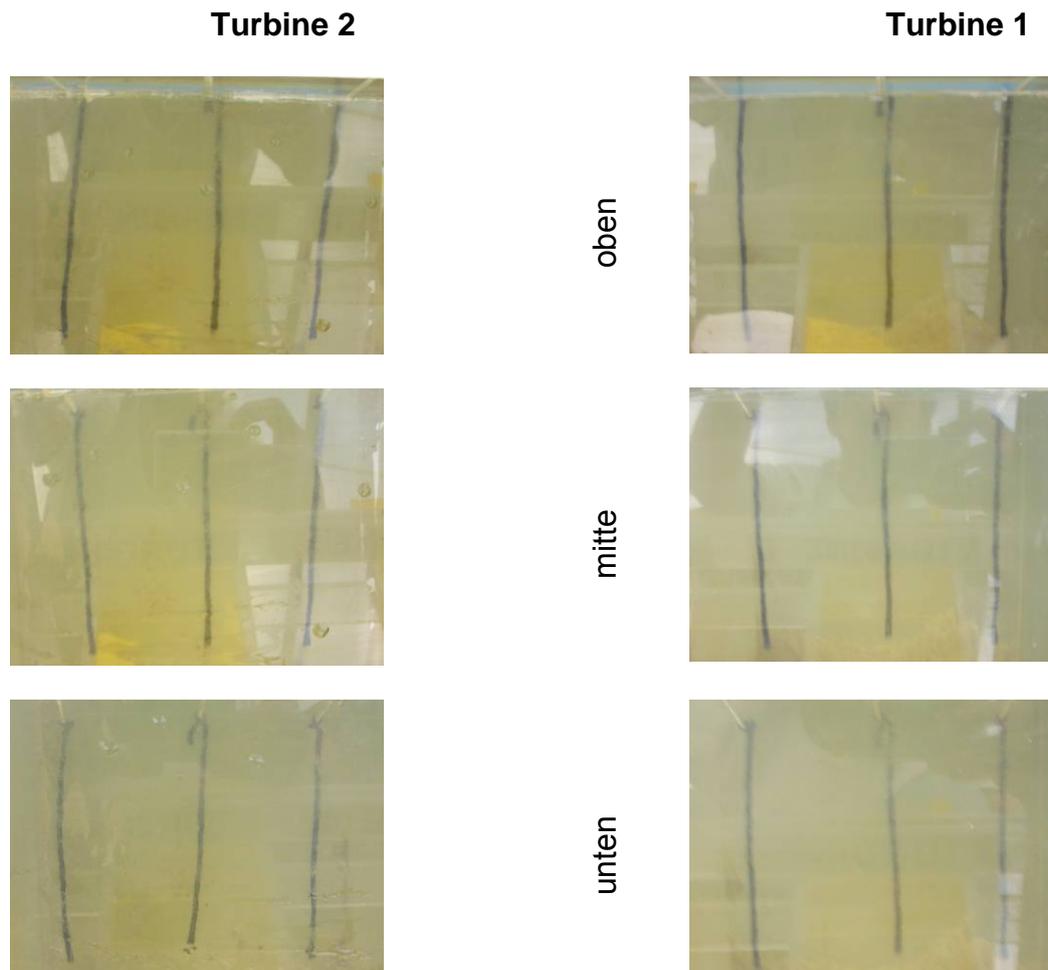


Abb. 3.67: Strömungsbedingungen Turbine 2 und 1, neuer Vorboden (VB3), langer Trennpfeiler nach Rouvé (R2) und kurze Leitwand (LW5)

Die Strömungsverhältnisse an der Turbine 2 wurden durch diese Variante gleichmäßig (Abb. 3.67), wobei sie bei der Turbine 1 gleich blieben.

Die Fließgeschwindigkeiten in den Quadranten I und III (siehe Abb. 3.69) waren nicht mehr so hoch wie bei der Variante mit kurzem Trennpfeiler und Leitwand, da sich die Geschwindigkeiten in den anderen beiden Quadranten gleichmäßigten. Dadurch konnte das Kriterium nach Fisher und Franke eingehalten werden (Abb. 3.66).

Die Anströmverhältnisse vor der Rechenebene sind in Abb. 3.68 für die Varianten mit und ohne Leitwand dargestellt. Man sieht die deutlich besseren Strömungsverhältnisse mit Leitwand.

Diese Variante stellte bis dahin die beste Konfiguration für die Anströmung der Turbine 2 dar.

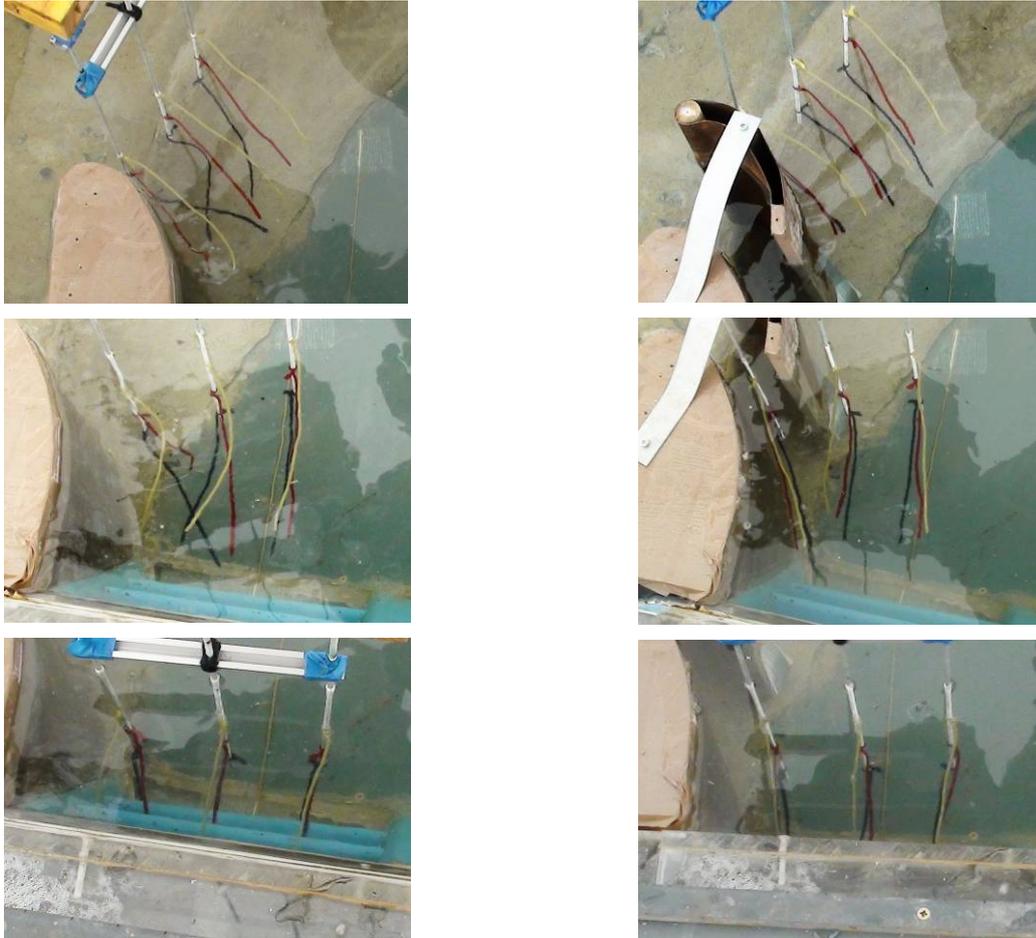
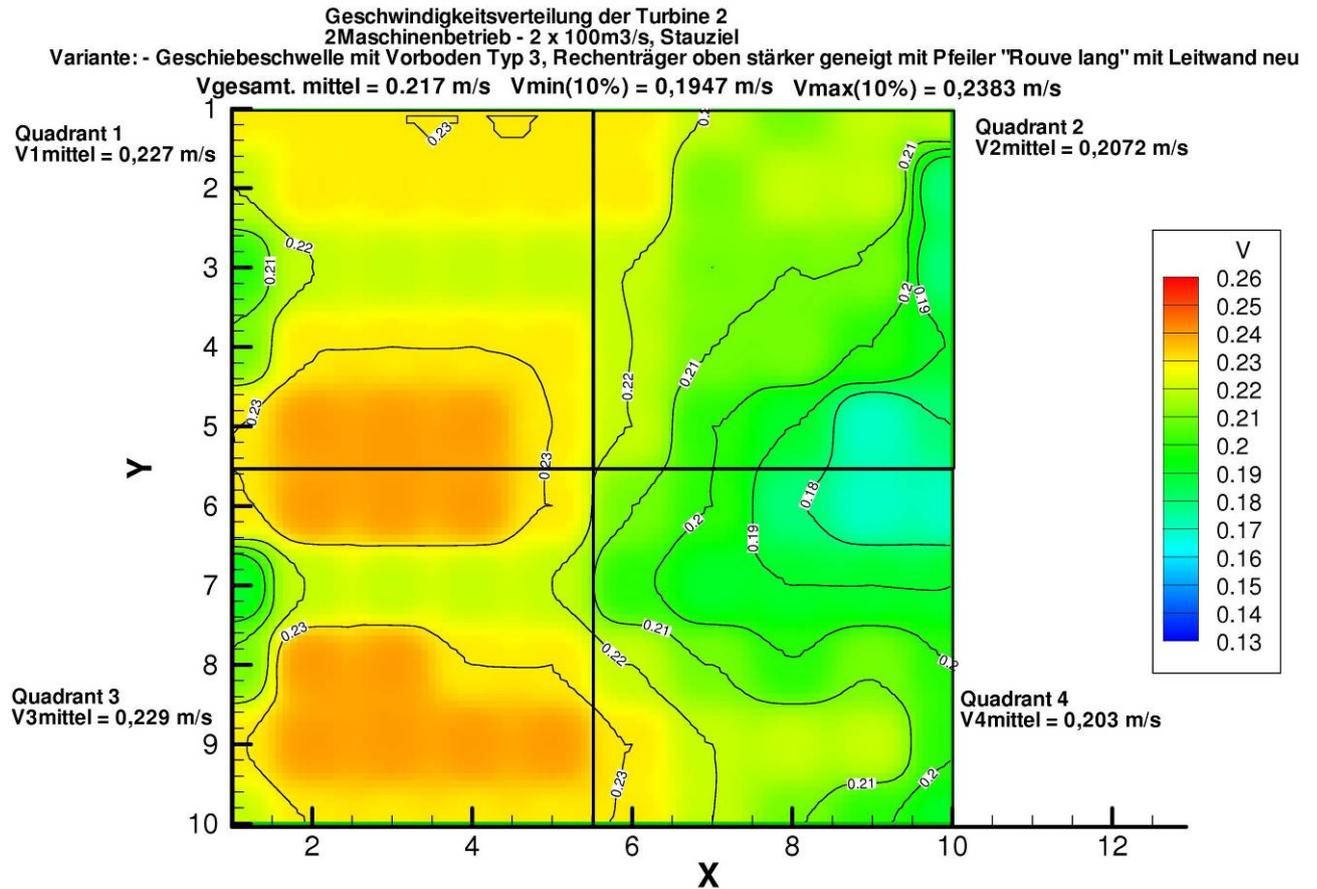


Abb. 3.68: Rouvé lang (R2) ohne Nase mit Stromfäden, links ohne Leitwand und rechts mit Leitwand (LW5)



Geschwindigkeitsverteilung der Turbine 2 (2 Maschinenbetrieb - 2 x 100m³/s), Stauziel
 Variante: - Geschiebeschwelle mit Vorboden Typ 3, Rechenträger oben stärker geneigt mit Pfeiler "Rouvé lang" und Leitwand neu
 Gemessene Modellwerte

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
1	0,230 0,230 0,260	0,230 0,220 0,260	0,230 0,200 0,260	0,230 0,190 0,260	0,230 0,220 0,260	0,230 0,220 0,260	0,220 0,200 0,240	0,210 0,170 0,240	0,220 0,190 0,240	0,220 0,190 0,240	0,220 0,190 0,240	I
2	0,220 0,200 0,240	0,230 0,220 0,240	0,230 0,230 0,260	0,230 0,200 0,240	0,230 0,220 0,240	0,230 0,220 0,240	0,210 0,190 0,240	0,220 0,200 0,240	0,210 0,190 0,240	0,220 0,170 0,240	0,180 0,160 0,220	II
3	0,200 0,190 0,230	0,220 0,220 0,240	0,220 0,220 0,240	0,220 0,220 0,240	0,220 0,200 0,240	0,220 0,200 0,240	0,210 0,170 0,230	0,210 0,190 0,230	0,210 0,190 0,240	0,200 0,170 0,230	0,180 0,170 0,220	
4	0,210 0,190 0,230	0,230 0,220 0,240	0,230 0,230 0,260	0,230 0,230 0,240	0,230 0,190 0,260	0,230 0,200 0,240	0,220 0,200 0,240	0,210 0,190 0,240	0,210 0,190 0,240	0,200 0,170 0,230	0,190 0,170 0,220	
5	0,230 0,230 0,240	0,240 0,230 0,260	0,240 0,230 0,260	0,240 0,220 0,260	0,230 0,220 0,260	0,230 0,170 0,230	0,200 0,170 0,230	0,200 0,150 0,230	0,180 0,150 0,220	0,170 0,150 0,220	0,170 0,160 0,220	
6	0,230 0,230 0,240	0,240 0,230 0,260	0,240 0,240 0,260	0,240 0,230 0,260	0,230 0,220 0,260	0,210 0,200 0,230	0,200 0,190 0,220	0,180 0,150 0,220	0,180 0,150 0,220	0,170 0,150 0,220	0,170 0,150 0,200	
7	0,190 0,170 0,220	0,220 0,220 0,240	0,220 0,220 0,240	0,220 0,220 0,240	0,220 0,220 0,240	0,200 0,170 0,230	0,190 0,170 0,230	0,190 0,160 0,220	0,190 0,160 0,220	0,190 0,160 0,220	0,190 0,170 0,260	III
8	0,210 0,190 0,230	0,240 0,230 0,260	0,240 0,240 0,260	0,230 0,230 0,260	0,230 0,220 0,260	0,220 0,190 0,240	0,210 0,190 0,240	0,200 0,170 0,230	0,210 0,160 0,240	0,200 0,160 0,240	0,200 0,170 0,240	IV
9	0,230 0,230 0,240	0,240 0,230 0,260	0,240 0,240 0,260	0,240 0,200 0,260	0,240 0,200 0,260	0,230 0,200 0,260	0,220 0,200 0,240	0,220 0,200 0,240	0,220 0,200 0,240	0,220 0,200 0,240	0,200 0,170 0,230	
10	0,220 0,200 0,230	0,230 0,220 0,240	0,230 0,220 0,240	0,230 0,220 0,240	0,230 0,220 0,260	0,230 0,220 0,240	0,220 0,220 0,240	0,210 0,190 0,240	0,200 0,170 0,230	0,200 0,170 0,230	0,190 0,170 0,220	

Quadrant 1 V1mittel 0,227	Mittelwert Min. Wert Max. Wert	Quadrant 2 V2mittel 0,2072
Quadrant 3 V3mittel 0,229		Quadrant 4 V4mittel 0,203
Vgesamt, mittel 0,217		Vmin(10%) 0,19494 Vmax(10%) 0,23826

Abb. 3.69: Geschwindigkeitsverteilung Turbine 2 , neuer Vorboden (Typ3), langer Trennpfeiler nach Rouvé (R2) und Leitwand (LW5)

3.3.21 Rouvé schmal mit Knick und lang (R3) und neue Leitwand (LW6)

Da die bisher beste Variante (siehe Kapitel 3.3.20) geringfügig von den Vorgaben der Steweag abweichte (siehe Kapitel 4.2.1), wurde mit den weitergehenden Varianten versucht akzeptable Alternativen vorzuschlagen.

Bei dieser Variante (Abb. 3.70) wurde die Pfeilerlänge beibehalten jedoch die Breite auf die vorhandene Pfeilerbreite reduziert, um so die Aufstandsfläche für einen etwaigen Rechenreiniger bzw. die Dammbalken zu gewährleisten. Ebenso wurde die Leitwand so situiert, dass sie in der Flucht des Trennpfeilers zu liegen kommt.

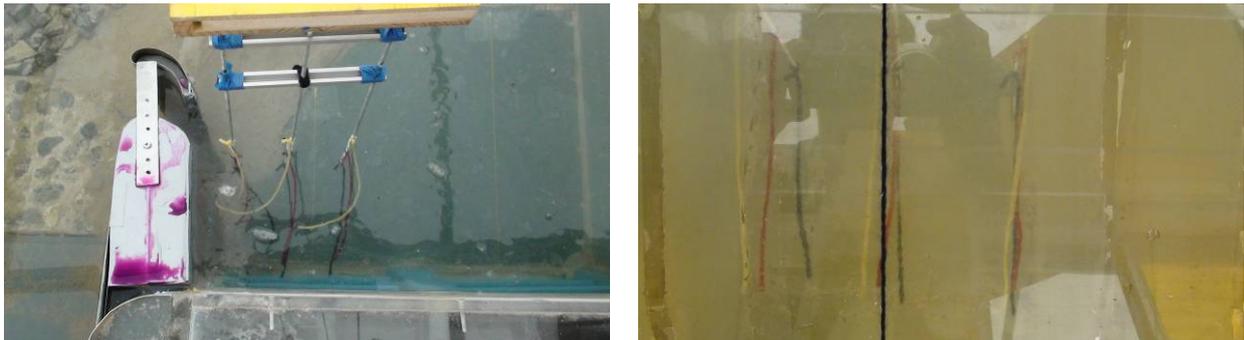


Abb. 3.70: Rouvé schmal und lang mit Knick (R3) und neue Leitwand Typ6 und Strömungsbedingung nach Messebene

Es kam dabei zu starken Abrisswirbel im Vorfeld zur Rechenebene sowie zu sehr kleinen Fließgeschwindigkeiten an der bekannt kritischen Stelle (H10/V4) mit und ohne Leitwand. Durch eine etwas größere Leitwand werden die Geschwindigkeitswerte etwas besser, wobei die Leitwand nicht mehr in der Flucht des Trennpfeilers zu liegen kommen würde.

3.3.2 Rouvé schmal und mittellang (R4) und Leitwand (LW5)

Da die vorhergehende Variante zu einer schlechten Anströmung führte, wurde mit dieser weiteren Variante (Abb. 3.71 und Abb. 3.72) versucht einen anderen akzeptablen Mittelweg zwischen den erfolgreichen Varianten in Kapitel 3.3.17 und Kapitel 3.3.20 zu finden.

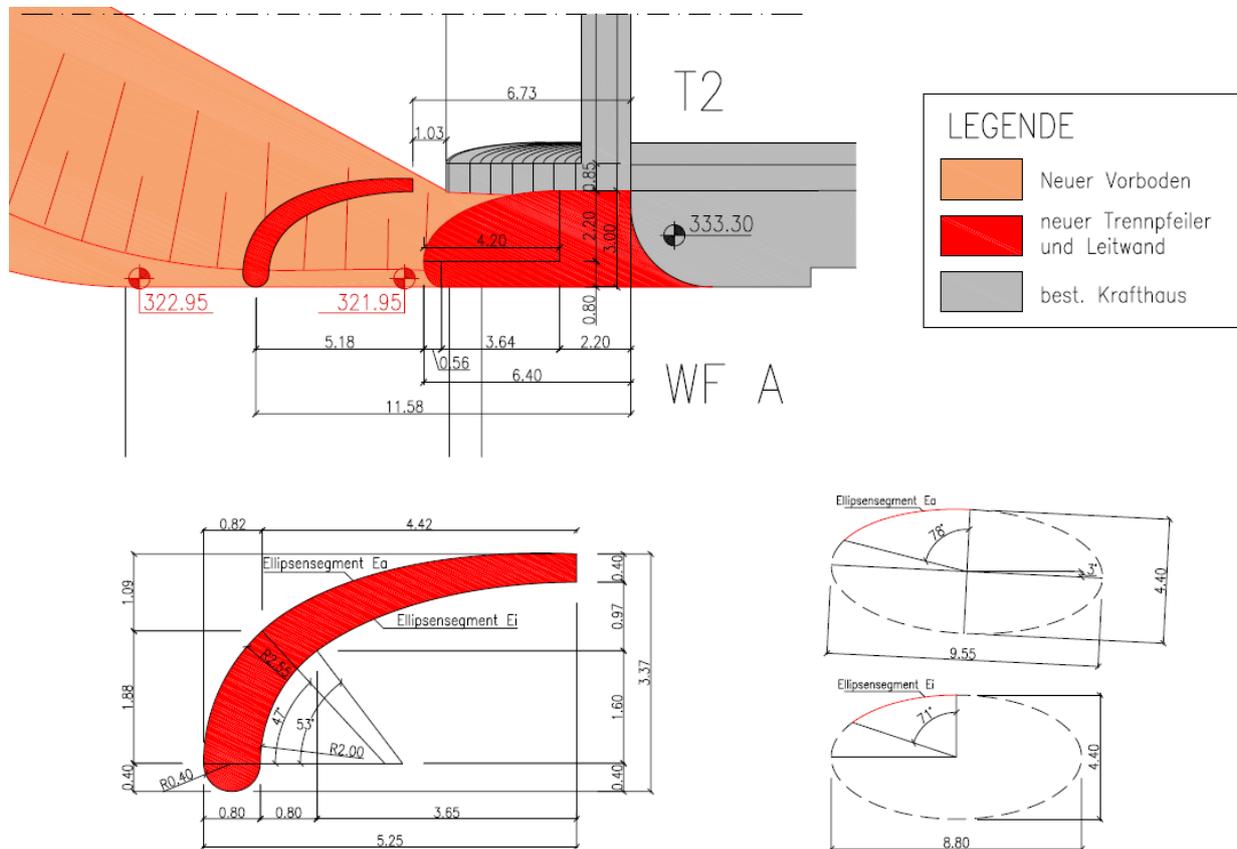


Abb. 3.71: Rouvé schmal und mittellang (R4) und Leitwand (LW5) - Geometrie

Dabei sollten der Pfeiler und die Leitwand in der Flucht des bestehenden Pfeilers bzw. Krafthauses ausgeführt sein und aus konstruktiven und betrieblichen Gründen (Reinigung, Bau, etc.) vertikal stehen.

Bereits aus den qualitativen Betrachtungen der Stromfäden (Abb. 3.74 und Abb. 3.75) wurde ersichtlich, dass die Strömung diese Variante bei der Turbine 2 geringfügig turbulenter als die erfolgreichen Vorgängervarianten war. Die Turbine 1 wurde im 2MB gut und im 1MB etwas turbulenter angeströmt.

Es kam zu einer guten Umströmung der Leitwand mit geringem Strömungsabriss, wobei hinter der Leitwand, wie bei den vorherigen Varianten auch, Wirbel bzw. Turbulenzen entstehen. Dieser Turbulenzbereich verbindet sich, zu einem kreiselnden Wirbel auf Grund der geringen Überdeckungshöhe. Wie bereits aus vorhergehenden Versuchen bekannt, vergleichmäßigte sich die Strömung geringfügig bereits bis zur Rechenebene (Abb. 3.74).

In der Messebene (Abb. 3.75) lag bei Turbine 1 im 2MB eine ruhige Strömung vor, während bei 1MB bereits geringfügige Turbulenzen im Randbereich festzustellen waren. Besonders im Quadrant II zeigten bei Turbine 2 im 2MB die nahe beim

Trennpfeiler liegenden Wollfäden turbulente Zustände an. Im 1MB schien die Turbulenz ähnlich der bei 2MB.



Abb. 3.72: Rouvé schmal und mittellang (R4) und Leitwand (LW5) - Fotos

Aus den quantitativen Messungen (siehe Abb. 3.79 bis Abb. 3.82) können diese qualitativen Betrachtungen gut nachvollzogen werden. Im 1MB verbesserte sich die Anströmung der Turbine 2, während die Turbine 1 etwas schlechter angeströmt wurde. Besonders der Fall der Turbine 1 ist klar nachzuvollziehen, da im 1MB der Krafthausmittelpfeiler nun als Trennpfeiler wirken muss, jedoch nicht die dafür notwendige optimale Form bzw. Breite besitzt. Dadurch kommt es zu Abrissen der Strömung in den Quadranten II und IV. Es wäre zu überlegen den mittleren Turbinentrennpfeiler für den 1MB weiter zu optimieren.

Besonders gut lassen sich die quantitativen Ergebnisse durch die Darstellung in Abb. 3.76 und Abb. 3.77 darstellen. Besonders im maßgeblichen 2MB bei der Turbine 2 liegt diese Variante gut im Vergleich mit den anderen Leitwandvarianten (siehe Abb. 3.78) ohne jedoch andere Kriterien der Steweag zu verletzen. Generell ist zu sagen, dass diese Variante in allen Betriebszuständen relativ konstante Ergebnisse lieferte und als Ausführungsvariante empfohlen werden kann.

Die Auswirkungen dieser Variante auf den Hochwasserfall sind noch separat zu untersuchen.

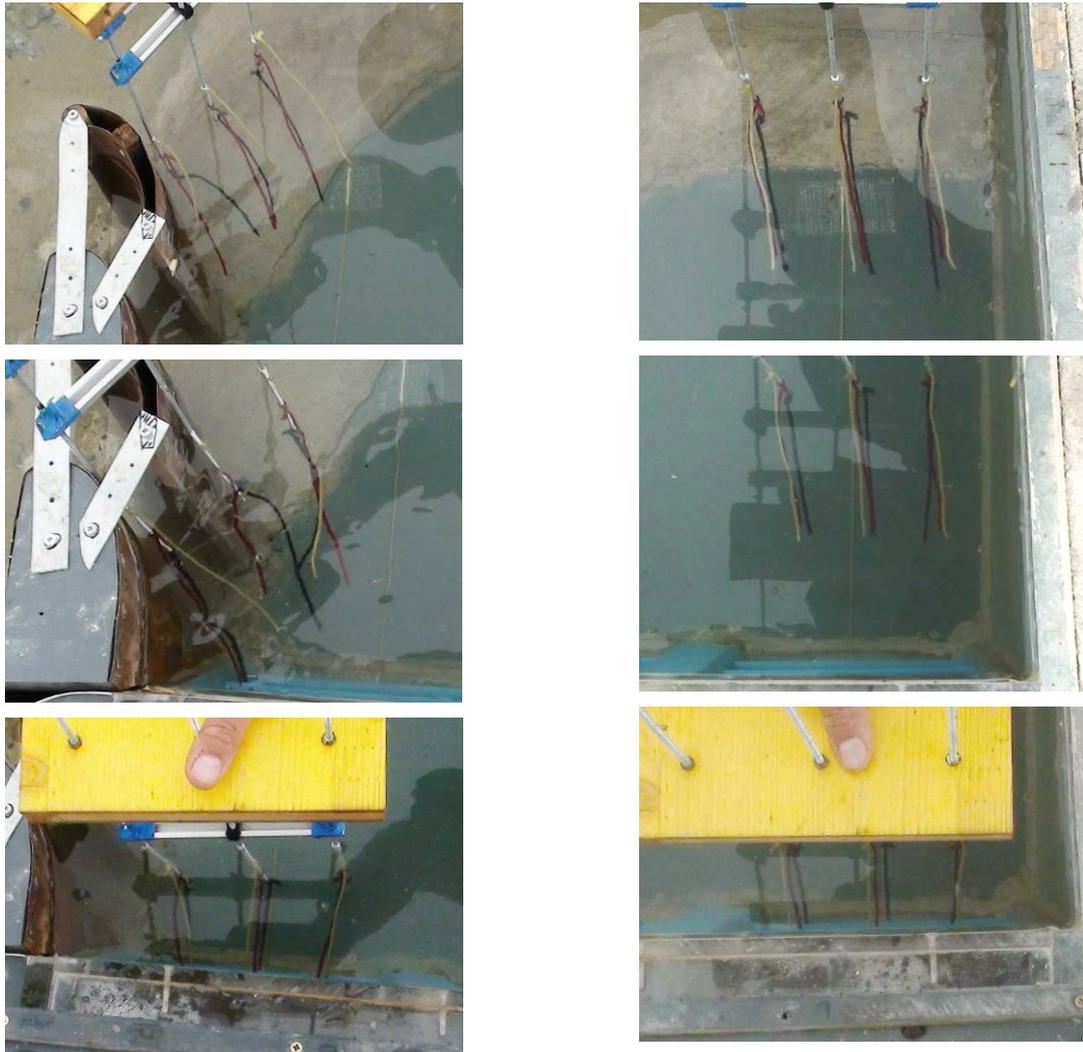


Abb. 3.73: Pfeiler R4 und Leitwand (LW5) – Stromfäden vor Rechenebene T1 2MB (QA=20.5 l/s). Links T2 und rechts T1 (Fließrichtung von oben nach unten)



Abb. 3.74: R4 und Leitwand (LW5) – Stromfäden vor Rechenebene T2 2MB (32 l/s)

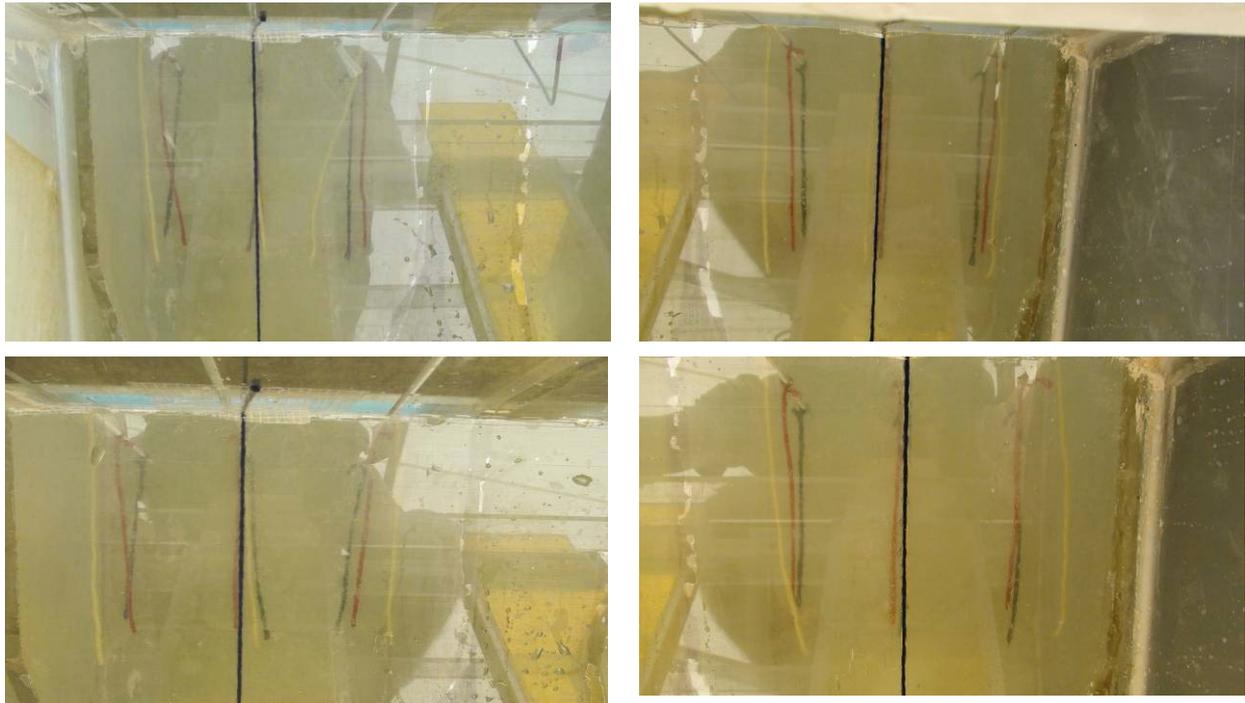


Abb. 3.75: Peiler R4 und Leitwand (LW5) – Stromfäden nach Messebene. Oben mit 2MB und unten mit 1MB. Links T2 und rechts T1 (Fließrichtung von oben nach unten)

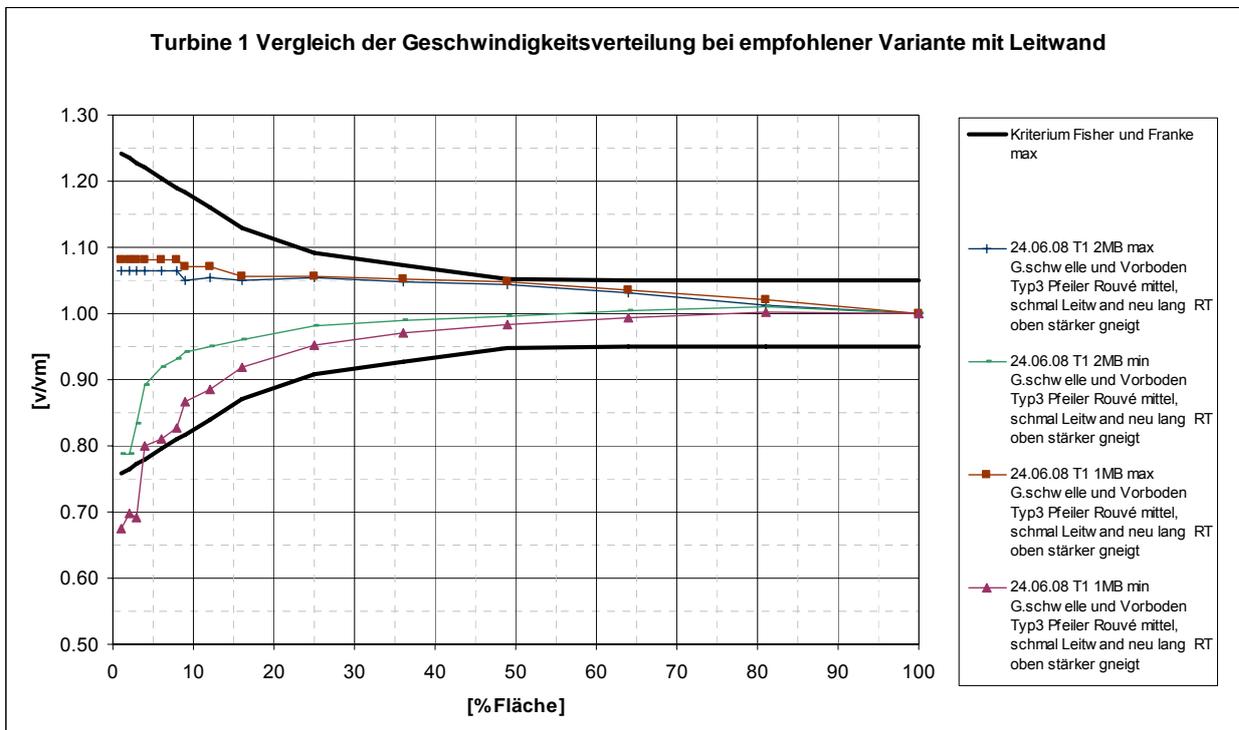


Abb. 3.76: Verteilung der bezogenen Geschwindigkeiten der Turbine 1 neuer Vorboden (VB3), Trennpfeiler (R4) und Leitwand (LW5). 1MB und 2MB

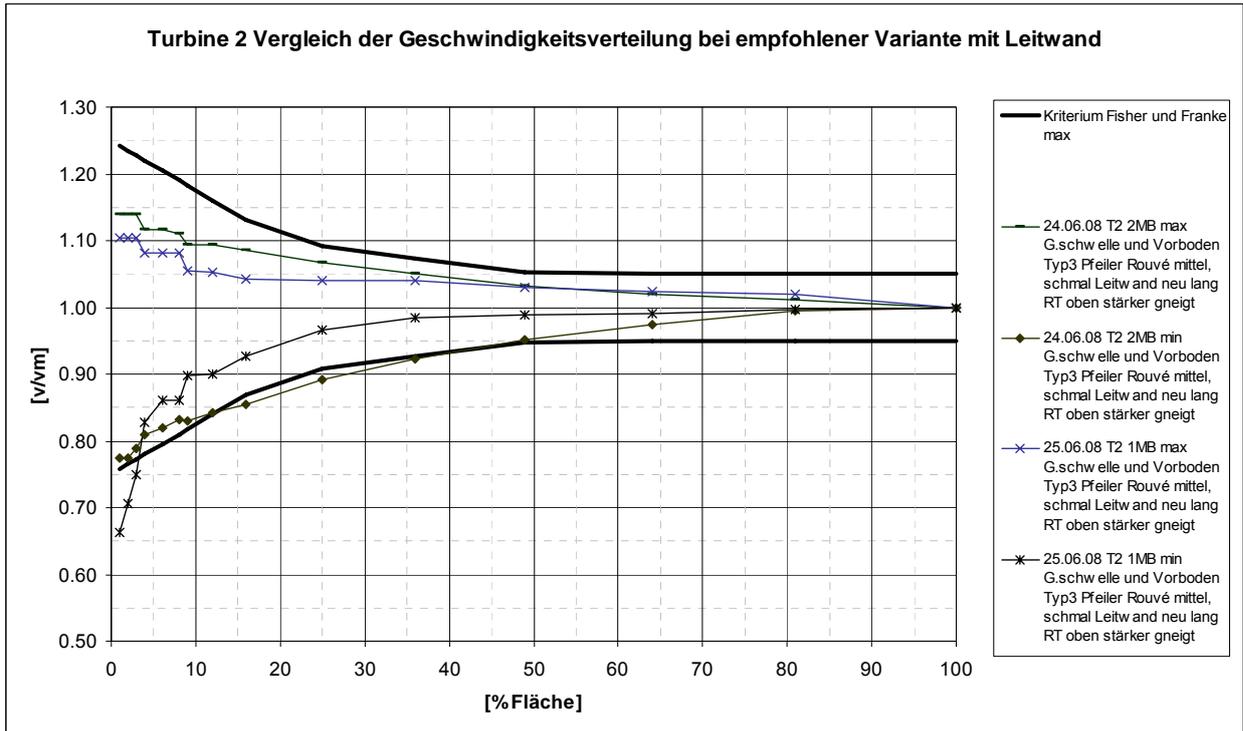


Abb. 3.77: Verteilung der bezogenen Geschwindigkeiten der Turbine 2 neuer Vorboden (VB3), Trennpfeiler (R4) und Leitwand (LW5). 1MB und 2MB

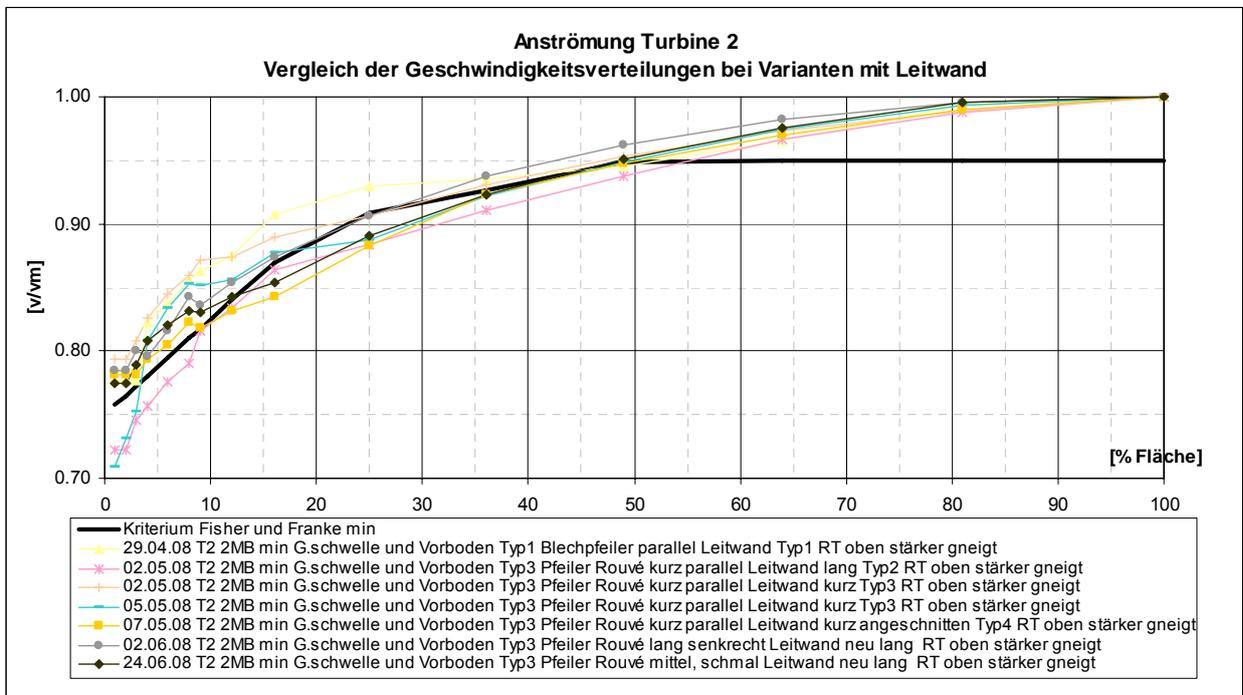
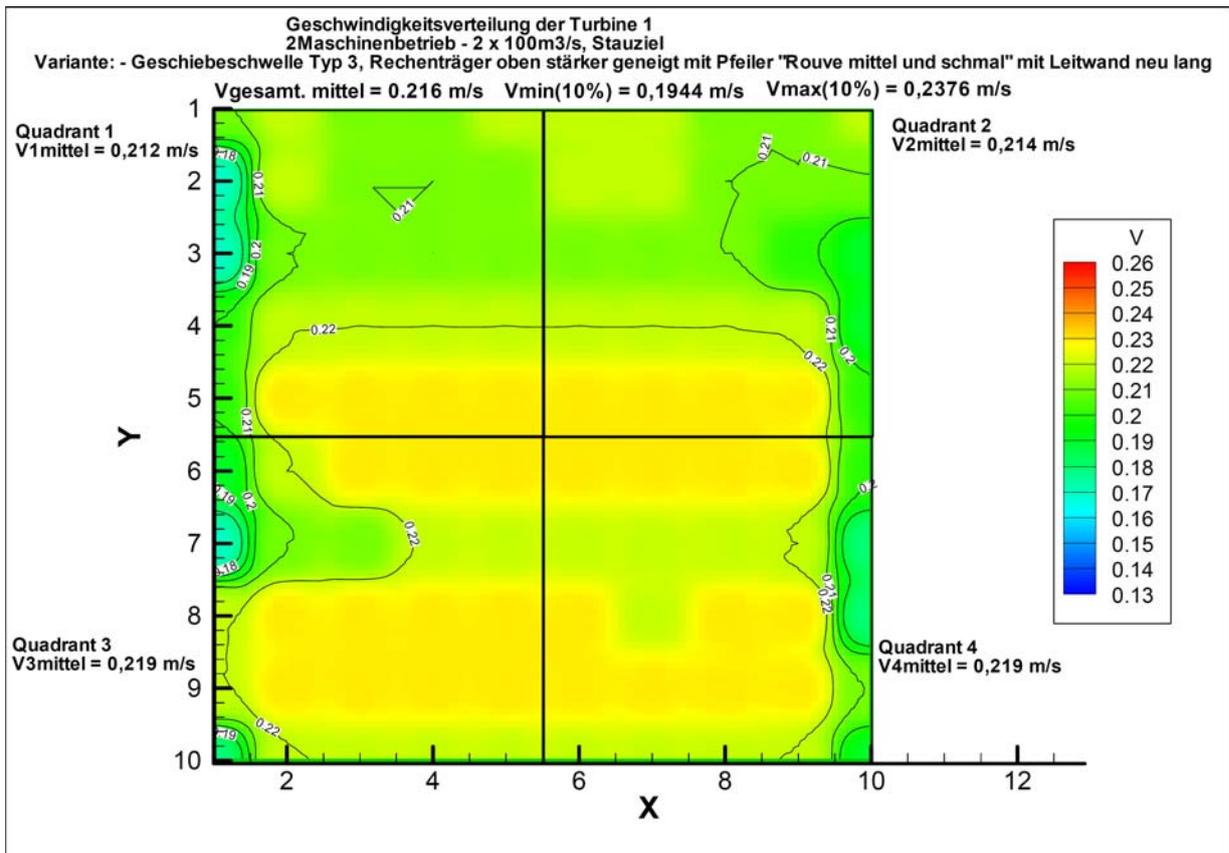


Abb. 3.78: Vergleich der Verteilungen der bezogenen Geschwindigkeiten (nur unterer Ast) bei der Turbine 2 bei Varianten mit Leitwand.

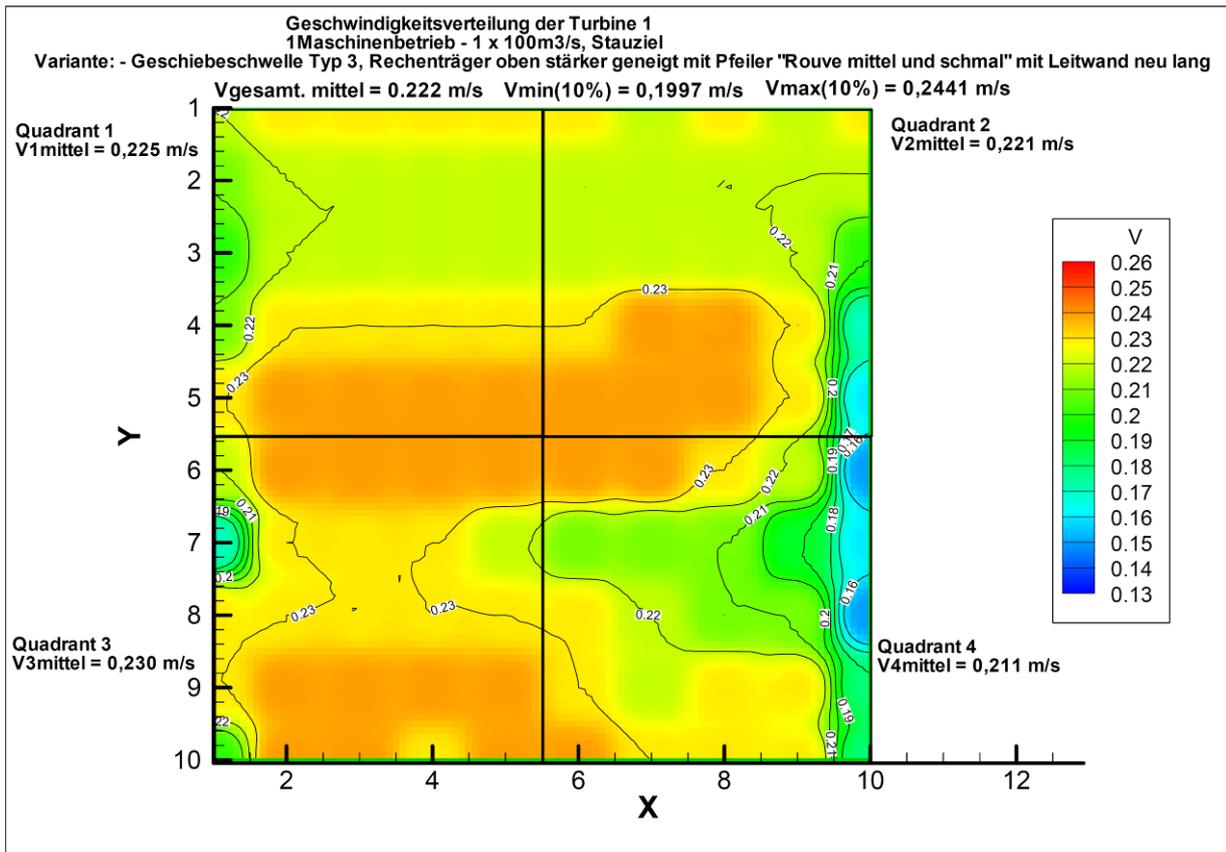


Geschwindigkeitsverteilung der Turbine 1 (2 Maschinenbetrieb - 2 x 100m³/s), Stauziel
 Variante: - Geschiebeschwelle mit Vorboden Typ 3, Rechenträger oben stärker geneigt mit Pfeiler "Rouvé mittel (l=15cm, b=7,5cm)" und Leitwand neu lang
 Gemessene Modellwerte

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I	0,210 0,200	0,220 0,200	0,210 0,230	0,210 0,230	0,220 0,230	0,220 0,230	0,220 0,230	0,210 0,230	0,210 0,230	0,220 0,230
2	0,170 0,150	0,220 0,200	0,210 0,230	0,210 0,230	0,210 0,230	0,220 0,230	0,220 0,230	0,210 0,230	0,210 0,230	0,210 0,230
3	0,170 0,150	0,210 0,200	0,210 0,230	0,210 0,230	0,210 0,230	0,210 0,230	0,210 0,230	0,210 0,230	0,200 0,220	0,190 0,200
4	0,200 0,180	0,220 0,220	0,220 0,230	0,220 0,240	0,220 0,230	0,220 0,240	0,220 0,230	0,220 0,230	0,220 0,230	0,190 0,220
5	0,200 0,170	0,230 0,220	0,230 0,240	0,200 0,230						
6	0,190 0,170	0,220 0,210	0,230 0,240	0,200 0,220						
7	0,180 0,160	0,200 0,200	0,230 0,230	0,180 0,200						
8	0,220 0,220	0,230 0,240	0,180 0,240							
9	0,220 0,200	0,230 0,240	0,210 0,230							
10	0,180 0,150	0,220 0,200	0,220 0,230	0,190 0,220						

Quadrant 1 V1mittel	0,212	Mittelwert Min. Wert Max. Wert	Quadrant 2 V2mittel	0,2144
Quadrant 3 V3mittel	0,219		Quadrant 4 V4mittel	0,219
Vgesamt. mittel	0,216		Vmin(10%)	0,1944
			Vmax(10%)	0,2376

Abb. 3.79: Geschwindigkeitsverteilung Turbine 1 2MB , neuer Vorboden (VB3), mittlerer Trennpfeiler nach Rouvé (R4), und Leitwand (LW5)

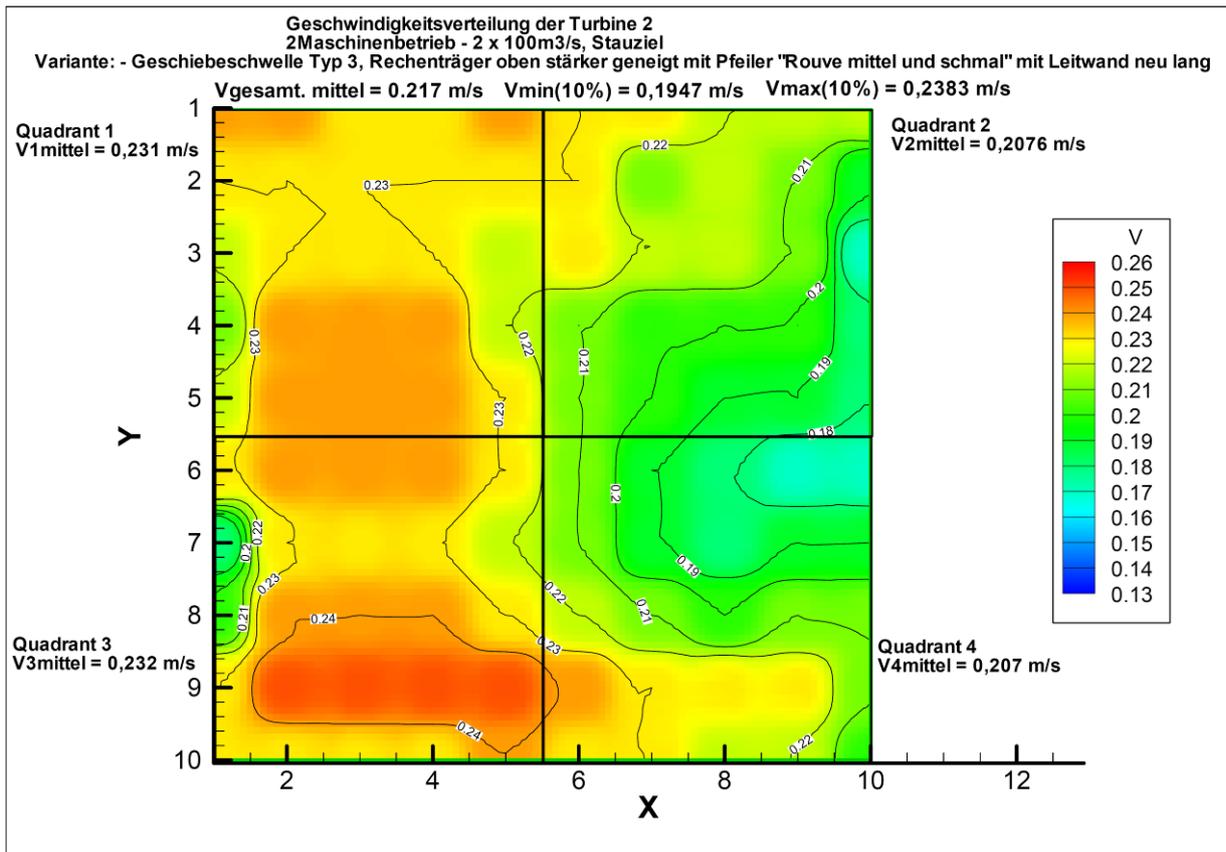


Geschwindigkeitsverteilung der Turbine 1 (1 Maschinenbetrieb - 1 x 100m³/s), Stauziel
 Variante: - Geschiebeschwelle mit Vorboden Typ 3, Rechenträger oben stärker geneigt mit Pfeiler "Rouve mittel (l=15cm,b=7,5cm" und Leitwand neu lang
 Gemessene Modellwerte

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
I	1	0,220 0,200 0,240	0,230 0,220 0,240	0,230 0,220 0,240	0,230 0,230 0,240	0,230 0,220 0,240	0,230 0,220 0,240	0,220 0,220 0,240	0,230 0,220 0,240	0,220 0,220 0,240	0,230 0,230 0,230	II	
	2	0,210 0,200 0,240	0,220 0,220 0,240	0,220 0,220 0,230	0,220 0,220 0,230	0,220 0,200 0,230	0,220 0,220 0,230		0,220 0,220 0,230				
III	3	0,200 0,190 0,220	0,220 0,220 0,230	0,220 0,200 0,230	0,220 0,200 0,230	0,200 0,200 0,220	IV						
	4	0,210 0,200 0,230	0,230 0,230 0,240	0,230 0,230 0,240	0,230 0,230 0,240	0,230 0,230 0,260	0,230 0,230 0,260	0,240 0,230 0,260	0,240 0,230 0,260	0,240 0,230 0,260	0,230 0,200 0,240	0,170 0,160 0,190	
	5	0,230 0,230 0,260	0,240 0,230 0,260	0,240 0,230 0,260	0,240 0,230 0,260	0,240 0,240 0,260	0,240 0,230 0,260	0,240 0,240 0,260	0,240 0,240 0,260	0,240 0,240 0,260	0,230 0,200 0,260	0,160 0,130 0,190	
	6	0,220 0,220 0,240	0,240 0,230 0,260	0,240 0,240 0,260	0,240 0,240 0,260	0,240 0,230 0,260	0,240 0,230 0,260	0,240 0,230 0,260	0,230 0,220 0,260	0,220 0,170 0,240	0,220 0,110 0,200	0,150 0,110 0,200	
	7	0,170 0,150 0,200	0,230 0,220 0,240	0,230 0,220 0,240	0,230 0,220 0,240	0,220 0,200 0,260	0,210 0,200 0,240	0,210 0,200 0,240	0,210 0,190 0,230	0,190 0,160 0,230	0,160 0,120 0,190	0,160 0,120 0,190	
	8	0,230 0,220 0,240	0,230 0,230 0,260	0,230 0,230 0,240	0,230 0,220 0,240	0,230 0,230 0,240	0,230 0,220 0,260	0,220 0,190 0,240	0,220 0,190 0,240	0,210 0,150 0,240	0,210 0,120 0,190	0,150 0,120 0,190	
	9	0,230 0,220 0,240	0,240 0,240 0,260	0,240 0,240 0,260	0,240 0,240 0,260	0,240 0,240 0,260	0,230 0,220 0,260	0,220 0,200 0,260	0,230 0,200 0,270	0,230 0,200 0,260	0,180 0,120 0,240	0,180 0,120 0,240	
	10	0,200 0,170 0,230	0,240 0,240 0,260	0,240 0,230 0,260	0,230 0,230 0,260	0,240 0,230 0,260	0,240 0,230 0,260	0,230 0,230 0,260	0,230 0,230 0,260	0,230 0,220 0,260	0,230 0,150 0,220	0,180 0,150 0,220	

	<table border="1" style="margin: auto;"> <tr><th colspan="2">Mittelwert</th></tr> <tr><td>Min. Wert</td><td>Max. Wert</td></tr> </table>	Mittelwert		Min. Wert	Max. Wert	
Mittelwert						
Min. Wert	Max. Wert					
Quadrant 1 V1mittel	0,225	Quadrant 2 V2mittel	0,2212			
Quadrant 3 V3mittel	0,230	Quadrant 4 V4mittel	0,211			
Vgesamt. mittel	0,222	Vmin(10%)	0,19971			
		Vmax(10%)	0,24409			

Abb. 3.80: Geschwindigkeitsverteilung Turbine 1 1MB , neuer Vorboden (VB3), mittlerer Trennpfeiler nach Rouvé (R4), und Leitwand (LW5)

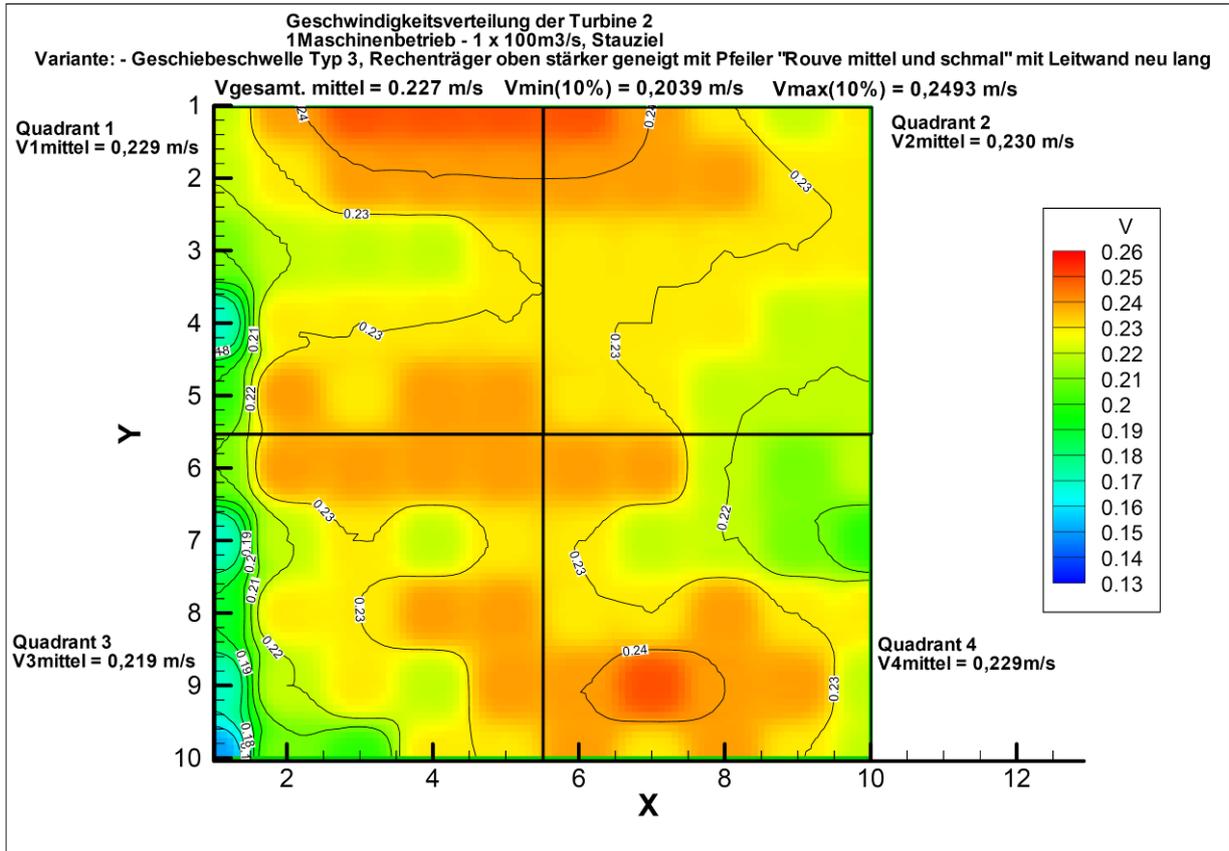


Geschwindigkeitsverteilung der Turbine 2 (2 Maschinenbetrieb - 2 x 100m³/s), Stauziel
 Variante: - Geschiebeschwelle mit Vorboden Typ 3, Rechenträger oben stärker geneigt mit Pfeiler "Rouvé lang" und Leitwand neu
 Gemessene Modellwerte

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
1	0,240 0,230 0,260	0,240 0,220 0,260	0,230 0,190 0,260	0,230 0,230 0,260	0,240 0,220 0,260	0,230 0,200 0,260	0,230 0,200 0,240	0,220 0,170 0,260	0,220 0,170 0,240	0,220 0,170 0,240	0,220 0,170 0,240	
2	0,230 0,200 0,240	0,230 0,200 0,260	0,230 0,220 0,260	0,230 0,220 0,240	0,230 0,220 0,270	0,230 0,200 0,240	0,210 0,170 0,240	0,220 0,190 0,240	0,220 0,200 0,230	0,210 0,190 0,240	0,190 0,150 0,230	
3	0,220 0,200 0,240	0,230 0,220 0,260	0,230 0,220 0,240	0,230 0,220 0,240	0,220 0,200 0,270	0,220 0,220 0,260	0,220 0,190 0,240	0,220 0,200 0,240	0,200 0,200 0,230	0,210 0,190 0,240	0,170 0,150 0,230	
4	0,210 0,190 0,230	0,240 0,230 0,260	0,240 0,230 0,260	0,240 0,220 0,260	0,220 0,170 0,260	0,210 0,160 0,260	0,200 0,160 0,240	0,200 0,170 0,260	0,200 0,160 0,240	0,200 0,160 0,240	0,180 0,160 0,220	
5	0,220 0,200 0,240	0,240 0,230 0,260	0,240 0,230 0,270	0,240 0,230 0,260	0,230 0,220 0,260	0,230 0,170 0,240	0,200 0,160 0,230	0,190 0,150 0,230	0,190 0,150 0,230	0,180 0,150 0,230	0,180 0,150 0,230	
6	0,230 0,230 0,240	0,240 0,230 0,270	0,240 0,240 0,260	0,240 0,230 0,260	0,230 0,200 0,260	0,210 0,170 0,260	0,190 0,160 0,230	0,180 0,150 0,230	0,170 0,130 0,220	0,170 0,150 0,220	0,170 0,150 0,230	
7	0,180 0,170 0,200	0,230 0,230 0,240	0,230 0,220 0,240	0,230 0,220 0,240	0,220 0,200 0,240	0,210 0,170 0,230	0,190 0,160 0,230	0,180 0,160 0,220	0,190 0,170 0,220	0,190 0,170 0,220	0,190 0,160 0,220	
8	0,200 0,190 0,230	0,240 0,240 0,260	0,240 0,240 0,260	0,240 0,230 0,260	0,230 0,200 0,260	0,220 0,190 0,240	0,210 0,190 0,240	0,200 0,160 0,240	0,210 0,170 0,260	0,210 0,170 0,260	0,210 0,170 0,240	
9	0,230 0,230 0,260	0,250 0,240 0,270	0,250 0,240 0,270	0,250 0,240 0,270	0,250 0,240 0,270	0,240 0,230 0,260	0,230 0,200 0,260	0,230 0,200 0,260	0,230 0,220 0,260	0,230 0,220 0,260	0,210 0,170 0,230	
10	0,230 0,220 0,240	0,230 0,230 0,260	0,230 0,230 0,260	0,230 0,230 0,240	0,240 0,230 0,260	0,230 0,230 0,260	0,230 0,220 0,260	0,230 0,220 0,260	0,220 0,220 0,240	0,220 0,200 0,240	0,200 0,170 0,230	

	<table border="1" style="margin: auto;"> <tr><th colspan="2">Mittelwert</th></tr> <tr><td>Min. Wert</td><td>Max. Wert</td></tr> </table>	Mittelwert		Min. Wert	Max. Wert	
Mittelwert						
Min. Wert	Max. Wert					
Quadrant 1 V1mittel	0,231	Quadrant 2 V2mittel	0,2076			
Quadrant 3 V3mittel	0,232	Quadrant 4 V4mittel	0,207			
Vgesamt, mittel	0,220	Vmin(10%)	0,19755			
		Vmax(10%)	0,24145			

Abb. 3.81: Geschwindigkeitsverteilung Turbine 2 2MB , neuer Vorboden (VB3), mittlerer Trennpfeiler nach Rouvé (R4), und Leitwand (LW5)



Geschwindigkeitsverteilung der Turbine 2 (1 Maschinenbetrieb - 1 x 100m³/s), Stauziel
 Variante: - Geschiebeschwelle mit Vorboden Typ 3, Rechenträger oben stärker geneigt mit Pfeiler "Rouve mittel (l=15cm,b=7,5cm)" und Leitwand neu lang
 Gemessene Modellwerte

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
I	1	0.220 0.200 0.240	0.240 0.230 0.260	0.250 0.230 0.270	0.250 0.230 0.260	0.250 0.220 0.270	0.250 0.240 0.270	0.240 0.190 0.270	0.230 0.190 0.260	0.220 0.200 0.260	0.230 0.200 0.260	II
	2	0.220 0.200 0.230	0.230 0.220 0.240	0.240 0.230 0.260	0.240 0.240 0.260	0.240 0.230 0.260	0.240 0.240 0.260	0.240 0.240 0.260	0.240 0.220 0.260	0.230 0.220 0.260	0.230 0.220 0.240	
III	3	0.210 0.200 0.230	0.220 0.220 0.240	0.220 0.220 0.240	0.220 0.220 0.230	0.230 0.220 0.240	0.230 0.230 0.240	0.230 0.230 0.240	0.230 0.230 0.240	0.230 0.220 0.240	0.230 0.220 0.240	IV
	4	0.170 0.160 0.190	0.230 0.230 0.240	0.230 0.230 0.260	0.230 0.230 0.260	0.230 0.230 0.240	0.230 0.220 0.240	0.230 0.220 0.240	0.230 0.220 0.240	0.220 0.200 0.240	0.220 0.220 0.240	
	5	0.200 0.170 0.230	0.240 0.230 0.260	0.230 0.220 0.240	0.240 0.230 0.260	0.240 0.230 0.260	0.230 0.230 0.260	0.230 0.230 0.260	0.230 0.220 0.240	0.220 0.200 0.240	0.220 0.200 0.240	
	6	0.210 0.200 0.230	0.240 0.230 0.260	0.240 0.240 0.260	0.240 0.240 0.260	0.240 0.240 0.260	0.240 0.240 0.260	0.240 0.230 0.260	0.240 0.190 0.240	0.210 0.190 0.230	0.220 0.200 0.230	
	7	0.170 0.160 0.200	0.220 0.200 0.230	0.230 0.220 0.240	0.220 0.220 0.240	0.230 0.220 0.240	0.230 0.220 0.240	0.220 0.200 0.240	0.220 0.200 0.230	0.210 0.190 0.230	0.200 0.190 0.220	
	8	0.190 0.150 0.220	0.230 0.220 0.240	0.230 0.200 0.260	0.240 0.230 0.260	0.240 0.230 0.260	0.230 0.230 0.240	0.230 0.230 0.240	0.240 0.240 0.260	0.230 0.230 0.240	0.230 0.230 0.240	
	9	0.170 0.120 0.220	0.220 0.200 0.240	0.230 0.200 0.260	0.220 0.190 0.260	0.240 0.230 0.270	0.240 0.230 0.260	0.250 0.220 0.260	0.240 0.230 0.260	0.240 0.230 0.260	0.220 0.220 0.230	
	10	0.150 0.120 0.200	0.210 0.190 0.240	0.200 0.170 0.230	0.230 0.220 0.260	0.230 0.220 0.260	0.240 0.230 0.260	0.230 0.230 0.260	0.240 0.230 0.260	0.230 0.230 0.240	0.220 0.220 0.240	

	<table border="1" style="margin: auto;"> <tr> <th colspan="2">Mittelwert</th> </tr> <tr> <td>Min. Wert</td> <td>Max. Wert</td> </tr> </table>	Mittelwert		Min. Wert	Max. Wert	
Mittelwert						
Min. Wert	Max. Wert					
Quadrant 1 V1mittel	0,229	Quadrant 2 V2mittel	0,230			
Quadrant 3 V3mittel	0,219	Quadrant 4 V4mittel	0,229			
Vgesamt. mittel	0,227	Vmin(10%)	0,20394			
		Vmax(10%)	0,24926			

Abb. 3.82: Geschwindigkeitsverteilung Turbine 2 1MB , neuer Vorboden (VB3), mittlerer Trennpfeiler nach Rouvé (R4), und Leitwand (LW5)

3.3.22.1 Rouvé schmal und mittellang (R4) und neue Leitwand (LW5) bei geringerem Durchfluss

Auf Wunsch der Stewag waren weitergehende Untersuchungen zur Anströmung mit einem Durchfluss größerer Häufigkeit, also maßgeblicheren Betriebszustand, durchzuführen, um etwaige Auswirkungen auf Grund der Durchflussmenge auszuschließen. Der Einfluss des Durchflusses auf die Trennpfeilerbreite, floss bereits in die Bemessungsformel für die Pfeilerbreite nach Rouvé ein. Dieser Einfluss konnte aber in den durchgeführten Versuchen bei $150 \text{ m}^3/\text{s}$ (Natur) (siehe Abb. 3.83) bei der aktuellen Variante mit Leitwand nicht bestätigt werden. Die Geschwindigkeitsverteilung im maßgeblichen Falle der Turbine 2 im 2MB erbrachte eine sehr ähnliche Verteilung.

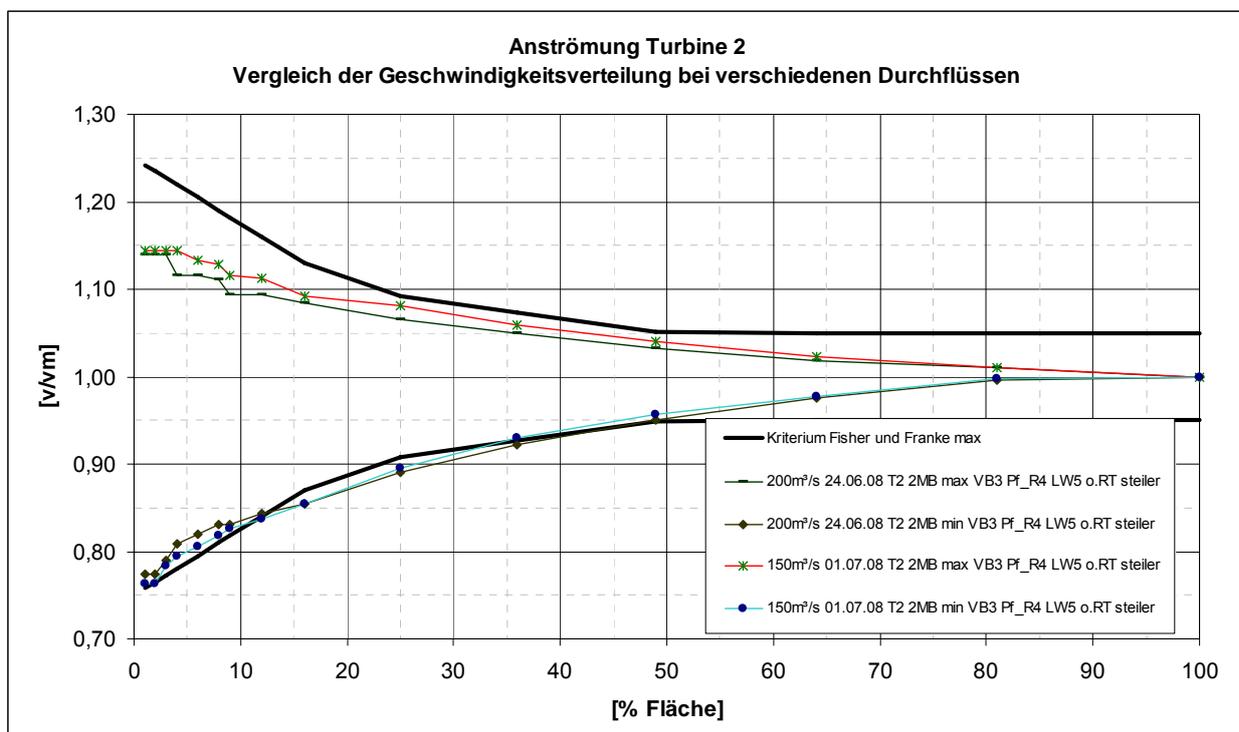


Abb. 3.83: Verteilung der bezogenen Geschwindigkeiten der Turbine 2 neuer Vorboden (VB3), Trennpfeiler (R4) und Leitwand (Typ5).

Auf Grund der, von Wasser abweichenden, Zähigkeit von Luft, werden im Modell bezüglich luftziehender Wirbel Versuche mit höheren Durchflüssen gefahren. Bei höheren Durchflüssen werden diese Art von Wirbel erst leichter sichtbar. Im Hinblick auf diese Tatsache und die Erkenntnis der gleichen Geschwindigkeitsverteilung wurden alle relevanten Versuche weiterhin in Bezug auf Q_A und $Q_A/2$ verglichen.

3.3.22.2 *Urplanung mit Vorboden 3 ohne Leitwand zur Evaluierung des Einflusses der Leitwand auf die Turbine 1 und 2 bei 1MB*

Als Variante wurde für die in Abb. 3.84 dargestellte Konfiguration (ähnlich zu Kapitel 3.3.4, jedoch geänderter Vorboden) bei 1MB die Geschwindigkeitsverteilung gemessen. Diese Messung diente als Vergleich zur Bestimmung des Einflusses der Pfeiler und Leitwände auf die Turbinenanströmung im 1MB.

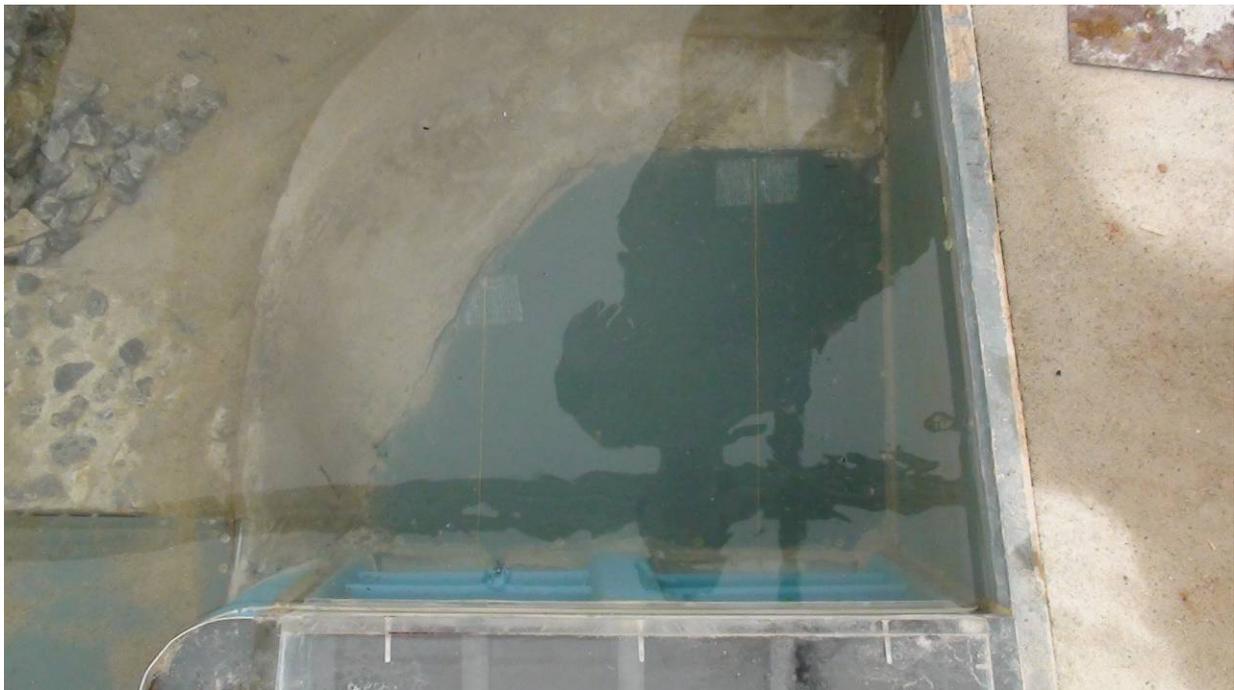


Abb. 3.84: Urplanungszustand mit geändertem Vorboden (VB3)

In der Abb. 3.85 sind die Stromfäden der in Variante mit Trennpfeiler R4 und Leitwand L5 denen der aktuellen Konfiguration gegenübergestellt. Das Verhalten der Stromfäden wirkte sehr ähnlich, wobei die Strömung bei der Turbine 1 bei der Variante ohne Trennpfeiler etwas turbulenter wirkte.

Im Gegensatz zu den qualitativen Bildern zeigte die quantitative Betrachtung, dass die Anströmung der Turbine 1 bei dieser Variante geringfügig besser war. Aus der Abb. 3.86 und Abb. 3.89 wird ersichtlich, dass der quantitative Einfluss eines weiter ins Oberwasser gezogenen Trennpfeilers mit Leitwand, wenn überhaupt, nur geringen Einfluss auf die Anströmung der Turbinen im 1MB hat.

In beiden Varianten konnte man erkennen, dass es am Trennpfeiler zwischen T1 und T2 bei beiden Zuläufen zu Strömungsabrissen, Turbulenzen und geringeren Geschwindigkeiten kam (siehe Abb. 3.87 und Abb. 3.88).

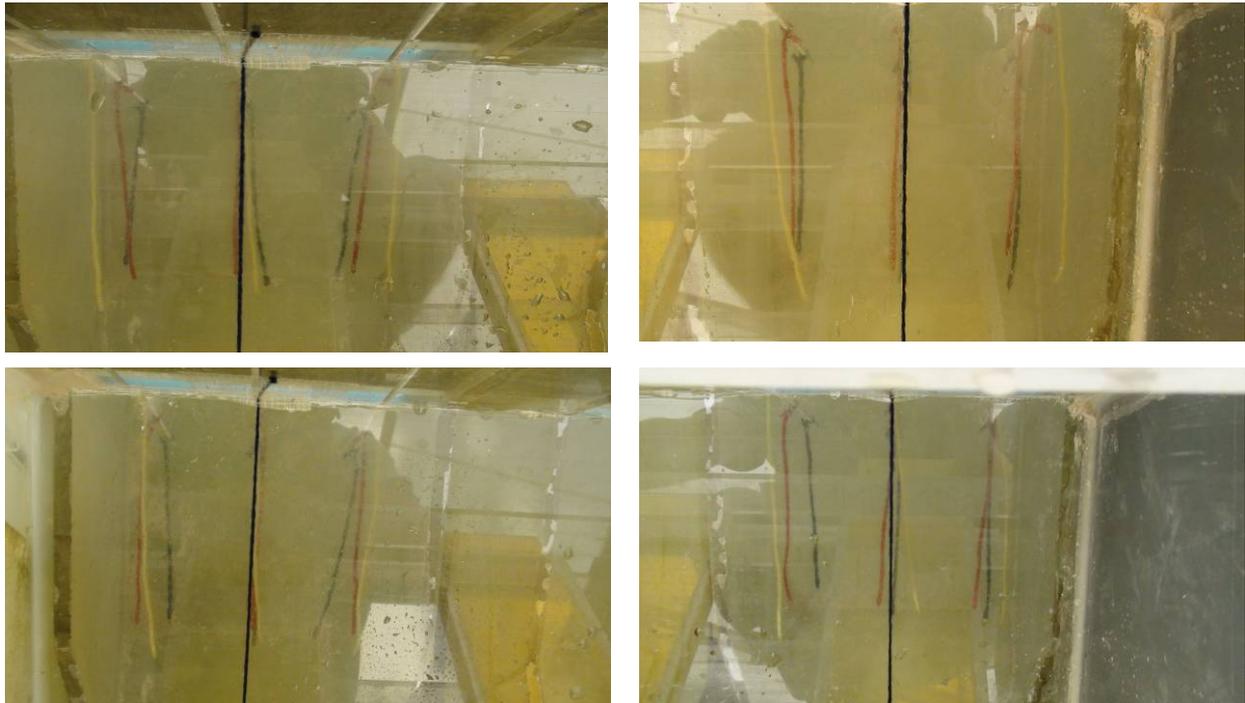


Abb. 3.85: Stromfäden nach Messebene. Oben mit R4 und neue Leitwand (LW5) und unten mit Urplanung. Links T2 und rechts T1 (Fließrichtung von oben nach unten)

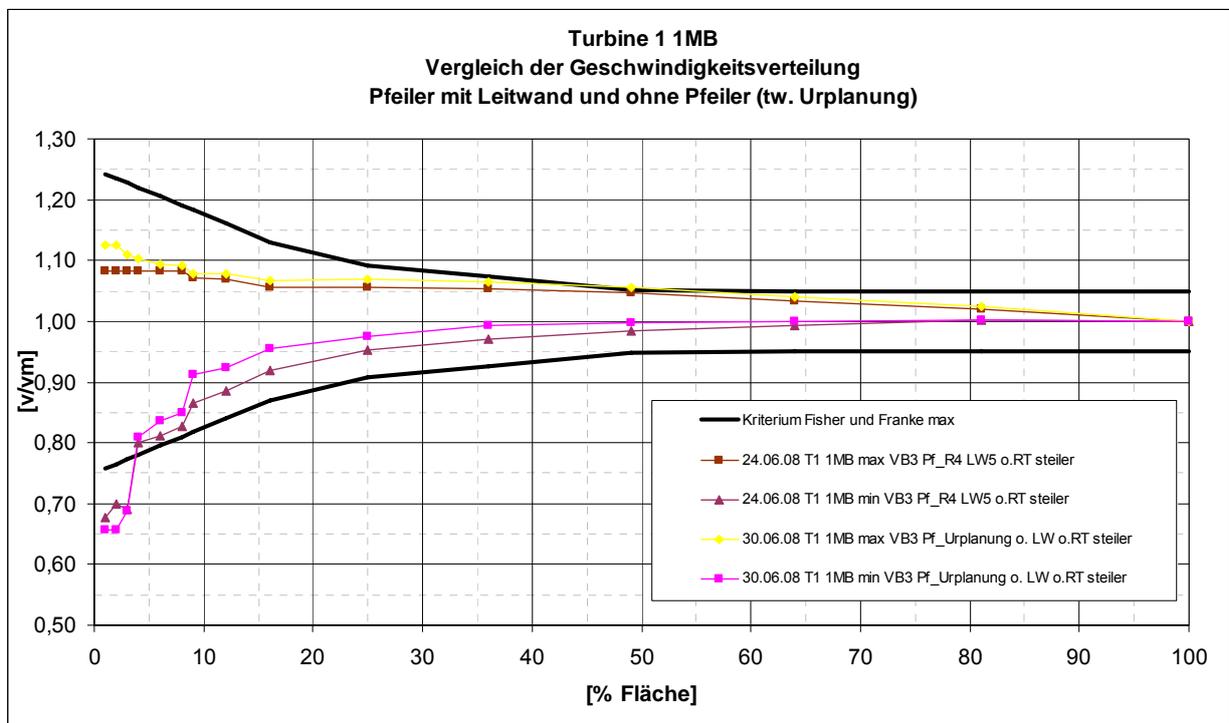
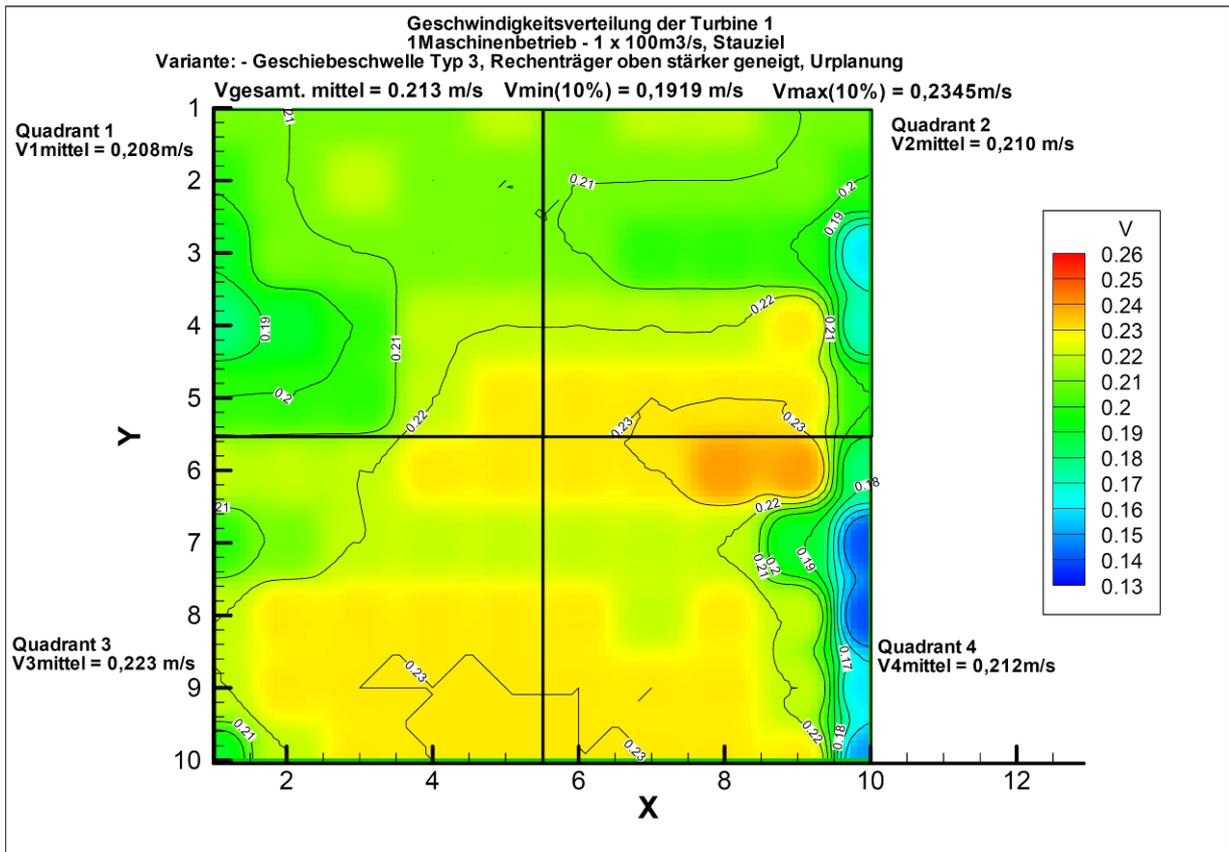


Abb. 3.86: Verteilung der bezogenen Geschwindigkeiten bei Turbine 1. Vergleich bei Pfeiler (R4) mit Leitwand (LW5) und Urplanung. 1MB

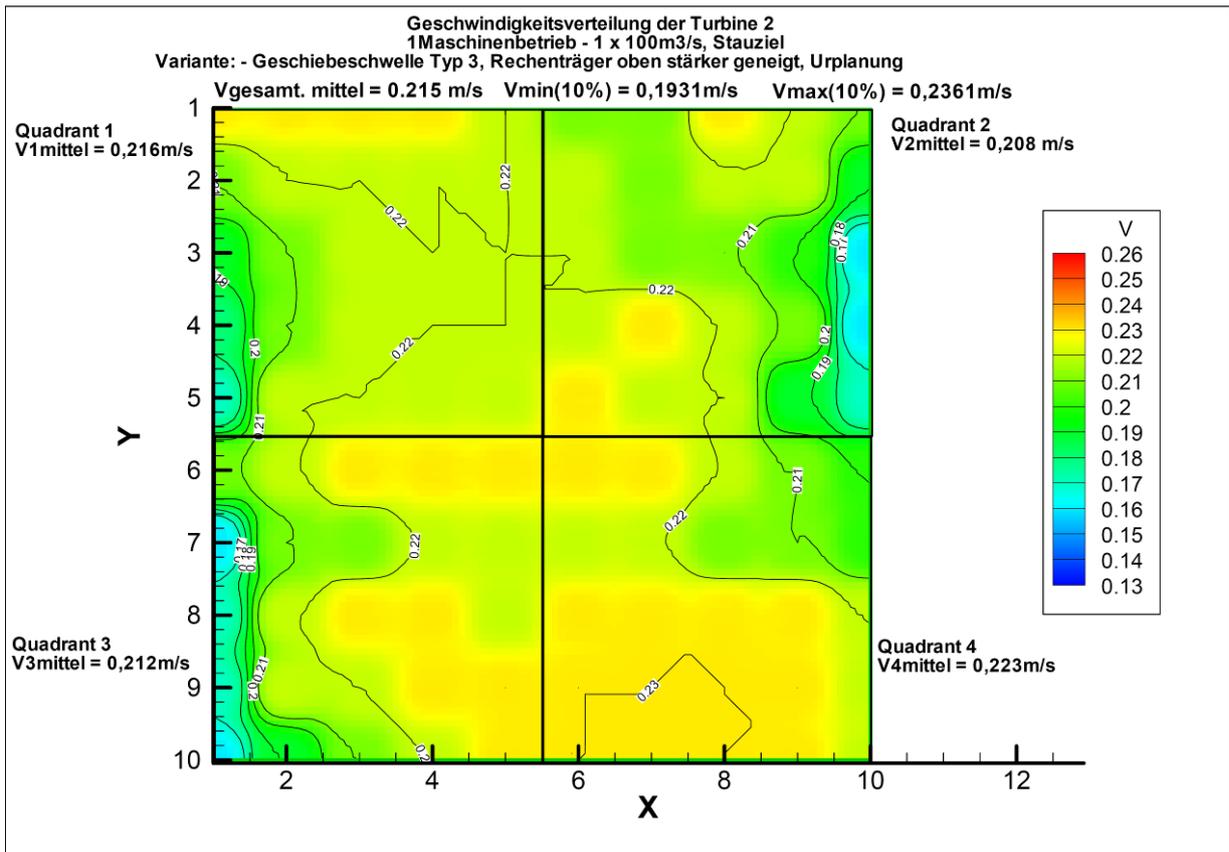


Geschwindigkeitsverteilung der Turbine 1 (1 Maschinenbetrieb - 1 x 100m³/s), Stauziel
 Variante: - Geschiebeschwelle mit Vorboden Typ 3, Rechenträger oben stärker geneigt, Urplanung
 Gemessene Modellwerte

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	0,210	0,210	0,210	0,210	0,220	0,210	0,220	0,220	0,210	0,210	II
2	0,190 0,230	0,200 0,230	0,170 0,230	0,170 0,230	0,220 0,230	0,200 0,230	0,200 0,230	0,200 0,230	0,200 0,230	0,200 0,230	
3	0,190	0,210	0,220	0,210	0,210	0,210	0,200	0,220	0,200	0,160	
4	0,170 0,220	0,200 0,220	0,200 0,220	0,200 0,230	0,200 0,220	0,200 0,230	0,190 0,220	0,200 0,220	0,190 0,220	0,130 0,190	
5	0,170 0,200	0,170 0,220	0,190 0,220	0,200 0,230	0,220 0,240	0,220 0,240	0,220 0,230	0,220 0,230	0,220 0,240	0,160 0,200	
6	0,200	0,200	0,200	0,220	0,230	0,230	0,230	0,230	0,230	0,200	
7	0,190 0,220	0,190 0,230	0,200 0,230	0,200 0,230	0,220 0,240	0,220 0,240	0,220 0,240	0,200 0,240	0,170 0,220	0,120 0,190	
8	0,220	0,230	0,230	0,230	0,230	0,230	0,220	0,230	0,220	0,140	
9	0,220 0,240	0,230 0,240	0,220 0,240	0,220 0,240	0,220 0,240	0,200 0,240	0,220 0,240	0,220 0,240	0,200 0,230	0,120 0,190	
10	0,220	0,230	0,230	0,230	0,230	0,230	0,230	0,230	0,220	0,160	
10	0,220 0,230	0,230 0,240	0,230 0,240	0,230 0,240	0,230 0,240	0,230 0,240	0,230 0,240	0,230 0,240	0,220 0,240	0,130 0,200	
10	0,190	0,220	0,230	0,230	0,230	0,230	0,230	0,230	0,230	0,150	
	0,160 0,220	0,220 0,240	0,220 0,240	0,220 0,240	0,220 0,240	0,220 0,240	0,230 0,240	0,230 0,240	0,220 0,240	0,130 0,200	

Quadrant 1 V1mittel	0,208	Mittelwert	Quadrant 2 V2mittel	0,2104
		Min. Wert Max. Wert		
Quadrant 3 V3mittel	0,223		Quadrant 4 V4mittel	0,212
Vgesamt, mittel	0,213		Vmin(10%)	0,19188
			Vmax(10%)	0,23452

Abb. 3.87: Geschwindigkeitsverteilung Turbine 1 1MB , neuer Vorboden (VB3), Urplanung



Geschwindigkeitsverteilung der Turbine 2 (1 Maschinenbetrieb - 1 x 100m³/s), Stauziel
 Variante: - Geschiebeschwelle mit Vorboden Typ 3, Rechenträger oben stärker geneigt, Urplanung
 Gemessene Modellwerte

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
I	1	0,230 0,220 0,240	0,230 0,220 0,240	0,230 0,220 0,260	0,230 0,220 0,260	0,220 0,200 0,260	0,210 0,160 0,240	0,210 0,150 0,240	0,230 0,220 0,240	0,220 0,150 0,240	0,210 0,160 0,240	II
	2	0,210 0,190 0,230	0,220 0,220 0,240	0,220 0,220 0,240	0,220 0,190 0,240	0,220 0,220 0,240	0,220 0,220 0,230	0,210 0,160 0,240	0,220 0,190 0,240	0,220 0,200 0,230	0,190 0,150 0,220	
III	3	0,190 0,190 0,200	0,210 0,200 0,230	0,220 0,200 0,230	0,220 0,220 0,230	0,220 0,220 0,230	0,210 0,200 0,230	0,210 0,200 0,230	0,210 0,200 0,230	0,200 0,190 0,230	0,160 0,160 0,190	IV
	4	0,180 0,170 0,190	0,210 0,200 0,230	0,220 0,220 0,230	0,220 0,220 0,230	0,220 0,220 0,230	0,220 0,200 0,240	0,230 0,220 0,240	0,220 0,220 0,230	0,210 0,160 0,230	0,160 0,150 0,170	
III	5	0,170 0,160 0,200	0,220 0,220 0,230	0,220 0,220 0,240	0,220 0,220 0,230	0,220 0,220 0,240	0,230 0,220 0,240	0,220 0,220 0,240	0,220 0,220 0,240	0,190 0,170 0,220	0,170 0,160 0,200	IV
	6	0,210 0,190 0,220	0,220 0,220 0,240	0,230 0,220 0,240	0,230 0,220 0,240	0,230 0,220 0,240	0,230 0,220 0,240	0,230 0,230 0,240	0,220 0,190 0,240	0,210 0,170 0,230	0,200 0,160 0,240	
III	7	0,160 0,130 0,190	0,210 0,200 0,230	0,210 0,200 0,230	0,220 0,200 0,230	0,220 0,200 0,230	0,220 0,200 0,240	0,220 0,200 0,230	0,210 0,190 0,230	0,210 0,200 0,230	0,200 0,190 0,220	IV
	8	0,170 0,150 0,200	0,220 0,200 0,230	0,230 0,220 0,240	0,230 0,220 0,260	0,220 0,220 0,240	0,230 0,220 0,240	0,230 0,220 0,240	0,230 0,220 0,240	0,230 0,220 0,240	0,220 0,200 0,240	
III	9	0,170 0,130 0,200	0,220 0,190 0,230	0,220 0,200 0,240	0,230 0,220 0,260	0,230 0,200 0,260	0,230 0,220 0,240	0,230 0,230 0,260	0,230 0,230 0,240	0,230 0,230 0,240	0,220 0,220 0,230	IV
	10	0,160 0,130 0,200	0,190 0,170 0,222	0,210 0,170 0,230	0,220 0,220 0,240	0,230 0,220 0,240	0,230 0,220 0,240	0,230 0,220 0,240	0,230 0,230 0,240	0,230 0,220 0,240	0,220 0,220 0,230	

Quadrant 1 V1mittel	0,216	Mittelwert		Quadrant 2 V2mittel	0,2084
		Min. Wert	Max. Wert		
Quadrant 3 V3mittel	0,212			Quadrant 4 V4mittel	0,223
Vgesamt, mittel	0,215			Vmin(10%)	0,19314
				Vmax(10%)	0,23606

Abb. 3.88: Geschwindigkeitsverteilung Turbine 2 1MB , neuer Vorboden (VB3), Urplanung

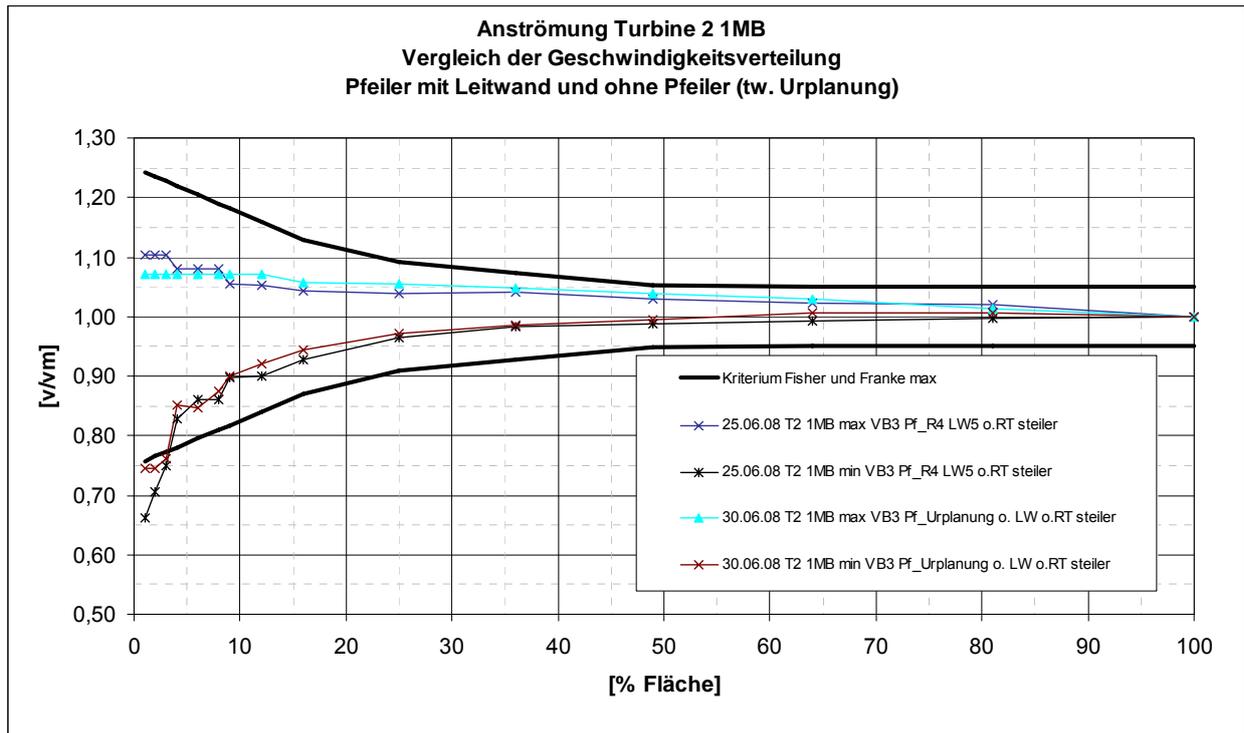


Abb. 3.89: Verteilung der bezogenen Geschwindigkeiten bei Turbine 1. Vergleich bei Pfeiler (R4) mit Leitwand (LW5) und Urplanung. 1MB

3.3.22.3 Rouvé schmal und mittellang (R4) ohne Leitwand

Zum Vergleich wurde der Trennpfeiler R4 auch ohne Leitwand untersucht. Wie erwartet verschlechterte sich dabei die Anströmung an die Turbine 2 (Abb. 3.93). Die Qualität der Anströmung lag damit in etwa bei der Urplanungsvariante (Abb. 3.90). Die Anströmung der Turbine 1 (Abb. 3.91) reiht sich in die guten Ergebnisse der Vorgängervarianten ein (Abb. 3.92).

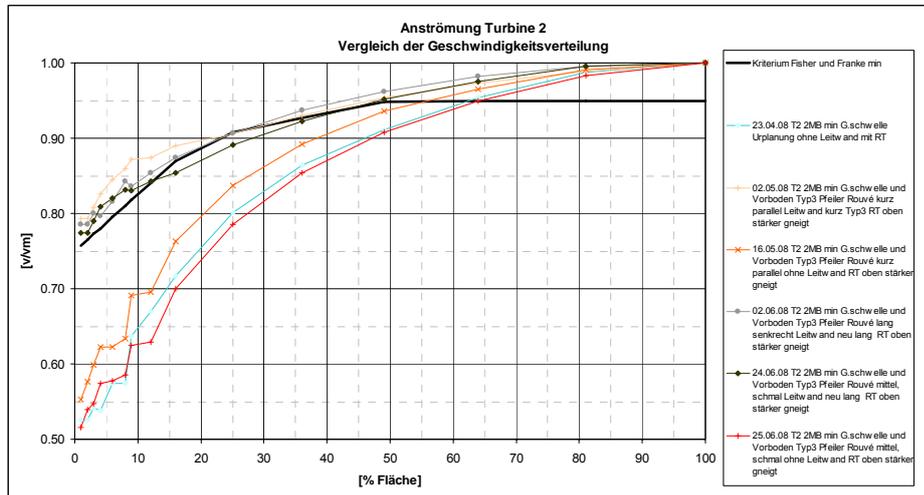


Abb. 3.90: Verteilung der bezogenen Geschwindigkeiten der Turbine 2 (nur unterer Ast) – Vergleich verschiedener Varianten

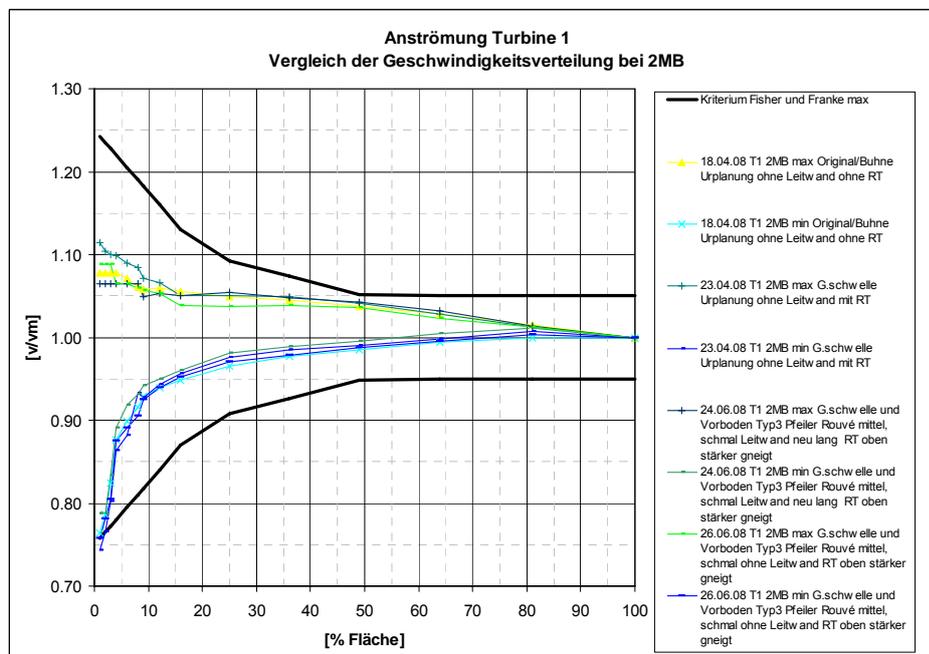
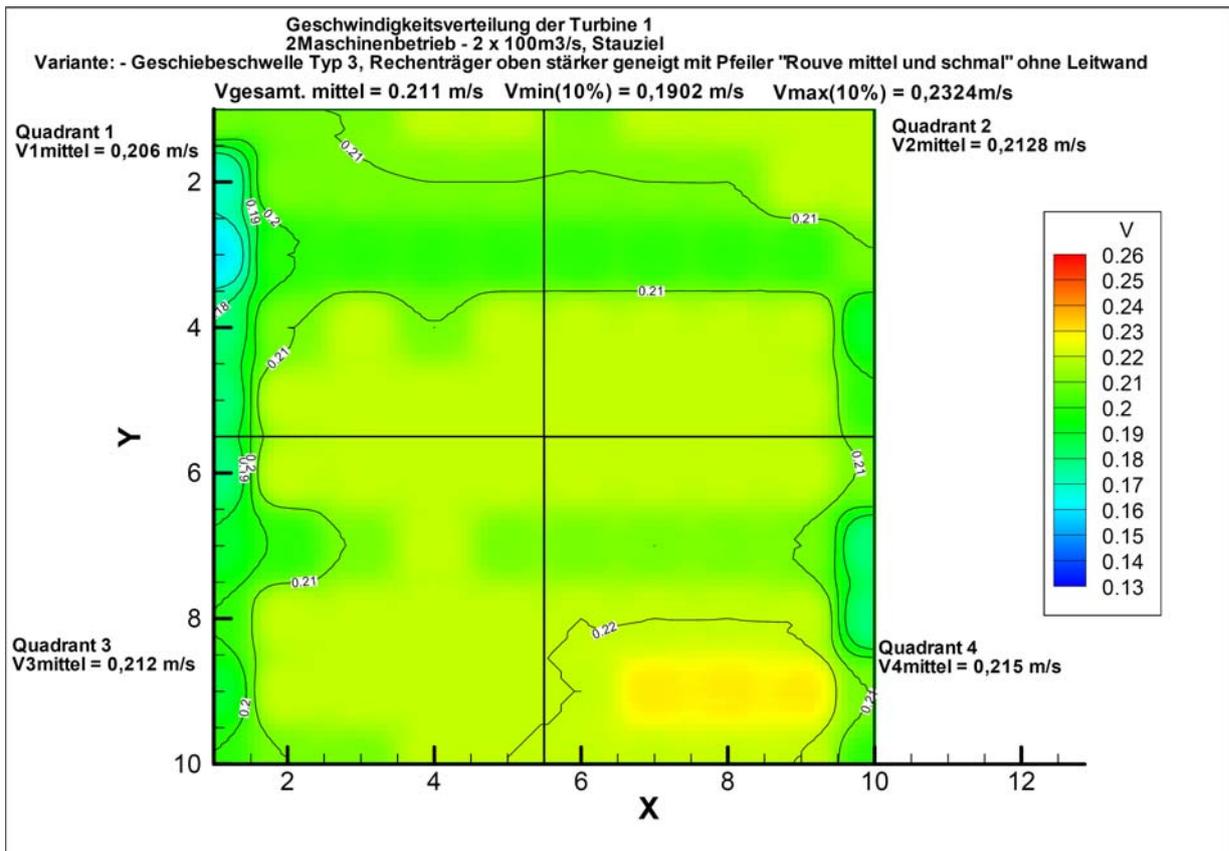


Abb. 3.91: Verteilung der bezogenen Geschwindigkeiten der Turbine 1 – Vergleich verschiedener Varianten



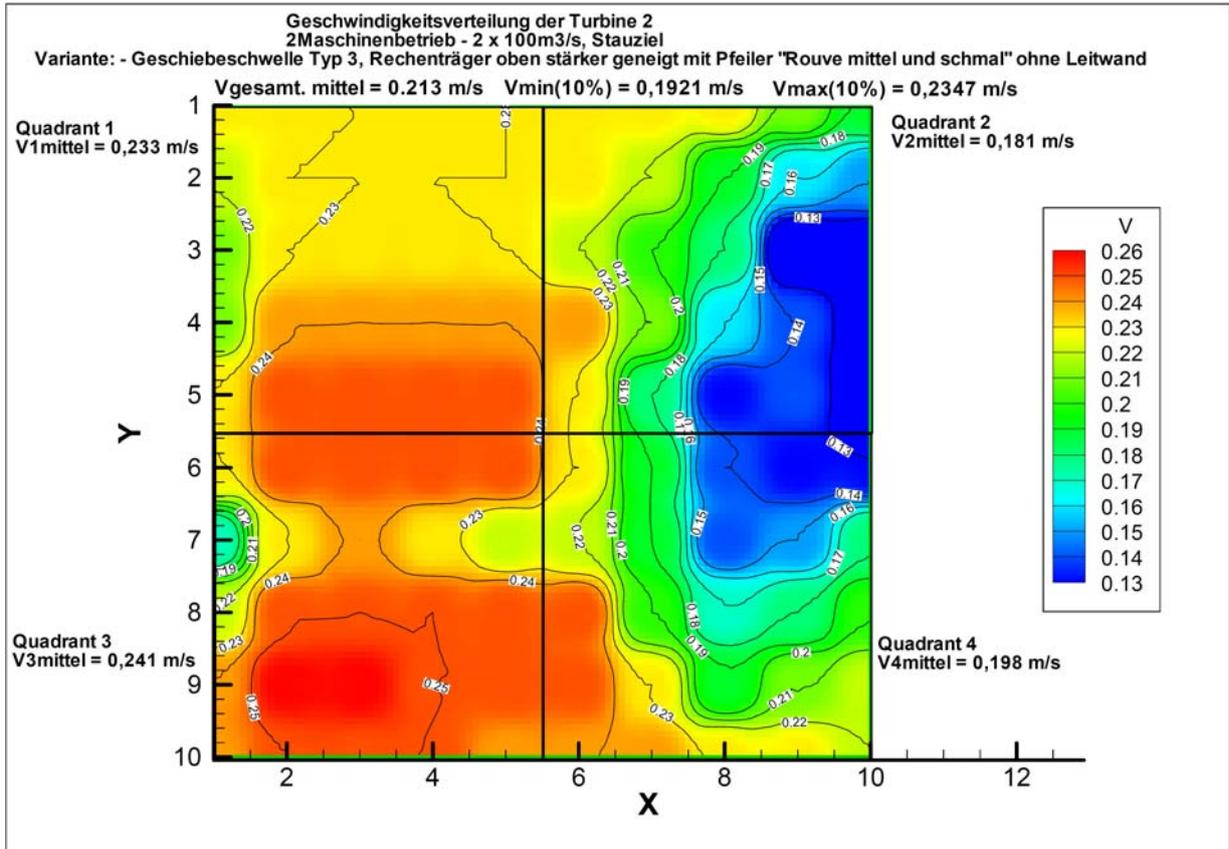
Geschwindigkeitsverteilung der Turbine 1 (2 Maschinenbetrieb - 2 x 100m³/s), Stauziel
 Variante: - Geschiebeschwelle mit Vorboden Typ 3, Rechenträger oben stärker geneigt mit Pfeiler "Rouvé mittel (l=15cm,b=7,5cm)" ohne Leitwand

Gemessene Modellwerte

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,210 0,190 0,230	0,210 0,200 0,230	0,210 0,200 0,230	0,220 0,200 0,230	0,220 0,220 0,230	0,210 0,200 0,230	0,220 0,200 0,230	0,220 0,200 0,230	0,220 0,200 0,230	0,220 0,200 0,230
2	0,170 0,160 0,200	0,210 0,170 0,230	0,210 0,200 0,230	0,210 0,200 0,220	0,210 0,200 0,220	0,210 0,200 0,230	0,210 0,200 0,230	0,210 0,200 0,230	0,220 0,200 0,230	0,220 0,200 0,230
3	0,160 0,130 0,190	0,200 0,190 0,220	0,200 0,200 0,220	0,200 0,200 0,220	0,200 0,190 0,220	0,210 0,200 0,220				
4	0,180 0,160 0,200	0,210 0,190 0,230	0,220 0,200 0,230	0,210 0,200 0,230	0,220 0,200 0,230	0,220 0,200 0,230	0,220 0,220 0,230	0,220 0,220 0,230	0,220 0,220 0,230	0,190 0,170 0,200
5	0,180 0,170 0,220	0,220 0,220 0,230	0,220 0,220 0,240	0,220 0,220 0,240	0,220 0,220 0,230	0,200 0,190 0,220				
6	0,180 0,170 0,200	0,220 0,220 0,230	0,220 0,220 0,230	0,220 0,220 0,230	0,220 0,220 0,230	0,220 0,220 0,240	0,220 0,220 0,240	0,220 0,220 0,240	0,220 0,220 0,230	0,210 0,200 0,220
7	0,190 0,170 0,200	0,200 0,190 0,220	0,210 0,200 0,230	0,220 0,220 0,230	0,210 0,200 0,230	0,210 0,200 0,230	0,210 0,200 0,220	0,210 0,200 0,220	0,210 0,200 0,230	0,180 0,170 0,190
8	0,200 0,190 0,220	0,220 0,200 0,230	0,220 0,220 0,230	0,220 0,220 0,230	0,220 0,220 0,230	0,220 0,220 0,230	0,220 0,200 0,230	0,220 0,200 0,240	0,220 0,220 0,230	0,180 0,160 0,200
9	0,190 0,170 0,220	0,220 0,220 0,230	0,230 0,220 0,240	0,230 0,220 0,240	0,230 0,230 0,240	0,210 0,190 0,230				
10	0,200 0,170 0,220	0,210 0,200 0,230	0,210 0,200 0,230	0,220 0,200 0,230	0,220 0,220 0,230	0,220 0,200 0,220	0,220 0,220 0,230	0,220 0,220 0,230	0,220 0,220 0,230	0,200 0,190 0,220

Quadrant 1 V1mittel	0,206	Mittelwert Min. Wert Max. Wert	Quadrant 2 V2mittel	0,2128
Quadrant 3 V3mittel	0,212		Quadrant 4 V4mittel	0,215
Vgesamt, mittel	0,211		Vmin(10%)	0,19017
			Vmax(10%)	0,23243

Abb. 3.92: Geschwindigkeitsverteilung Turbine 1 2MB , neuer Vorboden (VB3), mittlerer Trennpfeiler nach Rouvé (R4), ohne Leitwand



Geschwindigkeitsverteilung der Turbine 2 (2 Maschinenbetrieb - 2 x 100m³/s), Stauziel
 Variante: - Geschiebeschwelle mit Vorboden Typ 3, Rechenträger oben stärker geneigt mit Pfeiler "Rouvé mittel (l=15cm,b=7,5cm)" ohne Leitwand

Gemessene Modellwerte

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,230 0,200 0,240	0,230 0,200 0,240	0,230 0,200 0,260	0,230 0,220 0,240	0,210 0,160 0,230	0,190 0,150 0,230				
2	0,220 0,200 0,240	0,230 0,220 0,240	0,230 0,200 0,260	0,230 0,200 0,260	0,230 0,230 0,240	0,230 0,220 0,260	0,220 0,190 0,240	0,200 0,170 0,230	0,180 0,130 0,190	0,150 0,220 0,190
3	0,210 0,190 0,230	0,230 0,220 0,240	0,230 0,230 0,260	0,230 0,200 0,240	0,230 0,220 0,260	0,230 0,200 0,240	0,200 0,190 0,230	0,200 0,120 0,220	0,110 0,040 0,160	0,120 0,040 0,160
4	0,210 0,180 0,230	0,240 0,240 0,260	0,240 0,230 0,260	0,240 0,230 0,260	0,240 0,240 0,260	0,240 0,230 0,270	0,210 0,150 0,240	0,160 0,120 0,230	0,140 0,120 0,190	0,120 0,090 0,160
5	0,230 0,230 0,240	0,250 0,240 0,270	0,250 0,240 0,270	0,250 0,240 0,270	0,250 0,240 0,270	0,230 0,200 0,260	0,180 0,160 0,220	0,130 0,090 0,160	0,140 0,110 0,170	0,110 0,080 0,150
6	0,230 0,230 0,260	0,250 0,240 0,270	0,250 0,240 0,270	0,250 0,240 0,270	0,250 0,240 0,270	0,230 0,170 0,260	0,190 0,150 0,230	0,140 0,080 0,190	0,130 0,080 0,170	0,130 0,090 0,170
7	0,170 0,160 0,200	0,230 0,230 0,260	0,240 0,220 0,260	0,230 0,220 0,240	0,220 0,200 0,240	0,220 0,200 0,240	0,190 0,130 0,230	0,140 0,120 0,170	0,150 0,090 0,220	0,180 0,120 0,220
8	0,220 0,200 0,240	0,250 0,240 0,270	0,250 0,240 0,270	0,250 0,230 0,270	0,250 0,230 0,270	0,250 0,240 0,260	0,200 0,120 0,260	0,170 0,130 0,240	0,180 0,130 0,230	0,200 0,160 0,230
9	0,240 0,240 0,260	0,260 0,240 0,270	0,260 0,240 0,270	0,250 0,240 0,260	0,250 0,240 0,270	0,250 0,240 0,260	0,230 0,220 0,260	0,190 0,150 0,230	0,210 0,170 0,240	0,220 0,190 0,260
10	0,240 0,220 0,260	0,250 0,240 0,260	0,250 0,240 0,260	0,250 0,240 0,270	0,240 0,240 0,260	0,240 0,230 0,260	0,240 0,230 0,260	0,240 0,230 0,260	0,230 0,200 0,260	0,220 0,220 0,240

	<table border="1" style="margin: auto;"> <tr><th colspan="2">Mittelwert</th></tr> <tr><td>Min. Wert</td><td>Max. Wert</td></tr> </table>	Mittelwert		Min. Wert	Max. Wert	
Mittelwert						
Min. Wert	Max. Wert					
Quadrant 1 V1mittel	0,233	Quadrant 2 V2mittel	0,1812			
Quadrant 3 V3mittel	0,241	Quadrant 4 V4mittel	0,198			
Vgesamt. mittel	0,213	Vmin(10%)	0,19206			
		Vmax(10%)	0,23474			

Abb. 3.93: Geschwindigkeitsverteilung Turbine 2 2MB , neuer Vorboden (VB3), mittlerer Trennpfeiler nach Rouvé (R4), ohne Leitwand

3.3.23 Überprüfung auf lufteinziehende Wirbel

Da im Froud'schen Modellgesetz das Verhalten von Luft nicht berücksichtigt wird, sind Untersuchungen betreffend lufteinziehender Wirbel bei „normalem“ Modellbetrieb nicht möglich. Als Faustregel gilt, dass für einer qualitative Beurteilung zumindest eine Durchflusserhöhung um etwa 50 % notwendig ist. Diesbezüglich wurde ein Modelldurchfluss von etwa 30 l/s im 2MB gewählt. In Abb. 3.94 sind auftretende Wirbel bei verschiedenen Krafthauszulaufgeometrien (kein, mittlerer und langer Trennpfeiler), dargestellt. Bei allen Varianten bildeten sich je ein Wirbel pro Zulauf und der stärkere Wirbel im Bereich der Turbine 2 in der Nähe des rechten oberen Einlaufes (in Fließrichtung) aus. Je länger der Trennpfeiler ausgeführt wurde, desto mehr verschob sich der Wirbel in das Oberwasser, wo der Strömungsabriss erfolgte. Es kam jedoch zu keinem kompletten „Durchschlagen“ des Wirbels in den Einlauf

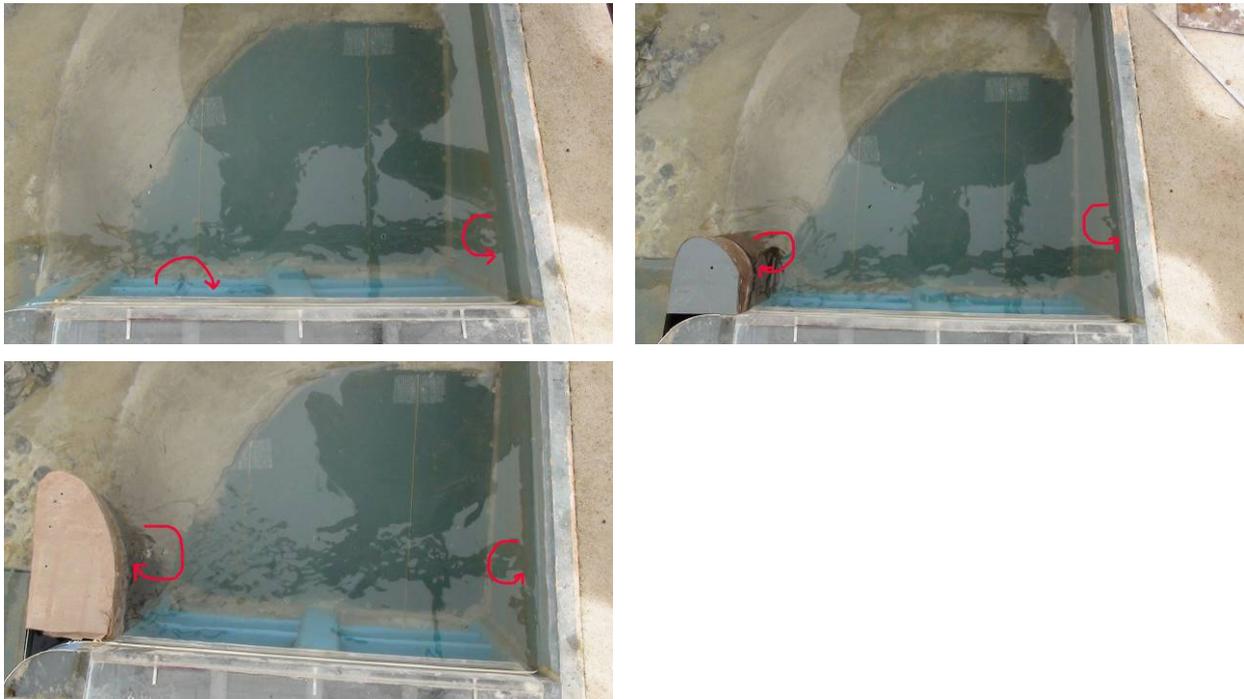


Abb. 3.94: Entstehung von lufteinziehenden Wirbel bei $Q = 32 \text{ l/s}$ bei verschiedenen Pfeilervarianten.

3.3.24 Rouvé Pfeiler (R5) mit Kugelkalotte ohne Leitwand

Als eine weitere Optimierung der Variante ohne Leitwand aus Kapitel 3.3.18 wurde eine Abwandlung des Pfeilers R1 ohne Nische untersucht, dessen OK etwas unter dem Stauziel situiert und dessen Kopf als Viertelkugel ausgeführt wurde, untersucht (siehe Abb. 3.96 und Abb. 3.97). Da das Freihalten der Dammbalkennische eine Vorgabe der Steweg war, ist diese Variante nur mittels der in Abb. 3.95 dargestellten Sonderlösung zu erzielen. Jedenfalls wurde jedoch darauf geachtet, dass der Pfeiler nicht aus der Flucht des bestehenden Pfeilers in das Wehrfeld A steht. Diese Form wurde an der Mur bereits am Kraftwerk Leoben zur Ausführung gebracht (siehe Abb. 3.95).



Abb. 3.95: Zusatzvariante für Trennpfeiler mit Nischenverschluss am Beispiel KW Leoben (VERBUND 2006)

Wie erwartet zeigte die Ausnützung der vorhandenen Breite und das Verschließen der Dammbalkennische eine Verbesserung der Anströmung, die diese Variante zur bisher besten Trennpfeilervariante ohne Leitwand machte. Die Untersuchung für einen Durchfluss von $150 \text{ m}^3/\text{s}$ konnte die Geschwindigkeitsverteilung sogar noch etwas verbessert werden. Somit würde diese Sonderlösung nur mehr in den Bereichen 1 % bis etwa 20 % schlechter als Varianten mit Leitwand sein (siehe Abb. 3.98).

Jedenfalls ist für diese Ausführungsvariante zu überlegen, dass ein Nischenverschluss vorzusehen ist und dass diese Variante zumindest im Durchflussbereich $100 \text{ m}^3/\text{s}$ bis $200 \text{ m}^3/\text{s}$ schlechter als die besten Leitwandvarianten ist.



Abb. 3.96: Rouvé (R5) mit Kugelkalotte - Fotos

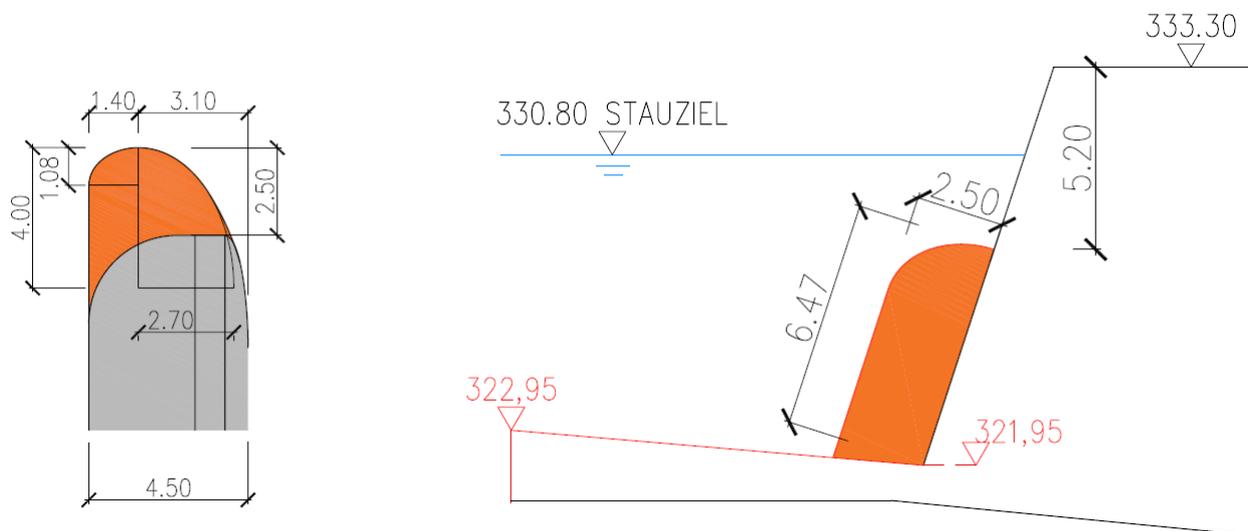


Abb. 3.97: Geometrie Pfeiler Rouvé (R5) mit Kugelkalotte. Schnitt und Seitenansicht

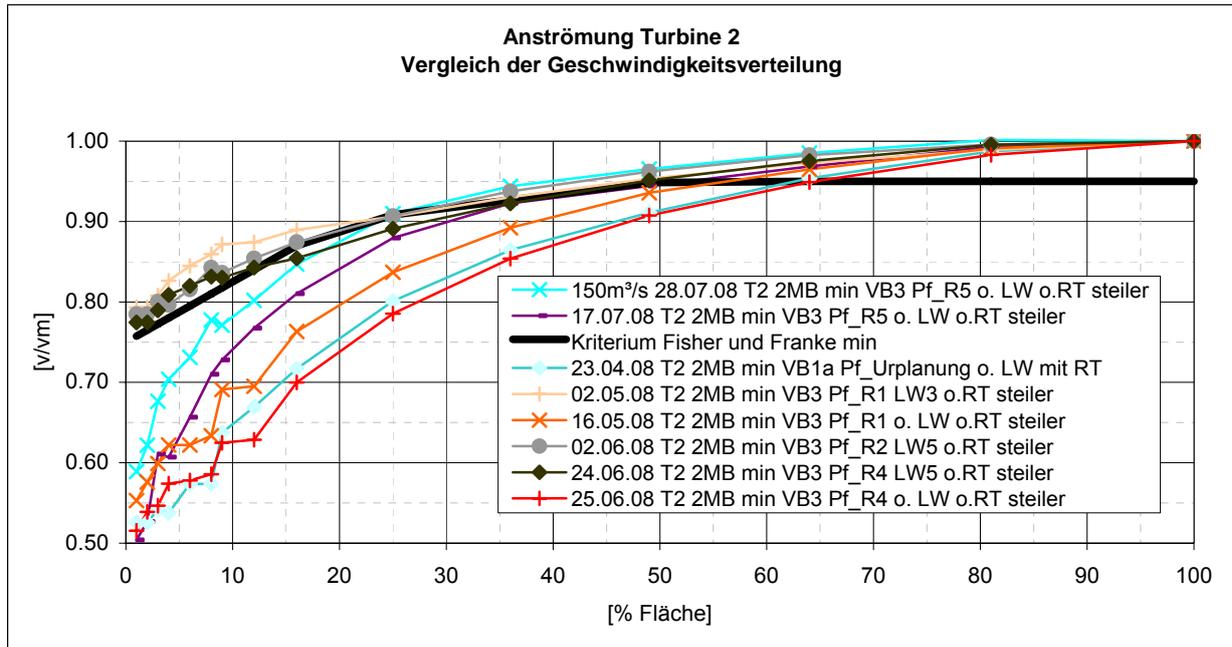


Abb. 3.98: Rouvé (R5) mit Kugelkalotte – Vergleich der Geschwindigkeitsverteilung mit anderen Varianten

3.3.25 Variantenuntersuchung des Mitteltrennpfeilers

Obwohl geringe Ablösungen am Mitteltrennpfeiler zwischen Turbine 1 und 2 nur im 1 Maschinenbetrieb geringfügig bemerkbar wurden, und diese sich vermutlich bis zur Turbine vergleichmässigen würden (siehe Godde 1994 und Lang 1999), wurden in Anlehnung an den Beispielen in Abb. 3.63 grundsätzliche Versuche mit verlängerten Pfeilern durchgeführt.

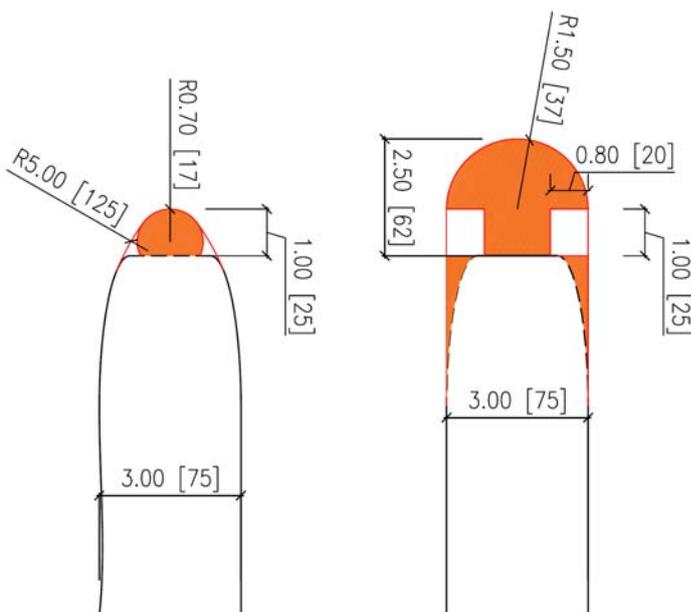


Abb. 3.99: Mitteltrennpfeilervarianten – Kurze Ellipse MP1 (links) und längerer Kreiszyylinder MP2 (rechts)

Es wurden nur grobe quantitative Analysen der Randbereiche durchgeführt, wobei festgestellt werden konnte, dass die Variante MP2 bereits im 1MB schlechtere Ergebnisse als die Urplanung brachte und daher verworfen wurde. Die Variante MP1 wiederum konnte die Geschwindigkeitsverteilung im 1MB soweit verbessern, dass das Einhalten der Fisher und Franke Bedingung erwartet werden kann. Im 2MB wurde die Turbine 1 jedoch genauso wie die Turbine 2 etwas beeinflusst, wodurch genauere Untersuchungen auch hinsichtlich der konstruktiven Ausführbarkeit erforderlich wären. Diese Erkenntnisse gelten für die Variante mit bzw. ohne Leitwand gleich.

4 Konstruktive Optimierung des KW Gössendorf

4.1 Allgemeine konstruktive Optimierung

Generelle konstruktive Optimierungen wurden bereits im Vorfeld zwischen Prof. Tschernutter und der Steweag besprochen. Diese wurden bereits von der Steweag in deren Pläne eingearbeitet und für die Vollmodelluntersuchungen übergeben.

Für eine allfällig notwendige Räumung des Turbinenzulauf- bzw. Auslaufbereiches ist die Anordnung von Zufahrtsrampen zu empfehlen. Deren hydraulische Auswirkung wäre noch in weiteren Untersuchungen zu ermitteln.

4.2 Hydraulische Optimierung des Krafthauses

Die Gestaltung des Krafthauses erfolgte bereits im Entwurfsprojekt der Steweag auf die Ausbauwassermenge Q_a von 200 m³/s (entspricht einer ca. 40-tägigen Wasserführung). Wobei bis zur Übergabe der Modellpläne, die Lage des Krafthauses gegenüber der Wehranlage verändert wurde. Die Aufgabe des Modellversuches bestand in der hydraulischen Optimierung dieses übergebenen Entwurfes (Kapitel 3.2.4).

Der KH-Einlaufbereich soll so gestaltet sein, dass einerseits die Zuströmung im Turbineneinlaufquerschnitt möglichst drallfrei und mit einer möglichst gleichmäßigen Geschwindigkeitsverteilung erfolgt, und andererseits der Eintrag von Geschiebe zu verhindern ist. Weiters soll der Krafhaustrennpfeiler eine optimale Hochwasserentlastung des Wehrfeldes A nicht beeinträchtigen. Diese Bedingungen sind konträr und führen zu einem Kompromiss in der Gestaltung des Zulaufes.

Der KH-Auslauf soll so ausgebildet sein, dass das bei Spülvorgängen und HW-Ereignissen abgelagerte Geschiebe rasch abgespült wird bzw. diese Anlandungen durch eine entsprechende Ausbildung der UW-seitigen Auslaufmauer weitestgehend vermieden werden.

Weiters sind die Abströmgeschwindigkeiten so klein wie möglich zu halten um die Rückgabeverluste zu reduzieren.

Wesentliche hydraulische und wasserbauliche Probleme des Erstentwurfes die in den Versuchen (siehe Kapitel 3.3) aufgezeigt wurden betrafen vor allem:

- Strömungsablösung am OW-seitigen KH-Trennpfeiler zw. Turbine 2 und WF_A
- Räumliche Wirbelbildung durch die seitliche Anströmung der Turbine 2 aus dem Bereich WF_A . Durch die unterschiedliche Höhenlage des Turbinenvorhofes und des Wehrfeldbereiches entstand ein horizontal gegen den Uhrzeigersinn drehender Wirbel der mit dem vertikal drehenden Einlaufwirbel unmittelbar vor der Rechenebene äußerst unruhige Strömungszustände (große Geschwindigkeits- und Richtungsschwankungen) im Turbineneinlauf der Turbine 2 ergab.

- Beginnende lufteinziehende Wirbel im 1 und 2-Maschinenbetrieb aufgrund einer zu geringen Überdeckungshöhe der Turbineneinläufe.
- Nicht Vorhandensein einer Geschiebeleitschwelle und damit auch die Gefahr des Einwerfens von Geschiebe in den KH-Zulauf bei kleineren und mittleren HW-Ereignissen.
- Durch die Erstentwurfsgeometrie gab es Bereiche die bei einer Sandfangspülung nicht aktiviert werden.
- Zu niedrige und zu kurze UW-seitige Auslaufmauer führten zu starken Verlandung des KH Auslaufs.
- Zu niedrige UW-seitige Auslaufmauer führte zu Wasserverlusten aus dem KH-Auslauf und zu Fallhöhenverlusten.
- Hohe Geschwindigkeiten an der KH-Rückgabe aufgrund eines zu geringen Auslaufquerschnittes im UW.

Zur Bewältigung der angeführten Probleme wurden weitgehende Variantenuntersuchungen durchgeführt (siehe Kapitel 3.3). Es werden nachfolgend mehrere hydraulisch konstruktive Maßnahmen vorgeschlagen die einen zufriedenstellenden KH-Betrieb mit einer effizienten Geschiebeabwehr gewährleisten sollen.

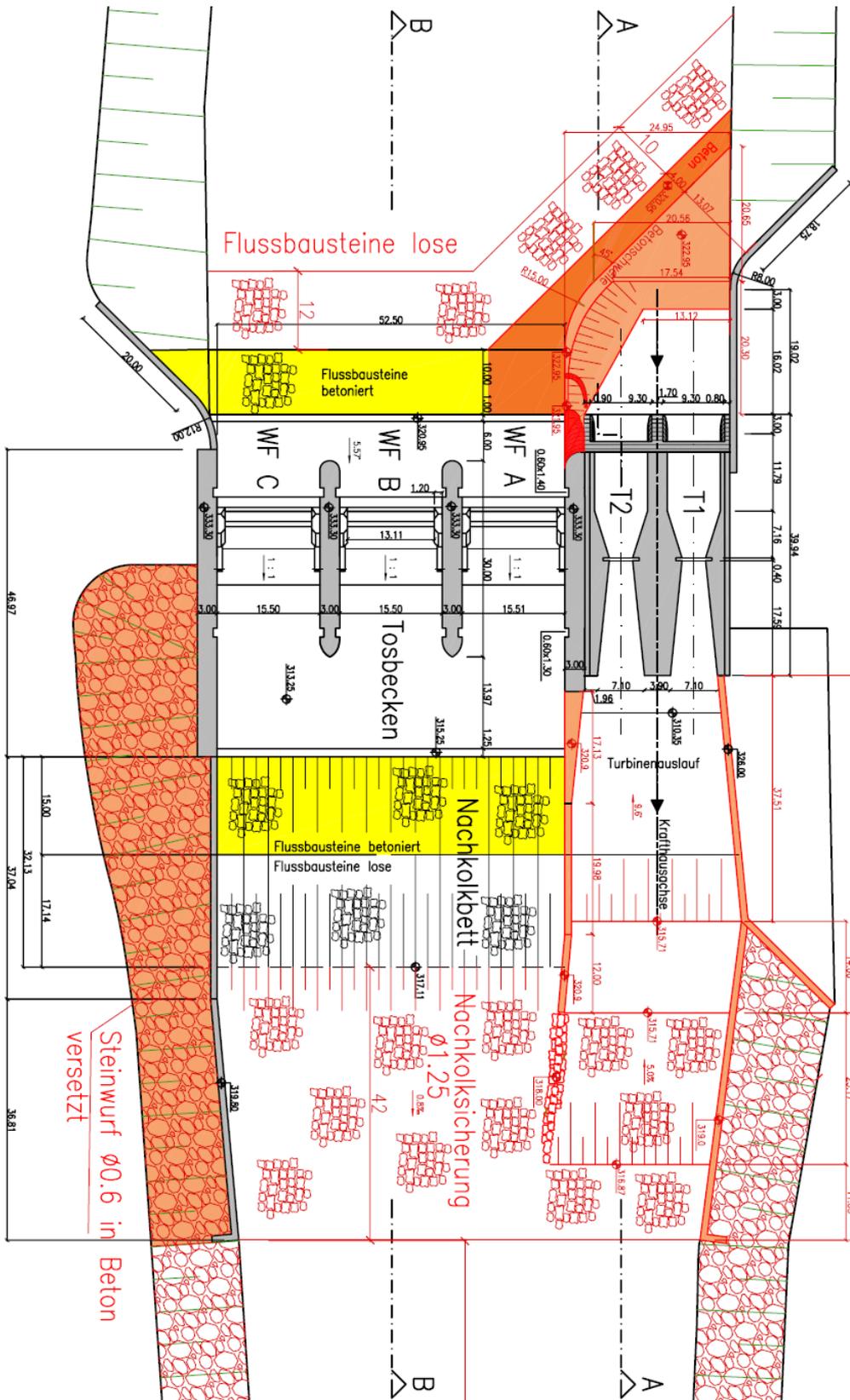


Abb. 4.1: Grundriss empfohlene Krafthausform

4.2.1 OW-seitiger Krafthautrennpfeiler und Strömungsgleichrichter (Leitwände)

Da die Urplanungsvariante im 2MB auf der Turbine 2 zu schlechten Anströmungen führte, wurden weitergehende Untersuchungen notwendig. Auf Grund von konstruktiven Vorgaben der Steweg wurde dieses Vorhaben noch komplexer:

- Keine Ausbuchtung aus der Flucht in das Wehrfeld A
- Freihaltung der Aufstandsflächen für Harkenrechenreiniger bzw. OW-Dammbalken

Daraus resultierte die Beibehaltung der Trennpfeilerbreite aus der übergebenen Planung.

Für die Entwicklung einer annehmbaren Anströmung in allen Betriebszuständen waren zahlreiche Untersuchungsvarianten notwendig (siehe Kap.3.3), wobei jede Variante Vor- bzw. Nachteile aufwies. Die in Kapitel 3.3 entwickelte, beste (siehe Kapitel 3.3.20) bzw. zweitbeste Variante (siehe Kapitel 3.3.17) entsprachen nicht exakt den konstruktiven Wünschen der Steweg. Es musste festgestellt werden, dass für den maßgebenden Betriebszustand des Zweimaschinenbetriebes Lösungen mit Leitwand mit Abstand die besten Ergebnisse erzielten (Abb. 4.3, ist ident mit Abb. 3.90).

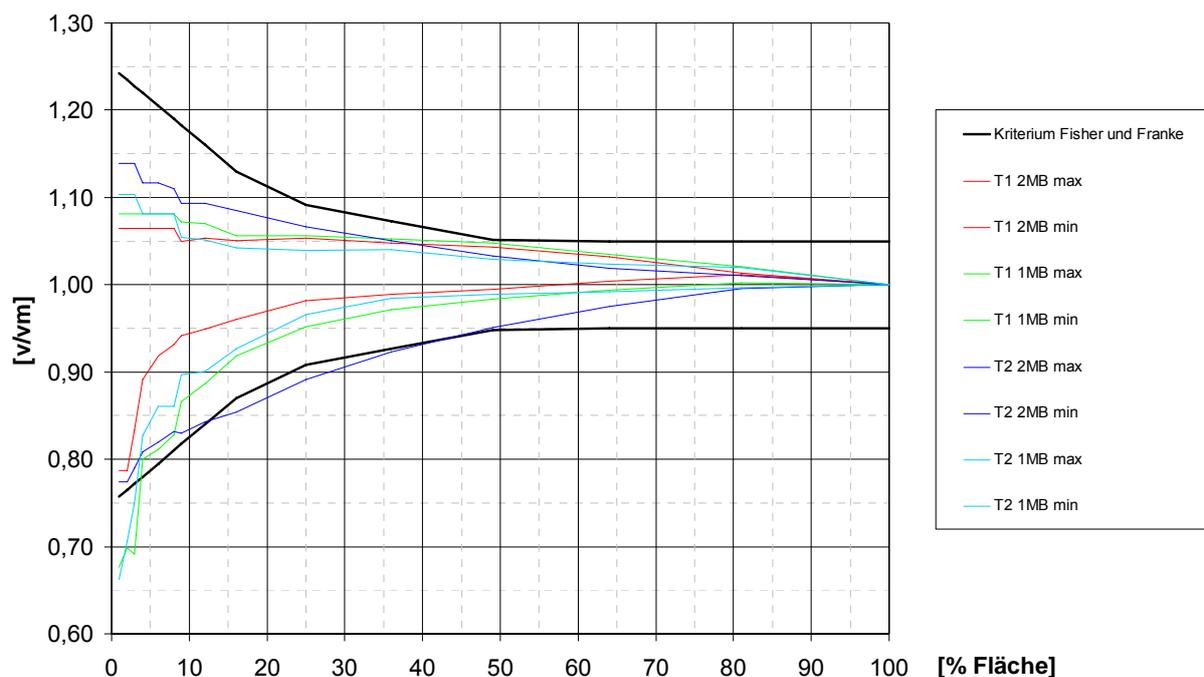
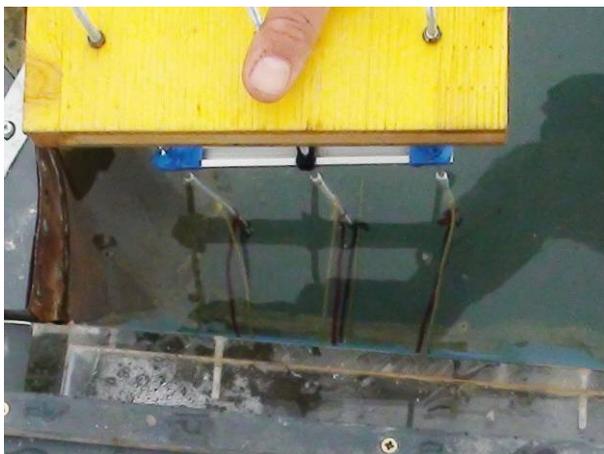
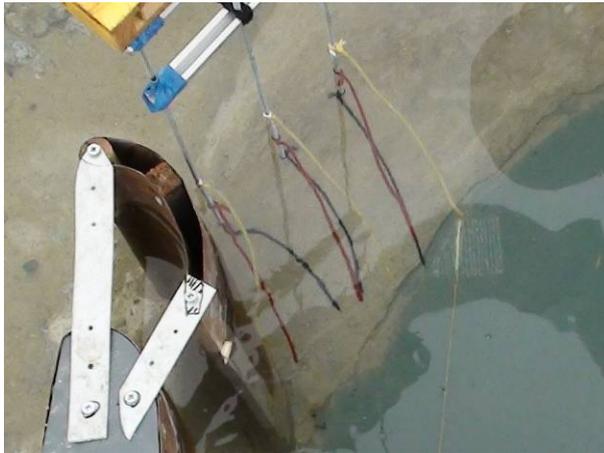


Abb. 4.3: Verteilungen der bezogenen Geschwindigkeiten bei der empfohlenen Trennpfeilervariante R4 mit Leitwand (LW5) im 1 und 2 Maschinenbetrieb

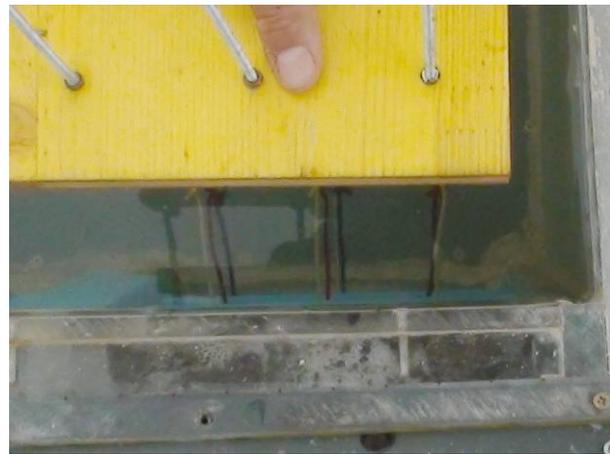
4.2.1.1 Variante 1, Empfehlung

Zur Vermeidung von Strömungsablösungen am rechten Trennpfeiler der Turbine 2 hat sich der Einbau eines vertikalen Pfeilers (Trennpfeilervariante R4) in Zusammenspiel mit einer vorgesetzten Leitwand hydraulisch als vorteilhaft erwiesen (siehe Kapitel 3.3). Es kommt mit diesem Trennpfeilertyp zu einer guten Strömungsführung aus dem WF_A zur Turbine 2 (siehe Kapitel 3.3.22).

Turbine 2



Turbine 1

**Abb. 4.4: Qualitative Anströmfotos an Turbinen 1 und 2 2MB vor der Rechenebene**

Die empfohlene Variante hält im Gegensatz zur Variante aus Kapitel 3.3.20, trotz vorgesetzter Leitwand bei der Turbine 2 im Zweimaschinenbetrieb (2-MB) nicht exakt die Grenzbedingungen nach Fisher und Franke ein (siehe Abb. 4.3). Die gute qualitative Anströmung an die Turbinen wird in Abb. 4.4 dargestellt. Beim Einmaschinenbetrieb (1MB), kam es bei der Turbine 1 im rechten Randbereich zum mittleren Trennpfeiler bzw. auch bei der Turbine 2 zu geringen Ablösungen. Auf Grund dessen kön-

nen die gewählten Grenzbedingungen (siehe Abb. 4.3) nicht exakt eingehalten werden.

Der Trennpfeiler wird bis zur Höhe des ursprünglichen Trennpfeilers bzw. OK Krafthauses (333,30 m.ü.A.) gezogen. Auf der Seite des Turbineneinlaufes springt er um die Auflagertiefe für den möglichen Rechenreiniger bzw. die Dammbalken seitlich zurück (85 cm) und entwickelt sich mit einer Viertelellipse (Achismaße: 2,2 m x 4,2m). Am Scheitelpunkt folgt eine Viertelellipse (Achismaße 0.56 m x 0.80m), die zum WF_A anschließt (Abb. 4.5).

Die Leitwand muss über das Stauziel 330,8 geführt werden. Die geplante Leitwand verjüngt sich in Strömungsrichtung von 80 cm auf 40 cm. Sie ist am Vorhofboden ca. 1 m und auf der Kote 333,30 m.ü.A. ca. 6,7 m von der Rechenebene entfernt. Der Abstand vom Beginn der Leitwand zum Trennpfeilerkopf beträgt ca. 5,18 m. Die Leitwand schneidet in den Wehrrücken der Geschiebeleitschwelle ein. Sie ist OW-seitig mit einem Kreisprofil ($\varnothing 80$ cm) abgerundet und endet stumpf in der Flucht der Landseite des Trennpfeilers. Beide Seiten der Leitwand sind jeweils mit einem Kreisbogen und anschließendem Ellipsensegment ausgerundet. Die Außenseite mit einem Kreisbogen $\varnothing 2.55$ m und einem Ellipsensegment mit den Achsmaßen 4,40 m·9,55 m, die Innenseite mit einem Kreisbogen $\varnothing 2.00$ m und einem Ellipsensegment mit den Achsmaßen 4,40 m·8,80 m (siehe Abb. 4.5).

Zur Abwehr von Treibholz bzw. Eis ist der Einbau einer vertikal verschiebbaren Geschiebeabwehr OW-seitig und UW-seitig vorzusehen. Die Zugängigkeit mittels eines Wartungssteiges wäre sinnvoll.

Durch den Einbau einer sogenannten Leitwand kann die Anströmung vor allem im 2-Maschinenbetrieb (maßgebend) wesentlich verbessert werden. Vor allem die Richtungsschwankungen der Strömung können beruhigt werden. Da die Zuströmung zur Turbine 2 im Wesentlichen seitlich vom WF_A erfolgt, kann mit diesen Einbauten eine vernünftige Rektifikation der Strömung zur Turbine 2 erfolgen ohne die Strömungsverhältnisse für die Turbine 1 zu verschlechtern. Es wird bei dieser Maßnahme vor allem der Horizontalwirbel der durch den Höhenversatz KH-Zulauf und Wehrfeldbereich entsteht gestört.

Die Turbinenzuflussverhältnisse für diese Maßnahme werden auch im Kapitel 4.2.3 behandelt.

4.2.1.1.1 Einfluss im Hochwasserfall

Ein geringfügiger, konsequenzloser Nachteil dieser Variante gegenüber einer Variante ohne Leitwand ist die geringfügige Anhebung des Oberwasserspiegels (siehe KW 2008).

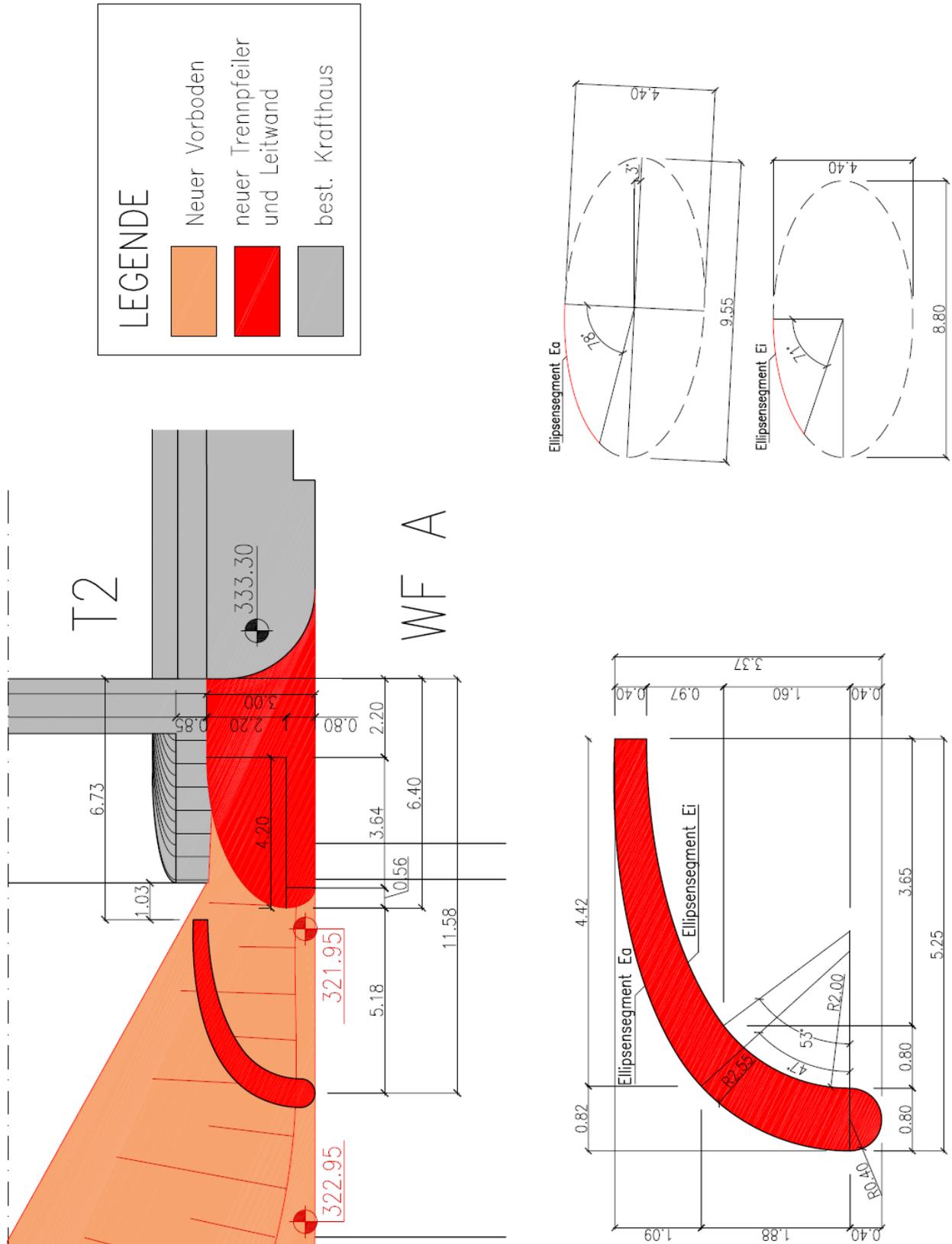


Abb. 4.5: Geometrie des Trennpfeilers mit Leitwand im Detail

4.2.1.1.2 Weitere Optimierungsmöglichkeiten

In einem ersten Schritt könnte der Trennpfeiler zwischen den Turbinen 1 und 2 ins OW ausgerundet werden, um die Anströmung im 1MB zu verbessern. Grundsätzlich positive Untersuchungen dazu sind in Kapitel 3.3.25 dargestellt. Dabei sind jedoch konstruktive Überlegungen bezüglich der Dammbalken und Rechenreiniger anzustellen.

Als weitere Option könnte trotz derzeitigem Planungsstand Überlegungen der Wehrtrennpfeiler dahingehend verbreitert werden, um eine direkte Verziehung in den Kraft Hauseinlauf zu erzielen (siehe Variante im Kapitel 3.3.20). Zur optimalen Ausnutzung wären dafür verschleißbare Dammbalkennischen vorzusehen (siehe Beispiel in Kapitel 3.3.24). Weiters wäre die Vorsehung eines hydraulischen Greifrechenreinigers bzw. eines Seilrechenreinigers der ausschließlich auf den Rechenstäben sitzt vorteilhaft. Mit diesen Maßnahmen könnte das in Kapitel 3.3.20 Optimum im 2MB erzielt werden.

Als letzte Verbesserungsmöglichkeit wird danach die Verbreiterung und Ausrundung der Geschiebeschwelle im Bereich des Wehrvorbodens angesehen für die bisher noch keine Untersuchungen durchgeführt wurden.

4.2.1.2 Variante 2

Falls von der Steweg die Variante mit einer vorgesetzten Leitwand nicht ausgeführt werden kann, sollte die in Kapitel 3.3.24 beschriebene Variante (Rouvé Pfeiler (R5) mit Kugelkalotte ohne Leitwand) zur Ausführung kommen.

4.2.1.2.1 Weitere Optimierungsmöglichkeiten

Mögliche Verbesserungsmöglichkeiten in der Anströmung könnten durch den Verschluss der Dammbalkennische erzielt werden (siehe Kapitel 3.3.24).

In einem ersten Schritt könnte der Trennpfeiler zwischen den Turbinen 1 und 2 ins OW ausgerundet werden, um die Anströmung im 1MB zu verbessern. Grundsätzlich positive Untersuchungen dazu sind in Kapitel 3.3.25 dargestellt. Dabei sind jedoch konstruktive Überlegungen bezüglich der Dammbalken und Rechenreiniger anzustellen.

Als letzte Verbesserungsmöglichkeit wird danach die Verbreiterung und Ausrundung der Geschiebeschwelle im Bereich des Wehrvorbodens angesehen.

4.2.2 Rechenträger

Im Kapitel 3.3 konnte ermittelt werden, dass die Geschwindigkeitsverteilung der Turbine 2 durch eine stärkere Neigung (40° aus der Horizontalen) des oberen Rechenträgers verbessert werden kann.

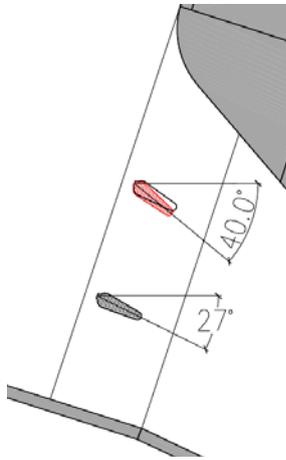


Abb. 4.6: Turbine 2 stärker geneigter, oberer Rechenträger

4.2.3 Turbinenzulaufgeschwindigkeiten

Die Messung der Turbinenzuströmungsverhältnisse erfolgte ca. 6,0 m (15,0 cm Modell) nach der Rechenebene mit einem Miniaturmessflügel in einem Punktraster von 10×10 Punkten über einem Zeitraum von 0,5 Minuten pro Messpunkt. Es wurde die mittlere, die maximale und minimale Geschwindigkeit normal zur Recheneinlaufebene achsparallel zur Turbine gemessen.

Die Messungen wurden ausschließlich für den Ausbaudurchfluss Q_A von $200 \text{ m}^3/\text{s}$ und einer Stauzielhöhe von $330,8 \text{ m.ü.A}$ durchgeführt. Nur bei der Variante 1 wurden Vergleichsmessungen bei Q_A von $150 \text{ m}^3/\text{s}$ ausgeführt. Die dargestellten Geschwindigkeiten sind umgerechnete Naturgeschwindigkeiten, der Umrechnungsfaktor auf Naturverhältnisse beträgt 6,3 (nach dem Froude'schen Modellgesetz s. Pkt. 2.1).

Die Turbine 1 ist landseitig und Turbine 2 neben dem WF_A situiert.

Vollständig gemessene Turbinenlastfälle (Stauziel $330,8$):

Variante 1: Mittler Trennpfeiler (R4) mit Leitwand (L6), Geschiebeleitschwelle (siehe Abb. 4.1 und Abb. 4.5)

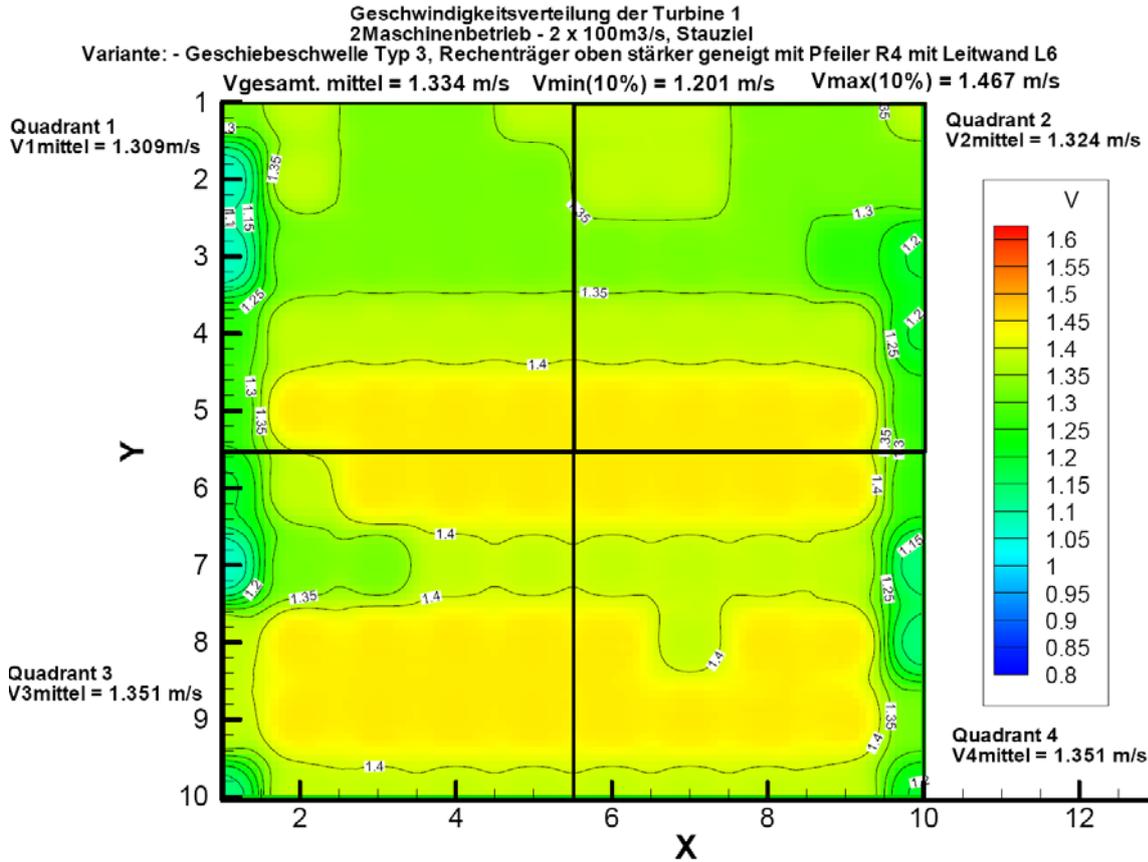
1-Maschinenlastfall – Turbine 1 und Turbine 2

2-Maschinenlastfall – Turbine 1 und Turbine 2

Variante 2 (Darstellung siehe Anhang Kapitel 3.3.24):

Rouvé Pfeiler (R5) mit Kugelkalotte ohne Leitwand, Geschiebeleitschwelle;

2-Maschinenlastfall – Turbine 2



Geschwindigkeitsverteilung der Turbine 1 (2 Maschinenbetrieb - 2 x 100m³/s), Stauziel
 Variante: - Geschiebeschwelle mit Vorboden Typ 3, Rechenträger oben stärker geneigt mit Pfeiler R4 und Leitwand L6

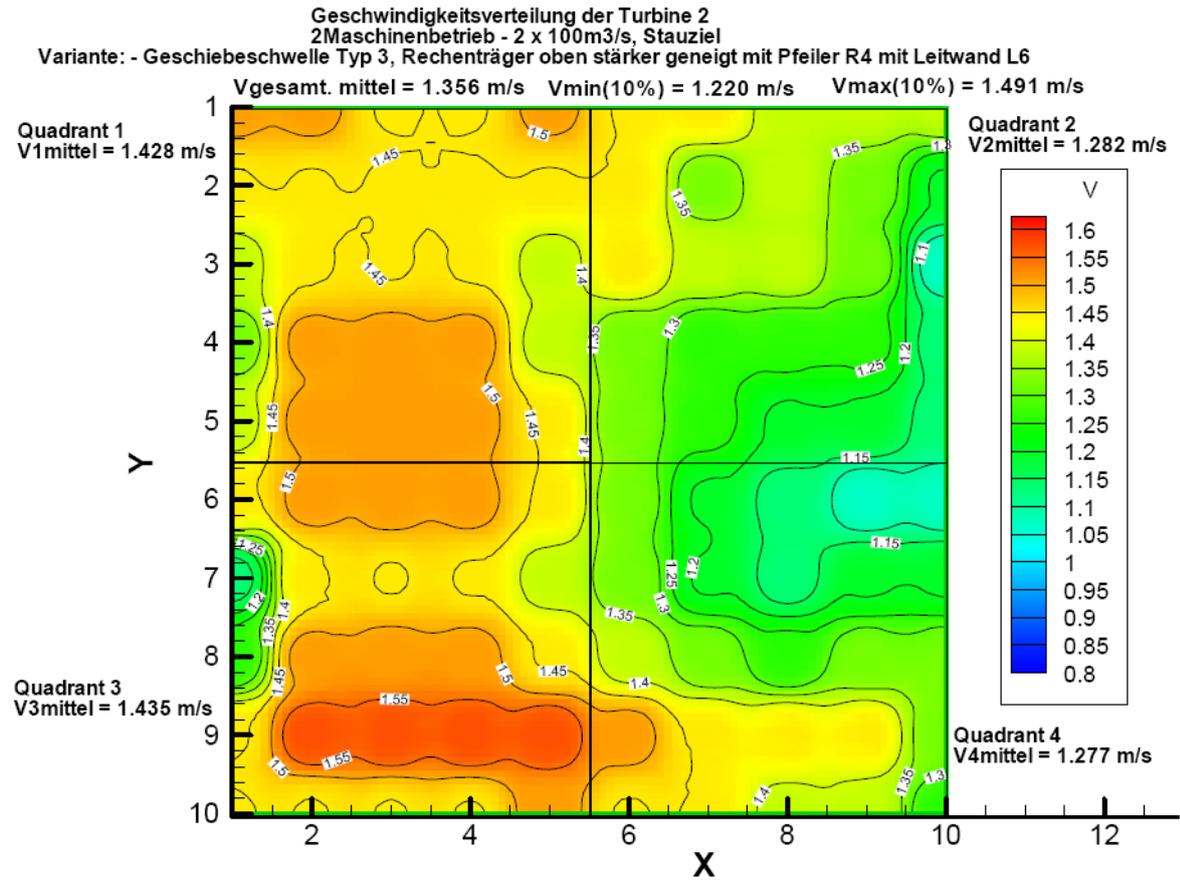
Umgerechnete Naturwerte

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1,297	1,359	1,297	1,297	1,359	1,359	1,359	1,297	1,297	1,359
2	1,050	1,359	1,297	1,297	1,297	1,359	1,359	1,297	1,297	1,297
3	0,926	1,235	1,359	1,420	1,235	1,420	1,173	1,420	1,235	1,420
4	1,050	1,297	1,297	1,297	1,297	1,297	1,297	1,297	1,235	1,173
5	0,926	1,235	1,235	1,420	1,173	1,420	1,235	1,359	1,235	1,359
6	1,235	1,359	1,359	1,359	1,359	1,359	1,359	1,359	1,359	1,173
7	0,988	1,359	1,359	1,420	1,359	1,482	1,359	1,420	1,359	1,359
8	1,050	1,420	1,420	1,420	1,420	1,482	1,420	1,420	1,420	1,235
9	1,173	1,359	1,420	1,420	1,420	1,420	1,420	1,420	1,420	1,173
10	1,050	1,359	1,359	1,482	1,359	1,482	1,420	1,482	1,359	1,420
1	1,235	1,359	1,420	1,420	1,420	1,420	1,420	1,420	1,359	1,359
2	1,050	1,297	1,297	1,359	1,359	1,359	1,359	1,359	1,359	1,112
3	0,988	1,173	1,235	1,420	1,235	1,420	1,235	1,420	1,235	1,420
4	1,359	1,420	1,420	1,420	1,420	1,420	1,359	1,420	1,420	1,112
5	1,359	1,420	1,359	1,482	1,359	1,482	1,359	1,482	1,359	1,482
6	1,359	1,420	1,420	1,420	1,420	1,482	1,359	1,482	1,420	1,482
7	1,235	1,359	1,359	1,482	1,420	1,482	1,420	1,482	1,420	1,482
8	1,112	1,359	1,359	1,359	1,359	1,359	1,359	1,359	1,359	1,173
9	0,926	1,359	1,235	1,420	1,235	1,420	1,359	1,420	1,235	1,420
10	1,050	1,359	1,420	1,420	1,359	1,420	1,359	1,420	1,050	1,359

Quadrant 1 V1mittel	1,309		
	Mittelwert		
	Min. Wert	Max. Wert	
Quadrant 2 V2mittel		1,324	
Quadrant 3 V3mittel	1,351		
Quadrant 4 V4mittel			1,351
Vgesamt, mittel	1,334		
			Vmin(10%) 1,201
			Vmax(10%) 1,467

Zusatzkriterium: Linke und rechte Seite Kriterium 50+/-2.5%			
Linke Seite		max min	Rechte Seite
VII_mittel	1,330	0,684 0,650	Vre_mittel 1,338
VII_mittel	50,0%		Vre_mittel 50,0%

Abb. 4.7: Isothachen und Messwerte Turbine 1, 2MB, Variante 1 (m/s Natur)



Geschwindigkeitsverteilung der Turbine 2 (2 Maschinenbetrieb - 2 x 100m³/s), Stauziel
 Variante: - Geschiebeschwelle mit Vorboden Typ 3, Rechenträger oben stärker geneigt mit Pfeiler R4 und Leitwand L6
 Umgerechnete Naturwerte

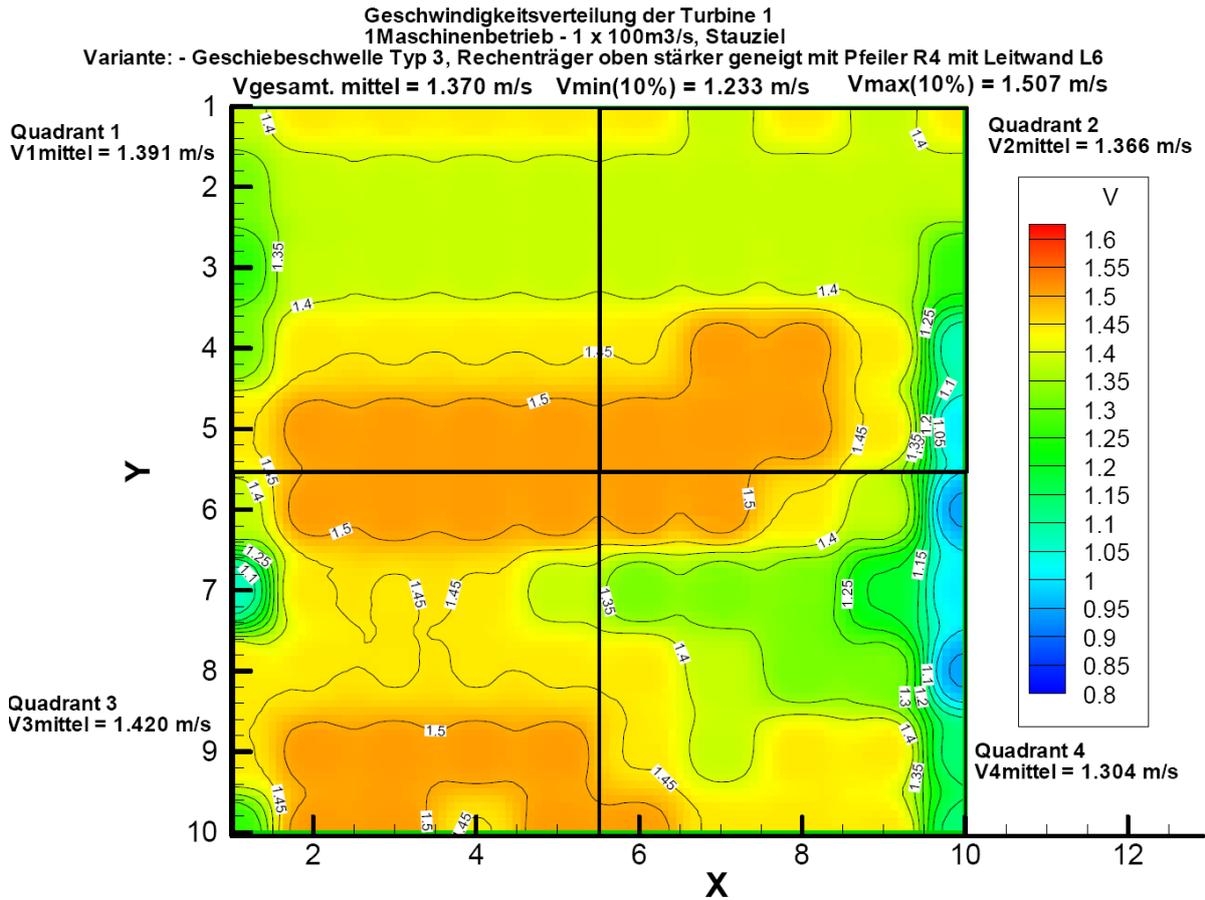
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1,482	1,482	1,420	1,420	1,482	1,420	1,420	1,359	1,359	1,359
2	1,420	1,420	1,420	1,420	1,420	1,420	1,297	1,359	1,297	1,173
3	1,359	1,420	1,420	1,420	1,359	1,420	1,359	1,359	1,297	1,050
4	1,297	1,482	1,482	1,482	1,359	1,297	1,235	1,235	1,235	1,112
5	1,359	1,482	1,482	1,482	1,420	1,297	1,235	1,235	1,173	1,112
6	1,420	1,482	1,482	1,482	1,420	1,297	1,173	1,112	1,050	1,050
7	1,112	1,420	1,420	1,420	1,359	1,297	1,173	1,112	1,173	1,173
8	1,235	1,482	1,482	1,482	1,420	1,359	1,297	1,235	1,297	1,297
9	1,420	1,544	1,544	1,544	1,544	1,482	1,420	1,420	1,420	1,297
10	1,420	1,420	1,420	1,420	1,482	1,420	1,420	1,359	1,359	1,235

Quadrant 1 V1mittel	1,428	Mittelwert	Quadrant 2 V2mittel	1,282
		Min. Wert Max. Wert		
Quadrant 3 V3mittel	1,435		Quadrant 4 V4mittel	1,277
Vgesamt, mittel	1,356		Vmin(10%)	1,220
			Vmax(10%)	1,491

Zusatzkriterium: Linke und rechte Seite Kriterium 50+/-2.5%			
Linke Seite		max min	Rechte Seite
VII_mittel	1,432	Sollwerte	Vre_mittel
VII_mittel 50,0%	0,734	0,695 0,681	Vre_mittel 50,0%
			1,280
			0,656

Linke Seite >2.5%Abweichung Rechte Seite >2.5%Abweichung

Abb. 4.8: Isothachen und Messwerte Turbine 2, 2MB, Variante 1 (m/s Natur)



Geschwindigkeitsverteilung der Turbine 1 (1 Maschinenbetrieb - 1 x 100m³/s), Stauziel

Variante: - Geschiebeschwelle mit Vorboden Typ 3, Rechenträger oben stärker geneigt mit Pfeiler R4 und Leitwand L6
 Umgerechnete Naturwerte

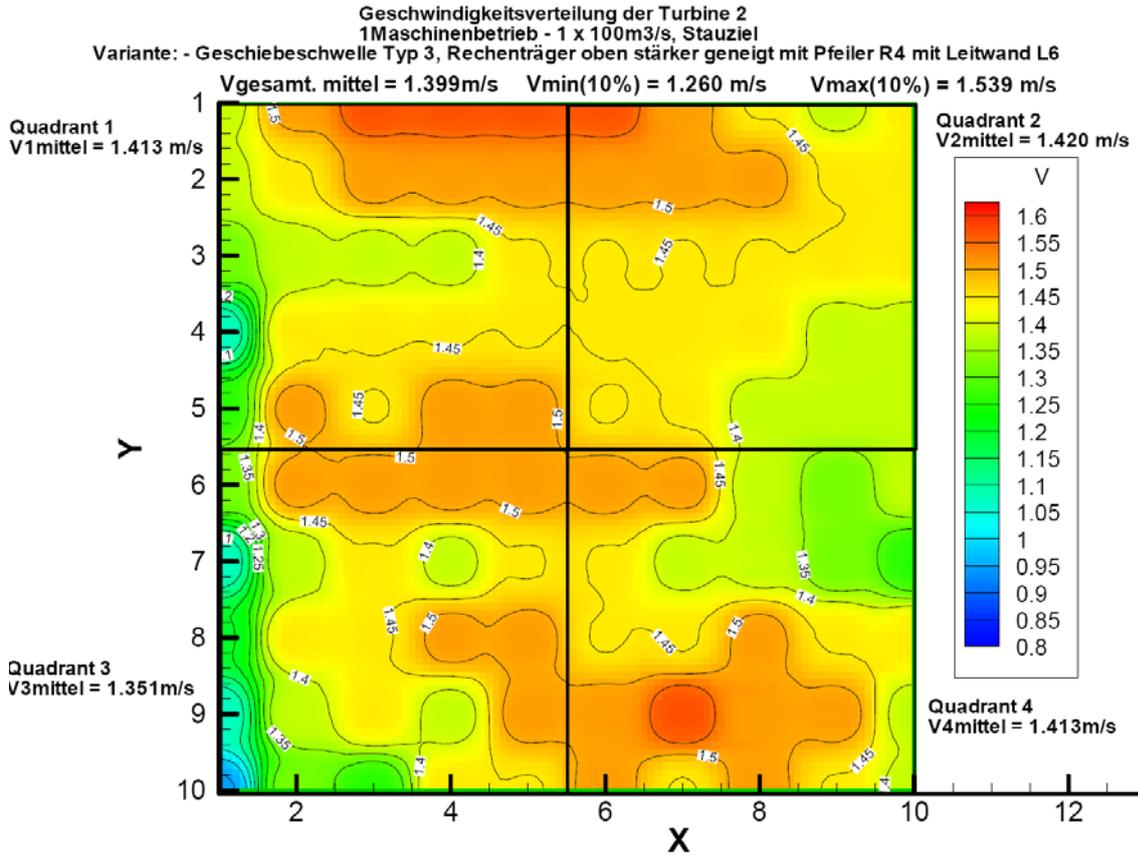
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	1.359	1.420	1.420	1.420	1.420	1.420	1.359	1.420	1.359	1.420	
2	1.297	1.359	1.359	1.359	1.359	1.359	1.359	1.359	1.359	1.359	
3	1.235	1.359	1.359	1.359	1.359	1.359	1.359	1.359	1.359	1.235	
4	1.297	1.420	1.420	1.420	1.420	1.420	1.482	1.482	1.420	1.050	
5	1.235	1.420	1.482	1.482	1.482	1.482	1.482	1.482	1.420	0.988	
6	1.359	1.482	1.482	1.482	1.482	1.482	1.482	1.420	1.359	0.926	
7	1.050	1.420	1.420	1.420	1.359	1.297	1.297	1.297	1.173	0.988	
8	1.420	1.420	1.420	1.420	1.420	1.420	1.359	1.297	1.297	0.926	
9	1.359	1.482	1.482	1.482	1.482	1.420	1.359	1.420	1.420	1.112	
10	1.235	1.482	1.482	1.420	1.482	1.482	1.420	1.420	1.420	1.112	

Quadrant 1	V1mittel	1,391		Quadrant 2	V2mittel	1,366
			Mittelwert			
			Min. Wert Max. Wert			
Quadrant 3	V3mittel	1,420		Quadrant 4	V4mittel	1,304
Vgesamt. mittel		1,370		Vmin(10%)		1,233
				Vmax(10%)		1,507

Zusatzkriterium:	Linke Seite	max	min	Rechte Seite
Vii_mittel	1,406	Sollwerte		Vre_mittel
Vii_mittel 50,0%	0,720	0,702	0,668	Vre_mittel 50,0%
				0,684

Linke Seite >2.5% Abweichung

Abb. 4.9: Isothachen Turbine 1, 1MB, Variante 1 (m/s Natur)



Geschwindigkeitsverteilung der Turbine 2 (1 Maschinenbetrieb - 1 x 100m³/s), Stauziel
 Variante: - Geschiebeschwelle mit Vorboden Typ 3, Rechenträger oben stärker geneigt mit Pfeiler R4 und Leitwand L6
 Umgerechnete Naturwerte

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1,359	1,482	1,544	1,544	1,544	1,544	1,482	1,420	1,359	1,420
2	1,235	1,420	1,482	1,482	1,482	1,482	1,482	1,482	1,420	1,420
3	1,297	1,359	1,359	1,359	1,420	1,420	1,420	1,420	1,420	1,420
4	1,050	1,420	1,420	1,420	1,420	1,420	1,420	1,420	1,359	1,359
5	0,988	1,173	1,420	1,482	1,420	1,606	1,420	1,482	1,359	1,482
6	1,235	1,482	1,420	1,482	1,482	1,482	1,420	1,420	1,359	1,359
7	1,050	1,420	1,420	1,606	1,359	1,482	1,420	1,606	1,420	1,482
8	1,297	1,482	1,482	1,482	1,482	1,482	1,482	1,359	1,297	1,359
9	1,235	1,420	1,420	1,606	1,482	1,606	1,420	1,606	1,173	1,420
10	0,988	1,235	1,235	1,420	1,359	1,482	1,359	1,482	1,235	1,482
11	0,926	1,359	1,359	1,482	1,235	1,606	1,420	1,482	1,420	1,482
12	1,173	1,420	1,420	1,482	1,482	1,420	1,420	1,482	1,420	1,420
13	0,926	1,359	1,359	1,482	1,235	1,606	1,420	1,482	1,420	1,482
14	1,050	1,359	1,420	1,359	1,482	1,482	1,544	1,482	1,482	1,359
15	0,741	1,359	1,235	1,482	1,173	1,606	1,420	1,606	1,420	1,606
16	0,926	1,297	1,235	1,420	1,420	1,420	1,482	1,420	1,482	1,359
17	0,741	1,235	1,173	1,482	1,050	1,420	1,359	1,606	1,420	1,482

Quadrant 1 V1mittel	1,413	Quadrant 2 V2mittel	1,420
Quadrant 3 V3mittel	1,351	Quadrant 4 V4mittel	1,413
Vgesamt. mittel	1,399	Vmin(10%)	1,260
		Vmax(10%)	1,539

Zusatzkriterium: Linke und rechte Seite Kriterium 50+-2.5%		Rechte Seite	
Linke Seite	max	min	Rechte Seite
VII_mittel	1,382	Sollwerte	Vre_mittel 1,417
VII_mittel 50,0%	0,708	0,717 0,682	Vre_mittel 50,0% 0,726

Abb. 4.10: Isothachen Turbine 2, 1MB, Variante 1 (m/s Natur)

4.2.4 Injektor bzw. BoatBuster (Eisbaum)

Zur Unterdrückung von lufteinziehenden Wirbeln wird der Einbau eines Injektors in der Rechenebene vorgeschlagen (Abb. 4.11). Diese Maßnahme soll das Generieren eines massiven lufteinziehenden Oberflächenwirbels durch permanentes Absaugen von kleinen Wirbelstrukturen an der Oberfläche verhindern. Der Injektor besteht aus eine Art Skimmer (eingetauchter Streichwehrüberfall) im Bereich des Stauziels (Kote 330,8 bzw. auch tiefer bei Absenkung des OW-Spiegels für Stauraumpülungen im Abschnitt oberhalb der festen Sohlschwelle) der durch einen wandparallelen Schlitz (ca. 0,60 m breit über die gesamte Einlaufbreite mit gewissen konstruktiven Unterbrechungen) mit dem tiefer liegenden Turbineneinlauf verbunden ist. Aufgrund des Druckabfalls im Einlauf durch die Strömungsbeschleunigung wird ein Absaugen der Oberflächenströmung bewirkt und damit der Aufbau einer starken Rotationsströmung vor der Rechenebene gestört.

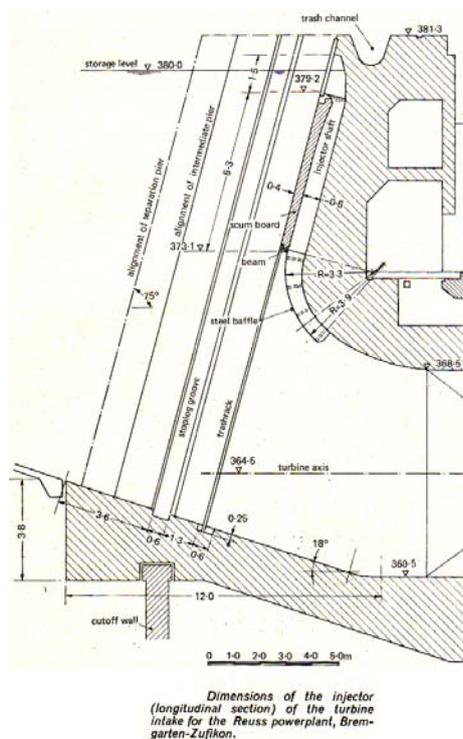


Abb. 4.11: Beispiel Injektor Abb. 4.12: Injektor (Metallvorbau) mit 0,8 m Tiefe (KNAUSS 1983)

Im Modell wurde dieser Injektor mittels einer nachträglich vor den Turbineneinläufen montierten Metallebene nachgebildet, da ein der Realität entsprechender Umbau des Modells mit vertretbarem Aufwand nicht möglich gewesen wäre (Abb. 4.12). Es wurden einmal ein Injektorkanal mit 0,4 m Tiefe und danach einer mit 0,8 m Tiefe überprüft. Mit dieser improvisierten Maßnahme konnten auch im Modell die Wirbel erfolgreich (qualitativ!) unterdrückt werden. Die Versuche zeigten, dass mit dem größeren Injektorkanal bessere Ergebnisse erzielt werden können.



Abb. 4.13: Vergleich Wirbelbildung bei Verwendung der Injektoren (ohne, 0,4m Öffnung, 0,8m Öffnung)

Unter Berücksichtigung einer gewissen Absenkungshöhe bei kombinierten Turbinen- und Spülbetrieb (ca. 80 cm bei Q_a) sollte die Überlaufkante des Skimmers auf ca. 1 - 1,20 m unterhalb des Stauziels liegen.

Sollte diese Maßnahme dennoch in der Natur nicht zufriedenstellend sein, so besteht zusätzlich die Möglichkeit des Einbaus eines Art Eisbaumes (Boom – dient in der Regel zur Treibzeugabwehr) welcher schräg abgehängt vor dem Kraftwerksrechen zu Brechung von Oberflächenwirbeln führt (Abb. 4.14).

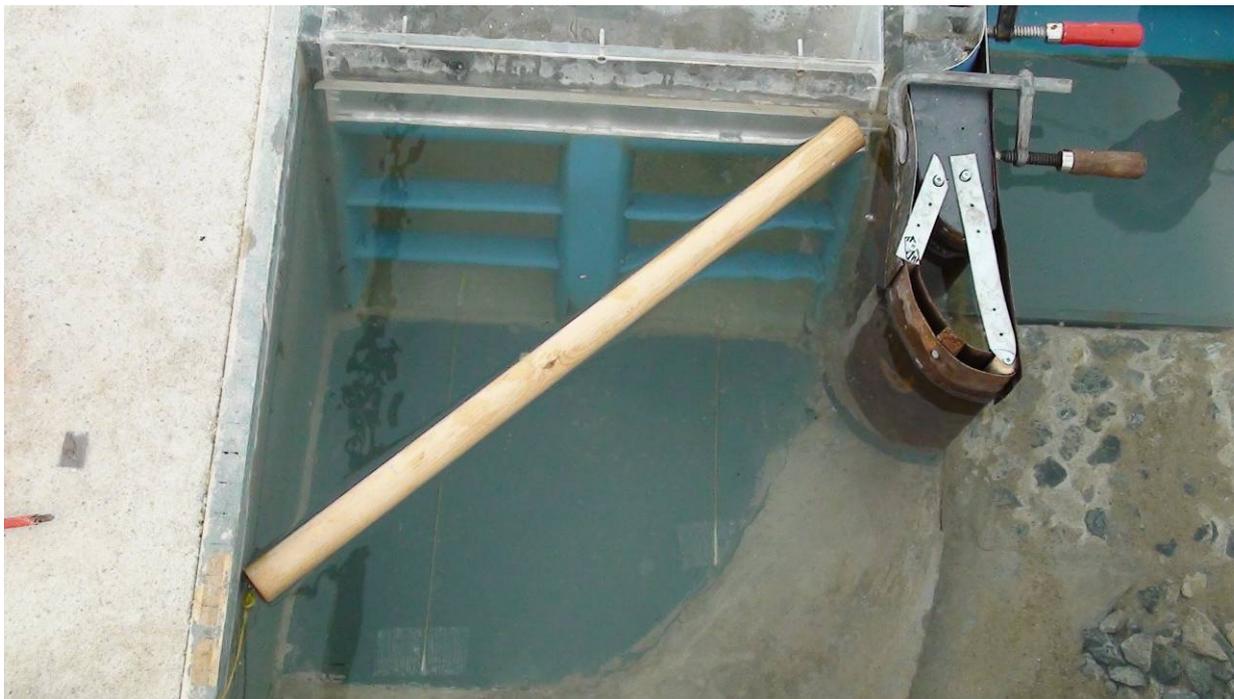


Abb. 4.14: Beispiel Eisbaum

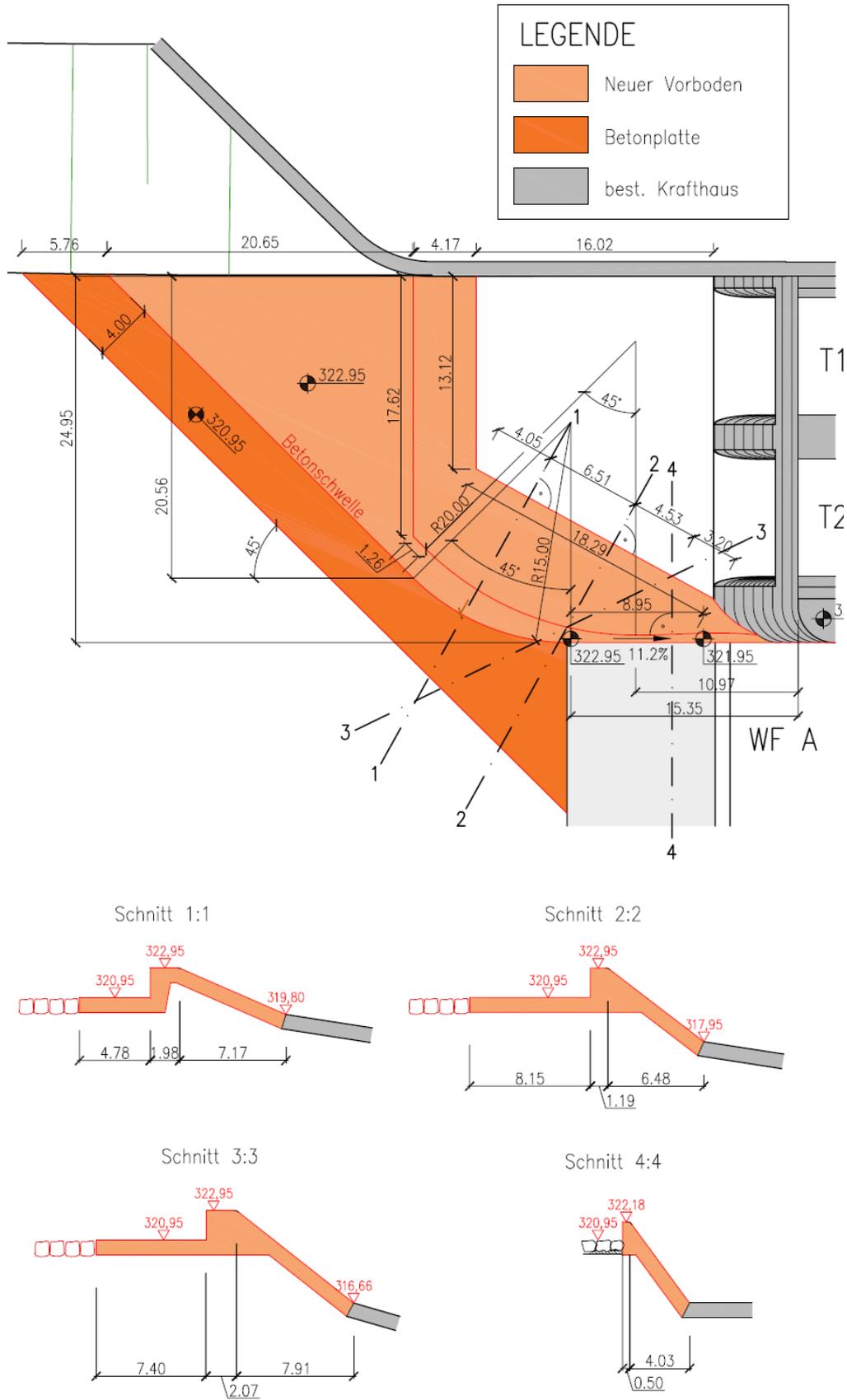


Abb. 4.15: Grundriss und Schnitte des Vorbodens und Geschiebeschwelle

4.2.5 Geschiebeleitschwelle

Zur Verbesserung der Spülverhältnisse unmittelbar vor dem KH-Einlauf wird die Linienführung der vorhandenen Schwelle abgerundet ins Oberwasser gezogen und weiters im 45° Winkel mit der linken Böschung verschnitten. Die Höhe der Geschiebeleitschwelle wird im OW-seitigen Bereich letztendlich – damit auch nach Ausbildung einer höher liegenden Ausgleichssole eine wirksame Geschiebeabwehr zu erwarten ist - mit mindest 2,00 m (322,95 m.ü.A.) empfohlen. Im Bereich des abfallenden Turbinenzulaufes sollte sich die Höhe kontinuierlich auf 1,00 m (321,95 m.ü.A.) beim WF_A , auf das ursprüngliche Schwellenniveau, vermindern.

Die Schwelle selbst könnte zwecks Verhinderung des Überspringens von Sandkörnern in den KH-Zulauf beim Turbinenbetrieb bzw. bei Stauraumpülungen und HW-Ereignissen als Krag Schwelle mit einer ca. 0,5 bis 1,0 m breiten vorne abgerundeten Kragplatte versehen werden.

4.2.6 Krafthausvorboden

Im Zuge der Optimierung der Krafthausanströmung bzw. Geschiebeschwelle wurde auch die Problematik der Längsverwirbelung entlang des schrägen Vorbodens und der Trennwand zum Wehrfeld A (siehe Abb. 3.18) mittels eines schrägen verschnittenen Vorbodens qualitativ entschärft. Die Oberkante der Geschiebeschwelle wird an einer Geraden mit der bestehenden Vorbodengeometrie verschnitten, dadurch ergeben sich verschiedenen Vorbodenneigungen. Die, in Abb. 4.15 dargestellte und empfohlene Variante bietet sich auf Grund der Erfüllung der verschiedenen Anforderungen an.

4.2.7 KH-Auslaufkanal

Auf Grund der Geometrien am bestehenden Saugrohrende ergaben sich bei Q_A Geschwindigkeiten knapp über 2,0 m/s und Geschwindigkeitshöhen von knapp über 0,2 m, die nicht mehr zur Energieerzeugung verwendet werden können. Dieser Wert ist auf Grund der geringen Überschreitungstage akzeptabel, könnte jedoch durch Reduktion der Überstauhöhen bzw. Aufweitungen noch etwas reduziert werden. In der Literatur wird eine empfohlene Geschwindigkeit von $< 2,0$ m/s angeführt.

Am KH-Auslaufkanal erhöhten sich durch die vorgegebene Geometrie (hier nur bei Zweimaschinenbetrieb) diese Geschwindigkeiten z.B. bei Q_A auf bis zu 3,2 m/s. Um die Fallhöhenverluste zu reduzieren wird empfohlen die dortigen Geschwindigkeiten zumindest den Auslaufgeschwindigkeiten am Saugrohr anzupassen, indem der Strömungsquerschnitt erhöht wird. Es wäre wünschenswert wenn Geschwindigkeiten im Kanal um die 1 m/s liegen würden, wobei jedoch zu beachten ist, dass durch eine Reduktion der Fließgeschwindigkeiten die Energieerzeugung verbessert, die Abtransportfähigkeit von Geschiebe jedoch reduziert wird.

Konstruktiv wird bei Q_A mit der in Abb. 4.16 dargestellte Geometrie, mit einer Aufweitung der linken Umfassungsmauer und einem damit einhergehenden Breitengewinn von etwa 2,0 m, und einer Vertiefung von 1,4 m auf eine Kote von 315,71 m.ü.A. eine Geschwindigkeit von etwa 1,9 m/s erreicht. Bei einer reinen Vertiefung ohne Aufweitung von 1,8 m (auf 315,31 m.ü.A.) könnte dieselbe Geschwindigkeitsreduktion erreicht werden. Durch die Vertiefung wird auch das Gefälle im Auslaufboden von 12° auf 9.6° reduziert.

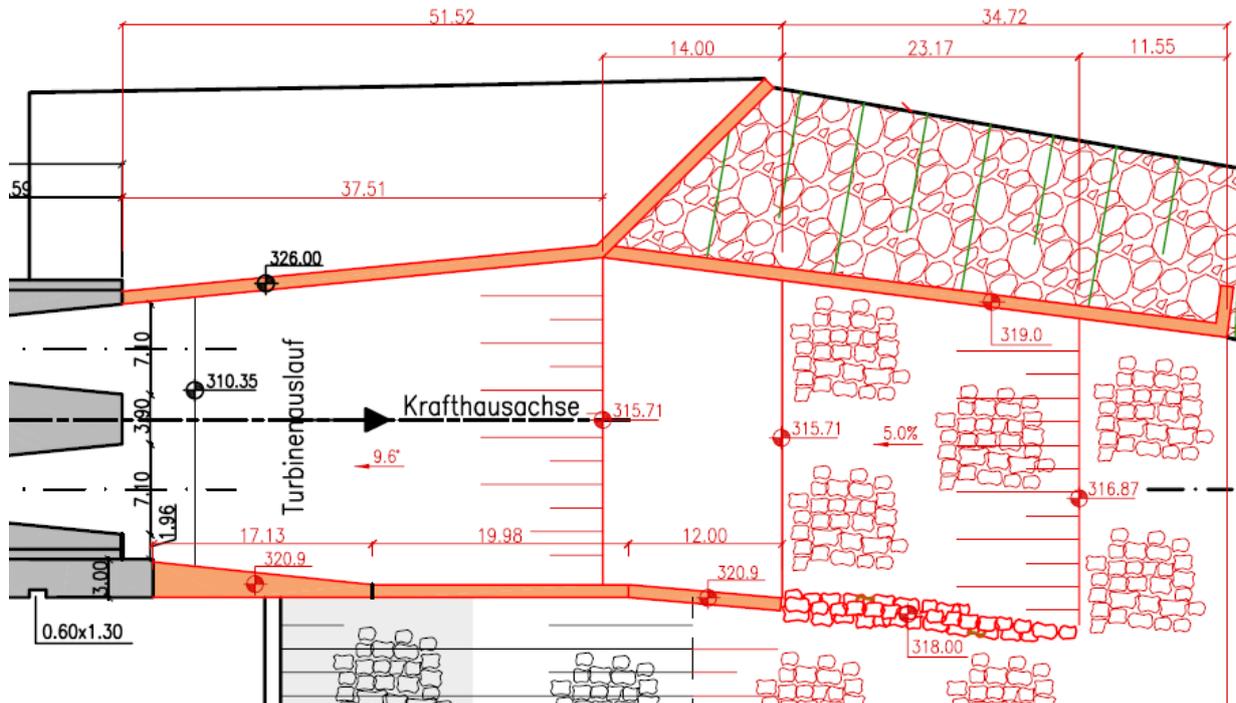


Abb. 4.16: Empfohlene Geometrie des UW- Auslaufkanals

4.2.8 UW-seitige rechte Auslaufmauer

Die Gestaltung der UW-seitigen Auslaufmauer erfolgte in Hinblick auf eine effiziente Geschiebelenkung bei Spülvorgängen bzw. beim Durchgang von HW-Wellen. Aus diesem Grunde wurde eine verlängerte, leicht gekröpfte Form der Mauer vorgeschlagen. Diese Maßnahmen sollen den Geschiebestrom, besonders bei Abflüssen durch WF_A , weiter ins Unterwasser bringen und etwas auf die rechte Flusshälfte umlenken. Damit werden größere Anlandungen direkt vor dem KH-Auslauf reduziert (siehe KW 2008). Die Ausbildung der Auslaufftrennmauer im Grundriss ist aus Abb. 4.16 ersichtlich.

Die KH Auslaufmauer wurde im Modell um 2,5 cm (entspricht etwa 1,0 m) auf das ungefähre Niveau des HQ1 mit 321,1 m.ü.A. erhöht und gekröpft um 12 m verlängert.

Damit die Mauer nicht vollständig seine Wirksamkeit bei HW-Ereignissen verliert, wird empfohlen das Niveau der OK jedoch bis zumindest $>HQ5$ Unterwasserpegel zu erhöhen.

Bei einer Vertiefung des Auslaufkanals ist die Auslaufftrennmauer zur Geschiebeabwehr mittels eines Steinwurdammes auf einem Niveau von 318 m.ü.A um ca 23 m zu verlängern.

4.2.9 UW-seitige linke Ufermauer

Von Seiten der Stewag wurde bei der Modellbesichtigung vom 20.05.2008 der Wunsch geäußert den Verschnitt der UW-seitigen linken Ufermauer mit der linken Uferböschung verlaufend auszuführen (siehe Abb. 4.16). Da diese Maßnahme zur

Wirbelberuhigung dient, wird die Ausführung dieser Maßnahme unter Berücksichtigung der in Kapitel 4.2.7 getroffenen Maßnahmen, empfohlen.

Bei einer Vertiefung des Auslaufkanals wird die natürliche Böschung angeschnitten und ist durch eine etwa 40 m lange Flügelmauer zu sichern.

5 Zusammenfassung

Die Modellversuche zur hydraulischen Optimierung des Erstentwurfes des KW Gössendorf ergaben die in Kurzform nachfolgenden konstruktiv - wasserbaulichen Verbesserungsvorschläge für die Gestaltung des Krafthausbereichs. Für die Vorschläge bezüglich Gestaltung der Wehranlage, Kolk- und Böschungssicherung wird auf KW (2008) verwiesen.

Es ist aufgrund der Modellversuche mit Geschiebetrieb im Bereich des Kraftwerk Gössendorf zu rechnen. Es wird deshalb im Bereich des Turbineneinlaufes zur besseren Geschiebeabwehr eine Geschiebeleitschwelle empfohlen. Sie ist im vorderen Bereich 2m hoch und könnte als Kragplatte ausgeführt werden. Vor der Geschiebeleitschwelle sollte eine massive Vorbodenplatte in Form einer glatten Betonsohle für einen rascheren Geschiebeabtransport sorgen. Die Vorbodenplatte hat eine Breite von 4m.

Zur Unterdrückung der Längswirbel im Einlaufbereich wurde der Vorboden neu gestaltet. Er wird gebogen ausgeführt und bildet zusammen mit der Geschiebeleitschwelle eine Einheit. Durch die Ausrundung des Vorbodens kommt es zu verschiedenen Böschungsneigungen der Einlaufftrennmauer. Diese sind jedoch flacher als jene der Urvariante. Durch den neuen Vorboden konnte die Einlaufsituation und damit die Turbinenanströmung verbessert werden.

Die Untersuchungen zur Turbinenanströmung konzentrierten sich auf die Gestaltung des Krafthaus-Trennpfeilers. Es zeigte sich, dass die Turbine 2 im 2MB bei der Urplanungsvariante schlechte Anströmbedingungen aufweist. Mehrere Pfeilervarianten wurden untersucht, wobei nur jene mit Leitwänden zufriedenstellende Ergebnisse brachten. Um die Vorgaben von Seiten der Steweg einzuhalten wird ein Trennpfeiler mit Leitwand vorgeschlagen, welcher jedoch eine Kompromisslösung im Bezug auf die hydraulisch beste Variante darstellt. Zusätzlich wurde eine Variante ohne Leitwand entworfen, die bessere Anströmbedingungen als die Urvariante aufweist. Die Dammbalkennische sollte hier jedoch verschlossen werden. Die wichtigsten untersuchten Trennpfeilervarianten werden in Kapitel 5.1 zusammenfassend betrachtet.

Die Überdeckungshöhe im Einlaufbereich ist beim vorhandenen Kraftwerk gering. Zur Unterdrückung von eventuell auftretenden lufteinziehenden Wirbeln werden 2 Maßnahmen empfohlen. Die Errichtung eines Injektors in der Rechenebene zur Absaugung von kleinen Wirbelstrukturen bzw. das Einbringen eines Boatbusters (Eisbaum) zur Brechung der Oberflächenwirbel.

Die Untersuchungen im Bereich des Krafthausauslaufes zeigten zu hohe Austrittsgeschwindigkeiten. Um den Energieverlust im Auslaufbereich zu minimieren sollte dieser wie folgt verändert werden. Die linke Auslaufmauer wird aufgeweitet und die Sohle im Auslaufbereich eingetieft. Dadurch reduziert sich das Gefälle des Auslaufbodens und der Fließquerschnitt wird erhöht. Mit diesen Maßnahmen wird die Auslaufgeschwindigkeit auf ca. 2m/s (und damit die Energieverluste) verringert. Um den Eintrag von Geschiebe in den Auslaufbereich zu verringern wird auch die rechte Auslaufmauer erhöht, begradigt und mit einem Steinschüttdamm verlängert.

5.1 Vergleich der gemessenen Trennpfeilervarianten

In Abb. 5.2 sind die wichtigsten Pfeilervarianten die in Kapitel 3.3 untersucht wurden zusammengestellt. Die Reihung der Varianten 1 bis 10 bezieht sich nur auf die Güte der Anströmung zur Turbine 2 im 2MB. Es wurden hier die konstruktiven Vorgaben

von Seiten der Steweag (siehe Kap. 4.2.1) außer Acht gelassen. Als Indikator für die Güte der Anströmung ist jeweils der α -Wert der Geschwindigkeitsverteilung, die Abweichungen von der Grenztrumpete nach Fisher und Franke und die Einhaltung des Quadrantenkriteriums angegeben. Bei den untersuchten Varianten variiert der α -Wert zwischen 1,021 bei der besten und 1,100 bei der schlechtesten Variante. Die Urvariante hat dabei einen α -Wert von 1,077. Je kleiner der α -Wert bei turbulenten Strömungen ist, umso gleichmäßiger ist die Anströmung (siehe Kapitel 2.2.2.4).

Die Reihung der Varianten aufgrund der α -Werte widerspiegelt sich auch in der Darstellung der bezogenen Geschwindigkeiten laut Fisher und Franke (siehe Abb. 5.3). Die Trennpfeilerlösungen mit Leitwand (Varianten 1-6) liefern dabei deutlich bessere Ergebnisse als jene ohne. Sie bewegen sich in Abb. 5.3 in der Nähe der Grenztrumpete nach Fisher und Franke, wobei nur die Variante 1 diese sowohl bei den minimalen, als auch bei den maximalen Geschwindigkeiten einhalten kann. Alle Leitwandvarianten können das geforderte Quadrantenkriterium ($25\% \pm 10\%$) einhalten. Die Linien der minimalen Geschwindigkeiten der Varianten 7-10 bewegen sich deutlich außerhalb der Grenztrumpete. Die Werte für Fisher&Franke in Abb. 5.2 geben die Differenzflächen zwischen Grenztrumpete und bezogener Geschwindigkeitsverteilung an. Überwiegt die Fläche innerhalb des Grenzkriteriums sind sie positiv, ansonsten negativ (siehe Abb. 5.1). Der Wert für die Abweichung oben bezieht sich auf die obere Grenze der Trumpete der Wert für die Abweichung unten auf die untere. Bei einer Anströmung die über den gesamten Querschnitt die gleiche Geschwindigkeit aufweist, was in der Praxis nicht möglich ist, würden die Werte für die Abweichungen von der Grenztrumpete bei 8,3 liegen.

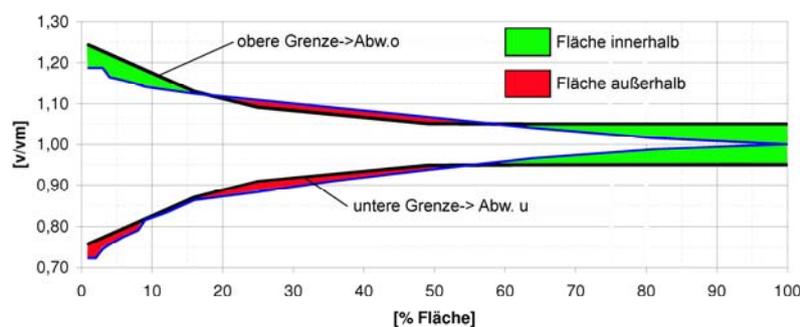


Abb. 5.1: Auswertung der bezogenen Geschwindigkeitsverteilungen

Die in Kap. 4.2.1.1 empfohlene Variante liegt in Abb. 5.2 auf Platz 2. Hier wurden bestimmte Kompromisse, wie das Freilassen der Dammbalkenaufstandfläche und das nicht Auskragen ins Wehrfeld, eingegangen. Diese Abweichungen von Variante 1 führen zu einer geringfügig schlechteren Anströmung. Alle Trennpfeilervarianten ohne Leitwand lieferten keine zufriedenstellenden Anströmbedingungen, der Grund dafür liegt im Vorhandensein der geringen Trennpfeilerbreite. Diese liegt mit maximal 3.85m deutlich unter der von Rouvé geforderten Breite von ca. 9m. Variante 7 lieferte von den Trennpfeilervarianten ohne Leitwand die besten Ergebnisse. Hier sei zu erwähnen, dass sich diese Variante mit abnehmendem Durchfluss verbessert, was bei den Varianten mit Leitwand nicht festzustellen war. Variante 10 stellt denselben Trennpfeiler wie Variante 2 nur ohne Leitwand dar. Die Anströmverhältnisse sind jedoch völlig verschieden, da es sich dabei um zwei unterschiedliche Systeme han-

delt. Während Trennpfeiler ohne Leitwände möglichst kurz ausgeführt werden sollten, kann man in Kombination mit Leitwänden auch bei relativ langen Trennpfeilern gute Anströmbedingungen schaffen.

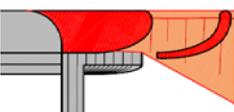
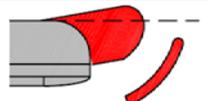
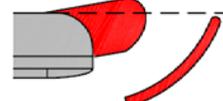
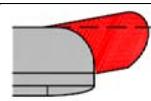
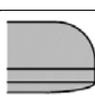
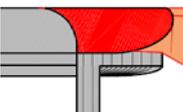
	Geometrie	Datum	Pfeiler	Vorboden Leitwand Rechent.	α - Wert	Fisher&Franke		(25%±10%)
						Abw. o	Abw. u	
V1		02.06.08	R2	VB3 LW5 RT. steil	1,021	+3,99	+2,38	Q1-Q4 eingehalten
V2		24.06.08	R4	VB3 LW5 RT. steil	1,024	+3,91	+1,56	Q1-Q4 eingehalten
V3	wie V4 LW angeschnitten	07.05.08	R1	VB3 LW4 RT. steil	1,027	+3,49	+1,04	Q1-Q4 eingehalten
V4		05.05.08	R1	VB3 LW3 RT. steil	1,030	+3,62	+1,55	Q1-Q4 eingehalten
V5	schräge Blech-LW	29.04.08	R0	VB1b LW1 RT. steil	1,031	+1,19	+2,43	Q1-Q4 eingehalten
V6		02.05.08a	R1	VB3 LW2 RT. steil	1,033	+3,68	+0,46	Q1-Q4 eingehalten
V7		17.07.08	R5	VB3 ohne LW RT. steil	1,046	+2,72	-1,21	Q2 nicht eingehalten
V8		16.05.08	R1	VB3 ohne LW RT. steil	1,064	+1,72	-2,89	Q2 nicht eingehalten
V9		23.04.08	Ur	VB1a ohne LW RT. steil	1,077	+1,74	-5,13	Q2 nicht eingehalten
V10		25.06.08	R4	VB3 ohne LW RT. steil	1,100	-1,16	-5,81	Q2 nicht eingehalten

Abb. 5.2: Vergleich der gemessenen Trennpfeilervarianten.

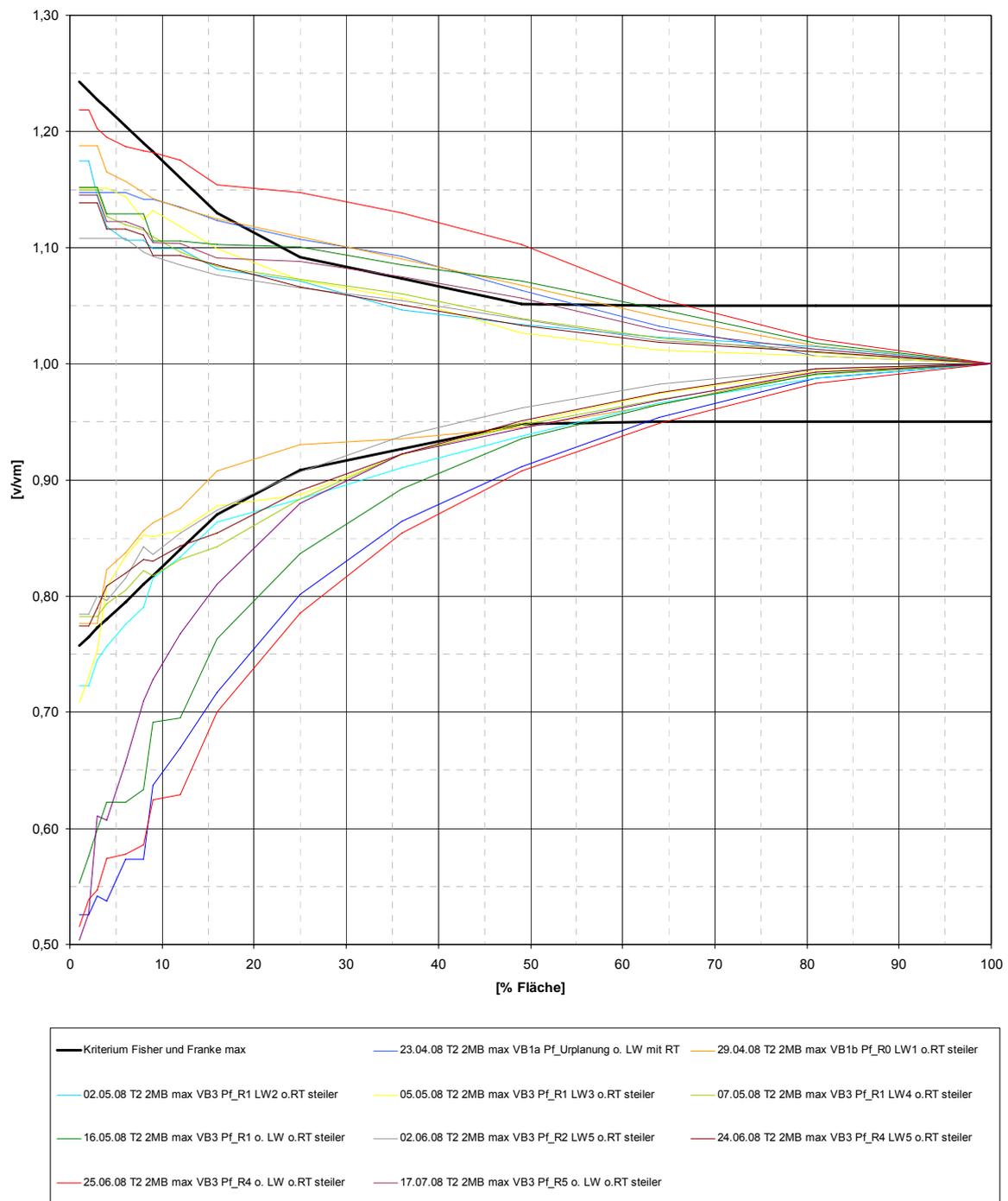


Abb. 5.3: Vergleich der Geschwindigkeitsverteilungen der gemessenen Pfeilervarianten nach Fisher und Franke. Turbine 2, 2MB

5.2 Erkenntnisse zur Trennpfeilergestaltung - Ausblick

Die Versuche am KW Gössendorf zeigten, dass die Optimierung der Trennpfeilerform an einem real geplanten Kraftwerk eine sehr komplexe Aufgabe darstellt. Die theoretischen Erkenntnisse und Entwurfparameter aus Kap. 2.2.3 sind teilweise nur schwer in der Praxis umsetzbar und beruhen meist auf vereinfachte Kraftwerksgeometrien. Die nötige Breite für eine ablösefreie Umströmung des Trennpfeilers kann nur in den seltensten Fällen ausgeführt werden. Weiters kann der Trennpfeiler nicht gesondert von den anderen Bauteilen, die Einfluss auf die Turbinenanströmung haben, betrachtet werden. Nur eine gemeinsame Behandlung von Trennpfeiler, Geschiebeschwelle, Einlaufvorboden, Rechen, Rechenträger, Dammbalkennischen und Einlaufgeometrie kann zum Ziel führen.

Das der Trennpfeiler oft nicht genügend breit ausgeführt wird, hat verschiedene Ursachen. Einerseits wird bei der Planung von Laufkraftwerken versucht die Gesamtbreite des Kraftwerks so gering wie möglich zu halten, andererseits verursachen größere Kubaturen auch mehr Materialkosten. Ob diese Mehrkosten durch eine bessere Turbinenanströmung und somit Energieausbeute amortisiert werden, ist fraglich. Um trotz geringer Breite eine annehmbare Anströmsituation zu bekommen, kann man auf verschiedene Sonderformen von Trennpfeilern zurückgreifen (siehe Kap. 2.2.3.5). Eine mögliche Sonderform, die in der Praxis bereits des Öfteren ausgeführt wurde ist der Trennpfeiler mit vorgesetzter Leitwand. Diese Variante lieferte auch bei den Versuchen zum KW Gössendorf gute Anströmverhältnisse.

Die vorgesetzte Leitwand verhindert das Ablösen der Strömung am Trennpfeiler. In den Versuchen zeigte sich, dass sich die Krümmung der Leitwand in Richtung Turbineneinlauf, wie auch beim Trennpfeiler nach Rouvé gefordert, verringern sollte. Der Schlitz zwischen Trennpfeiler und Leitwand sollte sich in Strömungsrichtung verengen, um die Strömung zu beschleunigen. Bei der besten Variante aus den Versuchen ergab sich ein Verhältnis zwischen Eintrittsbreite und Austrittsbreite von 1,6/1. Der Abstand zwischen Leitwandende und Rechenebene sollte nicht zu kurz ausgebildet werden, damit der Betrieb der Rechenreinigungsmaschine nicht eingeschränkt wird und sich die hinter der Leitwand bildenden Wirbel beruhigen können. Um die Wirbelbildung unmittelbar hinter der Leitwand zu minimieren, sollte diese sich in Strömungsrichtung verjüngen und ihr Ende strömungsgünstig ausgebildet werden. Um die statische Standsicherheit der Leitwand zu gewährleisten, sollte diese am oberen Ende massiv mit dem Trennpfeiler verbunden werden. Es zeigte sich, dass sich Trennpfeiler mit Leitwänden sowohl in 1 und 2 Maschinenbetrieb positiv auf die Turbinenanströmung auswirken. Bezüglich der Auswirkung der Leitwand auf Geschwemmsel gab es positive Rückmeldungen von Kraftwerksbetreibern.

Um genauere Kriterien zur Gestaltung von Trennpfeilern mit Leitwänden festzulegen, wären weiterführende Untersuchungen nötig, die jedoch den Rahmen dieser Diplomarbeit sprengen würden. Folgende Punkte sollten dabei geklärt werden:

- Geometrie von Trennpfeiler und Leitwand
- Verhältnis von Eintritts- und Austrittsöffnung
- Abstand der Leitwand von Rechenebene
- Wirbelbildung
- Zusammenspiel der Leitwand mit dem angrenzenden Wehrfeld
- Einfluss auf Geschwemmsel

6 Literaturverzeichnis

- BLIND H. (1987): *Wasserbauten aus Beton*, Berlin: Ernst, Verl. für Architektur und techn. Wiss., ISBN 3-433-01009-9.
- BOLLRICH G. (2007): *Technische Hydromechanik. Bd. 1: Grundlagen*, Berlin: Verl. für Bauwesen, 6., durchgesehene u. korr. edition, ISBN 978-3-345-00912-9.
- DEMNY G. (2004): *Erschließung der automatischen Strömungsoptimierung zur Lösung von Gestaltungsaufgaben im Wasserbau*. Aachen: Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule, Diss.
- ERLACH J. (1999): *Betrachtung der Gesamt-Energiebilanz einer Wasserkraftanlage mit Aufschlüsselung der Einzelverluste*, in: *Beiträge zum 2. Seminar Kleinwasserkraft; Praxis und aktuelle Entwicklung, Stuttgart, 1.10.1999*, Stuttgart: Eigenverlag, (Mitteilungen des Instituts für Strömungsmechanik und Hydraulische Strömungsmaschinen; 16), ISBN 3-9804376-5-5.
- GIESECKE J. & MONSONY E. (2005): *Wasserkraftanlagen: Planung, Bau und Betrieb*, Berlin: Springer, 4., aktual. u. erw. edition, ISBN 10 3-540-25505-2.
- GODDE D. (1994): *Experimentelle Untersuchungen zur Anströmung von Rohrturbinen. Ein Beitrag zur Optimierung des Turbineneinlaufes*, München: Eigenverlag, (Wasserbau und Wasserwirtschaft: Berichte der Versuchsanstalt Obernach und des Lehrstuhls für Wasserbau und Wassermengenwirtschaft der Technischen Universität München; 75), ISSN 0947-7187.
- HERMANN F. & HOLLENSTEIN R. (1998): *Zur Entstehung von Rechenverlusten bei gerader und schräger Anströmung*, München: Eigenverlag, (Wasserbau und Wasserwirtschaft: Berichte der Versuchsanstalt Obernach und des Lehrstuhls für Wasserbau und Wassermengenwirtschaft der Technischen Universität München; Heft 82)
- JAMBOR F. (1956): *Formgebung des Trennpfeilers in Flusskraftwerken*, in: *Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau*, Nr 7, ISSN 0572-5801.
- KIRSCHMER O. (1926): *Untersuchungen über den Verlust an Rechen*, München: Mitteilung des hydraulischen Instituts der Technischen Hochschule München, Nr. 2.
- KW (2004): Nichtawitz A.: *Kriterien und Methoden zur Optimierung der Einlaufströmung von Wasserturbinen*, in: *Konstruktiver Wasserbau - Landschaftswasserbau*, Band 18, Institut für konstruktiven Wasserbau, TU Wien.
- KW (2008): Tschernutter P., Pucher M., Schüll M., Mayr T.: *Bericht - Modelldurchführung für das Kraftwerk Gössendorf*, Institut für konstruktiven Wasserbau, TU Wien.
- LANG T. (1999): *Geometrische Kriterien zur Gestaltung von Kraftwerkseinläufen. Experimentelle Untersuchungen an Rohr-S-Turbine und Durchströmturbine*, München: Eigenverlag, (Wasserbau und Wasserwirtschaft: Berichte der Versuchsanstalt Obernach und des Lehrstuhls für Wasserbau und Wassermengenwirtschaft der Technischen Universität München; Heft 88), ISSN 1437-3513.
- MEUSBURGER H. (2002): *Energieverluste an Einlaufrechen von Flusskraftwerken*, Zürich: Eidgenössische Technische Hochschule, (Diss. ETH; 14891).
- PRESS H. (1959): *Stauanlagen und Wasserkraftwerke. II. Teil: Wehre*, Berlin: Verl. Ernst & Sohn, 2., erw. edition.

- ROUVÉ G. (1958): *Der Krafthaustrennpfeiler; Strömungsverhältnisse an gekrümmten Wänden*, Karlsruhe: Eigenverlag, (Arbeit aus dem Theodor- Rehbock- Flussbaulaboratorium; 145).
- SPANGLER J. (1928): *Untersuchung über den Verlust an Rechen bei schräger Zuströmung*, München: Mitteilung des hydraulischen Instituts der Technischen Hochschule München, Nr. 2.
- STATISTIK AUSTRIA (2008): *Statistisches Jahrbuch Österreichs 2008, Kap. 22: Energie*. ISBN 978-3-902587-29-9
- STROBL T. & ZUNIC F. (2006): *Wasserbau; Aktuelle Grundlagen - Neue Entwicklungen*, Berlin: Springer, ISBN-10 3-540-22300-2.
- VERBUND 2006: *Umwelt und Forschungsdaten 2005*. Wien: Österreichische Elektrizitätswirtschafts-Aktiengesellschaft, (Schriftenreihe der Forschung im Verbund; Bd.97)
- WITTMANN H. & GABRECHT G. (1954): *Untersuchung für Laufwasserkraftstufen*, in: Die Wasserwirtschaft, Jg. 1954/55, H.45, ISSN 0043-0978.
- ZIMMERMANN J. (1969): *Widerstand schräg angeströmter Rechen*. Karlsruhe: Eigenverlag, (Arbeit aus dem Theodor- Rehbock- Flussbaulaboratorium; 157).

7 Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1: Schematische Darstellung einer Staustufe (BLIND, 1987)	2
Abb. 2.2: Längsschnitt durch ein Wasserkraftwerk (STROBL ET AL. 2006)	2
Abb. 2.3: Anordnung von Flusskraftwerken (STROBL ET AL. 2006)	3
Abb. 2.4: Relative Lage des Kraftwerks zum Stauwerk (GIESECKE ET AL. 2005)	3
Abb. 2.5 Leistungsplan einer Niederdruckanlage (STROBL ET AL. 2006).....	4
Abb. 2.6: Brutto- und Nettofallhöhe an Wasserkraftanlagen (STROBL ET AL. 2006)	5
Abb. 2.7: Größenordnung der Einzelverluste in einer Wasserkraftanlage (ERLACH, 1999)	5
Abb. 2.8: Definitionsskizze zur Rechenverlustberechnung (GIESECKE ET AL. 2005)	7
Abb. 2.9: Direkte Numerische Simulation der Strömung durch einen Rechen bei einer Schräganströmung von 45° (HERMANN ET AL. 1998).....	7
Abb. 2.10: Regelabmessungen einer Rohrturbine (STROBL ET AL. 2006)	8
Abb. 2.11 Kraftwerksanströmung und die Entstehung von Verlusten (LANG 1999)...	10
Abb. 2.12: Isotachenlinien eines Geschwindigkeitsfeldes (KW 2008)	13
Abb. 2.13: Anforderungsdiagramm nach Fisher und Franke (GODDE 1994)	14
Abb. 2.14: Lokale und mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Fließquerschnitt, Geschwindigkeitsverteilung bei turbulenten und laminaren Rohrströmung (BOLLRICH 2007)	15
Abb. 2.15: Ermittlung der Schwerpunktlage (GODDE 1994)	16
Abb. 2.16: Messquerschnitte bei Turbinenanströmtests (IEC-CODE 60193-1999)....	17
Abb. 2.17: Schematische Darstellung der Trennpfeileranordnung (BLIND 1987)	18
Abb. 2.18: Optimale Trennpfeilerform nach WITTMANN ET AL. (1954)	19
Abb. 2.19: Trennpfeilervarianten nach WITTMANN ET AL. (1954).....	19
Abb. 2.20: Trennpfeilerverbreiterung in Richtung Wehrfeld (WITTMANN ET AL. 1954)	19
Abb. 2.21: Geschwindigkeitsverlauf am Trennpfeiler aus Kreissegmenten (ROUVÉ 1958)	20
Abb. 2.22: Trennpfeiler nach ROUVÉ (1958).....	21
Abb. 2.23: Ermittlung der Konstanten c (ROUVÉ 1958)	23
Abb. 2.24: Von GODDE (1994) untersuchte Trennpfeilerformen.	24
Abb. 2.25: Anströmung bei verschiedenen Wehrfeldlagen (GODDE1994).....	24
Abb. 2.26: Abgewinkelte Längen des Trennpfeilerkopfes (GODDE 1994).....	25
Abb. 2.27: Diskretisierung der Trennpfeilerumströmung mit FV-Netzen (DEMNY 2004)	25
Abb. 2.28: Gerechnete und gemessene Geschwindigkeitsprofile im Rechenquerschnitt (DEMNY 2004).....	26

Abb. 2.29: Parametrisierung des Pfeilergrundrisses und der vertikalen Pfeilerkontur (DEMNY 2004).....	26
Abb. 2.30: Optimale alternative Trennpfeilerkontur (DEMNY 2004).....	27
Abb. 2.31: Prinzipskizze Trennpfeiler mit Leitwand (ROUVÉ 1958).....	28
Abb. 2.32: Vorschlag eines Trennpfeilers mit Leitwand an einem Moselkraftwerk (JAMBER 1956)	28
Abb. 2.33: Trennpfeilergestaltung KW-Wipfeld und KW-Hausen (E.on).....	29
Abb. 2.34: Trennpfeilergestaltung KW-Mettlach und KW-Serring (RWE).....	29
Abb. 2.35: Trennpfeiler mit Auskragung auf Wehrseite (ROUVÉ 1958).....	30
Abb. 2.36: Trennpfeiler an einer Lechstaustufe (BLIND 1978).....	30
Abb. 2.37: Drehpfeiler nach GODDE (1994).....	31
Abb. 3.1: Grundriss gesamter Modellstand Kraftwerk Gössendorf.....	35
Abb. 3.2: Grundriss Modell (m Natur).....	36
Abb. 3.3: Schnitt Modell Krafthaus und Wehranlage (m Natur).....	37
Abb. 3.4: Ausgangssituation vor Versuchsdurchführung mit Ansicht OW.	38
Abb. 3.5: Ausgangssituation vor Versuchsdurchführung mit Ansicht UW.....	38
Abb. 3.6: Vergleich der verwendeten Sieblinien mit den umgerechneten Sieblinien im Modell.....	39
Abb. 3.7: Vergleich der mittleren Korndurchmesser der realen Geschiebeprouben und der Modellgeschiebe im M 1 : 40.....	39
Abb. 3.8: Riffelbildung bei Verwendung des feinen Modellsandes	40
Abb. 3.9: Pegelschlüssel	41
Abb. 3.10: Hochwasserwellen	41
Abb. 3.11: Messwagen mit Laser- und Ultraschallsonden.....	42
Abb. 3.12: Messebene und Messraster	42
Abb. 3.13: Geschwindigkeitsmessflügel	43
Abb. 3.14: Bild Lochraster/Schieber für Turbinendurchfluss.....	43
Abb. 3.15: Turbineneinlauf und Wehrfelder Ansicht OW (links) und UW Ansicht (rechts).....	45
Abb. 3.16: Stauhaltung für Messung der Turbinenanströmung	45
Abb. 3.17: Strömungsbedingungen Turbine 2 und 1 beim Urplanungszustand ohne Rechenträger (Fließrichtung von oben nach unten)	46
Abb. 3.18: Untersuchte Geometrie und die schematische Darstellung der aufeinandertreffenden Strömungen im Einlaufbereich bei der Urplanung	47
Abb. 3.19: Auswertung und Vergleich der Geschwindigkeitsfelder mit den Grenzwerten nach Fischer und Franke für die Variante „Urplanung ohne Rechenträger“ vom 18.04.2008.....	48
Abb. 3.20: Geschwindigkeitsverteilung Turbine 1 beim Urplanungszustand ohne Rechenträger.....	49

Abb. 3.21: Geschwindigkeitsverteilung Turbine 2 beim Urplanungszustand ohne Rechenräger	50
Abb. 3.22: Neue Geschiebeschwelle und längerer Trennpfeiler	51
Abb. 3.23: Pfeilergeometrie Nasen	52
Abb. 3.24: Nase an der Innenkante des ursprünglichen Pfeilers (Typ1).....	52
Abb. 3.25: Strömungsbedingungen Turbine 2 bei Nase Typ 1	53
Abb. 3.26: Nase an der Außen­kante des ursprünglichen Pfeilers (Typ2)	53
Abb. 3.27: Strömungsbedingungen Turbine 2 bei Nase Typ 2	54
Abb. 3.28: Geometrische Situation und schematische Darstellung der aufeinandertreffenden Strömungen im Einlaufbereich.....	55
Abb. 3.29: Turbineneinlauf mit eingebauten Rechenragern.....	55
Abb. 3.30: Vergleich der Geschwindigkeitsverteilung Turbine 2 mit und ohne Rechenräger	56
Abb. 3.31: Geschwindigkeitsverteilung Turbine 2 mit Geschiebeschwelle und Rechenräger	57
Abb. 3.32: Geschwindigkeitsverteilung Turbine 1 beim Urplanungszustand mit Geschiebeschwelle und Rechenräger	58
Abb. 3.33: Vergleich der Geschwindigkeitsverteilung Turbine 1 mit und ohne Rechenräger	59
Abb. 3.34: Gewölbte Einlaufftrennwand	60
Abb. 3.35: Geschiebeschwelle (mit Vorboden Typ 1). Skizze links und Foto rechts.	60
Abb. 3.36: Neuer Vorboden (Typ1b) aus PVC Platten	61
Abb. 3.37: Vertikale Strebe.....	61
Abb. 3.38: geneigte Rechenräger	62
Abb. 3.39: Trennpfeiler als Nase mit flach geneigtem unterem Bereich	63
Abb. 3.40: Nach hinten geknickte Pfeilerform.....	64
Abb. 3.41: Nasen $\varnothing 3\text{cm}$ an Innen- bzw. Außen­kante und horizontale Leitbleche	64
Abb. 3.42: Elliptischer Pfeiler und horizontale Leitbleche	65
Abb. 3.43: Strömungsbedingungen Turbine 2, Elliptischer Pfeiler und horizontale Leitbleche	66
Abb. 3.44: Pfeiler nach Rouvé mit Nase (R_N)	67
Abb. 3.45: Vertikale Blechleitwand (LW1) und verlängerter Pfeiler (R_0)	68
Abb. 3.46: Geschwindigkeitsverteilung Turbine 2, Vorboden (VB1b), vertikale Blechleitwand (LW1) und verlängerter Pfeiler (R_0).....	69
Abb. 3.47: Verteilung der bezogenen Geschwindigkeiten der Turbine 2 mit vertikale Blechleitwand (LW1) und schräger, verlängerter Pfeiler (R_0).....	70
Abb. 3.48: Geschiebeschwelle KW Rott (TU Graz)	71
Abb. 3.49: Neuer Vorboden Gössendorf (Typ VB2)	71

Abb. 3.50: Pfeilergeometrie und Position Rouvé kurz (Typ R1).....	71
Abb. 3.51: Neuer Vorboden (Typ2), kurzer Trennpfeiler nach Rouvé (R1) und langer Leitwand (LW2)	72
Abb. 3.52: Grundriss und Schnitte neuer Vorboden (VB3)	73
Abb. 3.53: Geschwindigkeitsverteilung Turbine 2 , neuer Vorboden (Typ2), kurzer Trennpfeiler nach Rouvé (R1) und lange Leitwand (LW2).....	74
Abb. 3.54: Vergleich der Konfigurationen des Rouvépfeilers (Typ R1) Neuer Vorboden (Typ3), mit LW2 (mitte) und LW3 (rechts).....	75
Abb. 3.55: Strömungsbedingungen Turbine 2 gegen Fließrichtung beim Vergleich für Vorboden (Typ VB3).....	76
Abb. 3.56: Vergleich der bisherigen Geschwindigkeitsverteilung Turbine 2	77
Abb. 3.57: Geschwindigkeitsverteilung Turbine 2 , neuer Vorboden (Typ3), kurzer Trennpfeiler nach Rouvé (R1), kurze Leitwand (LW3) und Rechenträger oben stärker geneigt.....	78
Abb. 3.58: Geschwindigkeitsverteilung Turbine 2 , neuer Vorboden (Typ3), kurzer Trennpfeiler nach Rouvé (R1), kurze Leitwand (LW3) und Rechenträger laut Plan .	79
Abb. 3.59: Geschwindigkeitsverteilung Turbine 2 , neuer Vorboden (VB3), kurzer Trennpfeiler nach Rouvé (R1) ohne Leitwand	80
Abb. 3.60: Angeschnittene Leitwand (LW4).....	81
Abb. 3.61: Geschwindigkeitsverteilung Turbine 2 , Vorboden (Typ3), kurzer Trennpfeiler nach Rouvé (links), kurze angeschnittene Leitwand und Rechenträger laut Plan.....	82
Abb. 3.62: Trennpfeilerkopf mit schaufelförmiger Leitwand an Moselstufe und Staustufe Hausen (BLIND 1987)	83
Abb. 3.63: Trennpfeiler mit Leitschaukel Saarkraftwerke Mettlach und Serring (Zur Verfügung gestellt von Fa. RWE)	83
Abb. 3.64: Rouvé lang ohne Nase (R2) und Leitwand (LW5).....	84
Abb. 3.65: Geometrien der Variante Rouvé lang ohne Nase (R2) und Leitwand (LW5)	85
Abb. 3.66: Verteilung der bezogenen Geschwindigkeiten der Turbine 2 neuer Vorboden (VB3), Trennpfeiler (R2) und Leitwand (LW5).....	85
Abb. 3.67: Strömungsbedingungen Turbine 2 und 1, neuer Vorboden (VB3), langer Trennpfeiler nach Rouvé (R2) und kurze Leitwand (LW5).....	86
Abb. 3.68: Rouvé lang (R2) ohne Nase mit Stromfäden, links ohne Leitwand und rechts mit Leitwand (LW5).....	87
Abb. 3.69: Geschwindigkeitsverteilung Turbine 2 , neuer Vorboden (Typ3), langer Trennpfeiler nach Rouvé (R2) und Leitwand (LW5)	88
Abb. 3.70: Rouvé schmal und lang mit Knick (R3) und neue Leitwand Typ6 und Strömungsbedingung nach Messebene	89
Abb. 3.71: Rouvé schmal und mittellang (R4) und Leitwand (LW5) - Geometrie.....	90
Abb. 3.72: Rouvé schmal und mittellang (R4) und Leitwand (LW5) - Fotos	91

Abb. 3.73: Pfeiler R4 und Leitwand (LW5) – Stromfäden vor Rechenebene T1 2MB (QA=20.5 l/s). Links T2 und rechts T1 (Fließrichtung von oben nach unten).....	92
Abb. 3.74: R4 und Leitwand (LW5) – Stromfäden vor Rechenebene T2 2MB (32 l/s)	92
Abb. 3.75: Pfeiler R4 und Leitwand (LW5) – Stromfäden nach Messebene. Oben mit 2MB und unten mit 1MB. Links T2 und rechts T1 (Fließrichtung von oben nach unten)	93
Abb. 3.76: Verteilung der bezogenen Geschwindigkeiten der Turbine 1 neuer Vorboden (VB3), Trennpfeiler (R4) und Leitwand (LW5). 1MB und 2MB	93
Abb. 3.77: Verteilung der bezogenen Geschwindigkeiten der Turbine 2 neuer Vorboden (VB3), Trennpfeiler (R4) und Leitwand (LW5). 1MB und 2MB	94
Abb. 3.78: Vergleich der Verteilungen der bezogenen Geschwindigkeiten (nur unterer Ast) bei der Turbine 2 bei Varianten mit Leitwand.	94
Abb. 3.79: Geschwindigkeitsverteilung Turbine 1 2MB , neuer Vorboden (VB3), mittlerer Trennpfeiler nach Rouvé (R4), und Leitwand (LW5).....	95
Abb. 3.80: Geschwindigkeitsverteilung Turbine 1 1MB , neuer Vorboden (VB3), mittlerer Trennpfeiler nach Rouvé (R4), und Leitwand (LW5).....	96
Abb. 3.81: Geschwindigkeitsverteilung Turbine 2 2MB , neuer Vorboden (VB3), mittlerer Trennpfeiler nach Rouvé (R4), und Leitwand (LW5).....	97
Abb. 3.82: Geschwindigkeitsverteilung Turbine 2 1MB , neuer Vorboden (VB3), mittlerer Trennpfeiler nach Rouvé (R4), und Leitwand (LW5).....	98
Abb. 3.83: Verteilung der bezogenen Geschwindigkeiten der Turbine 2 neuer Vorboden (VB3), Trennpfeiler (R4) und Leitwand (Typ5).	99
Abb. 3.84: Urplanungszustand mit geändertem Vorboden (VB3).....	100
Abb. 3.85: Stromfäden nach Messebene. Oben mit R4 und neue Leitwand (LW5) und unten mit Urplanung. Links T2 und rechts T1 (Fließrichtung von oben nach unten)101	
Abb. 3.86: Verteilung der bezogenen Geschwindigkeiten bei Turbine 1. Vergleich bei Pfeiler (R4) mit Leitwand (LW5) und Urplanung. 1MB	101
Abb. 3.87: Geschwindigkeitsverteilung Turbine 1 1MB , neuer Vorboden (VB3), Urplanung	102
Abb. 3.88: Geschwindigkeitsverteilung Turbine 2 1MB , neuer Vorboden (VB3), Urplanung	103
Abb. 3.89: Verteilung der bezogenen Geschwindigkeiten bei Turbine 1. Vergleich bei Pfeiler (R4) mit Leitwand (LW5) und Urplanung. 1MB	104
Abb. 3.90: Verteilung der bezogenen Geschwindigkeiten der Turbine 2 (nur unterer Ast) – Vergleich verschiedener Varianten.....	105
Abb. 3.91: Verteilung der bezogenen Geschwindigkeiten der Turbine 1 – Vergleich verschiedener Varianten.....	105
Abb. 3.92: Geschwindigkeitsverteilung Turbine 1 2MB , neuer Vorboden (VB3), mittlerer Trennpfeiler nach Rouvé (R4), ohne Leitwand	106
Abb. 3.93: Geschwindigkeitsverteilung Turbine 2 2MB , neuer Vorboden (VB3), mittlerer Trennpfeiler nach Rouvé (R4), ohne Leitwand	107

Abb. 3.94: Entstehung von lufteinziehenden Wirbel bei $Q = 32 \text{ l/s}$ bei verschiedenen Pfeilervarianten.....	108
Abb. 3.95: Zusatzvariante für Trennpfeiler mit Nischenverschluss am Beispiel KW Leoben (VERBUND 2006).....	109
Abb. 3.96: Rouvé (R5) mit Kugelkalotte - Fotos	110
Abb. 3.97: Geometrie Pfeiler Rouvé (R5) mit Kugelkalotte. Schnitt und Seitenansicht	110
Abb. 3.98: Rouvé (R5) mit Kugelkalotte – Vergleich der Geschwindigkeitsverteilung mit anderen Varianten	111
Abb. 3.99: Mitteltrennpfeilervarianten – Kurze Ellipse MP1 (links) und längerer Kreiszyylinder MP2 (rechts).....	111
Abb. 4.1: Grundriss empfohlene Krafthausform.....	115
Abb. 4.2: Schnitte empfohlene Krafthausform	116
Abb. 4.3: Verteilungen der bezogenen Geschwindigkeiten bei der empfohlenen Trennpfeilervariante R4 mit Leitwand (LW5) im 1 und 2 Maschinenbetrieb.....	117
Abb. 4.4: Qualitative Anströmfotos an Turbinen 1 und 2 2MB vor der Rechenebene	118
Abb. 4.5: Geometrie des Trennpfeilers mit Leitwand im Detail.....	120
Abb. 4.6: Turbine 2 stärker geneigter, oberer Rechenträger	122
Abb. 4.7: Isothachen und Messwerte Turbine 1, 2MB, Variante 1 (m/s Natur).....	123
Abb. 4.8: Isothachen und Messwerte Turbine 2, 2MB, Variante 1 (m/s Natur).....	124
Abb. 4.9: Isothachen Turbine 1, 1MB, Variante 1 (m/s Natur).....	125
Abb. 4.10: Isothachen Turbine 2, 1MB, Variante 1 (m/s Natur).....	126
Abb. 4.11: Beispiel Injektor (KNAUSS 1983).....	127
Abb. 4.12: Injektor (Metallvorbau) mit 0,8 m Tiefe	127
Abb. 4.13: Vergleich Wirbelbildung bei Verwendung der Injektoren (ohne, 0,4m Öffnung, 0,8m Öffnung).....	128
Abb. 4.14: Beispiel Eisbaum.....	128
Abb. 4.15: Grundriss und Schnitte des Vorbodens und Geschiebeschwelle	129
Abb. 4.16: Empfohlene Geometrie des UW- Auslaufkanals	131
Abb. 5.1: Auswertung der bezogenen Geschwindigkeitsverteilungen	134
Abb. 5.2: Vergleich der gemessenen Trennpfeilervarianten.....	135
Abb. 5.3: Vergleich der Geschwindigkeitsverteilungen der gemessenen Pfeilervarianten nach Fisher und Franke. Turbine 2, 2MB.....	136

8 Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1: Anforderungen an die Strömungsqualität seitens der Turbinenhersteller (GODDE 1994)	11
Tab. 2.2: Skalierung der Wirbelstärke (KW 2004).....	17
Tab. 3.1: Übertragungsverhältnisse der Modellparameter.....	33
Tab. 3.2. Modelldurchflüsse nach dem Froude´schen Modellgesetz bei M 1:40	34