



Bauliche Beeinflussung der Anströmung von Buchtenkraftwerken

DIPLOMARBEIT

Master's Thesis

vorgelegt von

Mair Lukas

angefertigt am

Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie

Technische Universität Wien

Betreuer

Ao. Univ. Prof. Dipl. Ing. Dr. techn. Reinhard Prenner

und

Univ. Ass. Dipl. Ing. Michael Pucher

Wien, Mai 2010

Kurzfassung

In der vorliegenden Diplomarbeit wurden die Einflüsse von verschiedenen baulichen Veränderungen auf die Anströmung von Buchtenkraftwerken behandelt. Durch eine strömungsgünstige Formgebung der diversen Bauteile können Energieverluste entsprechend reduziert werden. Als erster Teil der Arbeit wurden 3 Modellberichte von Buchtenkraftwerken an der Saar analysiert. Bei dieser Analyse wurden die bei den Modellversuchen verwendeten Geometrien der Trennpfeiler und die Buchtenformen auf Gleichmäßigkeiten im Bezug auf die Qualität der Turbinenanströmung untersucht. Der Hauptteil der Arbeit beschäftigt sich mit einem hydraulischen Modellversuch, der im Zuge eines Forschungsprojektes, im Wasserbaulabor der TU Wien durchgeführt wurde. Dabei wurden an einem Buchtenkraftwerk verschiedene Geometrien (Bucht, Vorboden, Trennpfeiler) mit unterschiedlichen Betriebsführungszuständen kombiniert und deren Auswirkung auf die Turbinenanströmung untersucht. Dazu wurden mit Hilfe einer ADV-Sonde Geschwindigkeitsmessungen im Oberwasser, vor der Rechenebene und im Einlauf der wehrseitigen Turbine durchgeführt. Die Auswertung der Versuche erfolgte qualitativ über die Geschwindigkeitsverteilungen in den drei Messebenen und quantitativ über Kriterien zur Beurteilung der Güte der Anströmung im Einlauf der Turbine.

Abstract

The present thesis explores influences of different structural variations on the approaching flow conditions at a bay power plant. By the way of hydrodynamic shaping of different structural elements, loss of energy could be avoided. The first part of this work deals with the analysis of three model reports about bay power plants at the Saar river. This analysis comprised the investigation of the influence of alternative separation piers and bay shapes on the quality of the approach flow to the turbines. The main part of this thesis treats hydraulic model tests, which were performed as a part of a research project at the Hydraulic Laboratory of the Institute of Hydraulic Engineering and Water Resources of the Vienna University of Technology. Thereby different geometries (bay, bottom slopes, separation pier) at the bay power plant were combined with different plant operating conditions in order to be able to investigate the effects on the inflow conditions to the turbines. The use of an ADV probe permitted to measure velocity in the upstream domain, in front of the trash rack and in front of the turbine next to the weir. With the help of these measurements, velocity distributions could be developed for these three measurement cross-sections. The quality of these velocity distributions were evaluated qualitatively by visual comparison and quantitatively by using of specific criteria.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung und Problemstellung	1
2. Allgemeines zu Buchtenkraftwerken	3
3. Anströmung von Buchtenkraftwerken	5
3.1. Gestaltung der Oberwasserbucht	6
3.1.1. Ausbildung der Bucht nach Mosonyi (1966)	6
3.1.2. Ausbildung der Bucht nach Wittmann und Gabrecht (1954)	7
3.2. Gestaltung des Trennpfeilers	8
3.2.1. Trennpfeilergestaltung von Wittmann und Gabrecht (1954)	8
3.2.2. Trennpfeilergestaltung von Rouvé (1958)	9
3.2.3. Sonderform - Trennpfeiler mit Leitwand	11
3.2.4. Untersuchungen zum Trennpfeiler von Godde (1994) und Lang (1999)	12
3.3. Kriterien zur Beurteilung der Turbinenanströmung	14
3.3.1. Geschwindigkeitshöhenausgleichswert (α -Wert)	15
3.3.2. Kriterium nach Fisher und Franke	16
4. Analyse von bestehenden Kraftwerken	19
4.1. Allgemein	19
4.2. Beurteilungskriterien und Parametrisierung	20
4.3. Analyse	21
4.3.1. KW Mettlach	21
4.3.2. KW Serrig	26
4.3.3. KW Lisdorf	30
4.4. Vergleiche und Erkenntnisse	32
4.4.1. Vergleich aller Versuche aus den drei Modellberichten	33
4.4.2. Vergleich der Trennpfeiler	35
4.4.3. Vergleich der OW-Buchten	38
4.4.4. Erkenntnisse	39
5. Hydraulischer Modellversuch	40
5.1. Modellaufbau	41
5.1.1. Bucht und Vorboden	42

5.1.2. Trennpfeiler	43
5.2. Messeinrichtungen	44
5.2.1. Durchfluss	44
5.2.2. Wasserspiegel	44
5.2.3. Geschwindigkeit	45
6. Versuchsdurchführung	47
6.1. Versuchsprogramm	47
6.2. Messbereiche	48
6.2.1. Oberwasserbereich	49
6.2.2. Rechenebene	50
6.2.3. Turbinenebene	51
7. Messergebnisse	52
7.1. Variante B1	52
7.2. Variante B2	57
7.3. Variante B5	60
7.4. Variante B7	63
7.5. Variante B10	66
7.6. Variante B11	69
7.7. Variante B19	72
7.8. Variante B21	75
7.9. Variante B23	78
7.10. Variante B25	81
7.11. Variante B27	85
7.12. Variante B29	88
7.13. Variante B31	91
7.14. Variante B32	94
7.15. Variante B35	98
7.16. Variante B40	101
7.17. Variante B42	104
7.18. Variante B44	107
8. Diskussion der Ergebnisse	110
8.1. Einfluss des Vorbodens bzw. der Bucht	112
8.2. Einfluss des Trennpfeilers	114
8.3. Einfluss der Hochwasserabfuhr	116
8.4. Einfluss des Oberwasserspiegels	118
9. Zusammenfassung	120

Inhaltsverzeichnis	III
Literaturverzeichnis	122
Abbildungsverzeichnis	124
Tabellenverzeichnis	128
Anhang	129

1. Einleitung und Problemstellung

Die Energiegewinnung durch Wasserkraft ist neben anderen nachhaltigen Energieressourcen wie Windkraft, Sonnenenergie, Biomasse und Biogase, eine der wichtigsten und meistverwendeten erneuerbaren Energiequellen der Erde. Fossile Energieträger sind nach wie vor limitiert und in ihrer Gewinnung risikoreich und teuer. Die Nutzung der natürlichen Ressource Wasserkraft liegt in einem Land wie Österreich mit zahlreichen Gewässersystemen und einer optimalen alpinen Topographie also nahe und bietet sich geradezu an. Laut Statistik-Austria (2009) stammen etwa 2/3 der in Österreich erzeugten elektrischen Energie aus Wasserkraftwerken. Mit diesem Anteil liegt Österreich nach Norwegen europaweit an zweiter Stelle und ist eine der führenden Wasserkraftnationen (Lebensministerium-VII, 2004). Die Zahl von 4.000 Kleinkraftwerken und ca. 180 Großkraftwerken österreichweit unterstreicht die langjährige und traditionsreiche Bedeutung der Wasserkraft im Land (HAÖ, 2005). Die Großkraftwerke mit einer Leistung über 5 MW machen laut der Wasserkraftpotentialstudie von Pöyry (2008) über 90% der österreichischen Wasserkrafterzeugung aus. In Summe mit den Kleinkraftwerken ergibt sich jährliche eine Ausbeute von etwa 40.000 GWh (Pöyry, 2008). Die volkswirtschaftliche und energiepolitische Wichtigkeit der Wasserkraft in Österreich liegt also auf der Hand.

Um die Wirtschaftlichkeit eines Kraftwerks zu gewährleisten, bedarf es einer genauen und durchdachten Planung. Besondere Wichtigkeit hat dabei die Analyse der auftretenden Strömungsverhältnisse, um allgemeine Aussagen über die Einflüsse der einzelnen Bauteile auf die Zuströmung machen zu können. Diese sollten soweit wie möglich eine gleichmäßige verlustarme Turbinenanströmung gewährleisten. Zu diesem Zeitpunkt sind Modellversuche in einem wasserbaulichen Labor zur gegebenen Thematik unabdingbar.

In dieser Arbeit wird die bauliche Beeinflussung der Anströmung auf einen Buchtenkraftwerkstyp anhand einer Literaturanalyse von älteren Modelluntersuchungen und eines hydraulischen Modellversuches behandelt. Dabei soll versucht werden die Erkenntnisse aus der Literaturanalyse mit den Ergebnissen des eigenen hydraulischen Modellversuches zu vergleichen.

In der Literaturanalyse, als ersten Teil der Arbeit, werden drei Modellberichte von Kraftwerken an der Saar herangezogen um den Einfluss vom Trennpfeiler und der Oberwasserbucht bezüglich einer verlustarmen Turbinenanströmungen zu untersuchen. In den einzelnen Modellversuchen wurden vor allem Änderungen am Trennpfeiler und an der Oberwasserbucht durchgeführt um die Turbinenanströmung zu verbessern. Zudem lagen den Modellberichten die Geschwindigkeitsverteilungen im Turbineneinlauf der einzelnen Versuche bei. Diese Geschwindigkeitsverteilungen wurden in den Modellberichten visuell beurteilt. Weiters werden diese nach einem quantitativen Beurteilungskriterium für die Turbinenanströmung

ausgewertet. Zudem wird versucht ähnliche Strömungsmuster im Bezug auf die verwendeten Geometrien der Trennpfeiler und der Buchten herauszufinden und gegenüberzustellen.

Ziel des zweiten Teils der Arbeit, dem hydraulischen Modellversuch, ist es die Einflüsse von verschiedenen Bauteilgeometrien (Bucht, Trennpfeiler und Vorboden), in Kombination mit verschiedenen Betriebszuständen, auf die Turbinenanströmung zu untersuchen. Die Untersuchungen werden an einem Vollmodell bei 2-Maschinenbetrieb und mit besonderem Augenmerk auf die maßgebende wehrseitige Turbine durchgeführt. Über Geschwindigkeitsmessungen im Oberwasser, vor der Rechenebene und im Einlauf der Turbine werden Geschwindigkeitsverteilungen in diesen drei Ebenen dargestellt. Mit Hilfe dieser Geschwindigkeitsverteilungen und zusätzlichen quantitative Beurteilungskriterien können in Folge die verschiedenen Einflüsse verglichen werden.

2. Allgemeines zu Buchtenkraftwerken

Buchtenkraftwerke bilden einen Teil der Flusskraftwerke, welche wiederum zu den Niederdruckkraftwerken gehören. Niederdruckkraftwerke sind ihrem Namen entsprechend durch eine geringe Fallhöhe von bis zu 15m gekennzeichnet. Bei diesen Anlagen spricht man auch von Laufkraftwerken, da sich das Kraftwerk meistens im Mittellauf eines Flusses befindet und somit im Staubereich nur wenig Speichermöglichkeit besteht (Strobl und Zunic, 2006).

Die Flusskraftwerke sind meistens direkt im Flusslauf gebaut. Dabei werden die Kraftwerksanlagen immer in Kombination mit Wehranlagen gebaut. Durch die Wehr- und Kraftwerksanlage wird im Oberwasser ein Speicherraum gebildet, wodurch sich ein für die Energieerzeugung nutzbarer Höhenunterschied zwischen Oberwasser- und Unterwasserspiegel ergibt. Die Wehranlage ist zusätzlich für die sichere Hochwasserabfuhr zuständig. In Abhängigkeit von der Anordnung der Wehranlage und des Kraftwerkes im Flusslauf teilen Strobl und Zunic (2006) die Flusskraftwerke in folgende Bauweisen ein, die auch in Abbildung 2.1 dargestellt sind:

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

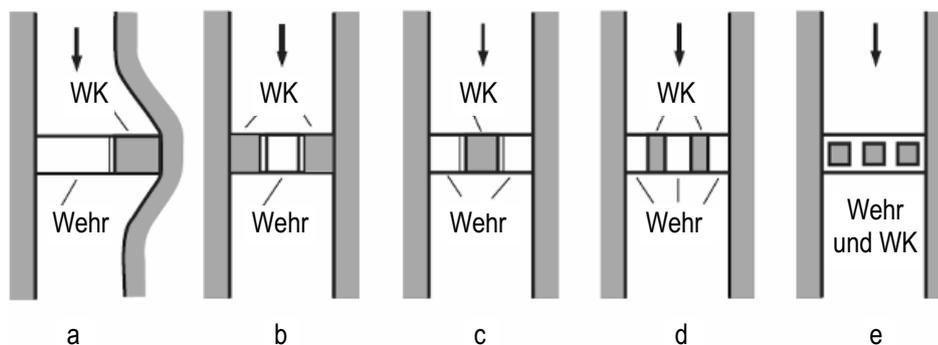


Abbildung 2.1.: Einteilung der Flusskraftwerke (Strobl und Zunic, 2006)

In dieser Arbeit wird nur auf die Buchtenkraftwerke eingegangen. Diese stellen eine Sonderform der Blockbauweise dar. Dabei sind alle Maschinensätze in einem Krafthaus auf einer Seite des Flusses in einer

künstlichen Bucht angeordnet (Giesecke und Mosonyi, 2005). Nebenan im restlichen Flussquerschnitt wird die Wehranlage als eigener Baukörper errichtet. Die Verbindung zwischen dem Kraftwerk und der Wehranlage wird über den Trennpfeiler hergestellt (Strobl und Zunic, 2006).

Im Unterschied zur Blockbauweise wird beim Buchtenkraftwerk der Flussquerschnitt nicht bzw. nur kaum eingengt. Durch diese Verbreiterung des Querschnittes kann das höchste Hochwasser problemlos über die Wehrfelder wie beim ursprünglichen Flusszustand abgeführt werden. Zudem kann das Kraftwerk beim Bau in einer trockenen Baugrube errichtet werden (Giesecke und Mosonyi, 2005).

Laut Mosonyi (1966) gibt es drei verschiedene Möglichkeiten das Kraftwerk in Abhängigkeit von der Wehranlage anzuordnen:

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

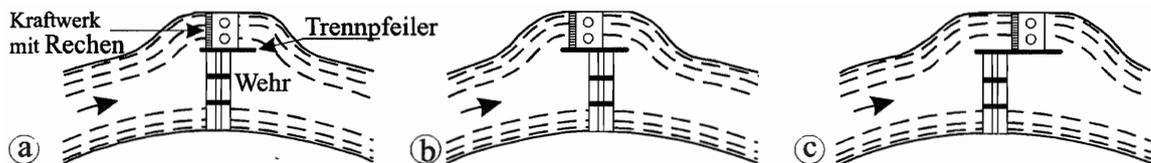


Abbildung 2.2.: Relative Lage des Krafthauses zur Wehranlage (Giesecke und Mosonyi, 2005)

Dabei ist die Anordnung a), bei der das Kraftwerk in einer Linie mit der Wehranlage liegt, die günstigste. Wenn das Kraftwerk, wie bei der Variante c, weiter flussabwärts verschoben ist, kommt es bereits zu ungünstigen Anströmungen. Die schlechteste Ausführung stellt allerdings Variante b dar, wo es durch die Vorsetzung des Kraftwerkes vor allem bei geschlossenen Wehrfeldern zu vielen Umlenkungen und Ablösungen kommen würde (Mosonyi, 1966).

Um im Bereich des Kraftwerkes eine möglichst gleichmäßige Strömung zu erzielen, ist vor allem auf die Verziehung der Buchtenuferlinie und auf die Formgebung des Trennpfeilers zu achten (Giesecke und Mosonyi, 2005). Darauf wird im Kapitel 3 genauer eingegangen.

3. Anströmung von Buchtenkraftwerken

Die Anströmung von Buchtenkraftwerken wird von verschiedenen baulichen Maßnahmen beeinflusst. Die Strömung muss verschiedene Geometrien passieren, bis sie die Turbinen erreicht. Sind diese Anlagenbauteile strömungsgünstig ausgebildet, kann es zu erheblichen Energieverlusten kommen. Vor allem bei Laufwasserkraftwerken, die eine relativ geringe Fallhöhe nutzen, können schon geringe Verluste eine relativ große Leistungseinbuße bewirken.

Besonders bei Buchtenkraftwerken kommt es zu verschiedenen Strömungsumleitungen. Bei geschlossenen Wehrfeldern kommt es zunächst zu einer Querschnittsverengung vom breiten Flussbett zu den Turbineneinläufen hin, bei der die Strömung beschleunigt wird und vor den Wehrfeldern zu den Turbineneinläufen umgeleitet werden muss. Dabei kann es schon zu Ablösungen in der Bucht und somit zu Verlusten kommen (s. Abbildung 3.1). Im weiteren Verlauf hat in Kraftwerksnähe vor allem der Trennpfeiler einen Einfluss auf die Turbinenanströmung (Lang, 1999). Auch nach Mosonyi (1966) gibt es am Zulauf zum Buchtenkraftwerk zwei Elemente, die den stärksten Einfluss auf die Strömungsverhältnisse einnehmen:

- die Linienführung der Bucht
- die Grundrissform des Trennpfeilers

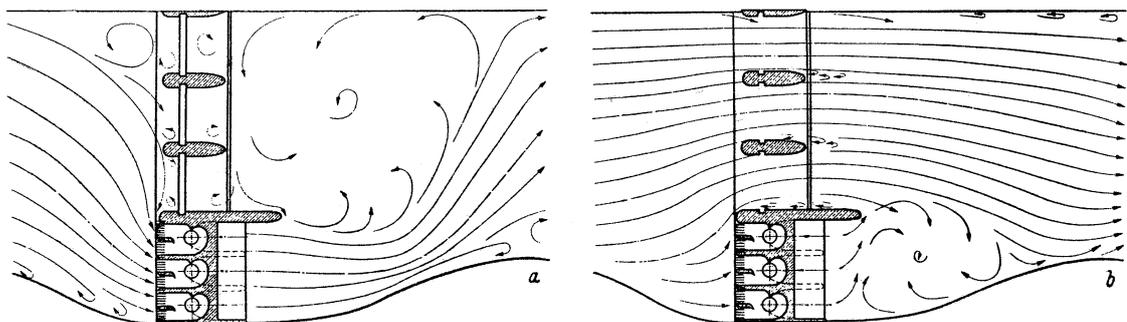


Abbildung 3.1.: Strömungsverlauf eines Buchtenkraftwerks bei geschlossenem Wehr (a) und bei offenem Wehr (b)
(Press, 1959)

Neben den Optimierungen der geometrischen Formen bei geschlossenen Wehrfeldern, sind vor allem auch die Anströmungsverhältnisse bei verschiedenen Betriebsführungsverhältnissen interessant. Wie in Abbildung 3.1 dargestellt ist, ändert sich die Anströmung auf das Kraftwerk bei geöffneten Wehrfeldern vollkommen. Durch verschiedene Wasserführungen ergeben sich auch unterschiedliche Anströmverhältnisse. Die Anströmung auf das Krafthaus sollte nach Wittmann und Gabrecht (1954) bei geöffneten Wehrfeldern stets günstiger sein als bei reinem Kraftwerksbetrieb ohne Abfluss über die Wehranlage.

3.1. Gestaltung der Oberwasserbucht

In der Literatur findet man zwei Empfehlungen für die Ausbildung der Buchtenform:

- Bucht nach Mosonyi (1966)
- Bucht nach Wittmann und Gabrecht (1954)

3.1.1. Ausbildung der Bucht nach Mosonyi (1966)

Mosonyi (1966) gibt neben der Empfehlung für die Grundform der Bucht weiters zwei Beispiele für ungünstige Buchtausführungen an (s. Abbildung 3.2). Neben dem Strömungsbild beeinflusst die Einlaufbucht auch die Geschiebebewegung. Wie in der Skizze (a) der Abbildung 3.2 dargestellt ist, ist durch eine langgezogene Bucht mit einer nur leicht gekrümmten Uferlinie mit einer günstigen Anströmung des Kraftwerks zu rechnen. Durch die weite Bucht (frühe Querschnittsaufweitung) kommt es aber aufgrund einer Verzögerung der Strömung vor allem in Ufernähe zu Geschiebeablagerungen. Zudem steigen die Baukosten aufgrund der großen Abmessungen der Bucht.

Der gegenteilige Fall zur Skizze (a) wird in Skizze (b) dargestellt (s. Abbildung 3.2). Die Einlaufbucht ist zu eng am Kraftwerk und weist eine zu stark gekrümmte Uferlinie auf. Die uferseitige Strömung kann sich nicht an die Formgebung anpassen und löst sich in der Bucht ab, sodass in der Bucht ein Totraum entsteht. Dies führt zu örtlichen Energieverlusten.

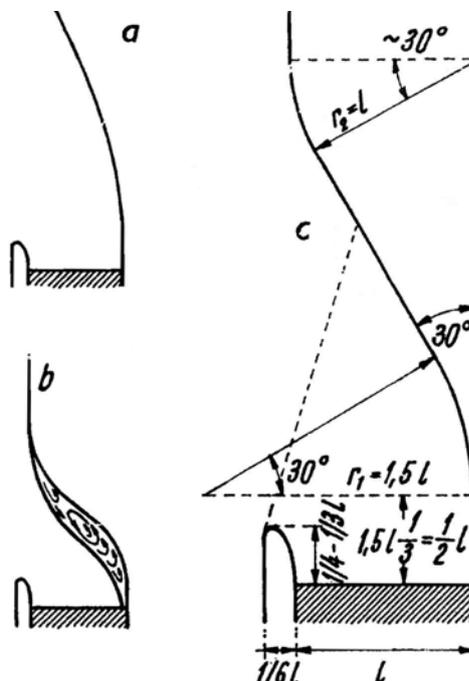


Abbildung 3.2.: Ausbildung der Buchten (Mosonyi, 1966)

Die optimale Buchtform kann laut Mosonyi (1966) nur über einen hydraulischen Modellversuch gefunden werden. Dennoch sind vorher in der Planungsphase Hauptabmessungen vorzunehmen. Diese Abmessun-

gen der Bucht sind in Skizze (c) der Abbildung 3.2 dargestellt. Dabei sollte das Ufer lotrecht und parallel zum Trennpfeiler ungefähr die halbe Kraftwerksbreite vom Kraftwerk Richtung Oberwasser geführt werden. Die Uferböschung schließt dann an diese Wand an und wird fortlaufend von der Lotrechten bis zum Ufer des ursprünglichen Flussbettes verzogen. Die Linienführung des Böschungsfusses geht dabei nach der Wand in einen Kreisbogen mit 30° Öffnungswinkel über. Somit ergibt sich auch für die Bucht ein Einlaufwinkel von 30° . Die aus dem Kreisbogen entstehende Endtangente wird bis zur ursprünglichen Uferlinie vorgezogen. Daraus ergibt sich eine Ecke, die wiederum abgerundet wird. Die Abmessungen sind alle in Abhängigkeit von der Kraftwerksbreite angegeben.

3.1.2. Ausbildung der Bucht nach Wittmann und Gabrecht (1954)

Auch Wittmann und Gabrecht (1954) warnen wie Mosonyi (1966) vor der Verwendung von zu langen bzw. zu kurzen Einlaufbuchten. Im Gegensatz zu Mosonyi (1966) sprechen sie aber bei der langen Bucht von einer ungünstigen Strömung auf das Krafthaus, da sich die Strömung erst kurz vor dem Kraftwerk in Richtung der Einläufe dreht.

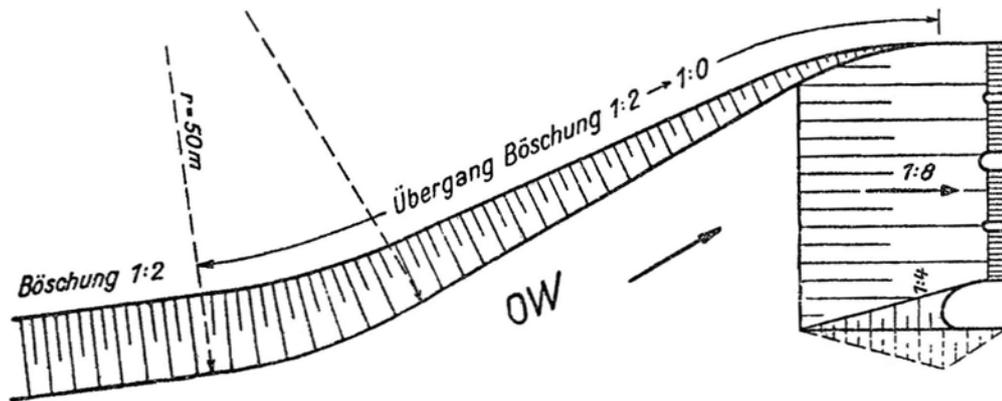


Abbildung 3.3.: Ausbildung der Buchte (Wittmann und Gabrecht, 1954)

Die Abmessungen der Bucht nach Wittmann und Gabrecht (1954) unterscheiden sich in einigen Bereichen mit der Bucht nach Mosonyi (1966) (s. Abbildung 3.3). Die lotrechte Wand wird allerdings nur bis in die Flucht des Trennpfeilerkopfes Richtung Oberwasser gezogen. Somit rückt die Bucht näher ans Kraftwerk. An diese lotrechte Wand schließt die Linienführung des Böschungsfusses mit einem 30° -Kreisbogen an, wodurch auch in diesem Fall der Einlaufwinkel der Bucht 30° beträgt. Der Radius dieses Kreisbogens sollte in etwa der Kraftwerksbreite entsprechen, wobei nach Mosonyi (1966) die 1,5-fache Kraftwerksbreite verwendet werden sollte. Auch die Abmessungen der Ausrundungsradien zwischen der Bucht und dem ursprünglichen Ufer unterscheiden sich bei den zwei Empfehlungen (s. Abbildung 3.2 u. 3.3).

3.2. Gestaltung des Trennpfeilers

Beim Buchtenkraftwerk bildet der Trennpfeiler das trennende bzw. das verbindende Bauteil zwischen Kraftwerk und Wehranlage (s. Abbildung 3.4). Bei geschlossenen Wehrfeldern muss die Strömung in die Bucht zu den Turbineneinläufen umgeleitet werden. Dabei soll sich diese Querströmung, die um den Trennpfeiler geführt wird, an keiner Stelle des Pfeilers ablösen. Zudem hat der Trennpfeiler die Aufgabe das Triebwasser gleichmäßig auf die Turbineneinläufe zu verteilen. Vor allem eine ungleichmäßige Anströmung der wehrseitigen Turbine ist zu vermeiden, um keine Energieverluste zu erzeugen (Lang, 1999).

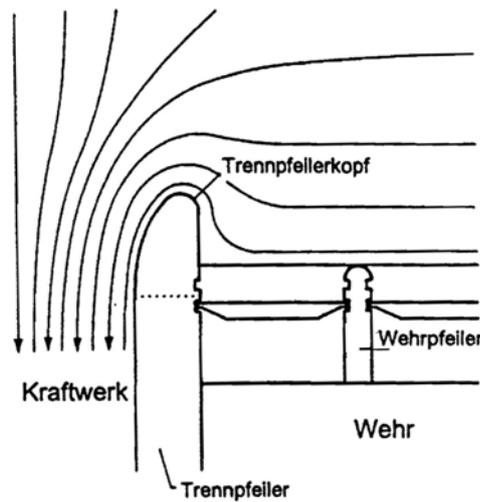


Abbildung 3.4.: Anordnung des Trennpfeilers (Godde, 1994)

Erste Versuche zur Gestaltung des Trennpfeilers wurden von Wittmann und Gabrecht (1954) durchgeführt. In weiterer Folge wurde von Rouvé (1958) eine Trennpfeilerform entwickelt. Zudem wurden im Zuge von projektbezogenen Modellversuchen verschiedene Sonderformen entwickelt. Systematische Untersuchungen zur Anströmung von Turbinen, bei denen auch die Trennpfeilerform von Bedeutung war, wurden von Godde (1994) und Lang (1999) durchgeführt.

3.2.1. Trennpfeilergestaltung von Wittmann und Gabrecht (1954)

Wittmann und Gabrecht (1954) führen den Wirkungsgrad der wehrseitigen Turbine auf die Ausbildung des Trennpfeilers zurück. Dabei stellten sie bei ausgeführten Anlagen Verluste an der wehrseitigen Turbine von bis zu 20% fest. Diese Verluste führten sie auf die gegenseitige Lage von Krafthaus und Wehranlage zurück. Sie stellten fest, dass bei ungünstiger gegenseitiger Lage die Druckhöhe nicht ausreicht, um die Wasserteilchen entlang der Trennpfeilerrundung zu beschleunigen und sich somit die Strömung am Trennpfeilerkopf ablöst. Die Bereiche der Ablösungen nehmen teilweise 60% des Einlaufquerschnittes ein. Aus den Modellversuchen entwickelten sie eine „für alle Laufwasserkraftwerke gültige Trennpfeilerform“ (s. Abbildung 3.5).

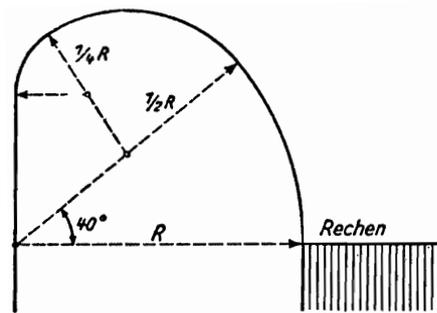


Abbildung 3.5.: Trennpfeilerform nach Wittmann und Gabrecht (1954)

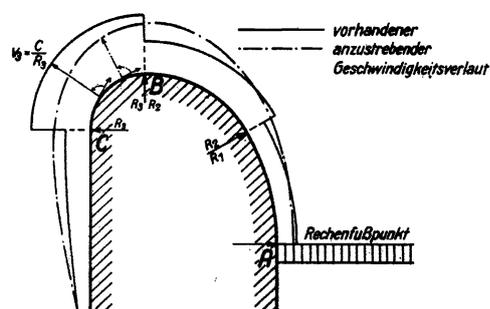
3.2.2. Trennpfeilergestaltung von Rouvé (1958)

Ausgehend von Wittmann und Gabrecht (1954), stellte Rouvé (1958) weitergehende Untersuchungen an. Er beschreibt die Strömungsgeschwindigkeit in unmittelbarer Wandnähe des Trennpfeilers über die Kreisströmung:

$$v_i = \frac{c_i}{R_i} \quad (3.1)$$

- i 3, 2, 1 in Strömungsrichtung
- v Geschwindigkeit
- c Konstante
- R Radius

Wenn der Trennpfeiler aus Kreissegmenten, wie im Fall von Wittmann und Gabrecht (1954), zusammengesetzt ist, so erfährt die Strömung im Bereich der Radienwechsel sprunghafte Geschwindigkeitswechsel (s. Abbildung 3.6). Diese Stellen der Radienwechsel, wo es zu einer Verzögerung der Strömung kommt, führen zu Ablösungen.



- 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

Rouvé (1958) empfahl nach ausführlichen Modellversuchen, bei denen verschiedene Formen mit einem stetigen Krümmungsverlauf untersucht wurden, die in Abbildung 3.7 dargestellte Trennpfeilerform. Der Trennpfeiler setzt sich aus zwei Viertelellipsen zusammen und hat somit an der Trennpfeilerspitze denselben Krümmungsradius.

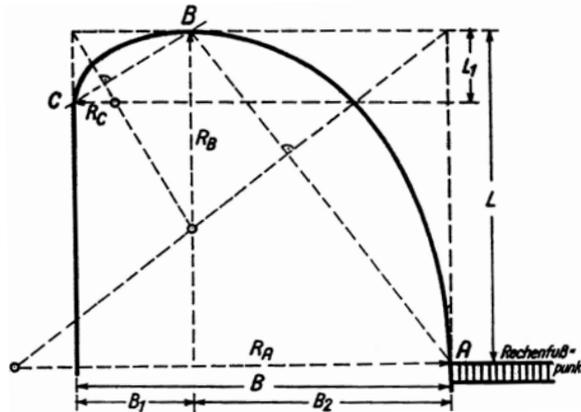


Abbildung 3.7.: Trennpfeilerform nach Rouvé (1958)

Die große Halbachse der kleinen Viertelellipse (B_1), die kleine Halbachse der großen Viertelellipse (B_2) sowie die Länge des Trennpfeilers (L) ergeben sich aus Beziehungen in Abhängigkeit von der Trennpfeilerbreite (B):

$$0,85 \cdot B \leq L \leq 0,95 \cdot B \quad (3.2)$$

$$0,28 \cdot B \leq B_1 \leq 0,35 \cdot B \quad (3.3)$$

$$0,72 \cdot B \leq B_2 \leq 0,65 \cdot B \quad (3.4)$$

Die Breite des Trennpfeilers (B) ergibt sich aus:

$$B = c \cdot Q^{2/5} \quad (3.5)$$

mit der Bedingung für die Konstante c :

$$0,7 \leq c \leq 1,4 \quad (3.6)$$

Der genaue Wert der Konstante c wird unter Berücksichtigung der Oberwasserstrecke, der gegenseitigen Lage von Kraftwerk und Wehranlage sowie der Buchtenform ermittelt. Die für die Konstruktion des

Trennpfeilers noch fehlende Abmessung der kleinen Vierteellipse (L_1), wird mit Hilfe des Krümmungsradius (R_B) im Übergangspunkt der beiden Ellipsen ermittelt:

$$L_1 = \frac{B_1^2}{R_B} \quad (3.7)$$

mit

$$R_B = \frac{B_2^2}{L} \quad (3.8)$$

3.2.3. Sonderform - Trennpfeiler mit Leitwand

Aus verschiedenen projektbezogenen Modellversuchen entwickelten sich verschiedene Sonderformen. Die verschiedenen Trennpfeiler haben das Ziel, dass sich die Geschwindigkeit der Strömung entlang der Trennpfeilerwand nur geringfügig ändert, um das Ablösen der Strömung zu Vermeiden (Rouvé, 1958).

Oftmals wäre laut Rouvé (1958) eine außerordentlich große Trennpfeilerbreite nötig, um vor allem bei Querströmungen ein Ablösen der Strömung zu verhindern. Die Verwirklichung eines breiten Trennpfeilers ist in der Natur aus Platzgründen aber manchmal nicht möglich. Auch nach Jambor (1956) ist die statisch erforderliche Trennpfeilerbreite oft kleiner als die Trennpfeilerbreite, die für eine ablösungsfreie Umströmung notwendig wäre. Aus Baukostengründen wird deshalb oft auf einen breiteren Trennpfeiler verzichtet. Um auch mit einem schmalen Trennpfeiler eine günstige Turbinenanstömung zu erreichen, kann dem Trennpfeiler eine Leitwand vorgesetzt werden (s. Abbildung 3.8). Der Raum zwischen Trennpfeiler und Leitwand soll sich dabei in Strömungsrichtung verengen. Dadurch wird die Strömung entlang der Trennpfeilerwand beschleunigt. Der Verzögerung bzw. den daraus resultierenden Ablösungen der Strömung nach dem Pfeilerkopf wird somit entgegengewirkt (Rouvé, 1958).

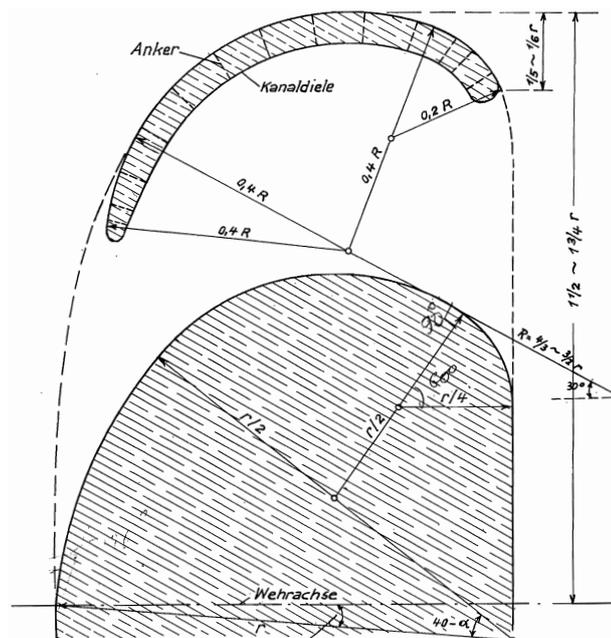


Abbildung 3.8.: Beispiel für einen Trennpfeiler mit Leitwand nach Jambor (1956)

Jambor (1956) gibt zusätzlich an, dass bei der Verwendung eines schmalen Trennpfeilers, die Länge des Trennpfeilers Einfluss auf die Turbinenanströmung hat. Durch die Verwendung eines kurzen Trennpfeilers wird die wehrfeldseitige Turbine günstig angeströmt. Für die Anströmung der landseitigen Turbine ist hingegen ein langer Trennpfeiler besser. Mit Hilfe der vorgesetzten Leitwand bei einem kurzen Trennpfeiler werden die Turbinen beider Seiten möglichst gleichmäßig angeströmt. Zum einen bleibt der kurze Trennpfeiler für die Anströmung der wehrfeldseitigen Turbine erhalten, und zum anderen wird der Trennpfeiler durch die Leitwand für die Anströmung der landseitigen Turbine künstlich verlängert (Jambor, 1956).

3.2.4. Untersuchungen zum Trennpfeiler von Godde (1994) und Lang (1999)

Sowohl Godde (1994) als auch Lang (1999) führten Untersuchungen zu verschiedenen geometrischen Formen im Bereich des Einlaufes von Laufwasserkraftwerken durch. Beide untersuchten die Einflüsse der Trennpfeilform, des Rechens und der Verziehung, wobei Lang (1999) zusätzlich noch verschiedene Sohlneigungen betrachtete. Die Versuche wurden zum Teil an einem Kleinkraftwerk mit Versuchsturbinen durchgeführt. Somit konnte Godde (1994) und Lang (1999) die durch bauliche Maßnahmen beeinflusste Strömung nicht nur anhand von Geschwindigkeitsverteilungen bewerten, sondern auch einen direkten Bezug zum Anlagenwirkungsgrad herstellen.

Bei den Vorversuchen zur Trennpfeilerform, stellte Godde (1994) zunächst fest, dass sich die Lage der Wehrfelder nicht auf die Geschwindigkeitsverteilung vor den Turbineneinläufen auswirkt. Der einzige Unterschied zeigt sich in der Größe der Totwasserzone vor dem Wehr (s. Abbildung 3.9). Diese Feststellung steht im Widerspruch mit Angaben aus der Literatur, wie z.B. bei Mosonyi (1966) (s. Kap. 2). Allerdings wurde beim Modellversuch von Godde (1994) nur ein kleiner Teil der Wehranlage nachgebildet und kein Vollmodell für die Untersuchungen verwendet.

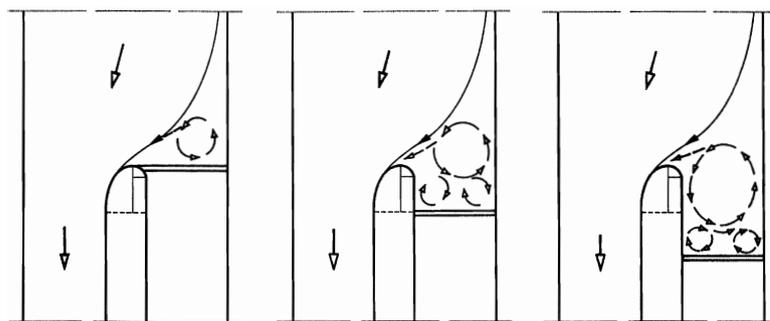


Abbildung 3.9.: Totwasserzone bei verschieden positionierter Wehranlage (Godde, 1994)

Godde (1994) verwendete in seinen Untersuchungen die in Abbildung 3.10 dargestellten Trennpfeilerformen, wobei mit den Pfeilern 7, 8 und 9 die besten α -Werte (s. Kap. 3.3) erzielt wurden.

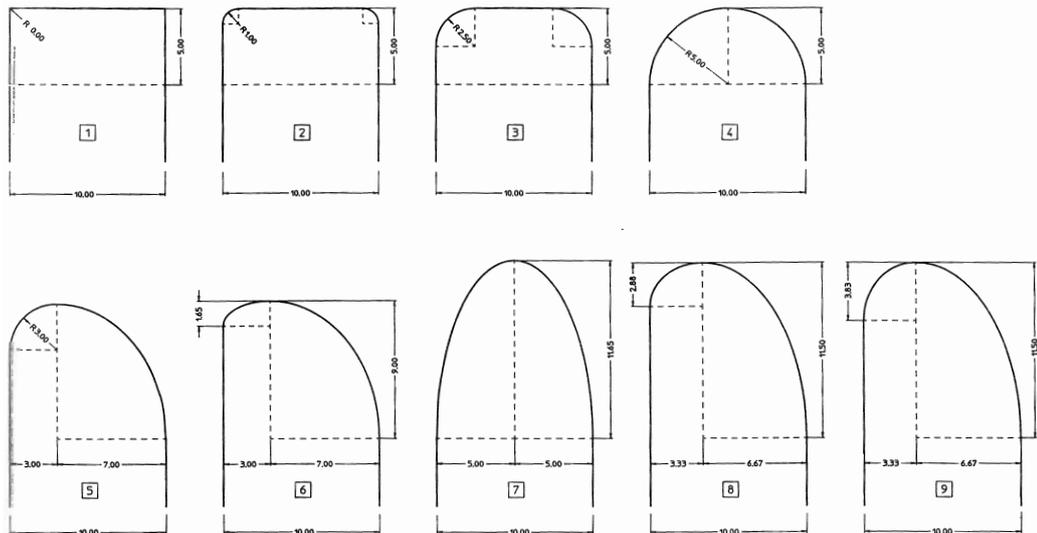


Abbildung 3.10.: Untersuchte Trennpfeilerformen von Godde (1994)

Mit diesem Ergebnis widerspricht Godde (1994) den Forderungen von Rouvé (1958), dass die Krümmung des Trennpfeilers von der Wehr- bis zur Kraftwerksseite stetig abnehmen soll. Vor allem der Trennpfeiler 7, der aus zwei gleich großen Viertelellipsen besteht, hält diese Forderung nicht ein. Für Godde (1994) hat nur der kraftwerksseitige Teil der abgewinkelten Länge L' (s. Abbildung 3.11) einen Einfluss auf die Geschwindigkeitsverteilung in der Rechenebene. Diese abgewinkelte Länge verhält sich linear zum α -Wert (s. Abbildung 3.12). Ausgehend von dieser Beziehung empfiehlt Godde (1994) einen Trennpfeiler mit einer möglichst großen abgewinkelten Länge L' . Bei der Tatsache, dass die Krümmung am Fusspunkt des Pfeilers (Übergang Trennpfeilerkopf/-wand) möglichst klein sein sollte, sind sich Rouvé (1958) und Godde (1994) einig, wobei Godde (1994) auch zwischen der abgewinkelten Länge L' und der Krümmung eine lineare Beziehung feststellte.

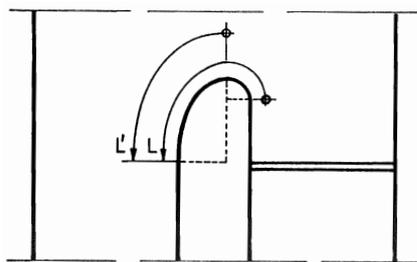


Abbildung 3.11.: Bezeichnungen der abgewinkelten Längen nach Godde (1994)

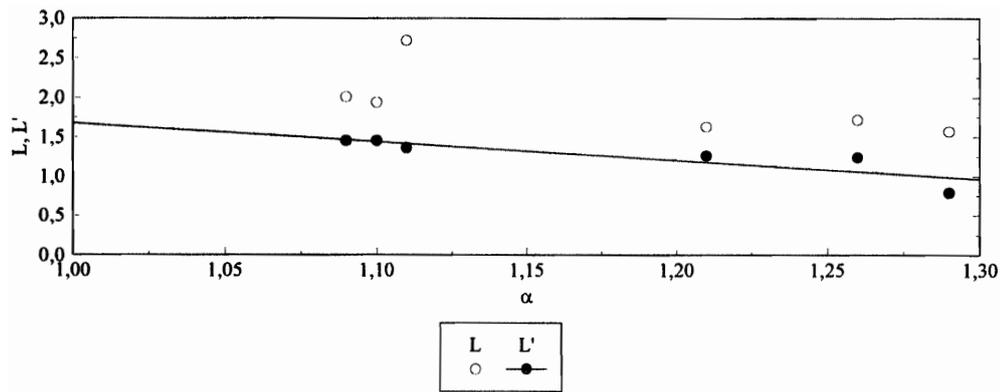


Abbildung 3.12.: Beziehung zwischen L bzw. L' und dem α -Wert (Godde, 1994)

Der halbkreisförmige Trennpfeiler hat im Vergleich zu den Trennpfeilern die sich aus Viertelellipsen zusammensetzen, die geringste abgewinkelte Länge L' bei der größten Krümmung im Übergang von Trennpfeilerkopf zur Trennpfeilerwand. Somit entspricht diese Trennpfeilerform nicht den Anforderungen von Godde (1994). Bei seinen Modellversuchen weist der halbkreisförmige Trennpfeiler auch einen schlechteren α -Wert auf, als die Trennpfeiler 5 bis 9 in Abbildung 3.10.

Von Lang (1999) wurden die in Abbildung 3.13 dargestellten Trennpfeiler untersucht. Um den generellen Einfluss des Trennpfeilers auf den Anlagenwirkungsgrad zu bestimmen, verzichtete er auf Spezialformen. Er verglich zwei relativ strömungsgünstige Formen (elliptischer bzw. halbkreisförmiger Trennpfeiler) mit zwei theoretischen Varianten in Form eines rechteckigen bzw. ohne Trennpfeiler. Dabei bewirkte der elliptische Trennpfeiler immer die besseren α -Werte als der halbkreisförmige Trennpfeiler. Lang (1999) untersuchte die Trennpfeiler allerdings vor allem in Zusammenhang mit dem Rechen und kam zur Folgerung dass sich die größten Energieverluste aufgrund vom schräg angeströmten Rechen ergeben. Ohne Trennpfeiler ist der Energieverlust um 2% höher als bei der Verwendung des elliptischen Trennpfeilers. Auch für Godde (1994) ist die Schräganströmung des Rechens entscheidend für die Energieverluste.

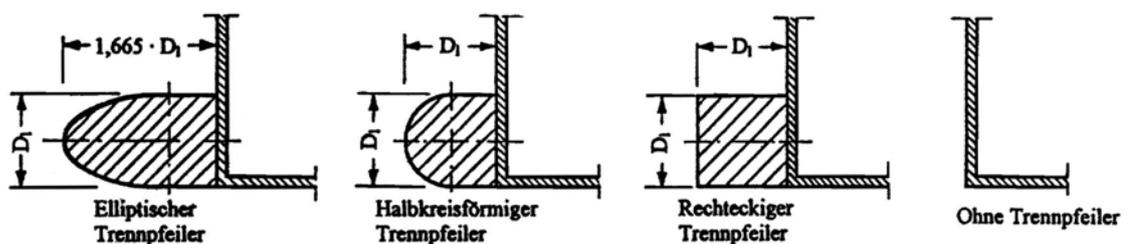


Abbildung 3.13.: Untersuchte Trennpfeilerformen von Lang (1999)

3.3. Kriterien zur Beurteilung der Turbinenanströmung

Um die Güte der Turbinenanströmung beurteilen zu können, werden in Modellversuchen Geschwindigkeitsmessungen im Bereich des Turbineneinlaufs durchgeführt. Diese Geschwindigkeitsmessungen werden nach einem über den Messquerschnitt verteilten Messraster durchgeführt, woraus sich die Verteilung der Anströmgeschwindigkeit über den Messquerschnitt ergibt. Um diese Geschwindigkeitsverteilungen

bezüglich der Strömungsqualität beurteilen bzw. quantifizieren zu können, gibt es verschiedene Kriterien, wobei in der vorliegenden Arbeit zwei einfache Kriterien verwendet werden:

- Geschwindigkeitshöhenausgleichswert (α -Wert)
- Kriterium nach Fisher und Franke

Bezüglich einer genauen Auflistung aller Kriterien wird auf Mayr (2008) verwiesen.

3.3.1. Geschwindigkeitshöhenausgleichswert (α -Wert)

Die Berechnung des α -Wertes wird in Anlehnung an Godde (1994) und Bollrich (2007) beschrieben:

Nach Bernoulli ergibt sich die Energiehöhe H_E , ausgehend vom Fall der verlustfreien Potentialströmung, mit:

$$H_E = \frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\rho \cdot g} + z \quad (3.9)$$

wobei v der mittleren Geschwindigkeit $v = Q/A$ entspricht.

Die Energiegleichung 3.9 muss bei realen Strömungen durch einen endlichen Fließquerschnitt mit den Energieausgleichswerten korrigiert werden. Dabei unterscheidet man zwischen dem Geschwindigkeitshöhenausgleichswert (α -Wert) und dem Druckhöhenausgleichswert (β -Wert).

Wenn die Geschwindigkeit einer Strömung über den gesamten Fließquerschnitt konstant verteilt angenommen wird, berechnet man die kinetische Energie theoretisch mit:

$$E_{kin,theor} = \frac{\rho \cdot dt}{2} \cdot v^3 \cdot A \quad (3.10)$$

Wie in Abbildung 3.14 dargestellt ist, verteilt sich die Geschwindigkeit aber nicht gleichmäßig über den Fließquerschnitt. Somit errechnet sich die reale kinetische Energie mit:

$$E_{kin,real} = \frac{\rho \cdot dt}{2} \cdot \int^A v_{(A)}^3 \cdot dA \quad (3.11)$$

Wenn die Geschwindigkeitshöhe in der Formel von Bernoulli mit der mittleren Geschwindigkeit berechnet wird, muss diese mit dem Geschwindigkeitshöhenausgleichswert multipliziert werden, um auf die wahre Geschwindigkeitshöhe zu kommen:

$$\alpha = \frac{E_{kin,real}}{E_{kin,theor}} = \frac{1}{v^3 \cdot A} \cdot \int^A v_{(A)}^3 \cdot dA \quad (3.12)$$

Auch der Ausdruck für die Druckhöhe in der Energiegleichung müsste korrigiert werden, falls die Druckverteilung in allen Punkten des Fließquerschnitts nicht gleich groß ist. Das trifft zu, wenn die Strömung im Längsschnitt gekrümmt ist, wie beim Ausfluss unter einem Schütz. Dies ist aber beim Turbineneinlauf nicht der Fall und somit kann der Druckhöhenausgleichswert β mit 1 angenommen werden.

Der α -Wert errechnet sich mit

$$v_{(A)} = v + \Delta v \tag{3.13}$$

und

$$\int^A \Delta v \cdot dA = 0 \tag{3.14}$$

zu

$$\alpha = \frac{1}{v^3 \cdot A} \cdot \int^A (v + \Delta v)^3 \cdot dA = 1 + \frac{3}{v^2 \cdot A} \cdot \int^A \Delta v^2 \cdot dA + \frac{1}{v^3 \cdot A} \cdot \int^A \Delta v^3 \cdot dA \tag{3.15}$$

Der Geschwindigkeitsausgleichswert ist immer größer als 1 und von der Geschwindigkeitsverteilung über A abhängig (s. Abbildung 3.14).

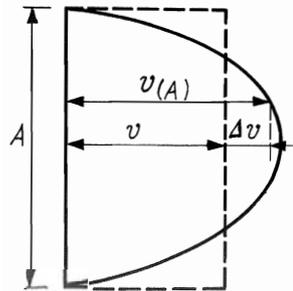


Abbildung 3.14.: Lokale und mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Fließquerschnitt (Bollrich, 2007)

Bei der turbulenten Strömung liegt der α -Wert zwischen 1,01 und 1,10. Je größer die Turbulenz ist, desto mehr nähert sich α dem Wert 1. Bei laminarer Strömung erreicht α den Wert 2 (Bollrich, 2007).

Von den Turbinenherstellern wird ein möglichst gleichmäßiges Geschwindigkeitsfeld verlangt. Da dies bei einem kleinen α -Wert und somit turbulenter Strömung der Fall ist (s. Abbildung 3.15), können über den α -Wert verschiedene Geschwindigkeitsverteilungen gut miteinander verglichen werden (Godde, 1994).

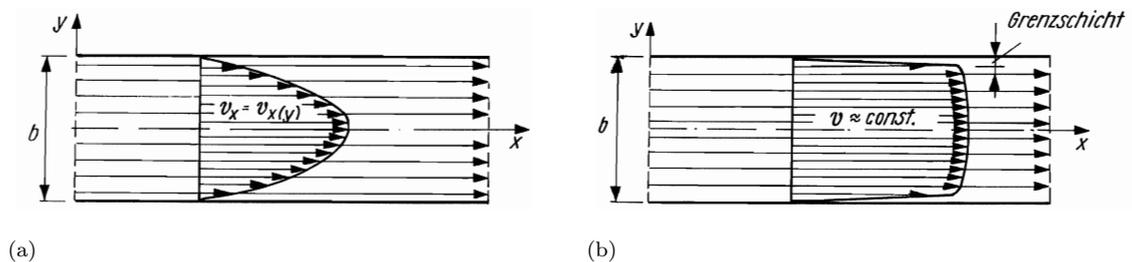


Abbildung 3.15.: Unterschied zwischen laminarer (a) und turbulenter Strömung (b) (Bollrich, 2007)

3.3.2. Kriterium nach Fisher und Franke

Fisher und Franke haben ihr Kriterium anhand von Modellversuchen verschiedener Versuchsanstalten aufgestellt. Durch das Auswerten der Geschwindigkeitsverteilungen aus den Modellversuchen, bei denen

verschiedene Einlaufgeometrien und Turbinentypen untersucht wurden, konnten sie diese Geschwindigkeitsverteilungen in vermutlich leistungsmindernd oder vermutlich nicht leistungsmindernd einteilen. Die Einteilung erfolgte über einen festgelegten Grenzbereich innerhalb eines Diagramms (s. Abbildung 3.16). Ausgehend von der Geschwindigkeitsverteilung werden in diesem Diagramm die lokalen Geschwindigkeitsabweichungen vom Mittelwert (über den gesamten Fließquerschnitt) in Relation zur davon betroffenen anteiligen Querschnittsfläche aufgetragen. Für die Abweichungen unterhalb des Mittelwertes werden die Geschwindigkeiten aufsteigend vom Minimal- zum Maximalwert gereiht. Die umgekehrte Reihung erfolgt für die Abweichungen oberhalb des Mittelwertes. Liegen die sich daraus ergebenden Kurven innerhalb der von Fisher und Franke vorgegebenen Grenzen, ist mit vermutlich keiner Leistungsminderung zu rechnen. Wie aus der Abbildung 3.16 zu sehen ist, können sich größere Abweichungen vom Mittelwert auf einen kleinen Flächenanteil beziehen und kleinere Abweichungen durchaus auch einen größeren Flächenanteil einnehmen, um noch innerhalb der Grenzen zu liegen (Godde, 1994).

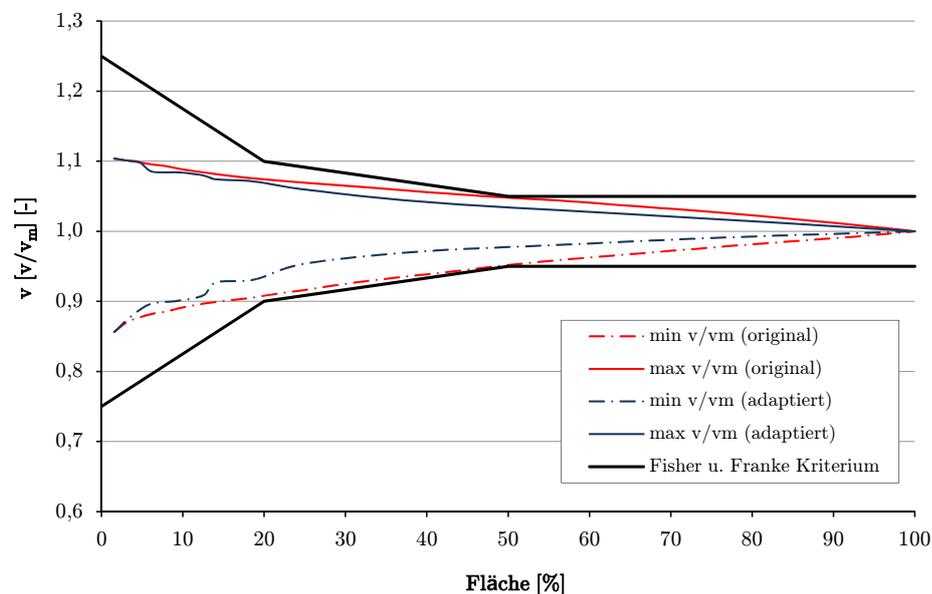


Abbildung 3.16.: Auswertungdiagramm nach Fisher und Franke

Zusätzlich zu der beschriebenen originalen Auswertungsmethode können die Geschwindigkeitsverteilungen noch nach einer adaptierten Methode ausgewertet werden (Tschernutter u. a., 2008). Dabei werden die Geschwindigkeiten nicht einfach über den ganzen Querschnitt nach der Größe sortiert, sondern es werden innerhalb des Querschnittes flächenbezogene Minima und Maxima errechnet. So wird die kleinste bzw. größte 1%, 2% etc. Fläche gesucht. Diese flächenbezogene Geschwindigkeitabweichung vom Mittelwert des gesamten Querschnitts wird nach anteiliger Fläche im Diagramm aufgetragen. Da bei der originalen Methode von Fisher und Franke räumlich nicht zusammenhängende Flächen zu einer fiktiven Gesamtfläche zusammengefasst werden, hilft die adaptierte Methode, die bei realen Kraftwerken auftretenden Strömungszonen besser zu erfassen. So würde z.B. eine Geschwindigkeitsabweichung unterhalb des Mittelwertes von 0,8 bei 25% Flächenanteil nach der adaptierten Methode bedeuten, dass es keine zusammenhängende Fläche mit 25% Flächenanteil im Querschnitt gibt, die unter 0,8 liegt. Bei der ori-

ginalen Methode hingegen gäbe es keine kumulierte fiktive Fläche mit 25% Flächenanteil, bei der die Geschwindigkeitsabweichung kleiner als 0,8 vom Mittelwert ist.

4. Analyse von bestehenden Kraftwerken

Um die eigenen Untersuchungen mit Beispielen von anderen Kraftwerken vergleichen zu können, werden in diesem Kapitel drei Laufkraftwerke mit Block- bzw. Buchtenform an der Saar analysiert. Die Analyse erfolgt anhand der Modellberichte zu den jeweiligen hydraulischen Modellversuchen.

4.1. Allgemein

In den Jahren 1978 (KW Mettlach), 1983 (KW Serrig) und 1984 (KW Lisdorf) wurden an der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) in Karlsruhe drei Modellversuche für diese Saarkraftwerke durchgeführt.

Für die Analyse dieser drei Modellversuche standen die Modellberichte mit der jeweiligen Versuchsgeschichte zur Verfügung. Bei den Modellversuchen wurden vor allem verschiedene Pfeiler, OW-Buchten, UW-Buchten, Trennwände zwischen den Turbinen und Durchflüsse untersucht. In der vorliegenden Analyse wird nur auf die Entwicklung der OW-Bucht und die Verbesserung der Trennpfeiler in Bezug auf die Geschwindigkeitsverteilung im wehrfeldseitigen Turbineneinlauf eingegangen. Für die vollständige Versuchsgeschichte wird auf die Modellberichte Lasar und Kemnitz (1984), Lasar und Kemnitz (1978) und Lasar und Kemnitz (1983) verwiesen.

Zum Vergleich der OW-seitigen Kraftwerksanströmung wurde die Geschwindigkeitsverteilung im Turbineneinlauf gemessen. Die Messebene befand sich beim Kraftwerk Mettlach 0,80 m vor der Oberkante des Einlauftrichters. Bei den anderen beiden Kraftwerken befand sich diese in einer senkrechten Ebene gleich hinter dem Rechen (s.Kap 4.4.1). Die Geschwindigkeiten wurden in allen Fällen mit einem Flügel gemessen und als Isotachenverteilung dargestellt. Aufgrund einer rein visuellen Auswertung dieser Isotachenbilder, sowie über Farbanströmungs- und Wirbelbeobachtungen, beurteilte die BAW die Qualität der Kraftwerksanströmung.

Um die vorliegenden Versuchsergebnisse vertieft analysieren zu können wurden die Isotachenbilder in der vorliegenden Arbeit nach dem α -Wert und nach dem Kriterium nach Fischer und Franke ausgewertet. Durch diese Kriterien war es möglich die einzelnen Versuchsergebnisse zu quantifizieren. Für die Auswertung der Isotachenbilder wurde über diese mit Hilfe eines Programmes ein Raster von 10 x 10 Punkten gelegt. An diesen 100 Punkten wurden die lokalen Geschwindigkeiten ausgelesen. Somit konnte für die einzelnen Versuche das Kriterium nach Fischer und Franke und der α -Wert bestimmt werden. Es wird versucht einen Zusammenhang zwischen Anströmungsgüte und Geometriealternativen aufzudecken.

4.2. Beurteilungskriterien und Parametrisierung

Wie bereits erwähnt wurden die Versuche von der BWA über die visuelle Beurteilung der Isotachenbilder gereiht, sowie anhand von Farbanströmung und Wirbelbildung beurteilt. Nachfolgend wird für jeden der drei Modellversuche die Entwicklung des α -Werts in Abhängigkeit von der Versuchsgeschichte dargestellt. Somit wird festgestellt ob sich der α -Wert äquivalent zur Versuchsgeschichte in den Modellberichten entwickelt.

Als wichtiger neuer Schritt, werden für jedes Kraftwerk die Trennpfeiler und die OW-Buchten parametrisiert. Dafür werden die Trennpfeiler auf eine Pfeilerbreite von 1 skaliert und alle analysierten Längen (s. Abbildung 4.1) auf diese Breite bezogen. Dadurch werden die Trennpfeiler zwischen den verschiedenen Kraftwerken, bei welchen die Trennpfeiler unterschiedliche Breiten aufweisen, vergleichbar.

Die Trennpfeiler setzen sich bei allen untersuchten Varianten aus Kreisbögen zusammen. Dabei setzt sich die Trennpfeilergrundform bei einigen Versuchen nicht wie in Abbildung 4.1 dargestellt aus drei, sondern nur aus einem bzw. zwei Kreisbögen zusammen. In diesen Fällen werden die zusammenfallenden Radien bei der Parametrisierung gleichgesetzt. Zum Beispiel wird für eine Trennpfeilerform, die nur aus einem Halbkreis besteht, $R_1 = R_2 = R_3$ gesetzt. Bei den zutreffenden Trennpfeilern wird diese Gleichsetzung in der Bemerkung angegeben.

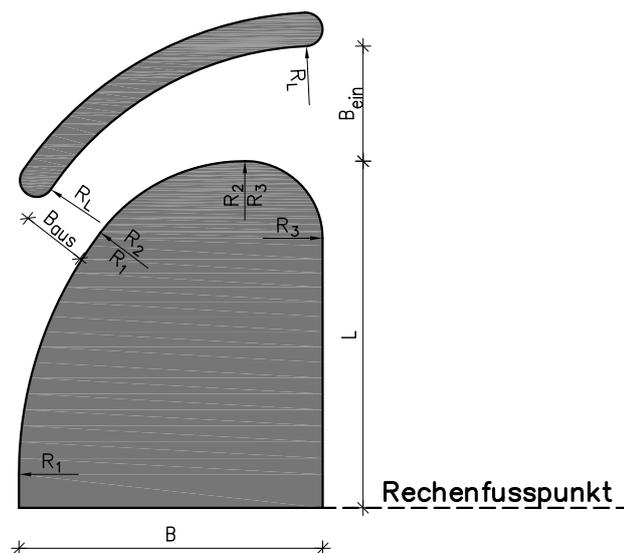


Abbildung 4.1.: Parameter der Trennpfeiler

Für die Parametrisierung der OW-Buchten werden die analysierten Längen (s. Abbildung 4.2) auf eine Kraftwerksbreite von 1 bezogen.

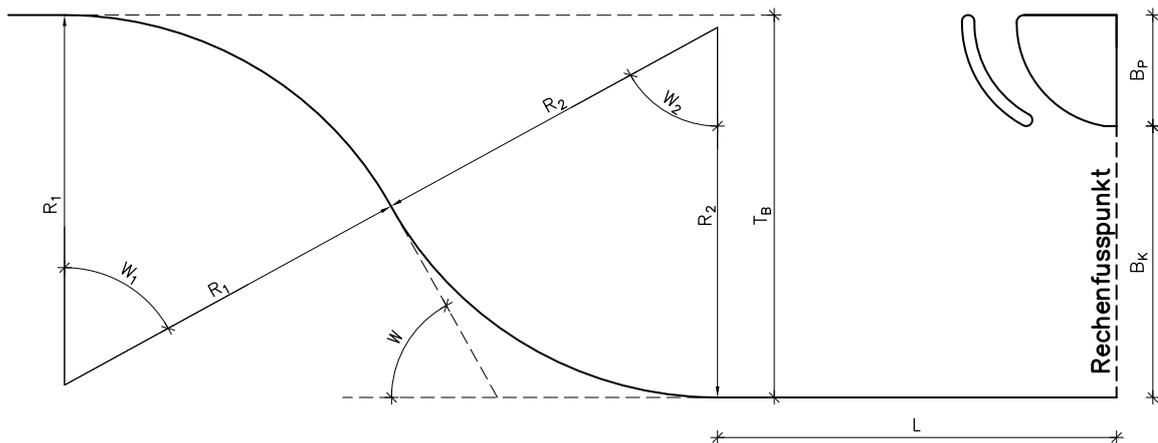


Abbildung 4.2.: Parameter der OW-Buchten

Der Versuch *Nr.1* stellt bei allen Versuchen die modellmäßige Verwirklichung der dem Labor vorliegenden Plänen dar.

4.3. Analyse

In den drei Modellberichten wird für jeden Versuchsstand auf die zugehörige Geschwindigkeitsverteilung in der Anlage verwiesen. Um die Analyse verständlicher zu machen, werden die verwendeten Versuche fortlaufend nummeriert. In den Tabellen 4.1, 4.4, 4.7 wird die hier verwendete Nummerierung mit der in den Modellberichten verwendeten Anlagenzahl aufgelistet. Zudem wird in den Tabellen die in den Modellberichten verwendete Nummerierung für die Trennpfeiler und die OW-Buchten angegeben.

4.3.1. KW Mettlach

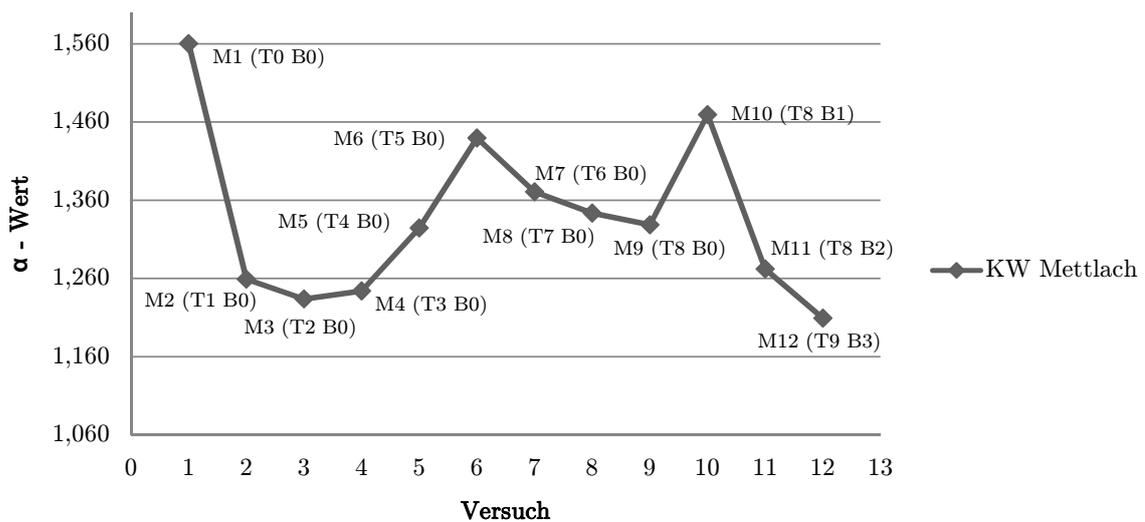
Die Staustufe Mettlach besteht aus einem dreifeldrigen Wehr, zwei Schiffahrtsschleusen und einem Kraftwerk mit 2 Turbineneinläufen. Das Kraftwerk hat dabei eine lichte Breite von 11 m, wobei die Turbineneinläufe jeweils 5 m einnehmen und die Trennwand 1 m breit ist. Der Trennpfeiler hat eine Breite von 4,5 m. Der Ausbaudurchfluss beträgt $Q_a = 60 \text{ m}^3/\text{s}$. Weitere Abmessungen bezüglich des Kraftwerks können der Abbildung 4.14 entnommen werden. Die Untersuchungen zur Kraftwerksoptimierung wurden alle bei 2-Maschinenbetrieb und ohne Beaufschlagung der Wehrfelder durchgeführt.

Die Nummerierung der einzelnen Versuche beim KW Mettlach erfolgt wie in Tabelle 4.1 dargestellt ist.

KW Mettlach			
Versuch Nr.	Anlage Nr.	Trennpfeilerform	OW-Buchtform
M1	6	T0	B0
M2	7	T1	B0
M3	8	T2	B0
M4	9	T3	B0
M5	10	T4	B0
M6	11	T5	B0
M7	12	T6	B0
M8	13	T7	B0
M9	14	T8	B0
M10	15	T8	B1
M11	16	T8	B2
M12	17	Ausführungsvorschlag = T9 bzw. B3	

Tabelle 4.1.: Nummerierung für das KW Mettlach

Bei den Versuchen *Nr. M2* bis *Nr. M4* wurde durch die Änderung der Trennpfeilerform eine erhebliche Verbesserung der Turbinenanströmung erzielt. Bei den Versuchen *Nr. M3* und *Nr. M4* wurde eine Leitwand vorgesetzt. Da diese Formen keinen Platz für die Notverschlussnischen ließen, wurden in den Versuchen *Nr. M5* bis *Nr. M9* längere Pfeilerköpfe untersucht, wobei sich die Geschwindigkeitsverteilung zunächst wieder verschlechterte. Die besten Ergebnisse wurden im Versuch *Nr. M9* mit einem Pfeiler mit Leitwand erzielt. Bei den Versuchen *Nr. M10* und *Nr. M11* wurde unter Beibehaltung des Trennpfeilers aus Versuch *Nr. M9* die OW-Bucht verändert. Der Versuch *Nr. M12* stellt die Ausführungsvariante dar, bei dem die OW-Bucht nochmals verändert und die Trennpfeilerform aus Versuch *Nr. M5* verwendet wurde. Die Länge des Pfeilers wurde aber gegenüber Versuch *Nr. M5* verkürzt (Lasar und Kemnitz, 1978).

Abbildung 4.3.: Entwicklung des α -Wertes mit der Versuchsgeschichte beim KW Mettlach

Wie aus der Abbildung 4.3 zu erkennen ist, liefern die kurzen Trennpfeiler T1, T2 und T3 in den

Versuchen *Nr. M 2* bis *Nr. M 4* die besseren α -Werte als die längeren Pfeiler in den weiteren Versuchen. Diese Trennpfeiler sind, wie aus der Tabelle 4.2 ersichtlich ist, weniger lang als breit. Der Versuch *Nr. M 3* hat einen α -Wert von 1,234. Der darauffolgende Versuch *Nr. M 4* hat einen α -Wert von 1,244. Dabei wurde dieselbe Trennpfeilerform nur um 2,37 m in Richtung OW verschoben (s. Abbildung 4.4). Zudem wirkt sich die Anbringung einer Leitwand vor dem Pfeiler auch immer positiv aus. In drei Fällen wird bei jeweils demselben Versuchsaufbau dem Trennpfeiler eine Leitwand vorgesetzt und es verbessert sich jedesmal der α -Wert (von *Nr. M 2* auf *Nr. M 3*, *Nr. M 6* auf *Nr. M 7* und *Nr. M 8* auf *Nr. M 9*). Zudem ist aus der Tabelle 4.2 zu erkennen, dass die Einlaufbreite (B_{ein}) zwischen Trennpfeiler und Leitwand immer größer ist als die Austrittsbreite (B_{aus}). Es wird also eine Verengung in Fließrichtung erzeugt. Zudem ist der wehrfeldseitige Radius (R_3) bei den Pfeilern mit den besten α -Werten, also bei den Pfeilern T1 bis T4 und T9, im Verhältnis zum kraftwerkseitigen Radius sehr klein.

Pfeiler	L	B	R ₁	R ₂	R ₃	R _L	B _{ein}	B _{aus}	Bemerkung
T0	0,99	1,00	0,50	0,50	0,50	-	-	-	$R_1 = R_2 = R_3$
T1	0,58	1,00	0,95	0,95	0,07	-	-	-	$R_1 = R_2$
T2	0,58	1,00	0,95	0,95	0,07	0,95	0,38	0,23	$R_1 = R_2$
T3	0,58	1,00	0,95	0,95	0,07	0,95	0,38	0,23	$R_1 = R_2$
									mit Betonabdeckung (s. Abb. 4.4)
T4	1,10	1,00	0,95	0,95	0,07	0,95	0,38	0,23	
T5	1,36	1,00	1,33	0,60	0,26	-	-	-	
T6	1,36	1,00	1,33	0,60	0,26	1,08	0,38	0,22	
T7	1,14	1,00	1,00	0,50	0,25	-	-	-	
T8	1,14	1,00	1,00	0,50	0,25	0,75	0,34	0,21	
T9	0,89	1,00	0,95	0,95	0,07	0,95	0,38	0,23	$R_1 = R_2$

Tabelle 4.2.: Parameter der Trennpfeiler beim KW Mettlach

Im Versuch *Nr. M 10* wurde die Bucht B1, wie aus der Tabelle 4.3 ersichtlich ist, verkürzt und der Buchtwinkel wurde steiler. Dadurch verschlechterte sich der α -Wert von 1,328 (Versuch *Nr. M 9*) auf 1,469. Im Versuch *Nr. M 11* wurde die Bucht B2, welche die exakt gleiche Grundform wie die Bucht B0 aufweist, um 5,00 m Richtung OW verschoben (s. Abbildung 4.5). Dies führte zu einer Verbesserung des α -Wertes auf 1,272. Die Bucht B3 hat mit $W = 50^\circ$ im Vergleich zu den drei anderen Buchtformen den flachsten Buchtwinkel.

Bucht	L	T _B	B _K	B _P	W	R ₁	W ₁	R ₂	W ₂	Bemerkung
B0	1,46	1,41	1	0,41	61,1	1,36	61,1	1,36	61,1	
B1	1,36	1,41	1	0,41	62,4	1,09	65,1	1,64/0,55	37,4/25	
B2	1,91	1,41	1	0,41	61,1	1,36	61,1	1,36	61,1	
B3	1,36	1,41	1	0,41	50	-	-	1,36	50	

Tabelle 4.3.: Parameter der OW-Buchten beim KW Mettlach

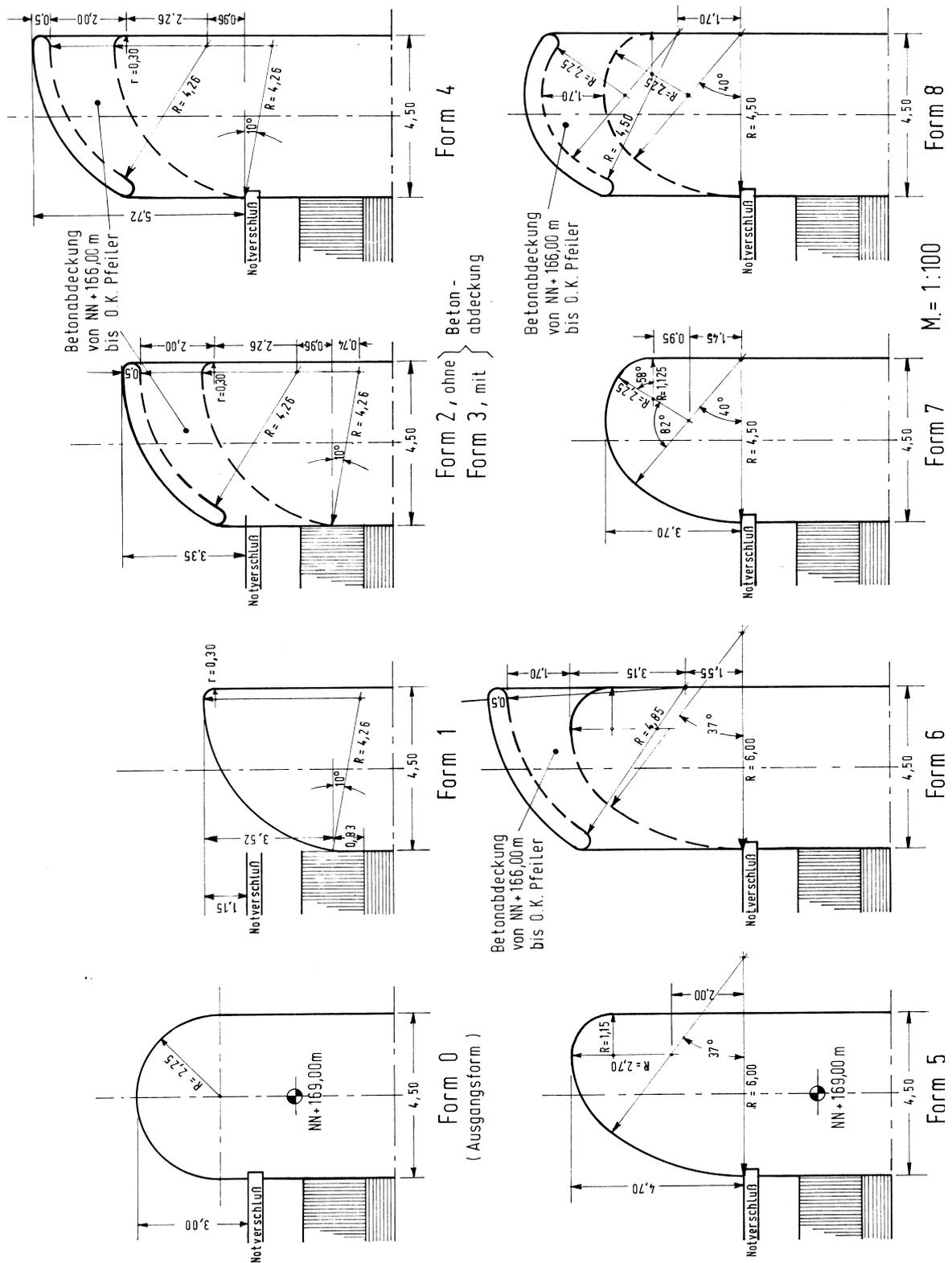


Abbildung 4.4.: Trennpfeiler beim KW Mettlach (Lasar und Kemnitz, 1978)

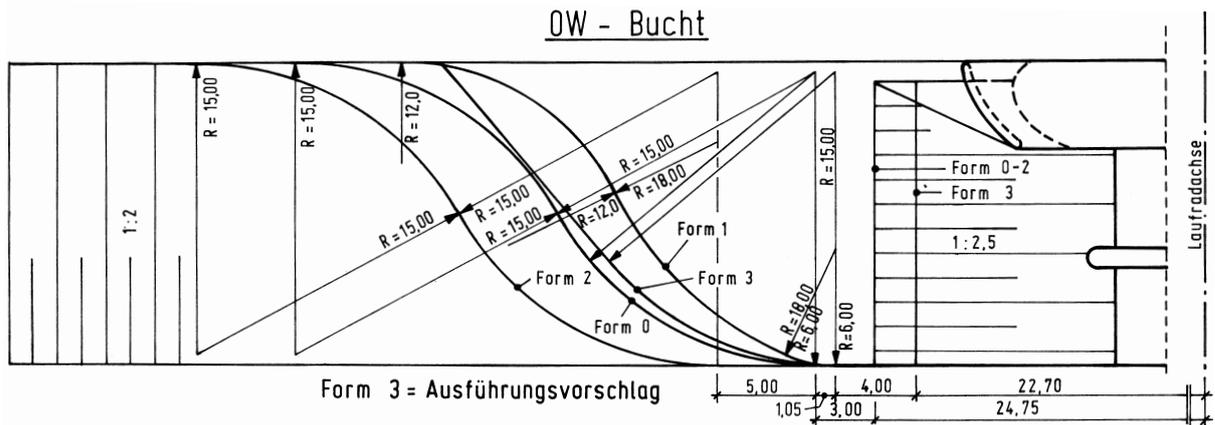


Abbildung 4.5.: OW-Buchten beim KW Mettlach (Lasar und Kemnitz, 1978)

Um eine Beziehung zwischen dem α -Wert und den verschiedenen Parametern aus den Tabellen 4.2 und 4.3 ersichtlicher zu machen, wurden sie in einem Diagramm in Abhängigkeit vom α -Wert gegenübergestellt. Dazu wurden die verschiedenen ausgewerteten Längen eines jeden Trennpfeilers bzw. jeder Bucht in Abhängigkeit vom zugehörigen α -Wert aufgetragen. Die Reihung im Diagramm erfolgte vom kleinsten zum größten α -Wert. Wie in Kapitel 3.2.4 beschrieben, fand Godde (1994) durch die Gegenüberstellung von α -Wert und der abgewickelten Länge der Trennpfeiler vom Scheitelpunkt eine lineare Beziehung zueinander heraus. Dieser Zusammenhang ist durch die Ergebnisse bei den Versuchen Nr. M 8 (T7B0) und Nr. M 2 (T1B0) gegenüber Versuch Nr. M 6 (T5B0) bereits widerlegt. Der Trennpfeiler T 5 weist gegenüber den Trennpfeilern T 1 und T 7, mit 1,411 (auf 1 m Pfeilerbreite bezogen) gegenüber 1,322 bzw. 1,133, die größte Abgewickelte Länge beim schlechtesten α -Wert auf (s. Abbildung 4.6). Nur der halbkreisförmige Trennpfeiler weist wie bei Godde (1994) den schlechtesten α -Wert auf. Dadurch dass es bei einem Trennpfeiler mit Leitwand nicht eindeutig ist, über welchen Bereich sich die abgewickelte Länge erstreckt, wurden nur die Pfeiler ohne Leitwand hinsichtlich dieser Länge analysiert.

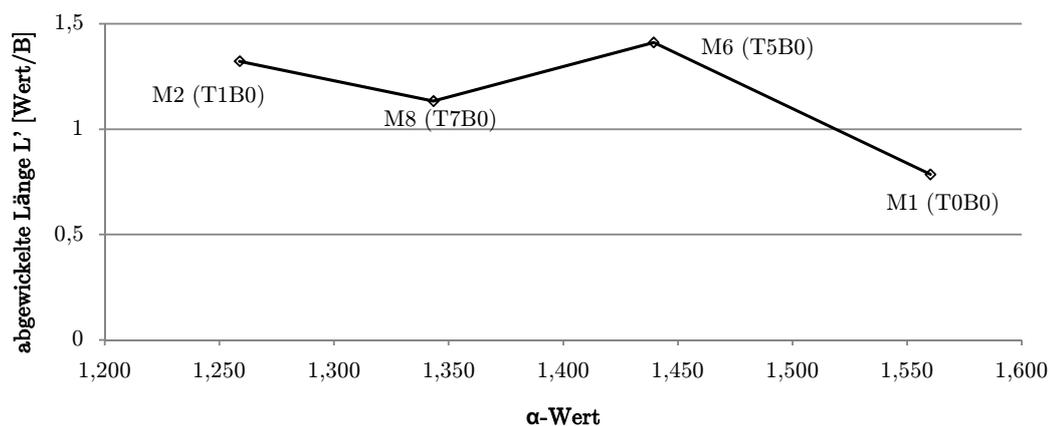


Abbildung 4.6.: Zusammenhang zwischen der abgewickelten Länge L' und dem α -Wert

Dadurch dass bei allen drei genannten Versuchen nur der Trennpfeiler verändert wurde, muss ein anderer Parameter bzw. eine andere Form ausschlaggebend sein. Wie man allerdings aus der Abbildung 4.7 erkennen kann, ist für keinen Parameter ein linearer Zusammenhang zum α -Wert vorhanden.

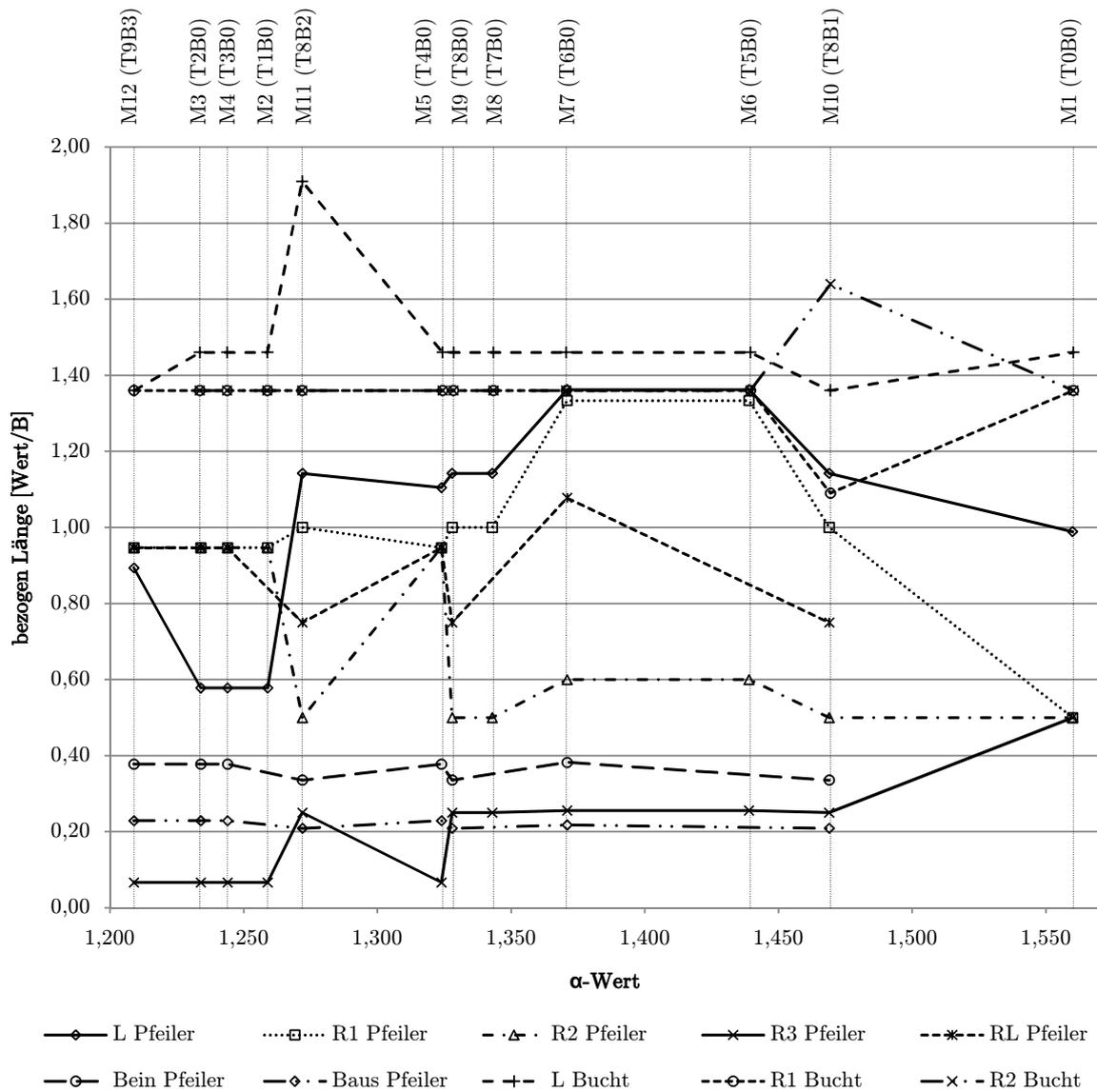


Abbildung 4.7.: Zusammenhang zwischen den Parametern und dem α -Wert beim KW Mettlach

4.3.2. KW Serrig

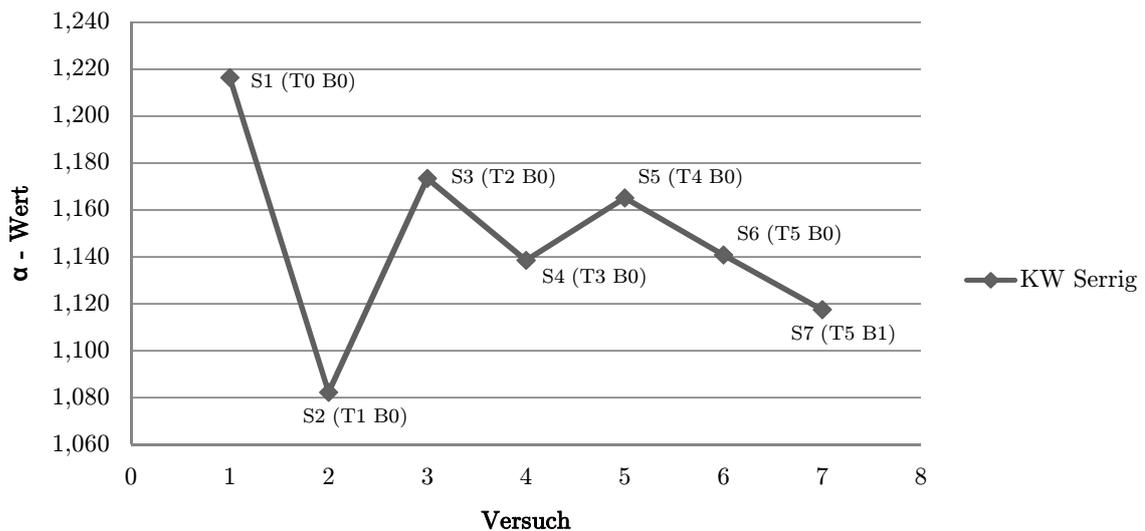
Die Staustufe Serrig besteht wie die Staustufe Mettlach aus einem dreifeldrigen Wehr, zwei Schiffahrtsschleusen und einem Kraftwerk mit 2 Turbineneinläufen. Das Kraftwerk hat dabei eine lichte Breite von 14 m, wobei die Turbineneinläufe jeweils 6 m einnehmen und die Trennwand 2 m breit ist. Der Trennpfeiler hat wiederum eine Breite von 4,5 m. Der Ausbaudurchfluss beträgt auch in diesem Fall $Q_a = 60 \text{ m}^3/\text{s}$. Die Untersuchungen wurden nur bei 2-Maschinenbetrieb ohne Beaufschlagung der Wehrfelder durchgeführt.

Die Durchnummerierung beim KW Serrig erfolgt nach der Tabelle 4.4.

KW Serrig			
Versuch Nr.	Anlage Nr.	Trennpfeilerform	OW-Buchtform
S 1	7	T 0	B 0
S 2	8	T 1	B 0
S 3	9	T 2	B 0
S 4	10	T 3	B 0
S 5	11	T 4	B 0
S 6	12	T 5	B 0
S 7	14	T 5	B 1

Tabelle 4.4.: Nummerierung für das KW Serrig

Bei den Versuchen *Nr. S 2* bis *Nr. S 6* wurden die Trennpfeilerformen variiert. Dabei bildeten sich bei den Versuchen *Nr. S 2* bis *Nr. S 5* allerdings Wirbel. Beim Versuch *Nr. S 6* wurde dem Pfeiler eine Leitwand vorgesetzt. Die beste Geschwindigkeitsverteilung wurde im Versuch *Nr. S 7* durch Verringerung der Vorbodenneigung von 1 : 2,5 auf 1 : 3,5 erzielt. Bei der OW-Bucht wurden keine Veränderungen vorgenommen (Lasar und Kemnitz, 1983).

Abbildung 4.8.: Entwicklung des α -Wertes mit der Versuchsgeschichte beim KW Serrig

Auch bei diesem Kraftwerk wird durch den Trennpfeiler mit Leitwand im Versuch *Nr. S 6* das beste Ergebnis erzielt (s. Abbildung 4.8). Zudem ist der Trennpfeiler T 5 aus jenem Versuch auch wieder der kürzeste (s. Tabelle 4.5). Der α -Wert liegt beim Versuch *Nr. S 2* zwar darunter, allerdings trat bei diesem Versuch, wie beschrieben, Wirbelbildung auf. Wie in der Tabelle 4.5 dargestellt ist, ändert sich an der Grundform der Trennpfeiler T 1, T 2, und T 3 nichts. Sie unterscheiden sich nur durch jene Höhe, bis zu der eine Verlängerung des Pfeilers von der Oberkante Richtung Sohle gezogen wird.

Pfeiler	L	B	R ₁	R ₂	R ₃	R _L	B _{ein}	B _{aus}	Bemerkung
T0	1,66	1,00	1,07	1,07	0,07	-	-	-	$R_1 = R_2$
T1	2,33	1,00	1,07	1,07	0,07	-	-	-	$R_1 = R_2$
T2	2,33	1,00	1,07	1,07	0,07	-	-	-	UK verlängerter Pfeiler 8,5 m unter Stauziel
T3	2,33	1,00	1,07	1,07	0,07	-	-	-	$R_1 = R_2$ UK verlängerter Pfeiler 4,0 m unter Stauziel
T4	1,53	1,00	1,33	1,33	0,07	-	-	-	$R_1 = R_2$
T5	1,53	1,00	1,33	1,33	0,07	1,33	0,29	0,14	$R_1 = R_2$ UK verlängerter Pfeiler 1,0 m unter Stauziel

Tabelle 4.5.: Parameter der Trennpfeiler beim KW Serrig

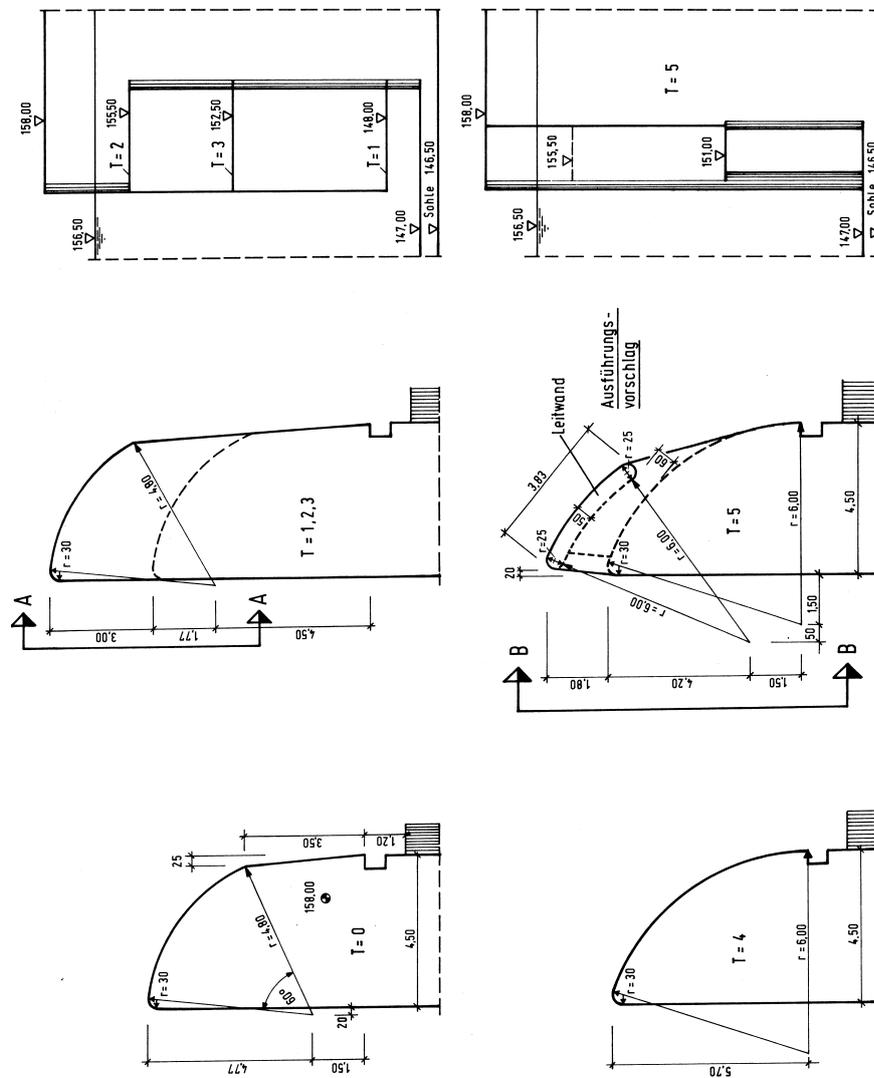


Abbildung 4.9.: Trennpfeiler beim KW Serrig (Lasar und Kemnitz, 1983)

Beim KW-Serrig wurde die ursprüngliche Buchtengrundform beibehalten, und keine weiteren Buchtfor-

men wurden untersucht (s. Abbildung 4.19). Von B0 auf B1 wurde nur die Vorbodenneigung geändert, und damit der α -Wert von 1,141 auf 1,118 verbessert.

Bucht	L	T _B	B _K	B _P	W	R ₁	W ₁	R ₂	W ₂	Bemerkung
B0	1,48	1,32	1,00	0,32	64,00	-	-	1,25	64,00	Vorbodenneigung 1 : 2,5
B1	1,48	1,32	1,00	0,32	64,00	-	-	1,25	64,00	Vorbodenneigung 1 : 3,5

Tabelle 4.6.: Parameter der OW-Bucht beim KW Serrig

Wie beim Kraftwerk Mettlach, zeigt sich durch die Auftragung der ausgewerteten Längen der einzelnen Parameter (s. Tab 4.5) in Abhängigkeit vom α -Wert, keine lineare Beziehung (s. Abbildung 4.10). Im vorliegenden Fall wurden nur die Parameter der Trennpfeiler verwendet, da sich bei den zwei verwendeten Buchten im Grundriss, und somit an den untersuchten Parametern, nichts ändert (s. Tabelle 4.6). An der Länge des Trennpfeilers ist zum Beispiel zu erkennen, dass diese variiert und kein direkter Bezug zur Verschlechterung des α -Wertes festzustellen ist. Dasselbe gilt für die Trennpfeiler T1, T2 und T3 im Bezug auf die Verlängerung des Pfeilers. Bei diesen drei Trennpfeilern war die Verlängerung die einzige Veränderung, wobei die Trennpfeiler T1 und T3 mit der Verlängerung über die größte bzw. kleinste Höhe den besseren α -Wert haben als der Trennpfeiler T2, dessen Verlängerung höhenmäßig zwischen den beiden anderen Trennpfeilern liegt.

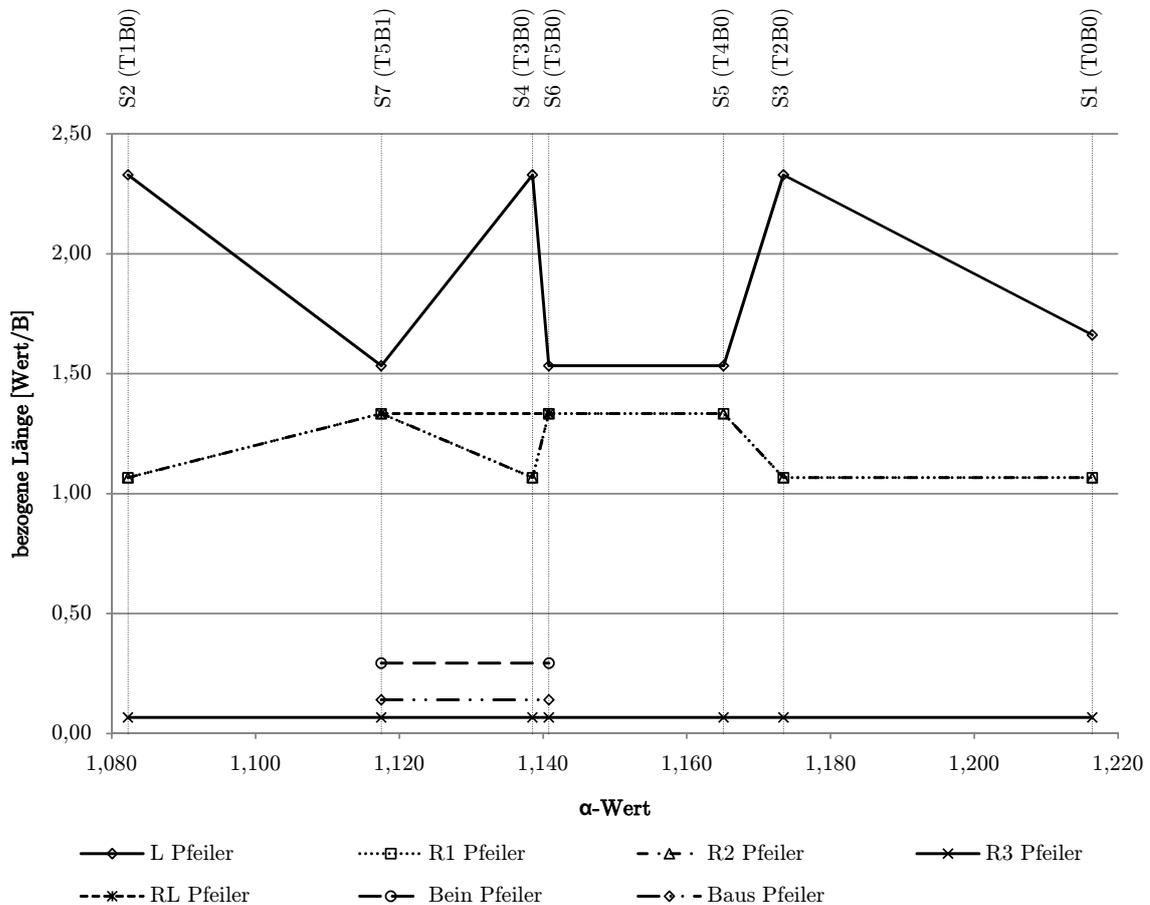


Abbildung 4.10.: Zusammenhang zwischen den Parametern und dem α -Wert beim KW Serrig

4.3.3. KW Lisdorf

Im Gegensatz zu den Staustufen Mettlach und Serrig besitzt das Kraftwerk der Staustufe Lisdorf nur eine Turbine. Neben dem Kraftwerk setzt sich die Staustufe Lisdorf noch aus einem dreifeldrigen Wehr und einer Schifffahrtsschleusen zusammen. Das Kraftwerk hat eine lichte Breite von $5,80\text{ m}$. Die Trennpfeilerbreite beträgt $5,30\text{ m}$. Der Ausbaudurchfluss beträgt $Q_a = 40\text{ m}^3/\text{s}$. Die Untersuchungen wurden alle nur bei reinem Turbinenbetrieb durchgeführt.

Beim KW Lisdorf erfolgt die Nummerierung der Versuche folgendermaßen (s. Tabelle 4.7):

KW Lisdorf			
Versuch Nr.	Anlage Nr.	Trennpfeilerform	OW-Buchtform
L 1	9	T 0	B 0
L 2	10	T 0	B 1
L 3	11	T 0	B 2
L 4	12	T 1	B 2
L 5	13	T 2	B 2
L 6	14	T 3	B 2
L 7	15	T 4	B 2

Tabelle 4.7.: Nummerierung für das KW Lisdorf

In den Versuchen *Nr. L 2* und *Nr. L 3* wurde die Oberwasserbucht verändert. Diese Änderungen brachten aber keine wirkliche Verbesserung der Geschwindigkeitsverteilungen. Verbesserungen wurden erst in den weiteren Versuchen durch die Variierung der Trennpfeilerform erreicht, wobei bei den Versuchen *Nr. L 6* und *Nr. L 7* durch das Vorsetzen einer Leitwand die Ergebnisse am Besten waren (Lasar und Kemnitz, 1984).

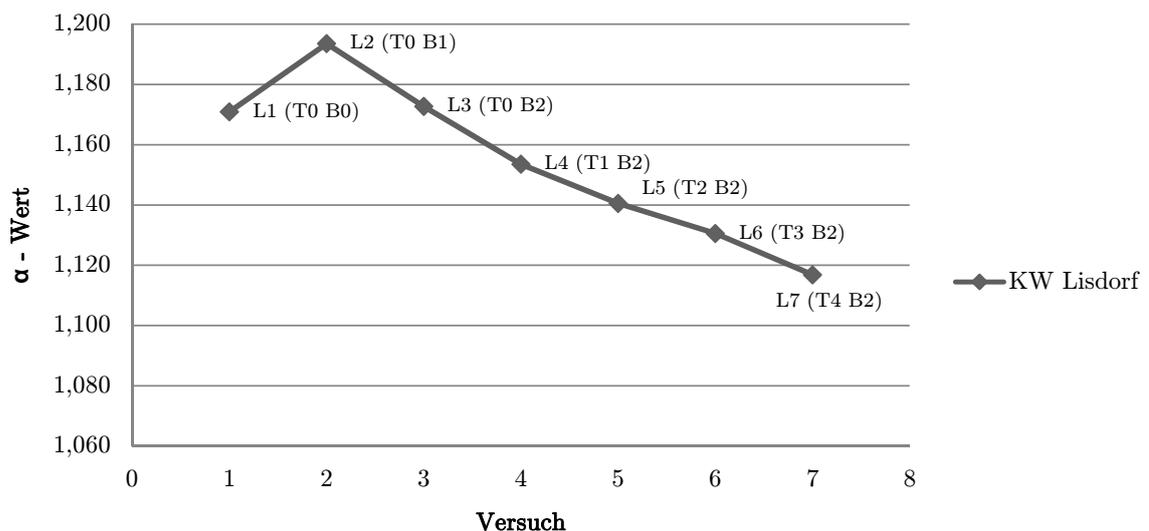


Abbildung 4.11.: Entwicklung des α -Wertes mit der Versuchsgeschichte beim KW Lisdorf

Aus der Abbildung 4.11 kann man erkennen, dass durch die Veränderung der OW-Bucht, der α -Wert nicht verbessert wurde. Wiederum ergaben die Trennpfeiler mit der vorgesetzten Leitwand die besten α -Werte.

Dabei unterscheiden sich die Pfeiler T 3 und T 4 vom Pfeiler T 2 nur durch die Betonabdeckung zwischen Trennpfeiler und Leitwand (s. Abbildung 4.12). Über diese wurde eine Verbesserung des α -Wertes erzielt. Der wehrseitige Radius (R_3) der Pfeiler T 1 bis T 4 ist im Gegensatz zum kraftwerkseitigen Radius (R_1) sehr klein (s. Abbildung 4.8).

Pfeiler	L	B	R_1	R_2	R_3	R_L	B_{ein}	B_{aus}	Bemerkung
T 0	1,10	1,00	0,94	0,57	0,32	-	-	-	
T 1	1,21	1,00	0,94	0,94	0,06	-	-	-	$R_1 = R_2$
T 2	1,21	1,00	0,94	0,94	0,06	0,79	0,46	0,17	$R_1 = R_2$
T 3	1,21	1,00	0,94	0,94	0,06	0,79	0,46	0,17	$R_1 = R_2$
									UK Betonabdeckung 1,0 m unter Stauziel
T 4	1,21	1,00	0,94	0,94	0,06	0,79	0,46	0,17	$R_1 = R_2$
									UK Betonabdeckung 0,5 m unter Stauziel

Tabelle 4.8.: Parameter der Trennpfeiler beim KW Lisdorf

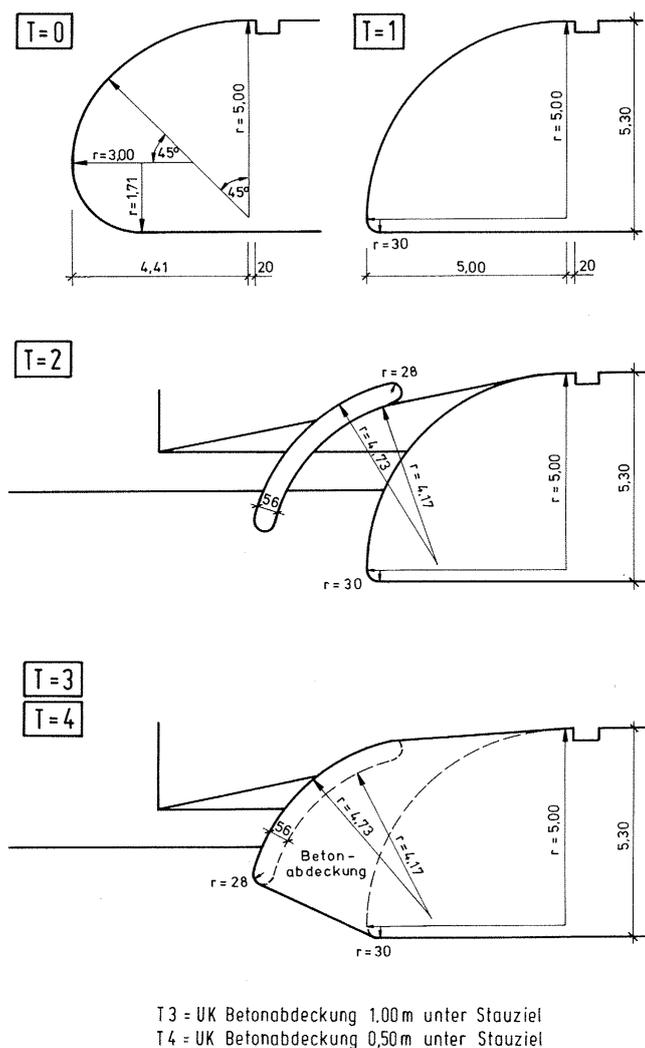


Abbildung 4.12.: Trennpfeiler beim KW Lisdorf (Lasar und Kemnitz, 1984)

Bei den Buchtenformen, die am KW Lisdorf angewandt wurden, handelt es sich um sehr spezielle Formen, die ein einfaches Parametrisieren sehr erschweren. Sie wurden aus diesem Grund nicht ausgewertet.

Durch die Auftragung der ausgewerteten Längen aus der Tabelle 4.8 in Abhängigkeit vom α -Wert ist auch beim KW Lisdorf kein linearer Bezug festzustellen (s. Abbildung 4.13). Die Trennpfeiler T 2, T 3 und T 4 weisen bei allen Parametern dieselben ausgewerteten Längen auf. Der α -Wert verschlechtert sich aber in Abhängigkeit vom Trennpfeiler. Wie schon erwähnt, unterscheiden sich die Trennpfeiler nur durch die Betonabdeckung zur Leitwand hin, wobei eine geringere Tauchwandtiefe etwas bessere Ergebnisse bringt. Zusätzlich ist von Interesse, dass im Gegensatz zum KW Mettlach, bei den Trennpfeilern T 0 und T 1 der Erkenntnis von Godde (1994) bezüglich dem Verhältnis der abgewickelten Länge zum α -Wert zutrifft. Bereits visuell ist erkennbar, dass bei T 1 durch eine größere abgewickelte Länge ein besserer α -Wert entsteht.

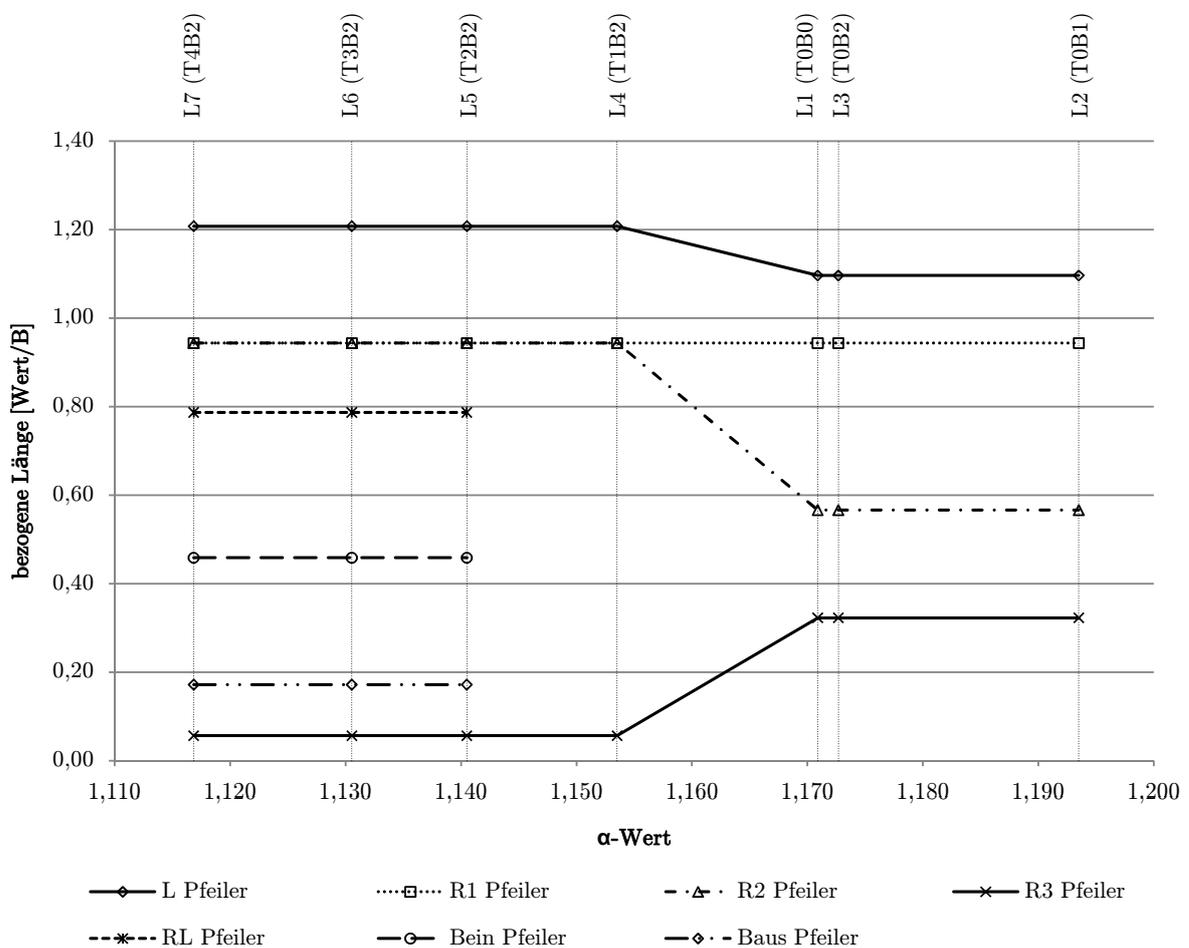


Abbildung 4.13.: Zusammenhang zwischen den Parametern und dem α -Wert beim KW Lisdorf

4.4. Vergleiche und Erkenntnisse

Bei allen drei Kraftwerken ist zu erkennen, dass der α -Wert mit den Einschätzungen der BAW über die Qualität der Kraftwerksanströmung übereinstimmt. Die Ausführungsvariante ergibt in jedem Fall den besten α -Wert. Zudem ist die Entwicklung dieses Wertes mit der Versuchsgeschichte nachvollziehbar. Eine Ausnahme bildet beim KW Serrig der Versuch Nr. S 2. Bei diesem Versuch wurde laut Lasar und Kemnitz

(1983) die Geschwindigkeitsverteilung durch Änderung des Trennpfeilers erheblich verbessert, nicht jedoch die Wirbelbildung. In Bezug auf die Parametrisierung der einzelnen Trennpfeiler und Buchten, kann innerhalb der jeweiligen Modellberichte kein Einfluss von einzelnen Parametern auf den α -Wert festgestellt werden. Daher folgt der Vergleich zwischen den Modellberichten.

4.4.1. Vergleich aller Versuche aus den drei Modellberichten

In der Tabelle 4.9 sind alle Versuche, die zur Analyse der drei Kraftwerke herangezogen wurden aufgelistet. Als Vergleichskriterium wird für alle Versuche der α -Wert angegeben. Gereiht sind die Versuche nach der Größe des α -Wertes.

Nr.	Versuch Nr.	α -Wert
1	M 1	1,560
2	M 10	1,469
3	M 6	1,439
4	M 7	1,371
5	M 8	1,343
6	M 9	1,328
7	M 5	1,324
8	M 11	1,272
9	M 2	1,259
10	M 4	1,244
11	M 3	1,234
12	S 1	1,216
13	M 12	1,209
14	L 2	1,194
15	S 3	1,173
16	L 3	1,173
17	L 1	1,171
18	S 5	1,165
19	L 4	1,154
20	S 6	1,141
21	L 5	1,141
22	S 4	1,139
23	L 6	1,131
24	S 7	1,118
25	L 7	1,117
26	S 2	1,082

Tabelle 4.9.: Auflistung aller Versuche

Wie aus der Tabelle 4.9 ersichtlich ist, treten beim KW Mettlach höhere α -Werte auf als bei den Kraftwerken Lisdorf und Serrig. Die Ursache liegt darin, dass die Messung 0,80 m vor der Oberkante des Einlauftrichters erfolgte (s. Abbildung 4.14). Dadurch wurde nicht der ganze Querschnitt des Turbineneinlaufes erfasst, weil der Spalt zwischen der Messebene und der Oberkante des Einlauftrichters mit dem Messflügel nicht erreichbar war. Somit erklärt sich das Geschwindigkeitsgefälle nach oben hin. Die nicht erfassten Abflussmengen würden im oberen Abschnitt zu höheren Geschwindigkeiten führen. (Lasar und Kemnitz, 1978)

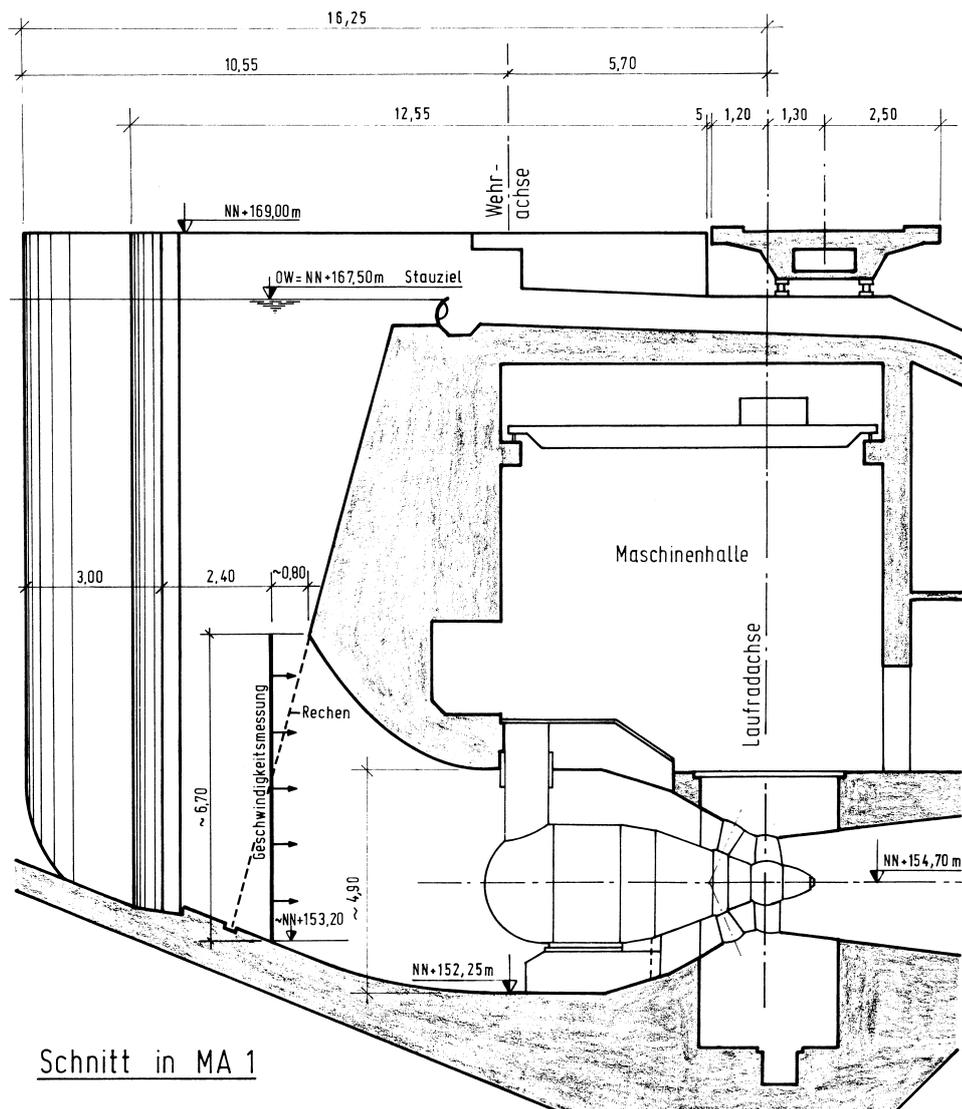


Abbildung 4.14.: Längsschnitt durch das KW Mettlach mit eingezeichneter Messebene (Lasar und Kemnitz, 1978)

Bei den Kraftwerken Serrig und Lisdorf wurden die Geschwindigkeitsmessungen direkt in einer senkrechten Ebene am Beginn der Einlaufhaube durchgeführt (s. Abbildung 4.15). Es konnte daher die gesamte Abflussmenge erfasst werden.

Um Modellversuche miteinander quantitativ vergleichbarer zu machen, sollten die Geschwindigkeitsmessungen immer an derselben Position erfolgen.

Dieser Erkenntnis folgend, können die verschiedenen Buchten und Trennpfeiler außerhalb des jeweiligen Modellversuchs, nur über die Parameter, nicht aber in Bezug auf den α -Wert verglichen werden.

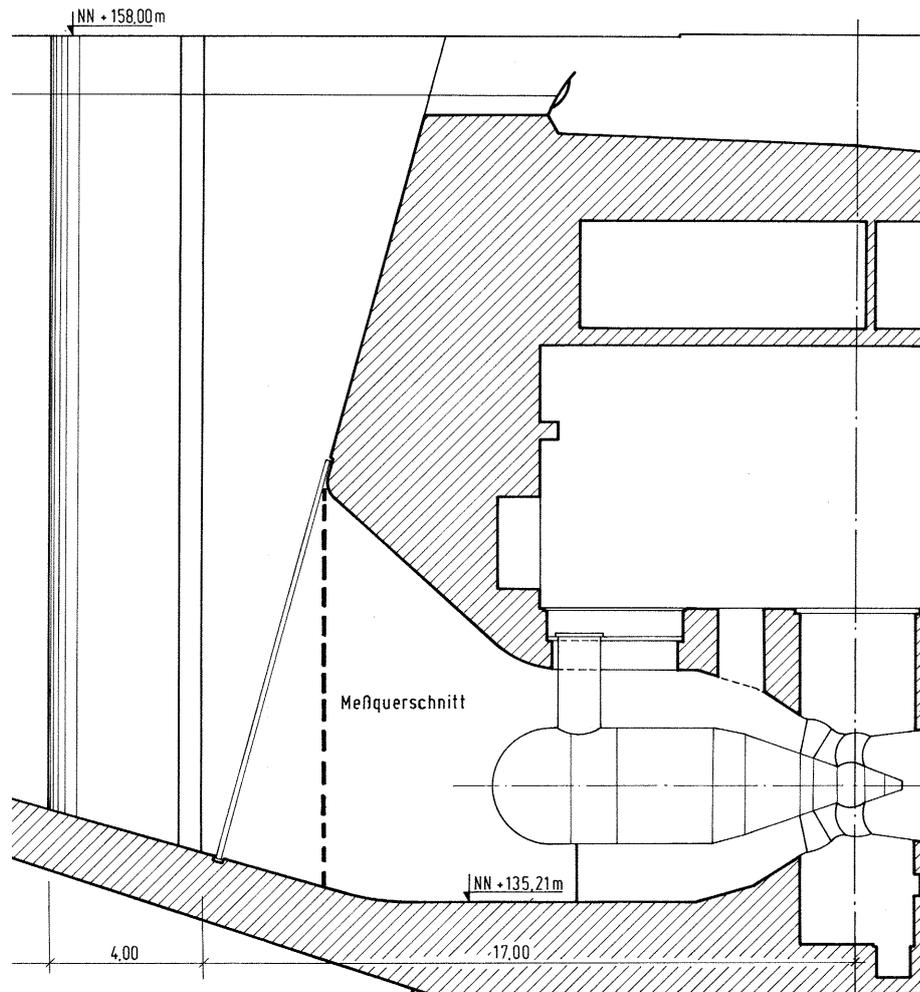


Abbildung 4.15.: Längsschnitt durch das KW Serrig mit eingezeichneter Messebene (Lasar und Kemnitz, 1983)

4.4.2. Vergleich der Trennpfeiler

In der Tabelle 4.10 sind verschiedene Trennpfeiler aus jedem der drei Modellberichte auf eine Pfeilerbreite von 1 skaliert und aufgelistet. Aus jedem Modellbericht wurden jene Trennpfeiler ausgewählt, die die besten Geschwindigkeitsverteilungen im Turbineneinlauf aufweisen.

Versuch Nr.	L	B	R ₁	R ₂	R ₃	R _L	B _{ein}	B _{aus}	Bemerkung
M3 (T2 B0)	0,58	1,00	0,95	0,95	0,07	0,95	0,38	0,23	R ₁ = R ₂
M11 (T8 B2)	1,14	1,00	1,00	0,50	0,25	0,75	0,34	0,21	
M12 (T9 B3)	0,89	1,00	0,95	0,95	0,07	0,95	0,38	0,23	R ₁ = R ₂
S2 (T1 B0)	2,33	1,00	1,07	1,07	0,07	-	-	-	R ₁ = R ₂
S7 (T5 B1)	1,53	1,00	1,33	1,33	0,07	1,33	0,29	0,14	R ₁ = R ₂
L7 (T4 B2)	1,21	1,00	0,94	0,94	0,06	0,79	0,46	0,17	R ₁ = R ₂

Tabelle 4.10.: Vergleich der ausgewählten Trennpfeiler

Die besten Trennpfeiler aus jedem Modellbericht sind in Abbildung 4.16 dargestellt. Die dargestellte Pfeilerlänge geht bei den drei Pfeilern vom Rechenfusspunkt aus.

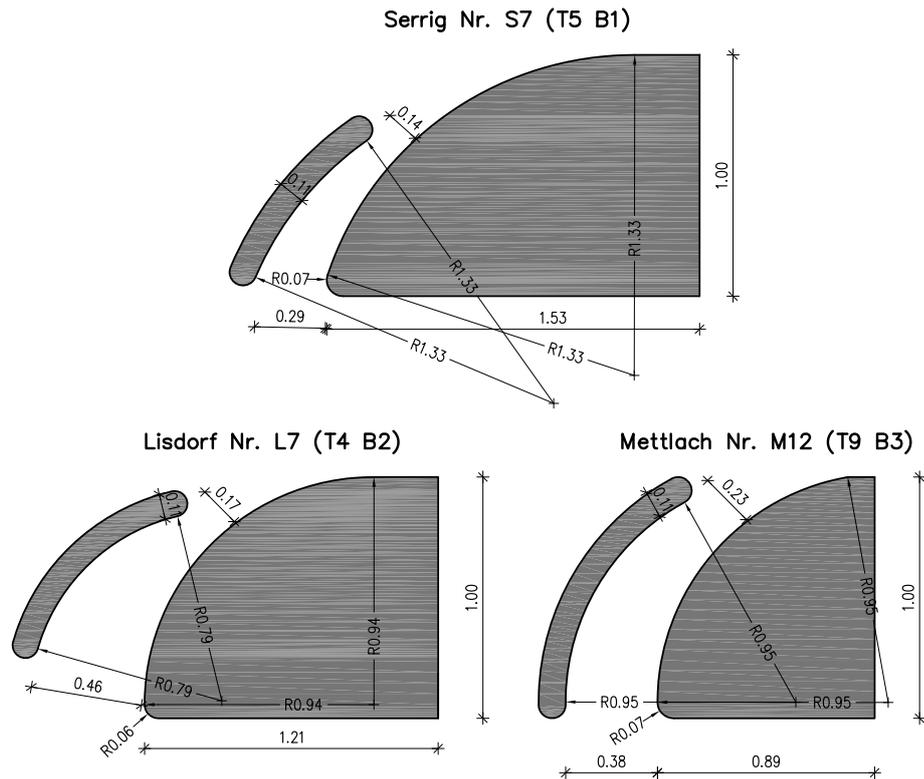


Abbildung 4.16.: Ausgewählte Pfeiler aus den drei Modellberichten

Die Trennpfeilerkurve setzt sich bei allen Pfeilern aus zwei Kreissegmenten zusammen. Zudem ist allen Pfeilern mit Ausnahme des Trennpfeilers in Versuch *Nr. S2* eine Leitwand vorgesetzt.

Der Abstand zwischen Leitwand und Trennpfeiler wird in Fließrichtung kleiner. Somit wird die Strömung beschleunigt. Das Verhältnis zwischen Eintrittsbreite und Austrittsbreite ist bei den drei Trennpfeilern aus Abbildung 4.16, wie in Tabelle 4.11 dargestellt, größer als 1.

Versuch Nr.	Eintrittsbreite	Austrittsbreite	Verhältnis
M 12 (T9)	0,38	0,23	1,66
S 7 (T5)	0,29	0,14	2,11
L 7 (T4)	0,46	0,17	2,67

Tabelle 4.11.: Verhältnis von Eintrittsbreite zu Austrittsbreite

Trägt man alle Parameter aus der Tabelle 4.10 in einem Diagramm auf, so kann man erkennen, dass die Charakteristik der sich ergebenden Kurven bei allen Trennpfeilern ähnlich ist. Trotzdem unterscheiden sich die einzelnen Trennpfeiler. Der Parameter L (Länge des Trennpfeilers) ist bei allen Pfeilern unterschiedlich. Auch die Radien der Pfeiler sind nicht ident.

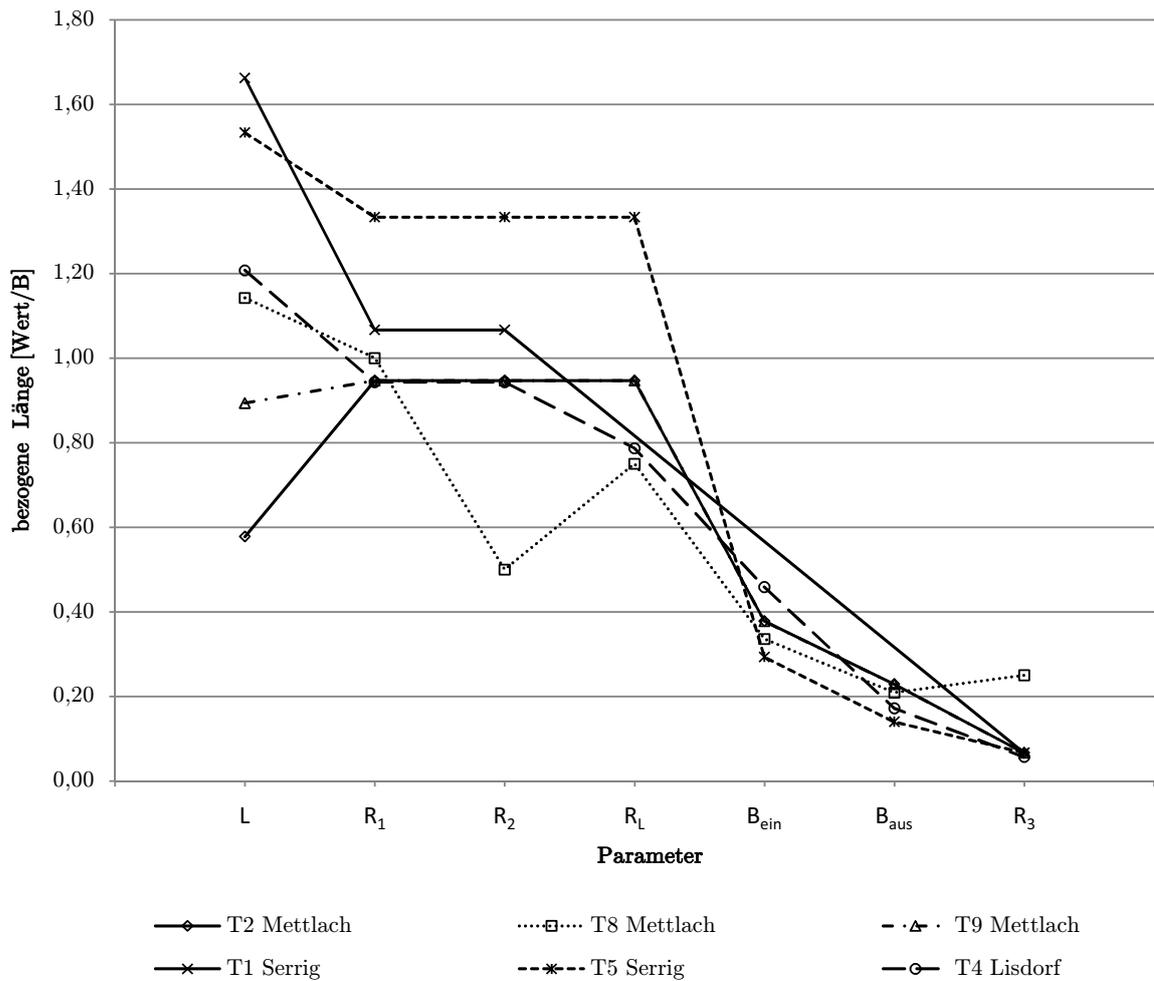


Abbildung 4.17.: Zusammenhang zwischen den Parametern und dem α -Wert bei den ausgewählten Trennpfeilern

Wenn man die drei Trennpfeiler, wie in Abbildung 4.18 dargestellt, übereinanderlegt, erkennt man, dass sie alle eine andere Länge bzw. Form aufweisen. Somit kann gesagt werden, dass auch über den direkten Vergleich der Formen der Trennpfeiler keine Gleichmäßigkeit bezüglich der Qualität der Turbinenanstromung hergestellt werden kann.

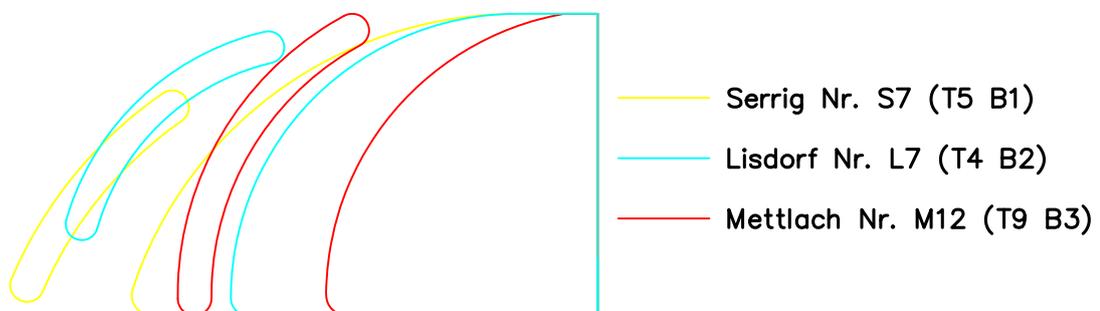


Abbildung 4.18.: Ausgewählte Pfeiler aus den drei Modellberichten übereinandergelegt

4.4.3. Vergleich der OW-Buchten

Nachfolgend werden jeweils eine Bucht aus dem KW Mettlach und eine aus dem KW Serrig gegenübergestellt. Aus dem Modellbericht vom KW Mettlach wurde die Bucht aus Versuch *Nr. M 12* ausgewählt. Der Versuch, in dem diese Buchtform verwendet wird hat mit 1,209 bei diesem Kraftwerk den besten α -Wert. Beim KW Serrig wurde die Urform der Bucht in allen Versuchen beibehalten.

Um die Buchten vergleichen zu können wurde die Breite der Bucht im Verhältnis zur Krafthausbreite (ohne Trennpfeilerbreite) skaliert. Bei den in Abbildung 4.19 dargestellten Buchten wurde, in Bezug auf die Länge, vom Rechenfusspunkt ausgegangen.

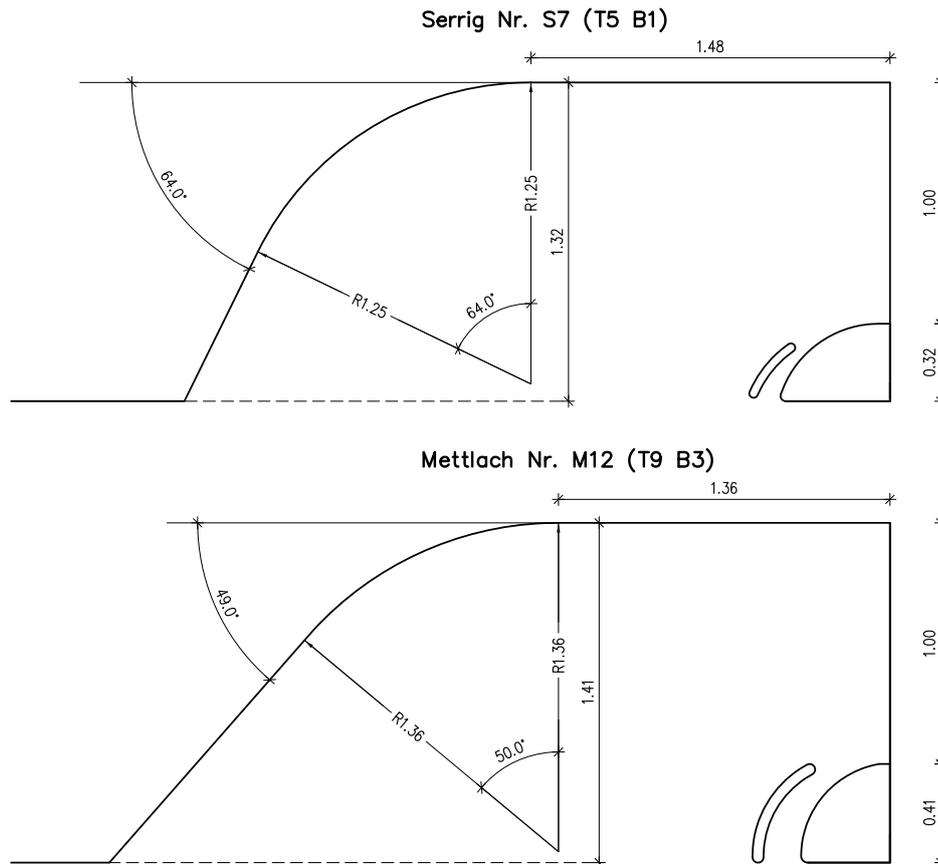


Abbildung 4.19.: Ausgewählte Buchten aus den Modellberichten

Bei beiden Kraftwerken, Serrig und Mettlach, liegt die wehrseitige Wand des Trennpfeilers in der Verlängerung der ursprünglichen Uferlinie (s. Abbildung 4.19).

Der Buchtenwinkel ist bei beiden Kraftwerken größer als 45° (s. Tabelle 4.12) und somit sehr steil im Gegensatz zu den Empfehlungen von Wittmann und Gabrecht (1954) und Mosonyi (1966). Bei keiner der beiden Buchten ist der Buchtbeginn ausgerundet.

Versuch	L	T _B	B _K	B _P	W	R ₁	W ₁	R ₂	W ₂
S 7 (B1)	1,48	1,32	1,00	0,32	64,00	-	-	1,25	64,00
M 12 (B3)	1,36	1,41	1	0,41	49	-	-	1,36	50

Tabelle 4.12.: Vergleich der OW-Buchten

4.4.4. Erkenntnisse

Nachfolgend werden kurz die wesentlichen Erkenntnisse aus der Analyse der drei Kraftwerke zusammengefasst:

- aufgrund der vielen verschiedenen Geometrien ist ein Parametrisieren sehr schwierig
- die Bucht wird seltener variiert als der Trennpfeiler und konnte nur beim KW Mettlach parametrisiert werden
- die drei Modellversuche sind aufgrund der verschiedenen Messebenen im Bezug auf den α -Wert nicht vergleichbar
- bei keinem ausgewerteten Parameter ist eine Linearität zum α -Wert festzustellen
- Trennpfeiler mit Leitwand verbessert immer die Anströmung bei reinem Turbinenbetrieb
- bei den besten Trennpfeilern mit Leitwand verengt sich der Raum zwischen Leitwand und Trennpfeiler in Strömungsrichtung
- das lineare angenommene Verhältnis von abgewinkelte Länge des Trennpfeilers zum α -Wert laut Godde (1994) kann bei den Trennpfeilern vom KW Mettlach nicht nachvollzogen werden (Trennpfeiler T 5 aus Versuch Nr. M 6 reißt aus), beim Kraftwerk Lisdorf hingegen gilt die angenommene Regel
- der Buchtenwinkel ist bei allen drei Kraftwerken mit über 45° sehr steil und übersteigt somit den aus der Literatur (s. Kapitel 3.1 empfohlenen Richtwert von maximal 30°

5. Hydraulischer Modellversuch

Der hydraulische Modellversuch wurde im Zuge eines Forschungsprojektes durchgeführt. Dabei wurden die Anströmverhältnisse zum Kraftwerk hin bei verschiedenen Geometrien (Trennpfeiler, Vorboden, etc.) und Betriebszuständen untersucht. Der Zulauf zum Krafthaus wurde gerade, als Bucht oder konkav ausgebildet. In dieser Arbeit ist das Buchtenkraftwerk Ziel der Untersuchungen. Das Kraftwerk wurde als vereinfachtes Modell dargestellt. Es besteht aus einem Krafthaus mit zwei Turbinen und einer Wehranlage mit drei Wehrfeldern (s. Abbildung 5.1).



Abbildung 5.1.: Kraftwerk von OW gesehen

Neben den verschiedenen Betriebszuständen wurden anhand des Modellversuchs vor allem die Einflüsse der Buchtenform, des Trennpfeilers und des Vorbodens auf die Turbinenanstömung analysiert. Die Darstellung der Anströmungsverhältnisse erfolgte mit Hilfe von Geschwindigkeitsmessungen im Oberwasserbereich, vor der Rechenebenen und im Turbineneinlauf. Die Messungen wurden bei verschiedenen Versuchsvarianten durchgeführt. Bei diesen Varianten wurden Änderungen an den oben erwähnten Geometrien vorgenommen und mit unterschiedlichen Betriebsführungsverhältnissen kombiniert.

5.1. Modellaufbau

Die Untersuchungen wurden an einem Vollmodell in der Flussbaurinne des Wasserbaulabors der TU Wien in den Aspanggründen durchgeführt. Aufgrund der Abmessungen der Flussbaurinne (lichte Länge 17 m, lichte Breite 1,7 m und lichte Höhe 0,5 m) wurde das Modell in etwa in einem Maßstab von 1 : 40 bis 1 : 60 eingebaut. Die Wasserversorgung erfolgte über den Kreislaufbetrieb des Labors.

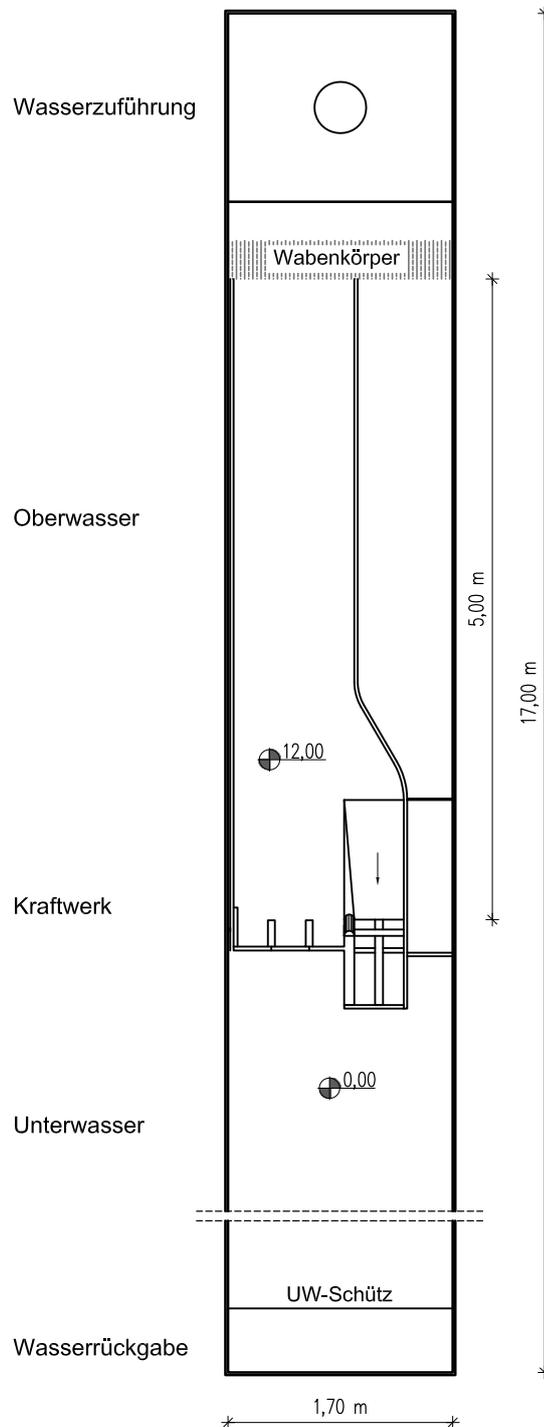


Abbildung 5.2.: Skizze des Modellstandes

Das Modell bestand grundsätzlich aus einem Oberwasserbereich und dem Kraftwerksbereich. Der Bereich der Wasserzuführung wurde mit dem Oberwasserbereich durch ein Wabennetz getrennt, um die Anströmung zu beruhigen bzw. zu vergleichmäßigen. Der Oberwasserbereich erstreckte sich über 5 m bis zum Kraftwerksfusspunkt (s. Abbildung 5.2).

In Abhängigkeit von der Versuchsvariante wurden am Kraftwerk die Bucht, der Vorboden und der Trennpfeiler verändert.

5.1.1. Bucht und Vorboden

Im Rahmen der Versuchsvarianten wurden am Vorboden zwei verschiedene Neigungen untersucht. Die Geometrie der Bucht wurde nach der Empfehlung von Wittmann und Gabrecht (1954) ausgebildet. Die Buchtform änderte sich im Grundriss bei den Varianten nicht. Lediglich der Abstand der Bucht vom Kraftwerk änderte sich in Abhängigkeit von der Vorbodenneigung. Es wurde ein flacher und ein steiler Vorboden festgelegt:

- Der flache Vorboden hatte eine Längsneigung von 1 : 10. Die Bucht endete in einem Abstand von 93,4 cm vor dem Krafthausfusspunkt und hatte einen Öffnungswinkel von 30° (s. Abbildung 5.3). Der seitliche Vorboden war im Verhältnis 1 : 0,8 geneigt. Lediglich bei einer Versuchsvariante mit dem flachen Vorboden wurde der seitliche Vorboden als vertikale Stufe ausgebildet.

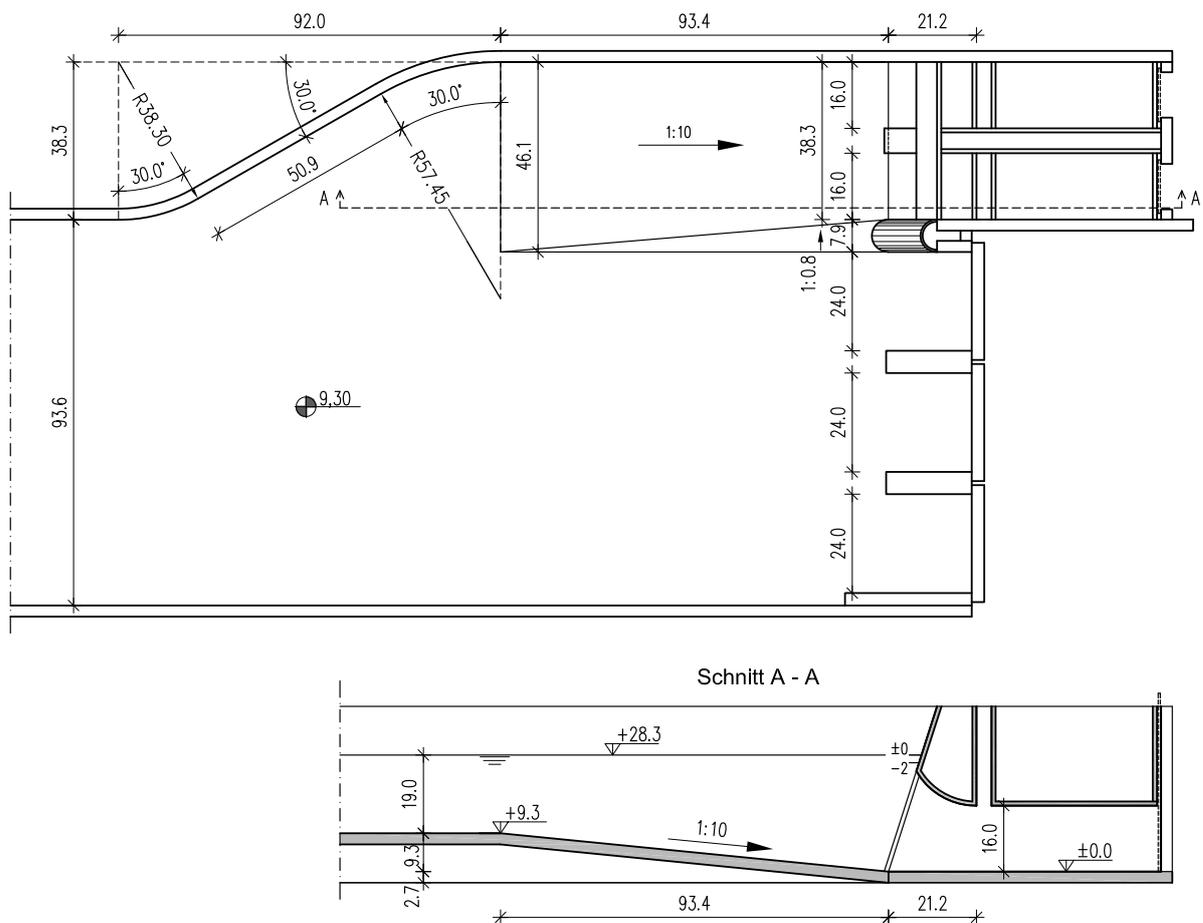


Abbildung 5.3.: Modellstand mit flachem Vorboden

- Bei den Varianten mit dem steilen Vorboden war dieser im Verhältnis 1 : 2,5 geneigt. Der seitliche Vorboden hatte wiederum eine Neigung von 1 : 0,8. Die Buchtform entsprach jener, die auch beim flachen Vorboden verwendet wurde. Das Ende der Bucht wurde aber flussabwärts an den Beginn des Vorbodens verschoben (s. Abbildung 5.4).

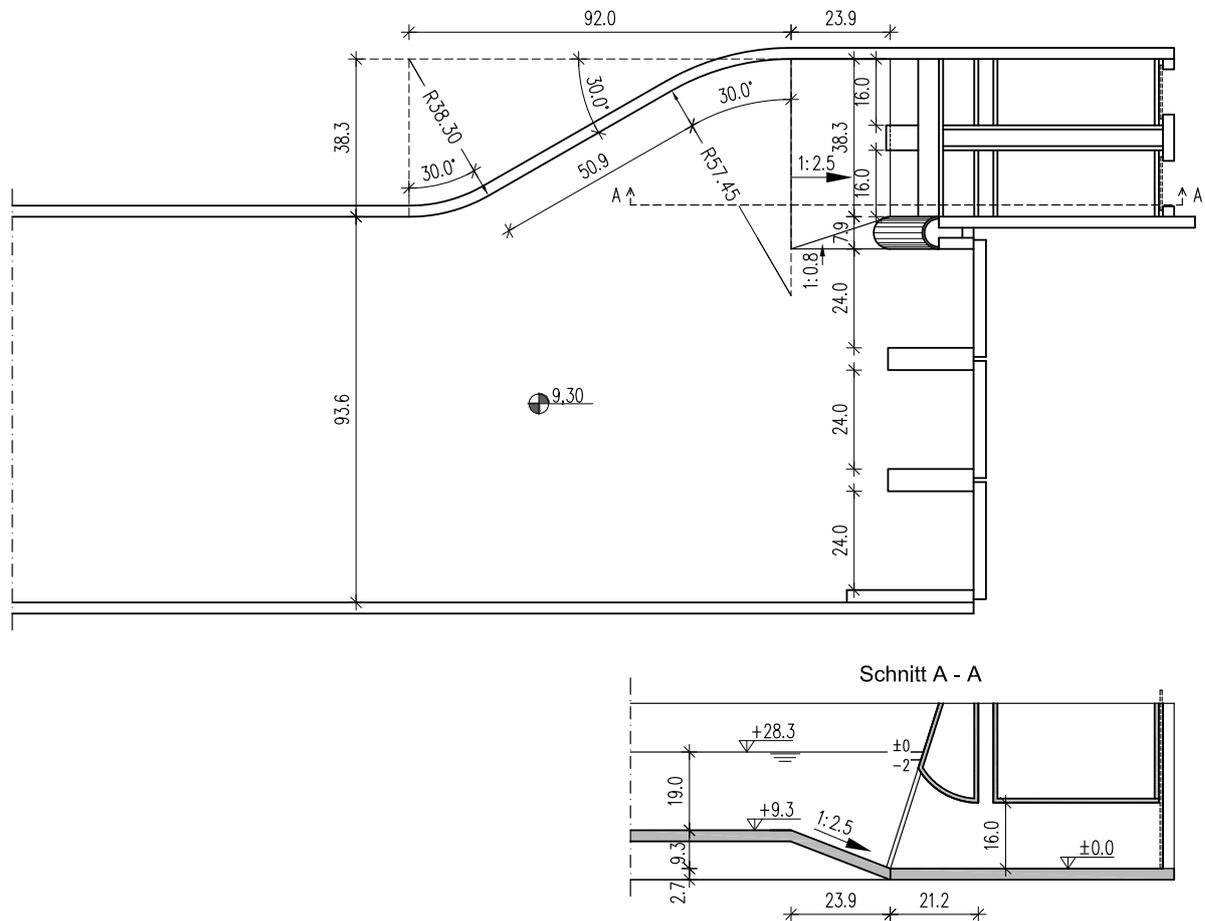


Abbildung 5.4.: Modellstand mit steilem Vorboden

5.1.2. Trennpfeiler

Im Zuge der Versuche wurden zwei Trennpfeilerformen untersucht:

- Halbkreisförmiger Trennpfeiler (s. Abbildung 5.5)
- Trennpfeiler nach Rouvé (s. Abbildung 5.6)

Die Trennpfeiler wurden je nach gemessener Variante in das Modell eingebaut.

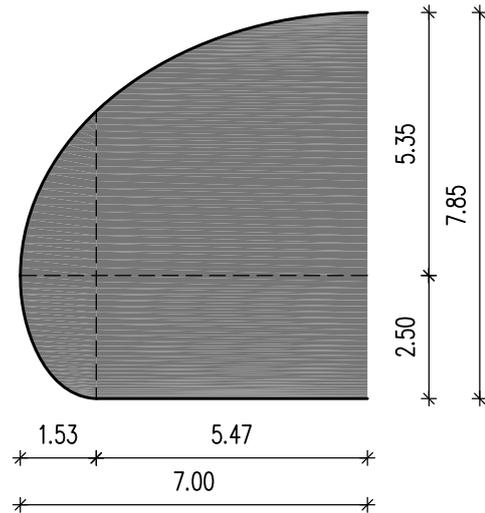
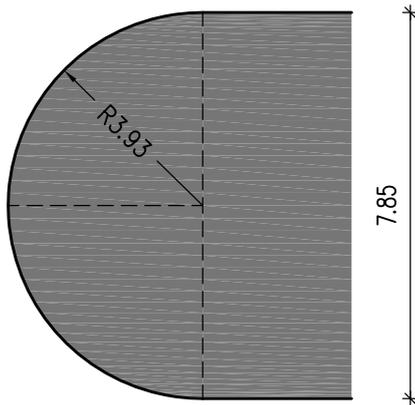


Abbildung 5.5.: Halbkreisförmiger Trennpfeiler [cm]

Abbildung 5.6.: Trennpfeiler nach Rouvé [cm]

5.2. Messeinrichtungen

Während der Versuche wurden für die einzelnen Varianten die folgenden relevanten Parameter aufgezeichnet:

- Durchfluss
- Wasserstand
- Geschwindigkeit

5.2.1. Durchfluss

Die Steuerung des Durchflusses war OW-seitig durch die Laborausstattung gegeben. Die Durchflüsse wurden mittels eines elektrisch betriebenen Schiebers entsprechend der Anzeige des eingebauten induktiv magnetischen Durchflussmessers (IDM) geregelt.

5.2.2. Wasserspiegel

Der Oberwasserspiegel wurde visuell eingestellt. Dabei wurde der Durchfluss an den Turbinen und somit auch der Stauspiegel über eine Lochblende (s. Abbildung 5.7) im Turbinenkanal geregelt. Durch Heben bzw. Senken der Schieberplatte konnte der Durchfluss durch die Lochplatte vergrößert bzw. verkleinert und somit der Stauspiegel abgesenkt bzw. angehoben werden.



Abbildung 5.7.: Lochblender zur Regelung des Turbinendurchflusses

Der Unterwasserspiegel wurde mit Hilfe des Schützes am Ende der Flussbaurinne wiederum visuell eingestellt.

5.2.3. Geschwindigkeit

Die Geschwindigkeitsmessung erfolgte mit Hilfe eines Acoustic Doppler Velocitymeters (ADV) der Firma Nortek. Durch die Verwendung dieses Messgerätes war es möglich, in jedem Messpunkt die Geschwindigkeitskomponenten in x-, y- und z-Richtung zu messen. Das Messgerät wurde mit Hilfe einer Halterung auf dem Messwagen der Flussbaurinne montiert, und konnte händisch bzw. motorbetrieben zu den jeweiligen Messpunkten bewegt werden (s. Abbildung 5.8).

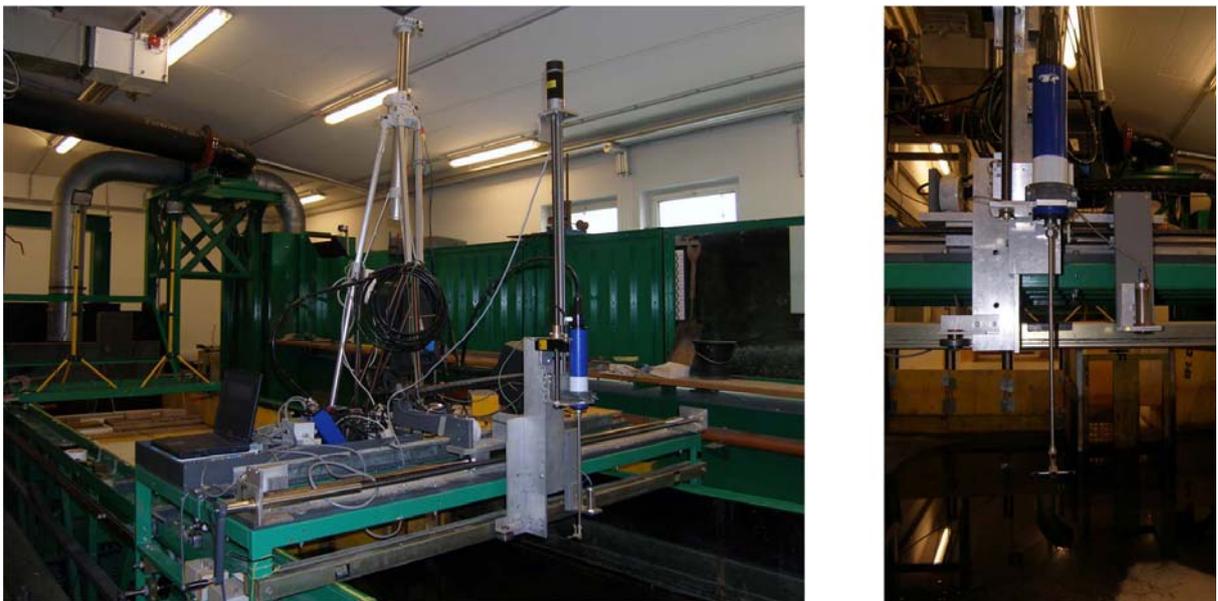


Abbildung 5.8.: ADV-Sonde auf Messwagen

Die ADV-Sonde war über einen Datenverarbeiter und einem A/D-Wandler mit dem Messcomputer verbunden, wo mit Hilfe eines PC-Programms die Daten verarbeitet wurden. Über den A/D-Wandler waren zudem Seilzug- und Lasersensoren mit dem PC verbunden. Über dasselbe PC-Programm konnte die Position der ADV-Sonde in allen drei Koordinatenrichtungen bestimmt werden. Dadurch war es möglich

die ADV-Sonde im Messraster zu bewegen.

Im Bezug auf die Sondenjustierung im Messraster, die Kalibrierung des Messgerätes und die aufgetretenen Probleme während dem Messen wird auf Todorov (2010) verwiesen.

6. Versuchsdurchführung

Im folgenden Kapitel werden die einzelnen Versuchsvarianten mit den zugehörigen Geometrien und Betriebsführungsverhältnissen aufgelistet. Zudem werden die Messraster aufgelistet, nach welchen die Geschwindigkeitsmessungen durchgeführt wurden.

6.1. Versuchsprogramm

Durch die Kombination der untersuchten Geometrien (s. Kap. 5.1) mit den verschiedenen Betriebszuständen ergeben sich 18 Versuchsvarianten, die von B1 bis B44 durchnummeriert sind (s. Abb. 6.1).

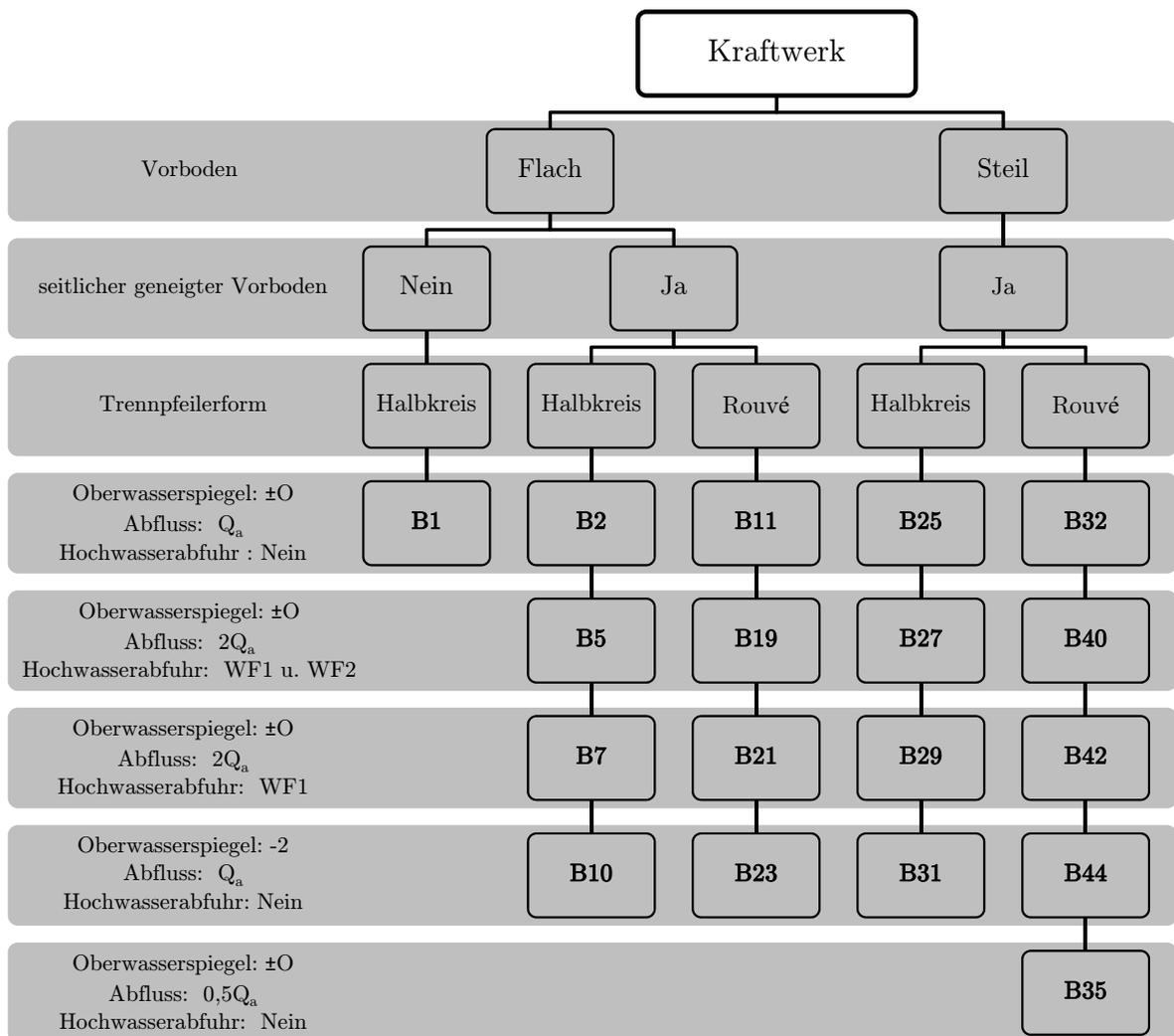


Abbildung 6.1.: Zusammenstellung der untersuchten Varianten

Zunächst lassen sich die Versuchsvarianten nach den veränderten Geometrien am Kraftwerk einteilen. Die Versuchsvarianten gliedern sich in jene mit dem steilen bzw. jenen mit dem flachen Vorboden mit der jeweils zugehörigen Bucht (s. Kap 5.1.1). In Bezug auf den seitlichen Vorboden wurde eine Variante ohne diesen Vorboden gemessen, wobei der Übergang von der Sohle im Wehrfeldbereich zum Turbineneinlauf als vertikale Stufe ausgeführt war.

Weiters teilen sich die Versuchsvarianten bezüglich der Geometrien noch einmal auf in jene Varianten, die mit dem halbkreisförmigen Trennpfeiler gemessen wurden und den Varianten bei denen der Trennpfeiler nach Rouvé untersucht wurde.

In Abhängigkeit von den verschiedenen Geometrien gliederten sich die untersuchten Varianten weiter nach den Oberwasserspiegellagen und den Betriebsführungsverhältnissen.

Es wurden Untersuchungen bei zwei verschiedenen Oberwasserspiegellagen durchgeführt:

- Der Oberwasserspiegel mit der Kote ± 0 entspricht einer Überdeckungshöhe von 4 cm. Der Wasserspiegel liegt dabei 19 cm über der Flusssohle.
- Der Oberwasserspiegel mit der Kote -2 entspricht einer Überdeckungshöhe von 2 cm.

Der Ausbaudurchfluss Q_a betrug 12 l/s.

Bei den entsprechenden Oberwasserspiegellagen und Durchflüssen wurden 3 Betriebszustände untersucht:

- Wehrfelder geschlossen
- Hochwasserabfuhr über die Klappen (überströmen) in den Wehrfeldern 1 und 2
- Hochwasserabfuhr über das Segment (unterströmen) im Wehrfeld 1

Die Messung der Strömungsgeschwindigkeiten wurde bei allen Versuchsvarianten in 3 Bereichen durchgeführt:

- im Oberwasserbereich
- vor der Rechenebene bei der Turbine 2 (wehrfeldseitig) und teilweise bei der Turbine 1
- im Turbineneinlauf der Turbine 2

Die Geschwindigkeitsmessung erfolgte bei allen Versuchen beim 2-Maschinenbetrieb. Dadurch, dass die wehrfeldseitige Turbine (Turbine 2) erfahrungsgemäß größere Probleme bereitet als die landseitige Turbine, wurden die Messbereiche vor der Rechenebene und im Turbineneinlauf auf die Turbine 2 ausgelegt.

6.2. Messbereiche

Die Geschwindigkeitsmessungen der in 6.1 aufgelisteten Bereiche, wurden jeweils punktuell nach bereichsspezifischen Rastern durchgeführt. Diese Raster wurden so festgelegt, dass die Strömung in den relevanten Bereichen der Anlage möglichst gut erfasst werden konnte.

Das dem Messraster zu Grunde gelegte Koordinatensystem wurde folgendermaßen definiert:

- x-Komponente entspricht der Hauptfließrichtung
- y-Komponente ist quer zur Hauptfließrichtung
- z-Komponente entspricht der Höhe, wobei $z = 0$ mit dem Boden des Turbineneinlaufs definiert ist

6.2.1. Oberwasserbereich

Im Oberwasserbereich wurde der Messraster in der Bucht, im Bereich des Vorbodens und entlang des Trennpfeiles verfeinert, um einen genaueren Aufschluss über die dortigen Strömungsverhältnisse zu bekommen. Im restlichen Oberwasser war das Netz gröber gegliedert (s. Abbildung 6.2 u. 6.3).

Die Messung im Oberwasser erfolgte bei allen Versuchsvarianten in einer Höhe von $z = 19,5 \text{ cm}$. Bei den ausgewählten Versuchsvarianten B1, B25 und B32 wurde die Messung zudem in den Höhen $z = 13,5 \text{ cm}$ und $z = 24,5 \text{ cm}$ durchgeführt, um die Strömungsverhältnisse im Oberwasser über die Höhe verteilt zu erfassen.

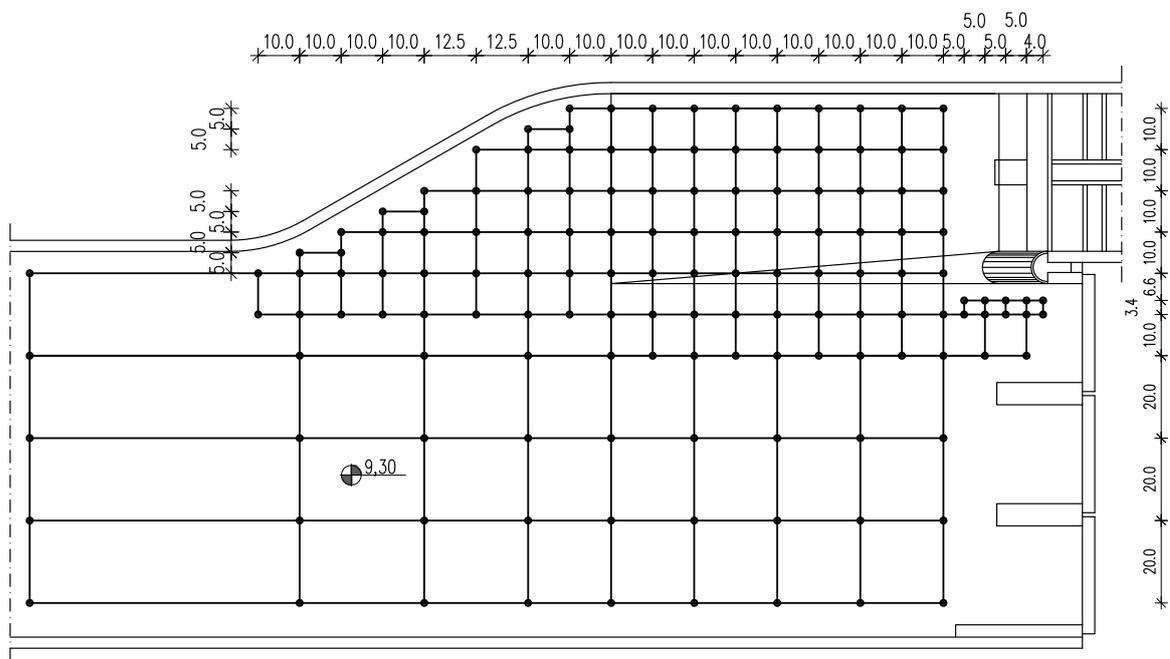


Abbildung 6.2.: Messraster OW bei flachem Vorboden

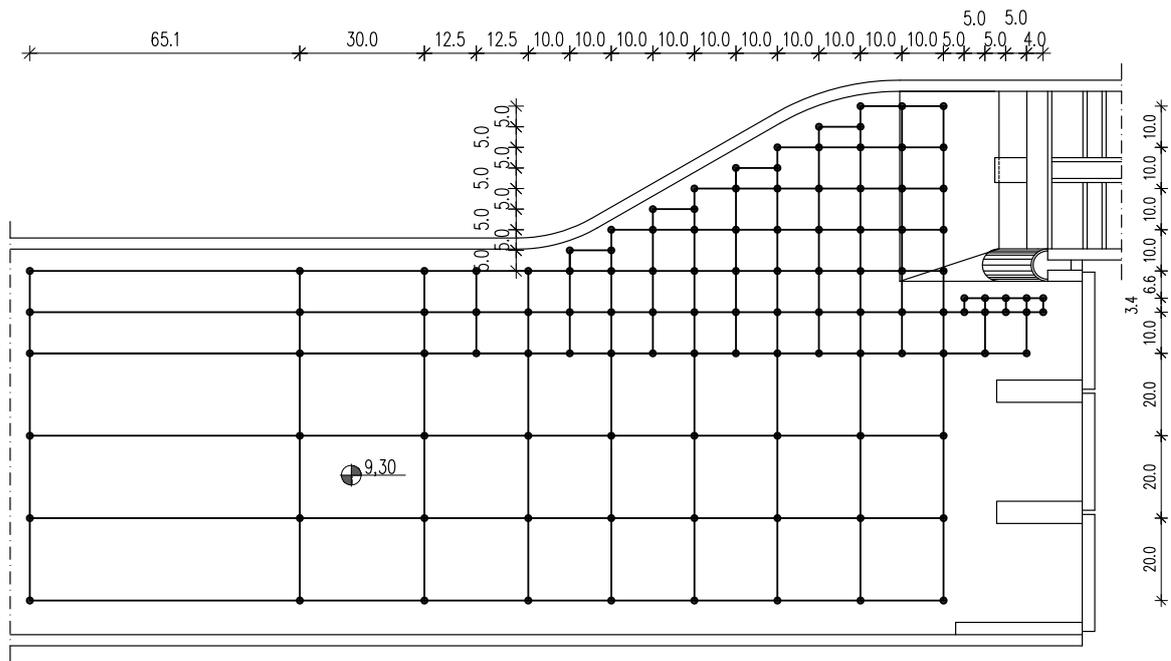


Abbildung 6.3.: Messraster OW bei steilem Vorboden

6.2.2. Rechenebene

Der Messbereich vor der Rechenebene erstreckt sich über den gesamten Einlaufbereich der Turbine 2 und über die Hälfte des Einlaufs der Turbine 1 (s. Abbildung 6.4). Die Messpunkte in dieser Ebene decken sich in y-Richtung mit den Punkten im Turbineneinlauf der Turbine 2, um Strömungsänderungen zwischen beiden Messebenen besser erkennen zu können.

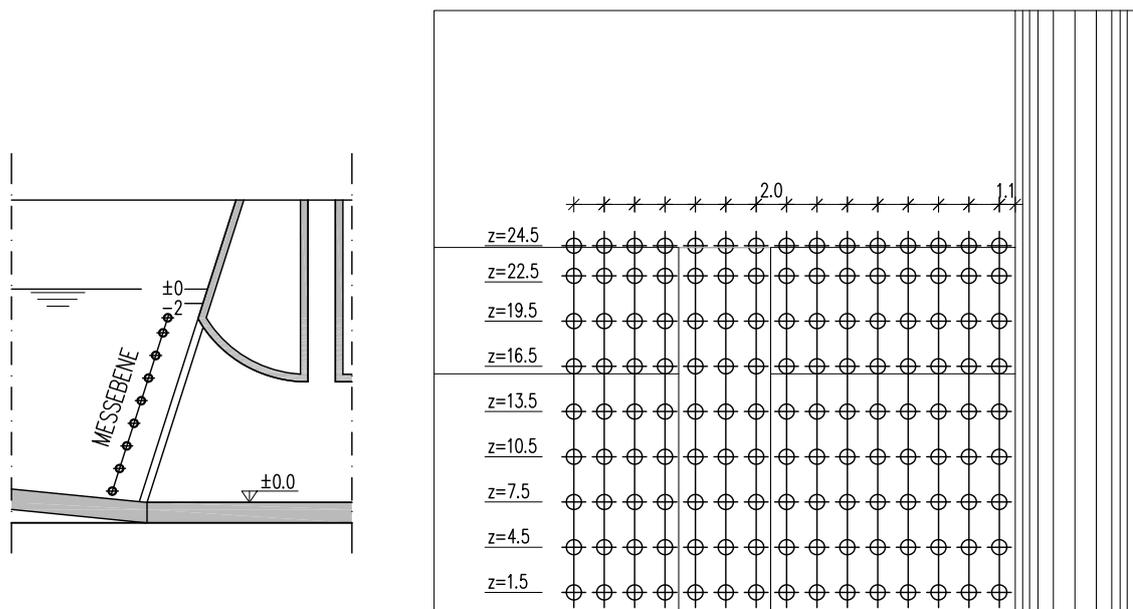


Abbildung 6.4.: Messraster vor der Rechenebene

Bei den Versuchsvarianten mit einer Oberwasserkote von -2 wurde die Zeile in der Höhenlage $z = 24,5 \text{ cm}$ nicht gemessen. Zudem war die Messung in der Zeile am Boden ($z = 1,5 \text{ cm}$) bei den Versuchsvarianten mit dem steilen Vorboden wegen der Größe des Messgerätes nicht möglich.

6.2.3. Turbinenebene

Die Geschwindigkeitsmessung im Einlauf der Turbine 2 erfolgte über ein Raster mit 8×8 Punkten, welche im Abstand von 2 cm zueinander angeordnet waren (s. Abbildung 6.5). In dieser Ebene wurde der gesamte Einlaufquerschnitt erfasst.

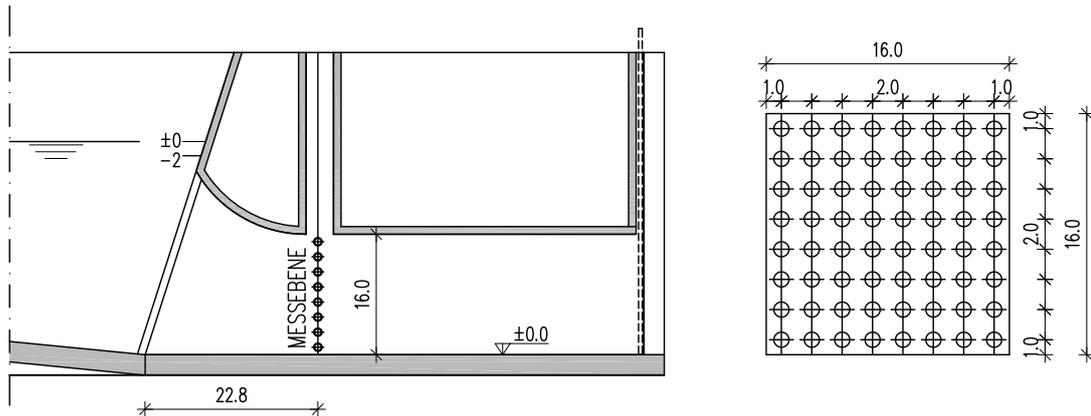


Abbildung 6.5.: Messraster im Turbineneinlauf

7. Messergebnisse

Im nachfolgenden Kapitel werden die Messergebnisse der einzelnen Varianten der Reihe nach, wie im Kapitel 6.1 aufgelistet und beurteilt. Für jede Variante werden übersichtshalber noch einmal die jeweiligen Basisdaten angegeben.

Die Beurteilung erfolgt anhand:

- der Geschwindigkeitsverteilung im Oberwasser
- der Geschwindigkeitsverteilung vor der Rechenebene
- der Geschwindigkeitsverteilung im Einlauf der Turbine 2
- der gemessenen Modellwerte vor der Turbine 2 mit α -Wert und dem Kriterium nach Fisher und Franke.

Im Anhang A sind zudem die Strömungsbilder zu den einzelnen Varianten zusammengefasst.

7.1. Variante B1

Oberwassermessung	Detailliert	Trennpfeiler	Halbkreis
Messung vor Rechenebene	Ja	Abfluss	Q_a
Messung vor Turbine 2	Ja	Oberwasserspiegel	± 0
Vorbodentyp	Flach	Unterwasserspiegel	± 0
seitlicher geneigter Vorboden	Nein	Hochwasserabfuhr	Nein

Tabelle 7.1.: Basisdaten Variante B1

Bei der Anströmung im Oberwasser ist zu erkennen, dass sich die Strömung in allen drei gemessenen Höhenlagen in der Bucht ablöst. Dabei zeigt sich, dass der Bereich der Ablösung in der Höhenlage $z = 13,5 \text{ cm}$ kleiner ist, als in den darüber liegenden Lagen. Die Bucht weist also ein schlechtes Strömungsverhältnis auf (s. Abbildung 7.1 bis 7.3).

Zu beobachten ist auch, dass der Totraum vor den geschlossenen Wehrfeldern in der mittleren Höhenlage $z = 19,5 \text{ cm}$ (s. Abbildung 7.2) kleiner ist als bei der oberen und unteren Lage.

Die Geschwindigkeitsverteilung vor der Rechenebene ist gekennzeichnet durch zwei Bereiche mit hohen Geschwindigkeiten vor den Turbineneinläufen und einen Bereich mit niedriger Geschwindigkeit (hervorgerufen durch den Pfeilerstau) vor der Trennwand. Auch wenn die Messung in dieser Ebene nicht den

gesamten Bereich der Turbine 1 erfasst, lässt die Abbildung 7.4 vermuten, dass die Geschwindigkeitsspitze zentriert vor dem Einlauf dieser Turbine ist. Vor dem Einlauf der Turbine 2 ist der Bereich der hohen Geschwindigkeiten zum Trennpfeiler hin verschoben. Dies ist auf die vom Trennpfeiler beschleunigte wehrfeldparallele Querströmung in den Turbineneinlauf hinein zurückzuführen. An der Sohle erkennt man in diesem trennpfeilernahen Bereich zwei Punkte mit deutlich kleineren Geschwindigkeiten. Sie kommt durch Ablösungen aus der seitlichen Stufe des Vorbodens zu den Wehrfeldern hin zustande (s. Abbildung 7.4). Im Verlauf zur Turbine 2 hin verschiebt sich der Bereich mit der hohen Geschwindigkeit auf die linke Seite. Im wehrfeldseitigen Bereich der Turbine 2 ist eine Geschwindigkeitsdifferenz zu erkennen. Dieser Bereich befindet sich auf derselben Höhe wie die Sohle im Wehrfeldbereich. Somit kann gesagt werden, dass sich die am Trennpfeiler beschleunigte Strömung im Turbineneinlauf ablöst. Zudem nimmt die Geschwindigkeit von oben nach unten ab, was auf den Einfluss der Haube schließen lässt (s. Abbildung 7.5). In der Tabelle 7.2 sieht man die Verteilung der Geschwindigkeiten in dieser Ebene, wobei auch die maximal und minimal gemessenen Geschwindigkeiten angegeben sind. Durch die Auswertung dieser Werte ergibt sich im Turbineneinlauf ein α – Wert von 1,010.

Sowohl das originale als auch das adaptierte Kriterium nach Fisher und Franke wird erfüllt (s. Abbildung 7.6).

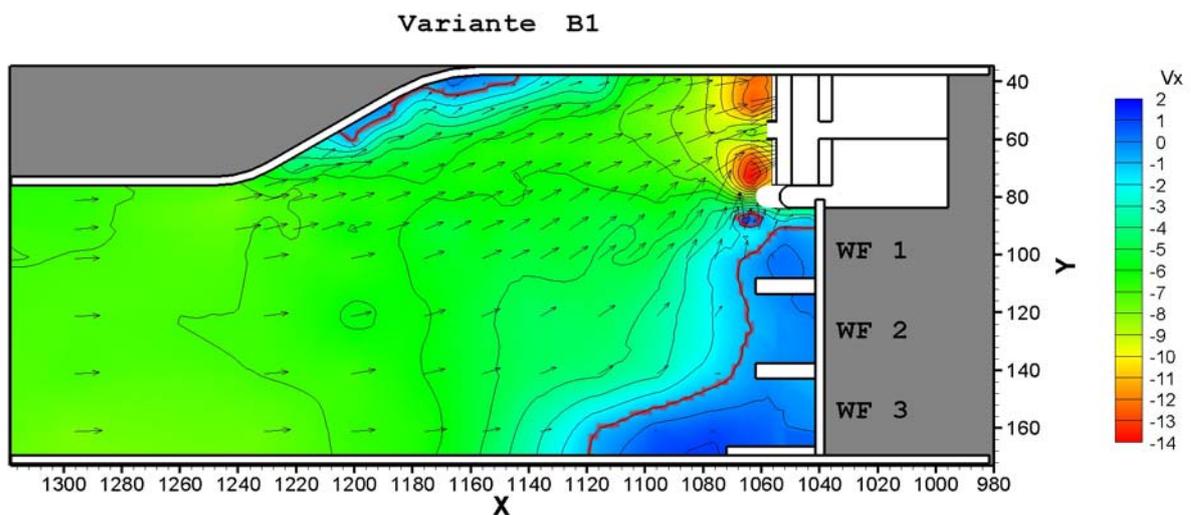


Abbildung 7.1.: Geschwindigkeitsverteilung Oberwasser $Z = 13,5$

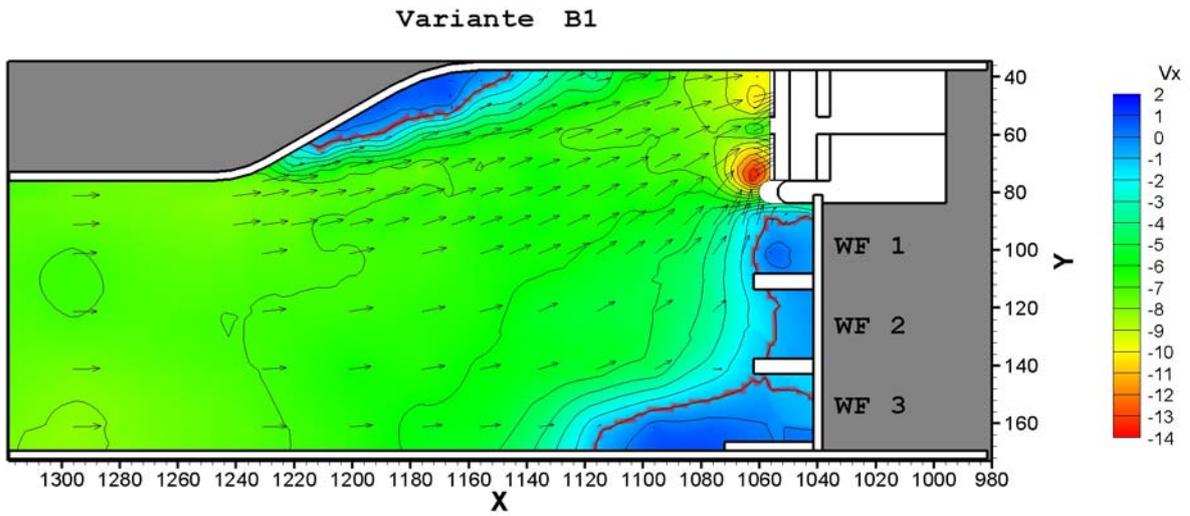


Abbildung 7.2.: Geschwindigkeitsverteilung Oberwasser $Z = 19,5$

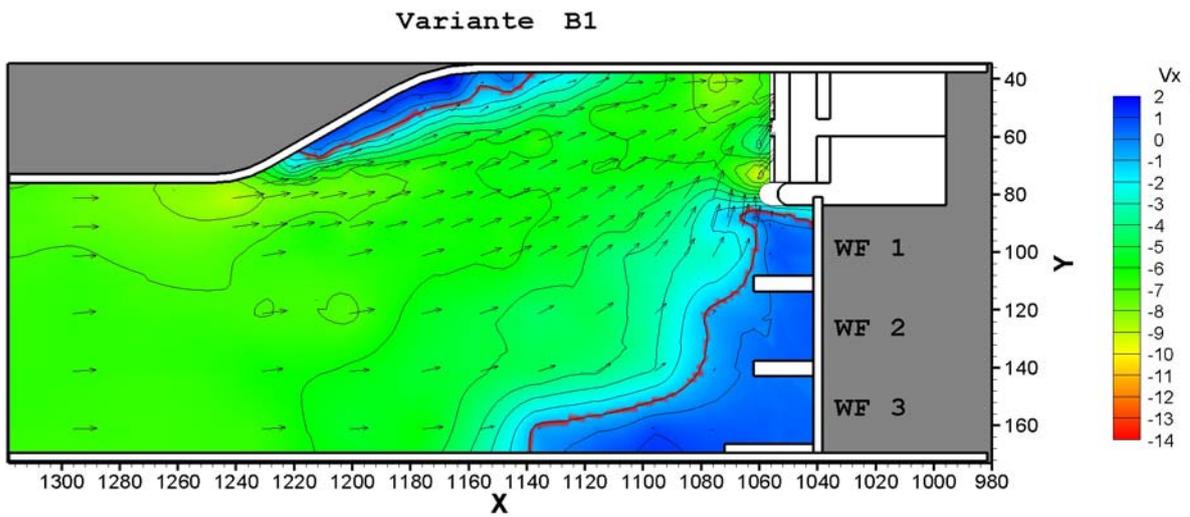


Abbildung 7.3.: Geschwindigkeitsverteilung Oberwasser $Z = 24,5$

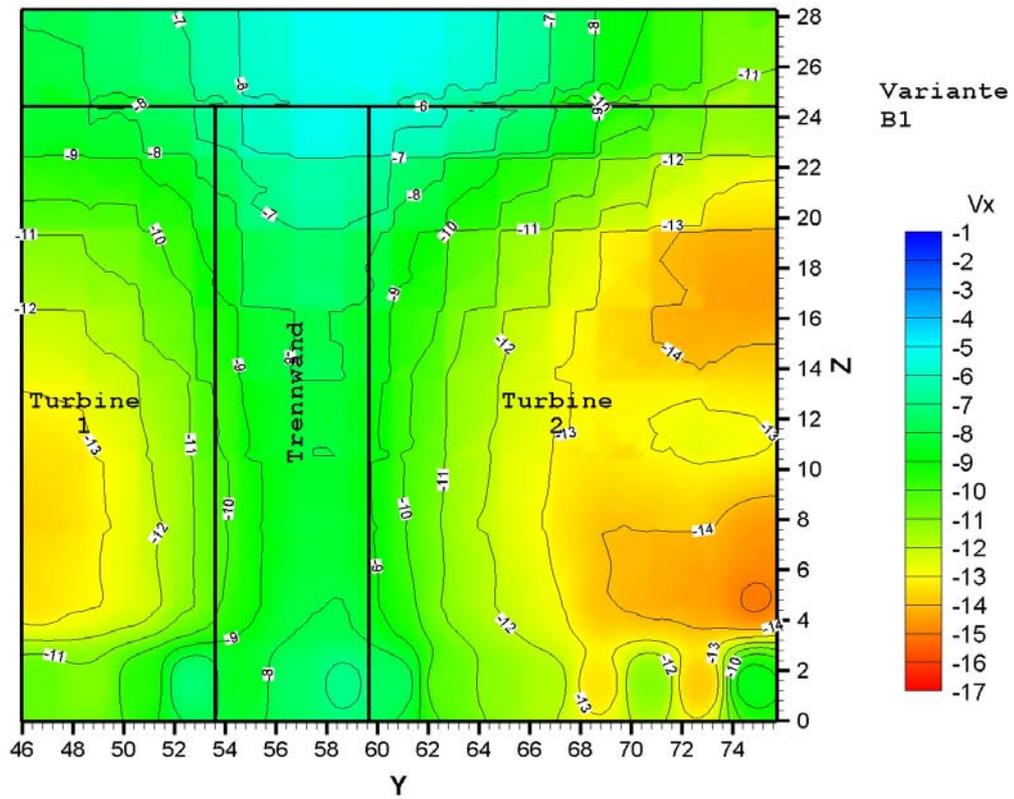


Abbildung 7.4.: Geschwindigkeitsverteilung vor der Rechenebene

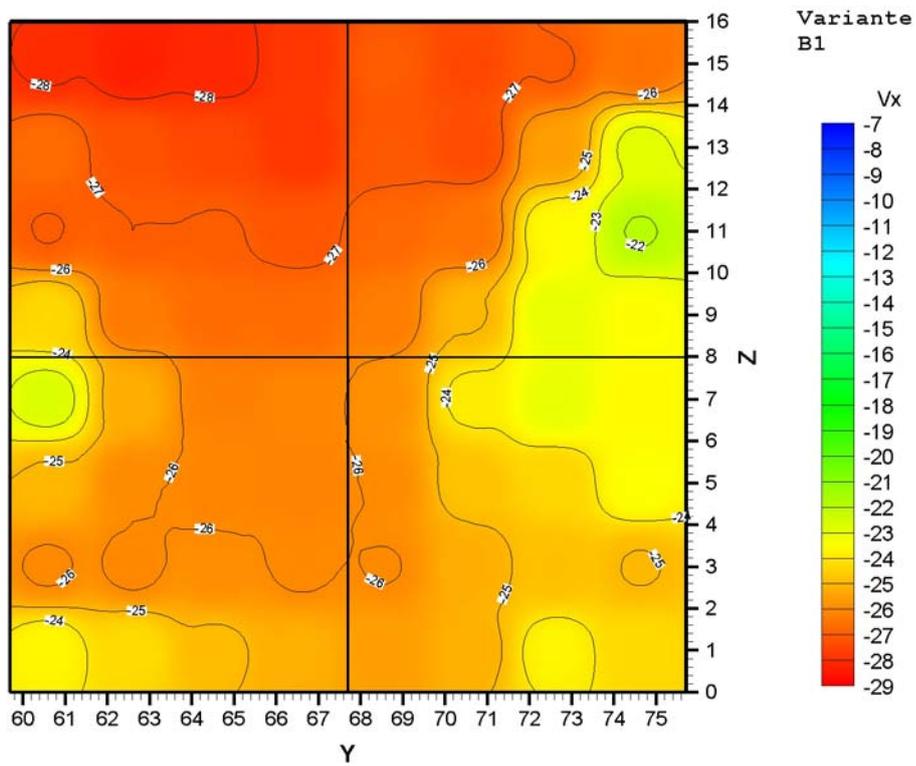


Abbildung 7.5.: Geschwindigkeitsverteilung im Einlauf der Turbine 2

Geschwindigkeitsverteilung der Turbine 2 - Variante B1

Gemessene Modellwerte

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-0,280	-0,283	-0,282	-0,278	-0,270	-0,274	-0,270	-0,266
2	-0,267	-0,272	-0,275	-0,279	-0,271	-0,274	-0,256	-0,229
3	-0,270	-0,270	-0,270	-0,272	-0,268	-0,265	-0,236	-0,220
4	-0,244	-0,264	-0,267	-0,267	-0,263	-0,250	-0,230	-0,235
5	-0,227	-0,253	-0,262	-0,261	-0,259	-0,239	-0,230	-0,236
6	-0,251	-0,260	-0,261	-0,262	-0,260	-0,248	-0,244	-0,234
7	-0,261	-0,261	-0,259	-0,261	-0,260	-0,252	-0,248	-0,250
8	-0,236	-0,243	-0,249	-0,252	-0,256	-0,252	-0,237	-0,243

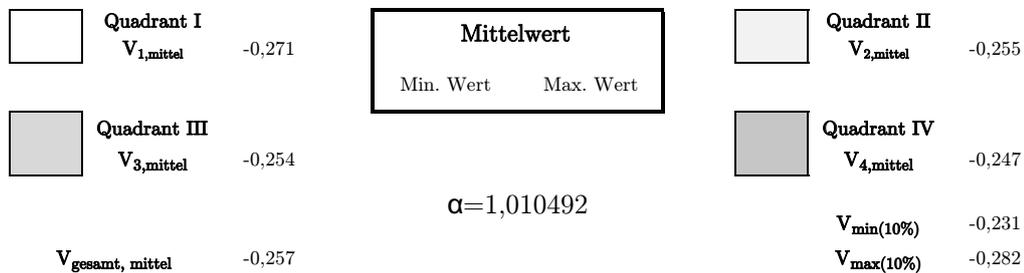


Tabelle 7.2.: Geschwindigkeitsverteilung vor der Turbine 2

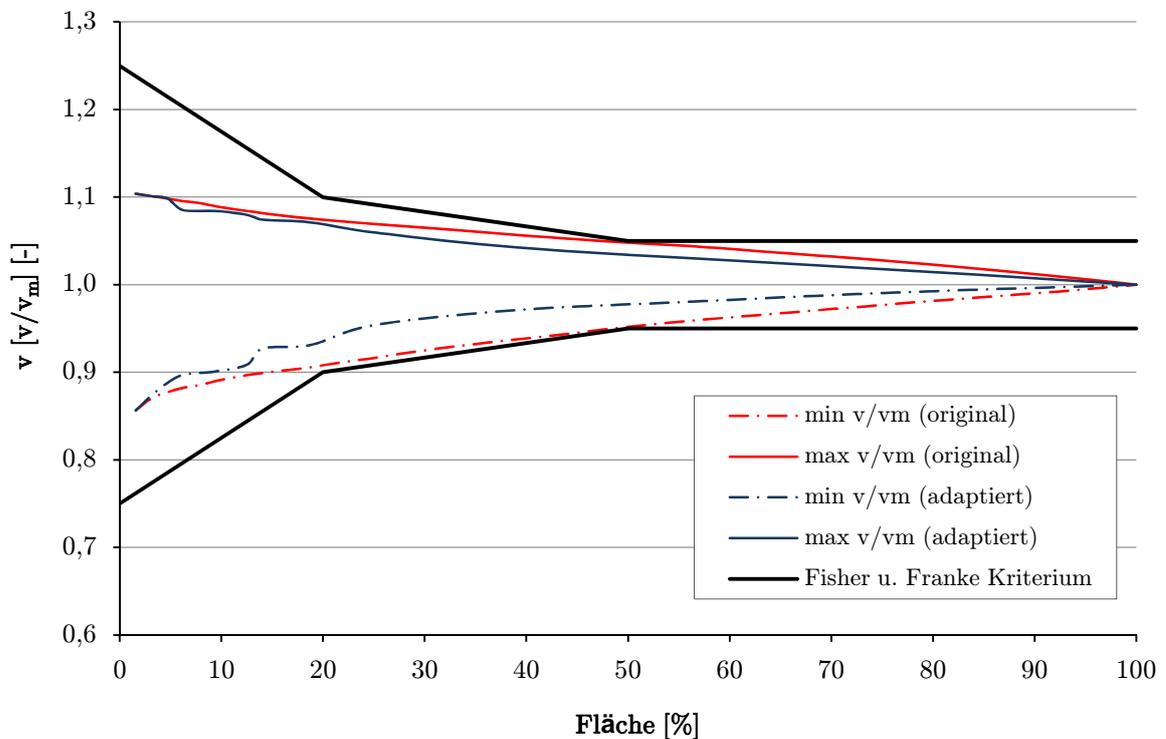


Abbildung 7.6.: Auswertung der Geschwindigkeitsverteilung vor der Turbine 2 nach Fisher und Franke

7.2. Variante B2

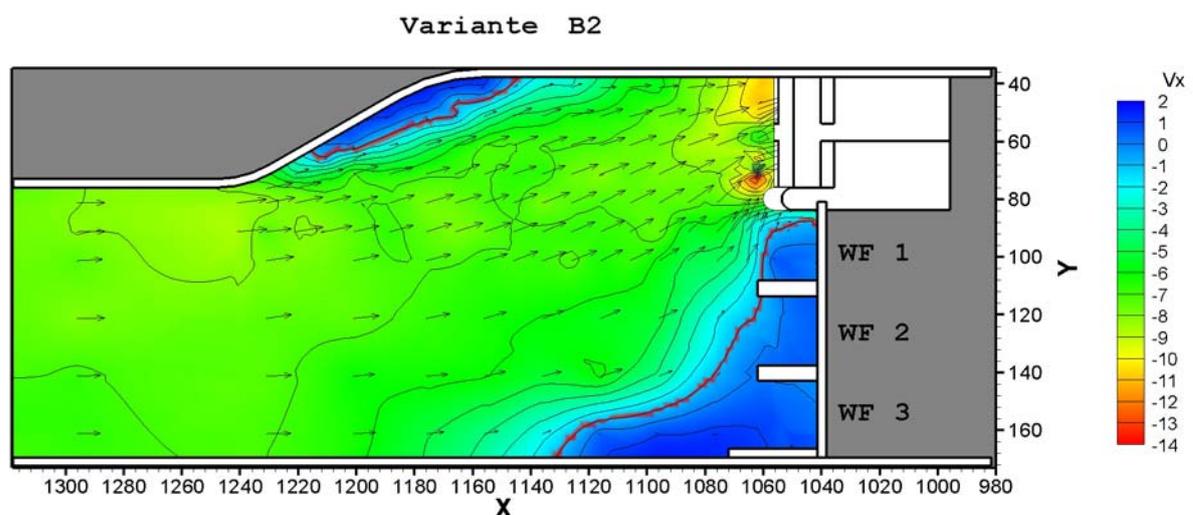
Oberwassermessung	Einfach	Trennpfeiler	Halbkreis
Messung vor Rechenebene	Ja	Abfluss	Q_a
Messung vor Turbine 2	Ja	Oberwasserspiegel	± 0
Vorbodentyp	Flach	Unterwasserspiegel	± 0
seitlicher geneigter Vorboden	Ja	Hochwasserabfuhr	Nein

Tabelle 7.3.: Basisdaten Variante B2

Ähnlich wie bei der Variante B1, zeigt sich im Oberwasser, dass sich die Strömung in der Bucht ablöst (s. Abbildung 7.7).

Die Geschwindigkeitsverteilung vor der Rechenebene lässt sich wieder in die drei Bereiche gliedern wie in Variante B1. Am Boden kommt es im Bereich der Trennwand zu erheblichen Geschwindigkeitsdifferenzen. Im Bereich des Trennpfeilers sind bis zu einer Höhe von $z = 10,0 \text{ cm}$ niedrigere Geschwindigkeiten als in den darüber liegenden Lagen festzustellen. Diese Differenz ergibt sich durch Ablösungen, gebildet aufgrund der seitlichen Anrampung zur Sohle im Wehrfeldbereich, welche von den Querströmungen überwunden werden müssen (s. Abbildung 7.8). Die Abbildung 7.9 zeigt allerdings dass sich die Strömung bis zur Turbine 2 erheblich verbessert. Lediglich an der wehrfeldseitigen Wand löst sich die Strömung leicht ab. In der Tabelle 7.4 kann man sehen wie die Geschwindigkeit in dieser Ebene verteilt ist. Der α -Wert beträgt 1,009.

Die Grenzbedingung von Fisher und Franke wird nach beiden Auswertungsmethoden eingehalten (s. Abbildung 7.10).

Abbildung 7.7.: Geschwindigkeitsverteilung Oberwasser $Z = 19,5$

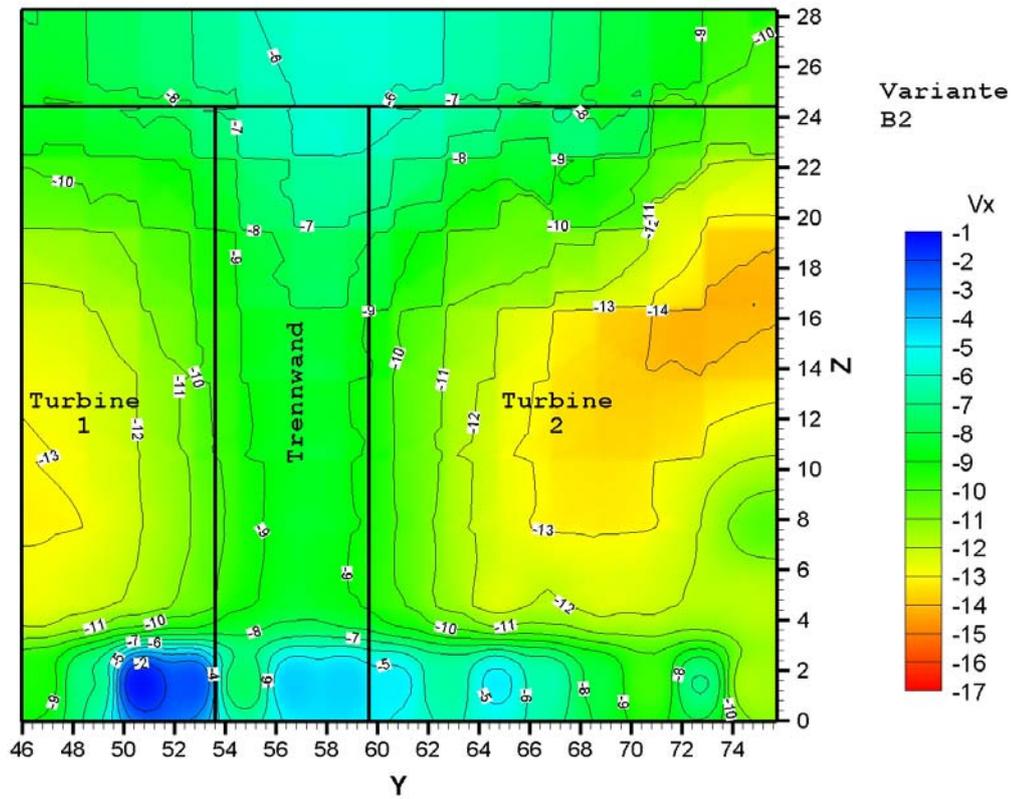


Abbildung 7.8.: Geschwindigkeitsverteilung vor der Rechenebene

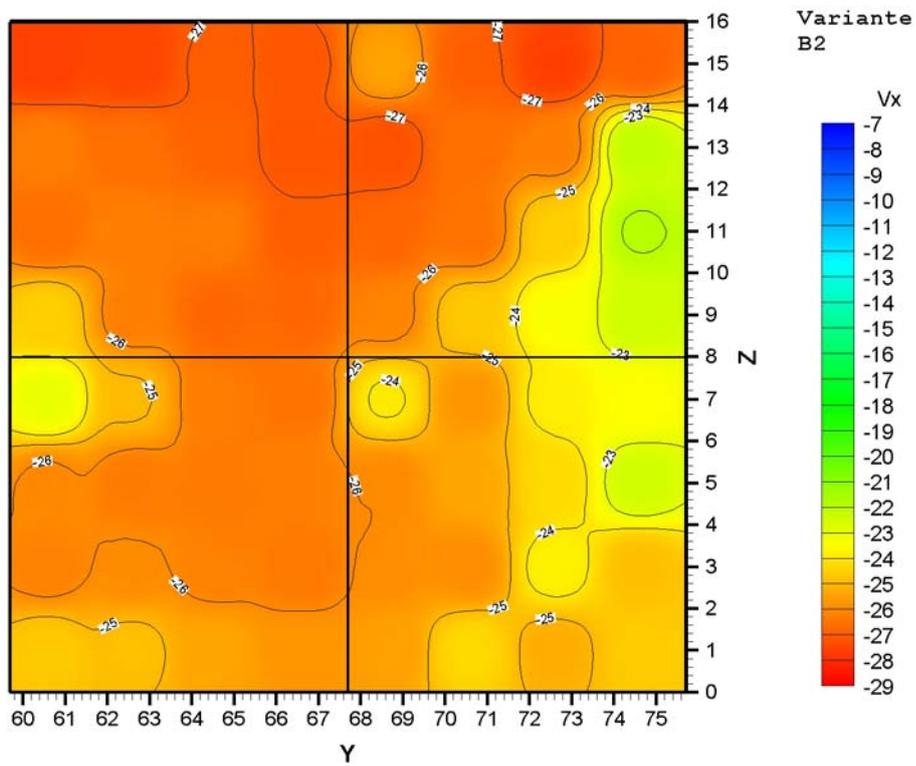


Abbildung 7.9.: Geschwindigkeitsverteilung im Einlauf der Turbine 2

Geschwindigkeitsverteilung der Turbine 2 - Variante B2

Gemessene Modellwerte

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-0,276	-0,275	-0,269	-0,272	-0,255	-0,269	-0,277	-0,269
2	-0,263	-0,266	-0,268	-0,272	-0,272	-0,266	-0,263	-0,222
3	-0,266	-0,263	-0,263	-0,270	-0,268	-0,266	-0,246	-0,219
4	-0,245	-0,263	-0,268	-0,268	-0,262	-0,246	-0,234	-0,225
5	-0,230	-0,250	-0,263	-0,265	-0,239	-0,258	-0,238	-0,235
6	-0,261	-0,263	-0,264	-0,263	-0,260	-0,254	-0,243	-0,225
7	-0,262	-0,260	-0,262	-0,264	-0,259	-0,259	-0,238	-0,249
8	-0,246	-0,248	-0,254	-0,258	-0,256	-0,243	-0,253	-0,246

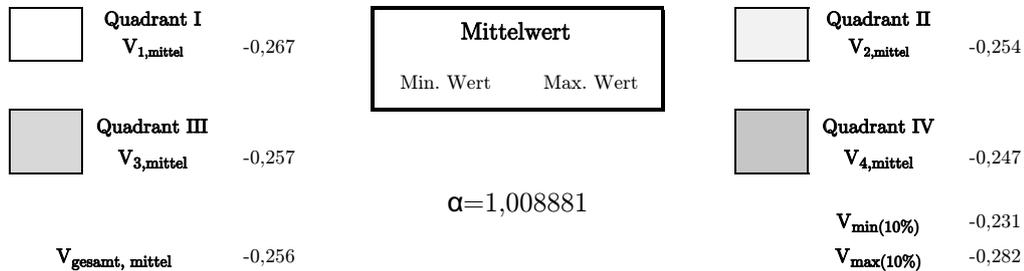


Tabelle 7.4.: Geschwindigkeitsverteilung vor der Turbine 2

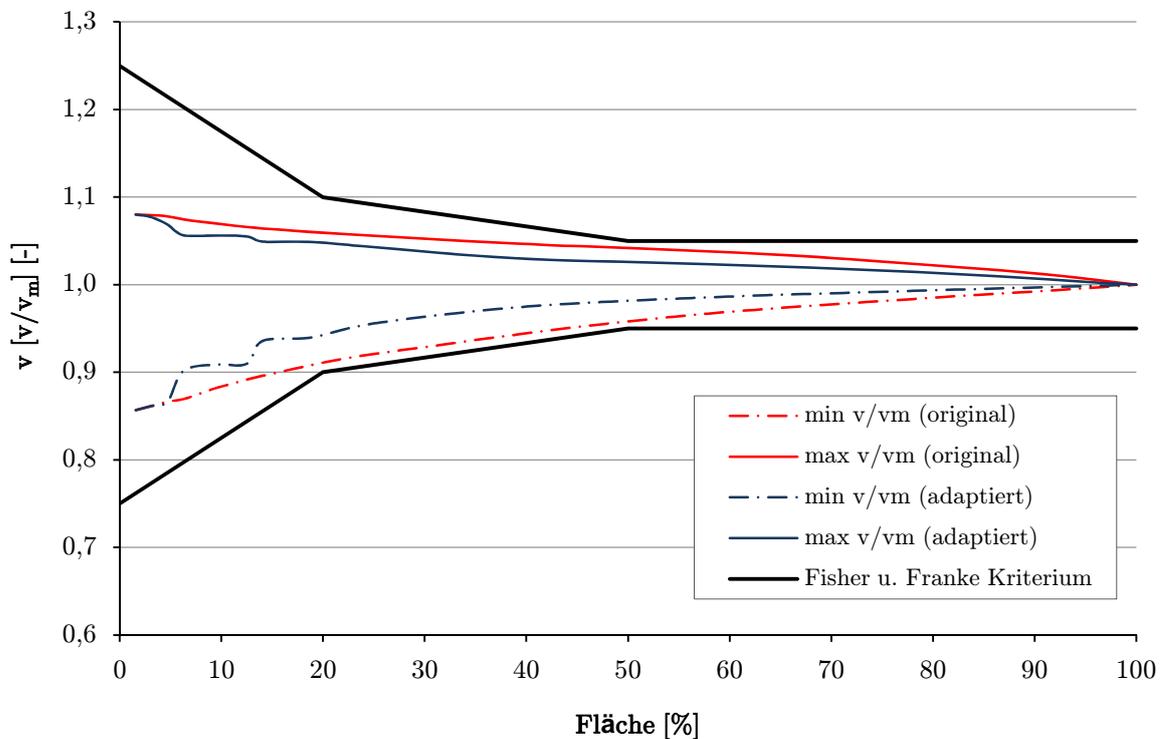


Abbildung 7.10.: Auswertung der Geschwindigkeitsverteilung vor der Turbine 2 nach Fisher und Franke

7.3. Variante B5

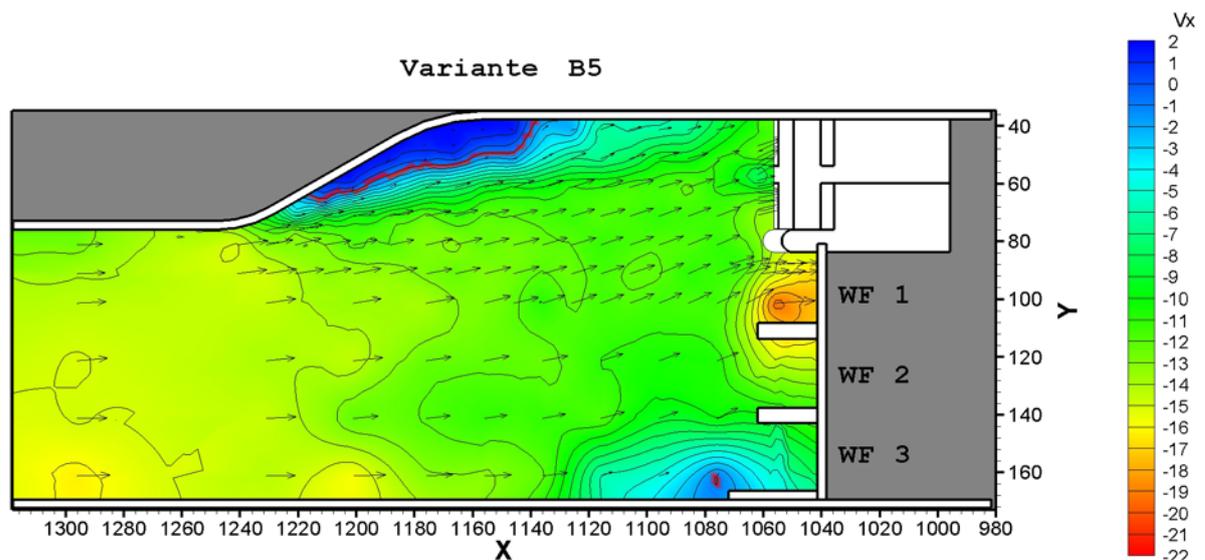
Oberwassermessung	Einfach	Trennpfeiler	Halbkreis
Messung vor Rechenebene	Ja	Abfluss	$2 Q_a$
Messung vor Turbine 2	Ja	Oberwasserspiegel	± 0
Vorbodentyp	Flach	Unterwasserspiegel	± 0
seitlicher geneigter Vorboden	Ja	Hochwasserabfuhr	Klappe im WF 1 und 2

Tabelle 7.5.: Basisdaten Variante B5

Auch bei dieser Variante, bei der das Hochwasser über die Wehrfelder 1 und 2 abgeführt wird, bildet sich in der Bucht ein Totraum (s. Abbildung 7.11).

Wiederum zeigen sich in der Rechenebene aufgrund des Pfeilerstaus der Trennwand vor allem am Boden niedrigere Geschwindigkeiten als direkt vor den Turbineneinläufen. Vor dem Einlauf zur Turbine 2 ist in Trennpfeilernähe der Einfluss der seitlichen Anrampung zu erkennen (s. Abbildung 7.12). Mit Ausnahme eines bodennahen Streifens vergleichmäßig sich die Strömung bis zur Turbine 2. Die Geschwindigkeit nimmt von oben nach unten in parallelen Schichten, vermutlich aufgrund der Einlaufhaube, ab. Am Boden nimmt die Geschwindigkeit allerdings erheblich ab (s. Abbildung 7.13). Diese plötzliche Geschwindigkeitsabnahme wird auf die Ausbildung einer Grenzschicht zurückgeführt.

Die Tabelle 7.6 zeigt die zugehörige Geschwindigkeitsverteilung in der Turbine 2 mit dem daraus folgenden α – Wert von 1,044. Die Grenzbedingung von Fisher und Franke wird nach der originalen Auswertungsmethode bis zu einem Flächenanteil von 65% und nach der adaptierten Methode bis 35% der anteiligen Fläche nicht eingehalten (s. Abbildung 7.14).

Abbildung 7.11.: Geschwindigkeitsverteilung Oberwasser $Z = 19,5$

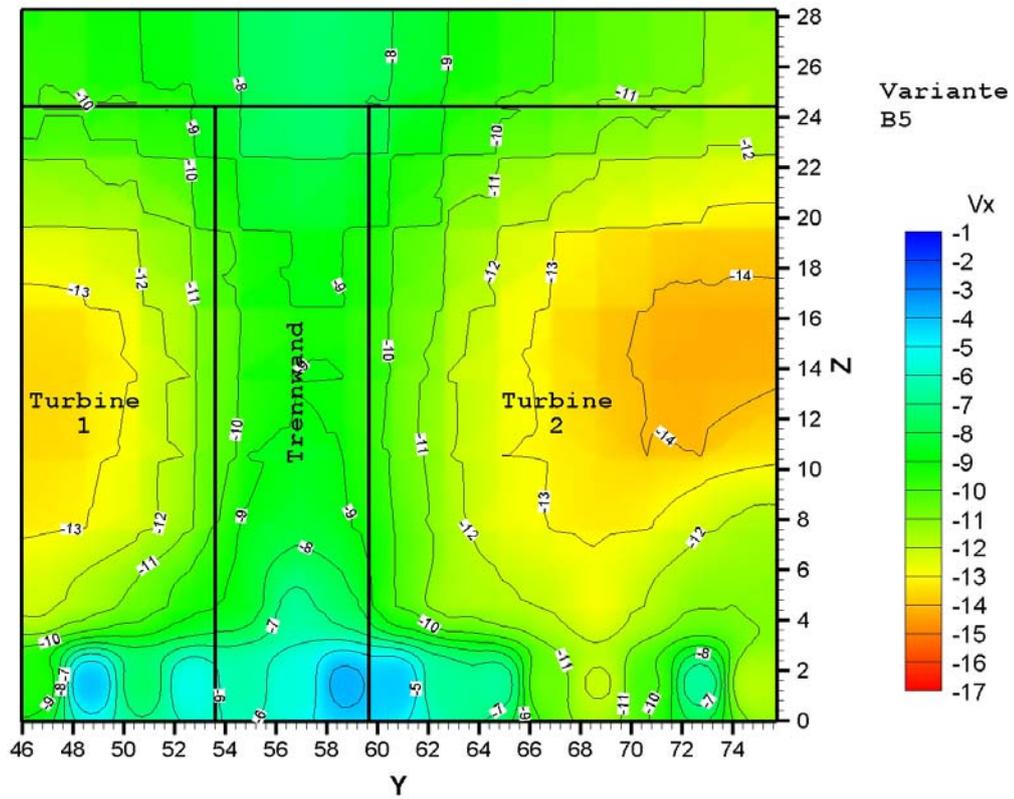


Abbildung 7.12.: Geschwindigkeitsverteilung vor der Rechenebene

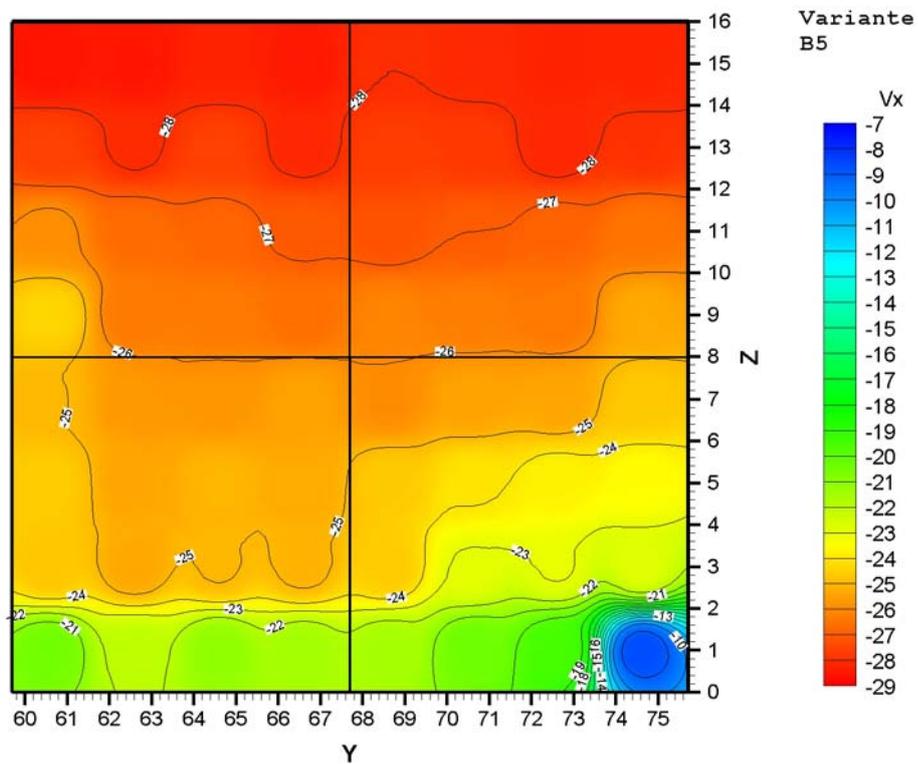


Abbildung 7.13.: Geschwindigkeitsverteilung im Einlauf der Turbine 2

Geschwindigkeitsverteilung der Turbine 2 - Variante B5

Gemessene Modellwerte

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-0,286	-0,285	-0,283	-0,285	-0,280	-0,281	-0,283	-0,282
2	-0,276	-0,281	-0,276	-0,282	-0,277	-0,278	-0,282	-0,279
3	-0,259	-0,267	-0,268	-0,271	-0,273	-0,270	-0,268	-0,265
4	-0,244	-0,264	-0,264	-0,266	-0,261	-0,263	-0,264	-0,253
5	-0,250	-0,257	-0,258	-0,255	-0,260	-0,255	-0,254	-0,247
6	-0,246	-0,254	-0,251	-0,253	-0,246	-0,240	-0,238	-0,235
7	-0,247	-0,254	-0,250	-0,251	-0,246	-0,230	-0,230	-0,229
8	-0,204	-0,221	-0,211	-0,215	-0,216	-0,204	-0,195	-0,086

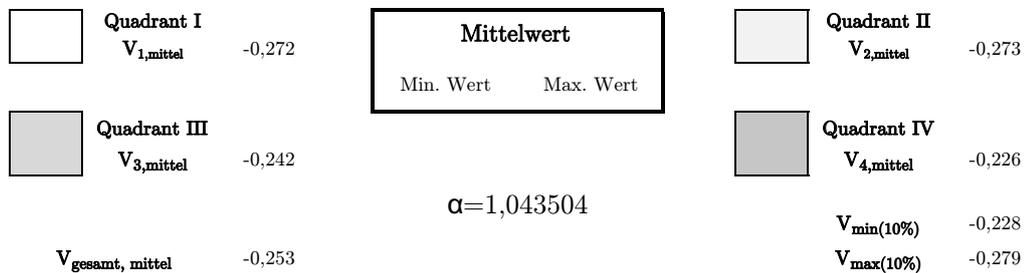


Tabelle 7.6.: Geschwindigkeitsverteilung vor der Turbine 2

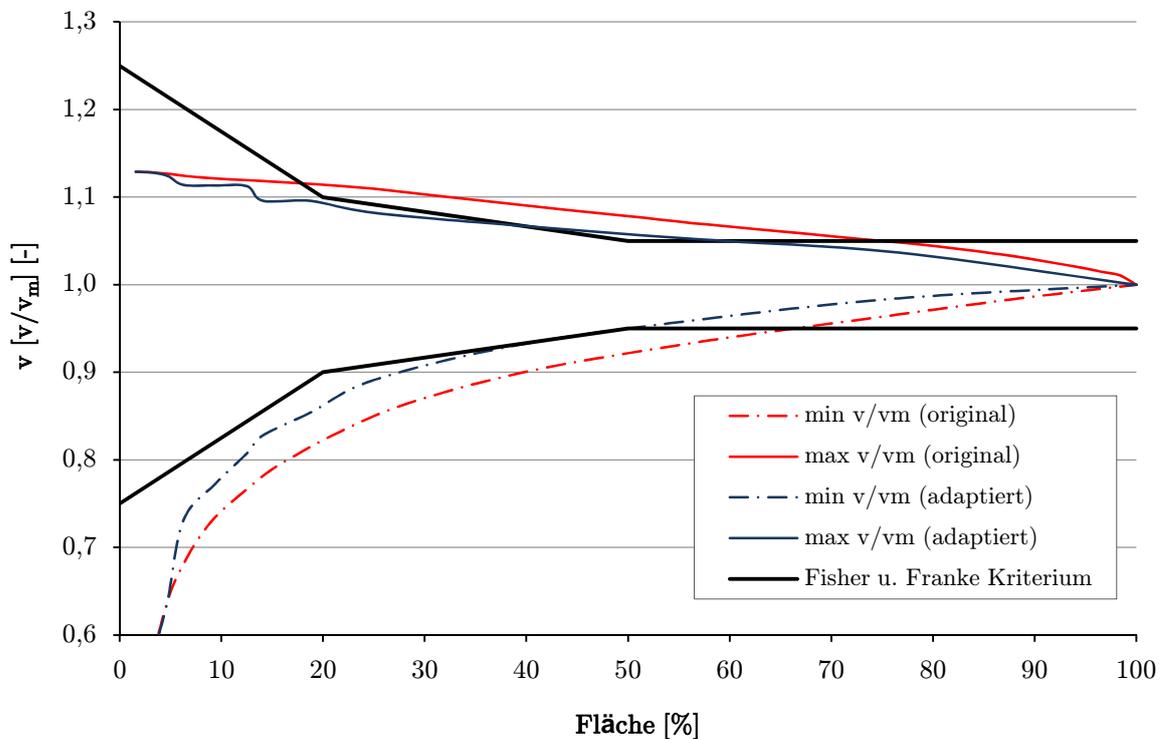


Abbildung 7.14.: Auswertung der Geschwindigkeitsverteilung vor der Turbine 2 nach Fisher und Franke

7.4. Variante B7

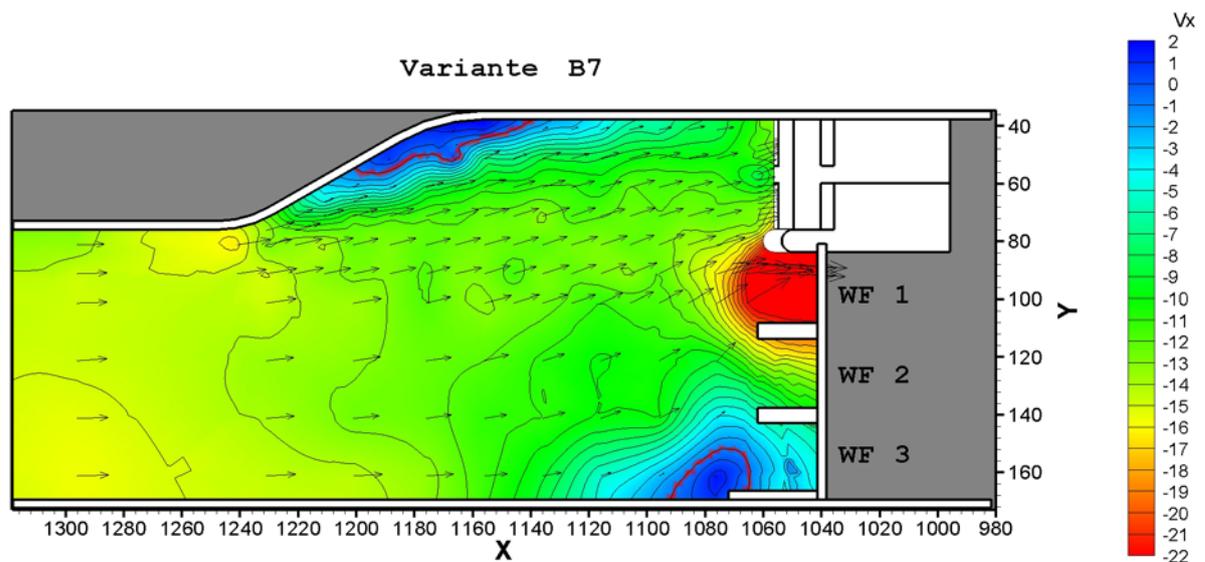
Oberwassermessung	Einfach	Trennpfeiler	Halbkreis
Messung vor Rechenebene	Ja	Abfluss	$2 Q_a$
Messung vor Turbine 2	Ja	Oberwasserspiegel	± 0
Vorbodentyp	Flach	Unterwasserspiegel	± 0
seitlicher geneigter Vorboden	Ja	Hochwasserabfuhr	Segment im WF 1

Tabelle 7.7.: Basisdaten Variante B7

Durch die Abfuhr des Hochwassers über das Wehrfeld 1, treten vor diesem die höchsten Geschwindigkeiten im Oberwasser auf. Die Bucht wird auch bei dieser Variante nicht vollkommen durchströmt (s. Abbildung 7.15).

Der Einfluss der Trennwand zwischen den Turbineneinläufen ist auch in der Rechenebene dieser Variante zu erkennen. Die Strömung wird aufgrund der seitlichen Rampe im Bereich des Trennpfeilerfusspunktes in diesem Fall besonders gestört. Bis etwa zur Hälfte des Einlaufes der wehrseitigen Turbine treten am Boden sehr niedrige Geschwindigkeiten auf (s. Abbildung 7.16). Diese Geschwindigkeitsdifferenz zieht sich bis zur Turbinenebene weiter. Ansonsten ist in dieser Ebene wieder die parallele Abnahme der Geschwindigkeit von oben nach unten zu erkennen (s. Abbildung 7.13).

Wie die Geschwindigkeit vor der Turbine 2 verteilt ist, zeigt die Tabelle 7.8. Der sich nach diesen Werten ergebende α – Wert beträgt 1,024. Das Kriterium nach Fisher und Franke wird nach der adaptierten Auswertungsmethode eingehalten. Durch die Auswertung nach der originalen Methode wird das Kriterium bis zu einem Flächenanteil von 60% nicht erfüllt (s. Abbildung 7.18).

Abbildung 7.15.: Geschwindigkeitsverteilung Oberwasser $Z = 19,5$

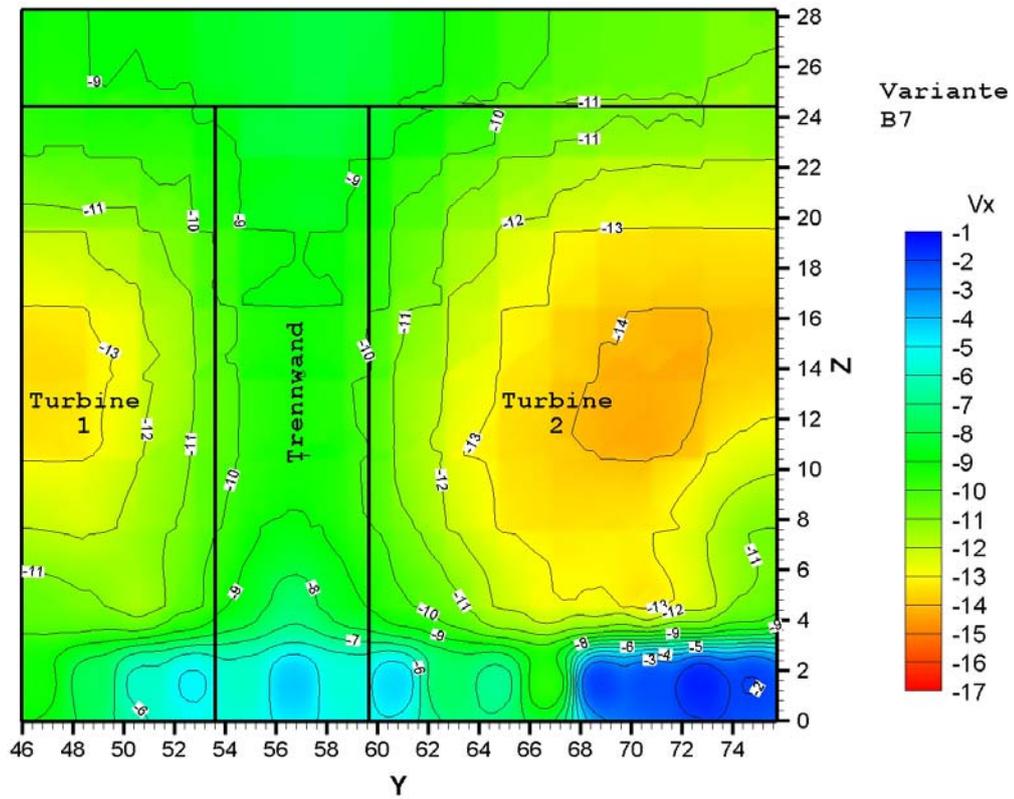


Abbildung 7.16.: Geschwindigkeitsverteilung vor der Rechenebene

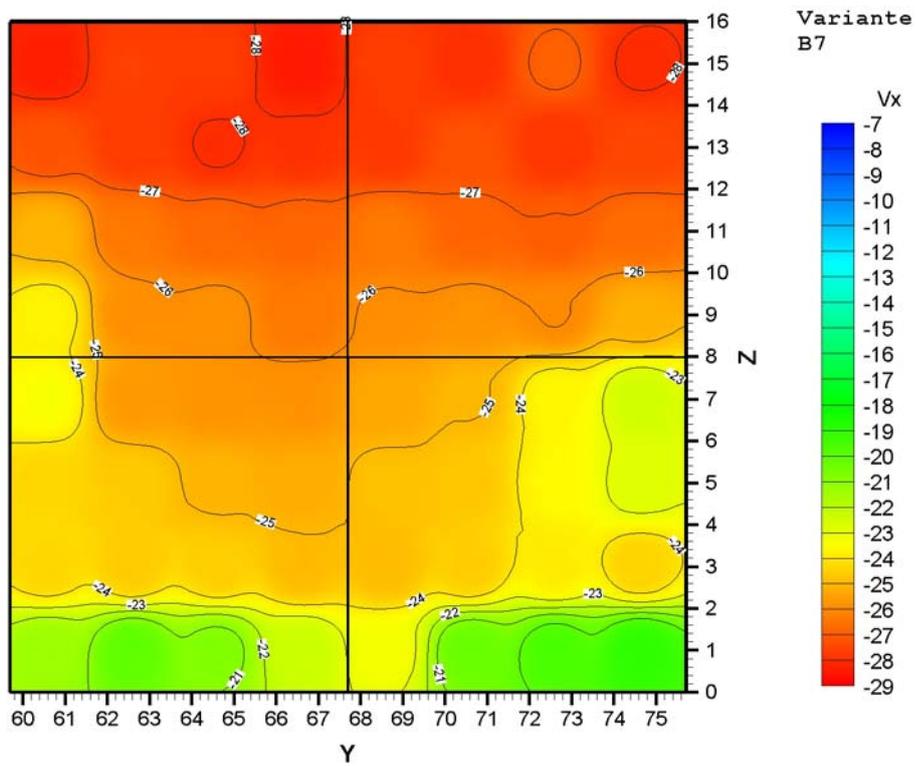


Abbildung 7.17.: Geschwindigkeitsverteilung im Einlauf der Turbine 2

Geschwindigkeitsverteilung der Turbine 2 - Variante B7

Gemessene Modellwerte

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-0,283	-0,277	-0,277	-0,284	-0,277	-0,280	-0,269	-0,281
2	-0,254	-0,285	-0,264	-0,289	-0,288	-0,267	-0,288	-0,269
3	-0,209	-0,277	-0,234	-0,279	-0,255	-0,276	-0,282	-0,261
4	-0,237	-0,259	-0,259	-0,264	-0,259	-0,258	-0,260	-0,252
5	-0,201	-0,258	-0,239	-0,269	-0,240	-0,272	-0,257	-0,214
6	-0,244	-0,246	-0,251	-0,253	-0,248	-0,247	-0,236	-0,228
7	-0,227	-0,258	-0,230	-0,264	-0,217	-0,265	-0,238	-0,263
8	-0,178	-0,235	-0,156	-0,228	-0,161	-0,245	-0,187	-0,243

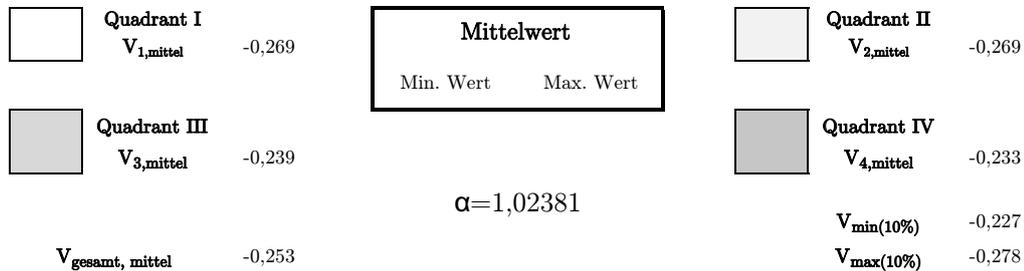


Tabelle 7.8.: Geschwindigkeitsverteilung vor der Turbine 2

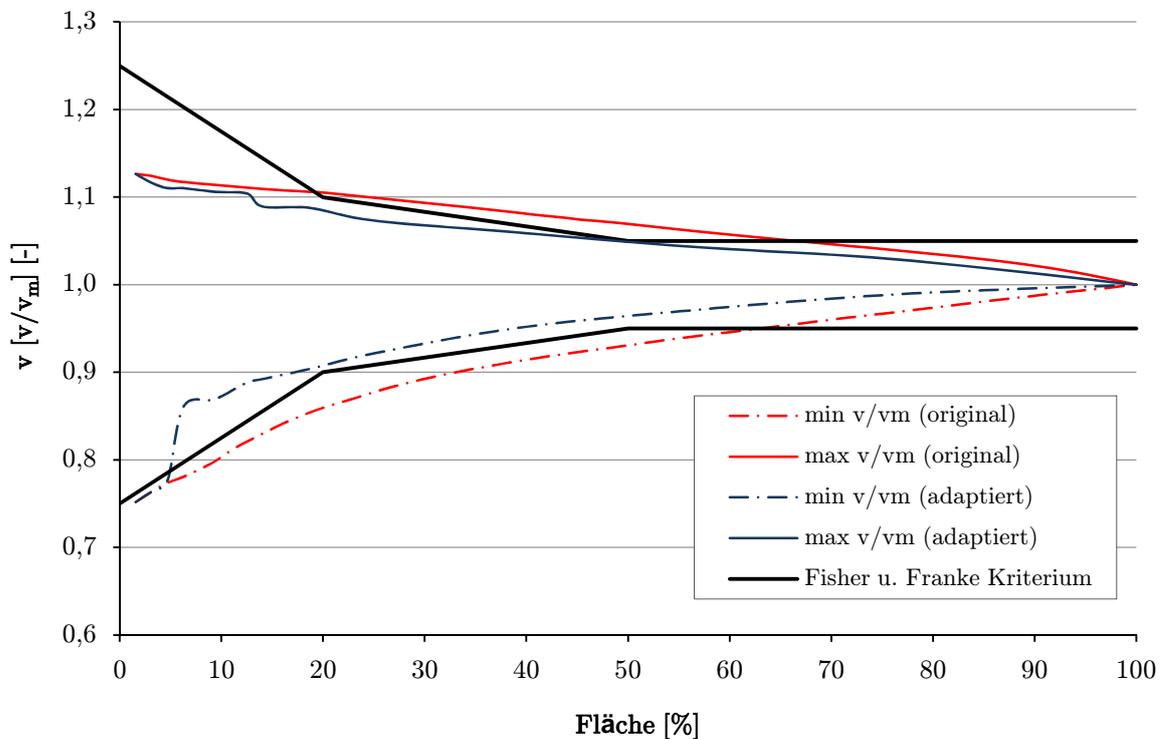


Abbildung 7.18.: Auswertung der Geschwindigkeitsverteilung vor der Turbine 2 nach Fisher und Franke

7.5. Variante B10

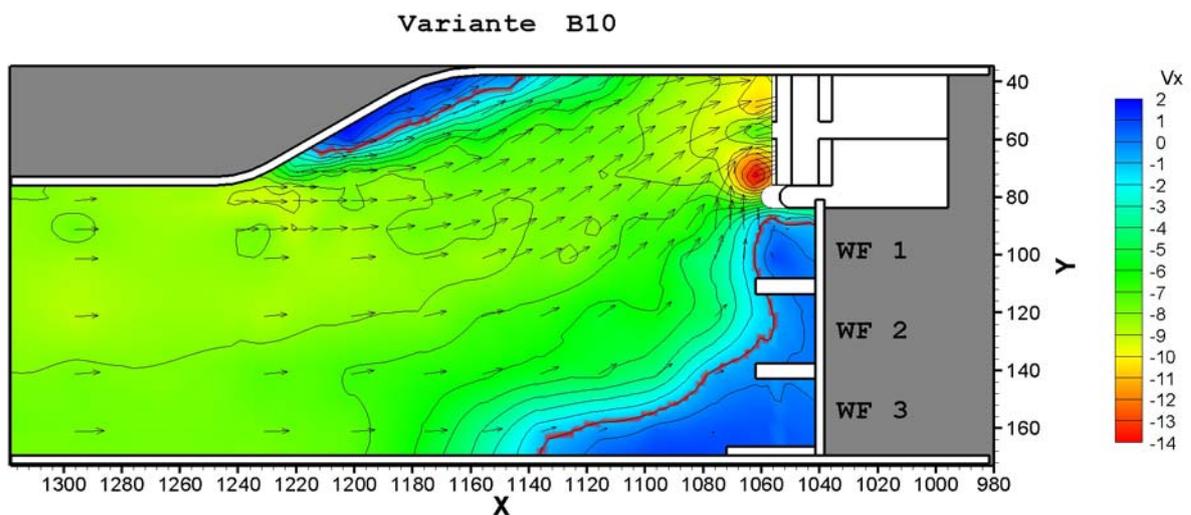
Oberwassermessung	Einfach	Trennpfeiler	Halbkreis
Messung vor Rechenebene	Ja	Abfluss	Q_a
Messung vor Turbine 2	Ja	Oberwasserspiegel	-2
Vorbodentyp	Flach	Unterwasserspiegel	± 0
seitlicher geneigter Vorboden	Ja	Hochwasserabfuhr	Nein

Tabelle 7.9.: Basisdaten Variante B10

Wie bei den bisher beschriebenen Varianten, löst sich die Strömung in der Bucht ab. Durch die geschlossenen Wehrfelder entstehen wehrfeldparallele Querströmungen in Richtung Turbineneinläufe (s. Abbildung 7.19).

In der Rechenebene erkennt man auch im vorliegenden Fall die Einflüsse der Trennwand und des seitlichen Vorbodens im untersten Bereich der Messebene. Vor dem Einlauf der Turbine 2 zieht sich die vom Trennpfeiler beschleunigte Strömung nahezu bis zum Boden. Die Ablösungen durch die seitliche Anrampung ist nur in unmittelbarer Nähe zum Trennpfeiler am Boden zu erkennen (s. Abbildung 7.20). Dieser Bereich zieht sich bis zur Messebene bei der Turbine 2 weiter. Auch der bodennahe Einfluss der Trennwand in der Rechenebene ist noch in der Turbinenebene zu erkennen. Zudem löst sich die Strömung an der wehrfeldseitigen Wand wieder ab. Abgesehen von diesen drei Bereichen verteilt sich die Geschwindigkeit über den gesamten Querschnitt gleichmäßig (s. Abbildung 7.21).

Der α -Wert ergibt sich aus den Geschwindigkeiten der Tabelle 7.10 mit 1,021. Die Grenzbedingung nach Fisher und Franke wird nach der adaptierten Auswertungsmethode eingehalten. Die Auswertung nach der originalen Methode haltet die Grenzen bis zu einem Flächenanteil von 55% nicht ein (s. Abbildung 7.22).

Abbildung 7.19.: Geschwindigkeitsverteilung Oberwasser $Z = 19,5$

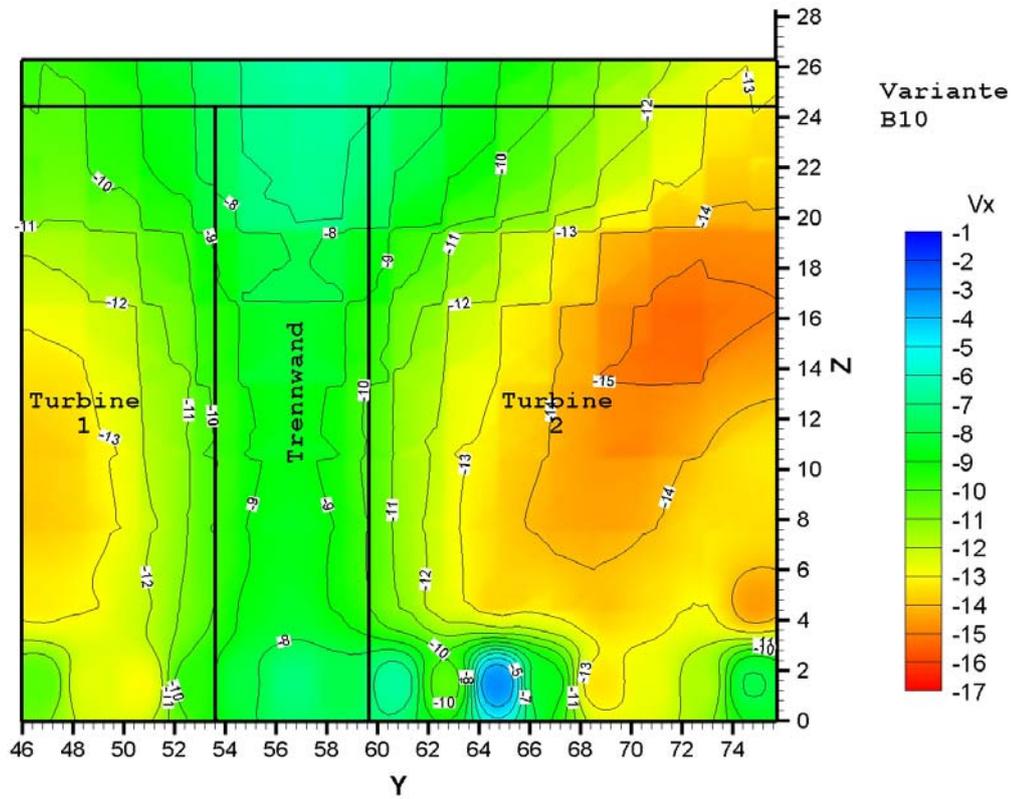


Abbildung 7.20.: Geschwindigkeitsverteilung vor der Rechenebene

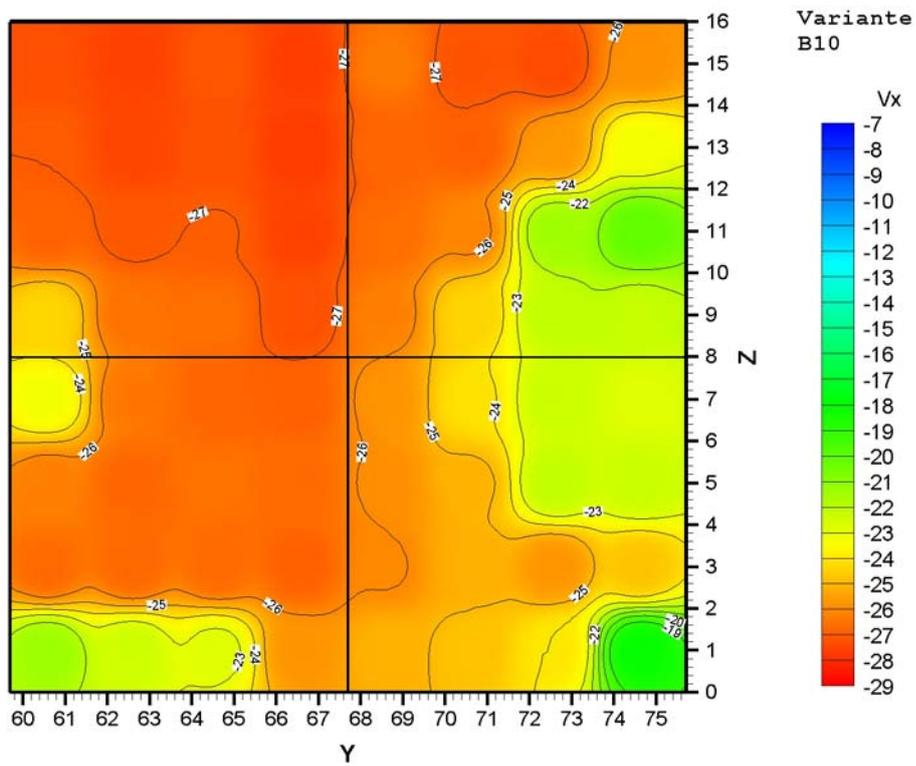


Abbildung 7.21.: Geschwindigkeitsverteilung im Einlauf der Turbine 2

Geschwindigkeitsverteilung der Turbine 2 - Variante B10

Gemessene Modellwerte

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-0,273	-0,276	-0,271	-0,277	-0,263	-0,272	-0,274	-0,259
2	-0,248	-0,289	-0,244	-0,292	-0,223	-0,295	-0,254	-0,296
3	-0,269	-0,271	-0,270	-0,276	-0,267	-0,261	-0,214	-0,201
4	-0,244	-0,265	-0,266	-0,273	-0,262	-0,244	-0,222	-0,223
5	-0,232	-0,265	-0,268	-0,269	-0,258	-0,241	-0,224	-0,228
6	-0,263	-0,268	-0,265	-0,267	-0,259	-0,251	-0,222	-0,223
7	-0,267	-0,268	-0,267	-0,269	-0,260	-0,252	-0,258	-0,248
8	-0,214	-0,224	-0,228	-0,258	-0,251	-0,248	-0,240	-0,181

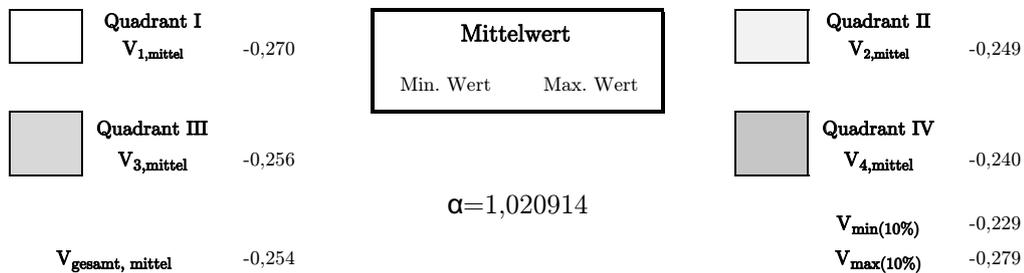


Tabelle 7.10.: Geschwindigkeitsverteilung vor der Turbine 2

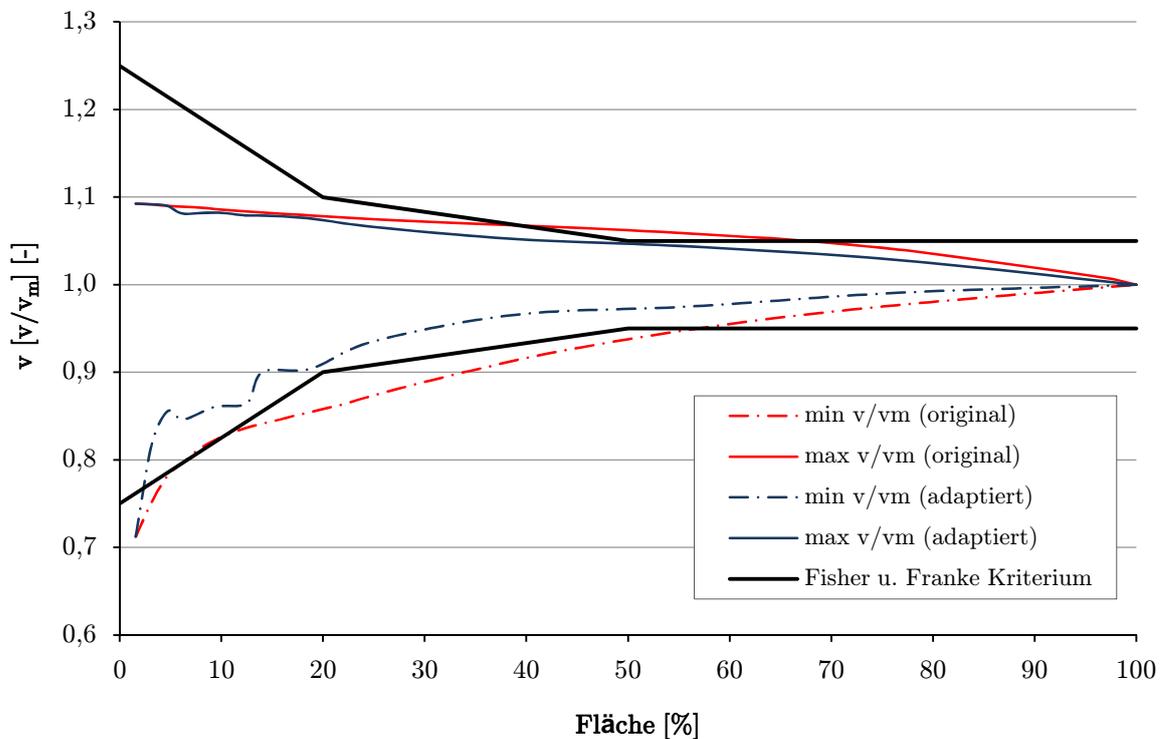


Abbildung 7.22.: Auswertung der Geschwindigkeitsverteilung vor der Turbine 2 nach Fisher und Franke

7.6. Variante B11

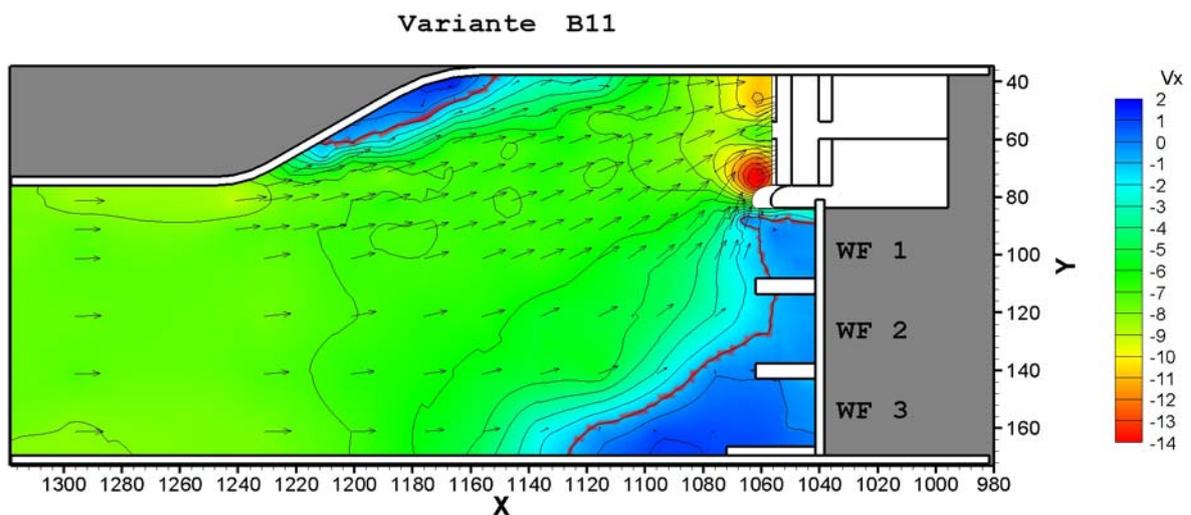
Oberwassermessung	Einfach	Trennpfeiler	Rouv�
Messung vor Rechenebene	Ja	Abfluss	Q_a
Messung vor Turbine 2	Ja	Oberwasserspiegel	± 0
Vorbodentyp	Flach	Unterswasserspiegel	± 0
seitlicher geneigter Vorboden	Ja	Hochwasserabfuhr	Nein

Tabelle 7.11.: Basisdaten Variante B11

Ähnlich wie bei allen Varianten mit dem flachen Vorboden und somit der weiteren Bucht, zeigt sich im Oberwasser, dass sich die Strömung in der Bucht ablöst (s. Abbildung 7.23).

In der Rechenebene kommt es am Boden im Bereich der Trennwand zu erheblichen Geschwindigkeitsdifferenzen. Im Bereich des Trennpfeilers zieht sich die beschleunigte Strömung bis zum Boden. Der Einfluss der seitlichen Anrampung zur Sohle im Wehrfeldbereich, ist bei dieser Variante nicht so ausgeprägt wie bei den vorhergehenden Varianten (s. Abbildung 7.24). Die Abbildung 7.25 zeigt, dass sich die Strömung an der rechten Wand des Einlaufes ablöst. Die von der Trennwand ausgelöste Störung am Boden zieht sich bis zu dieser Ebene durch. Die Ursache der großen Differenz am rechten Fußpunkt des Einlaufes kann auf einen Wirbel zurückgeführt werden, der sich vom seitlichen Vorboden durchzieht.

In der Tabelle 7.12 sind die großen Geschwindigkeitsdifferenzen dieser Ebene ersichtlich. Der α – Wert dieser Variante beträgt 1,053. Das Kriterium nach Fisher und Franke wird nach der adaptierten Auswertungsmethode bis zu einem Flächenanteil von 20% im Bezug auf die minimalen Geschwindigkeiten und zwischen 30% und 70% im Bezug auf die maximalen Geschwindigkeiten nicht eingehalten. Die Auswertung nach der originalen Methode liegt bis zu 70% des Flächenanteils außerhalb der definierten Grenzen (s. Abbildung 7.26).

Abbildung 7.23.: Geschwindigkeitsverteilung Oberwasser $Z = 19,5$

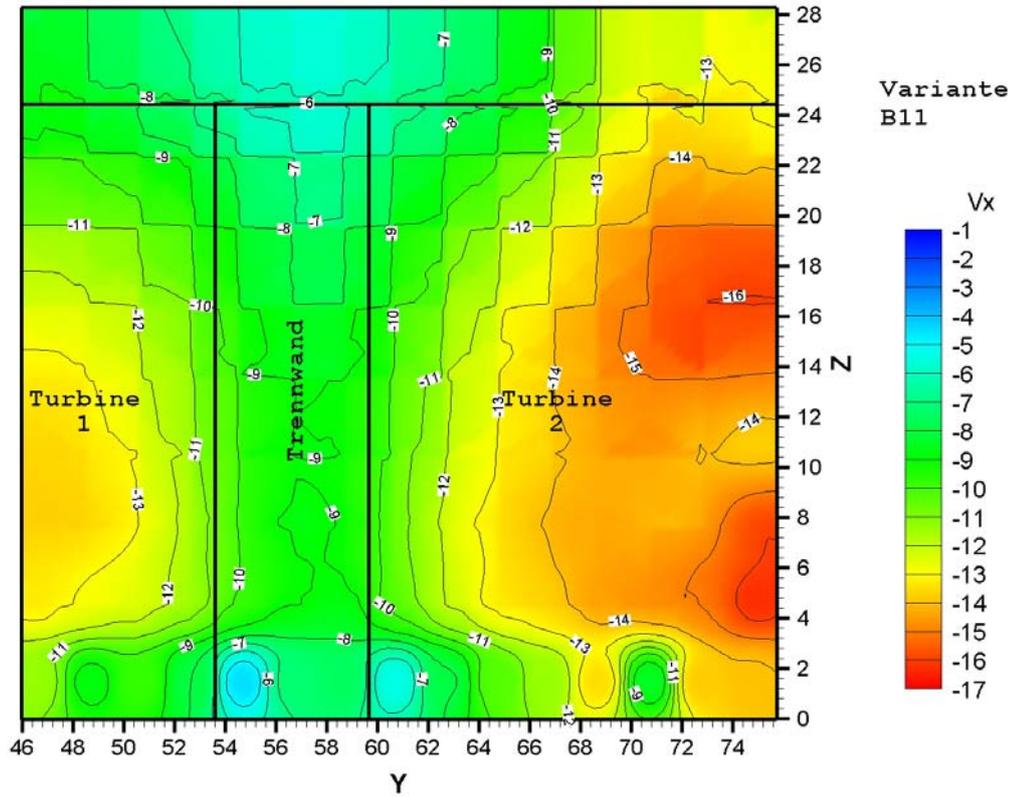


Abbildung 7.24.: Geschwindigkeitsverteilung vor der Rechenebene

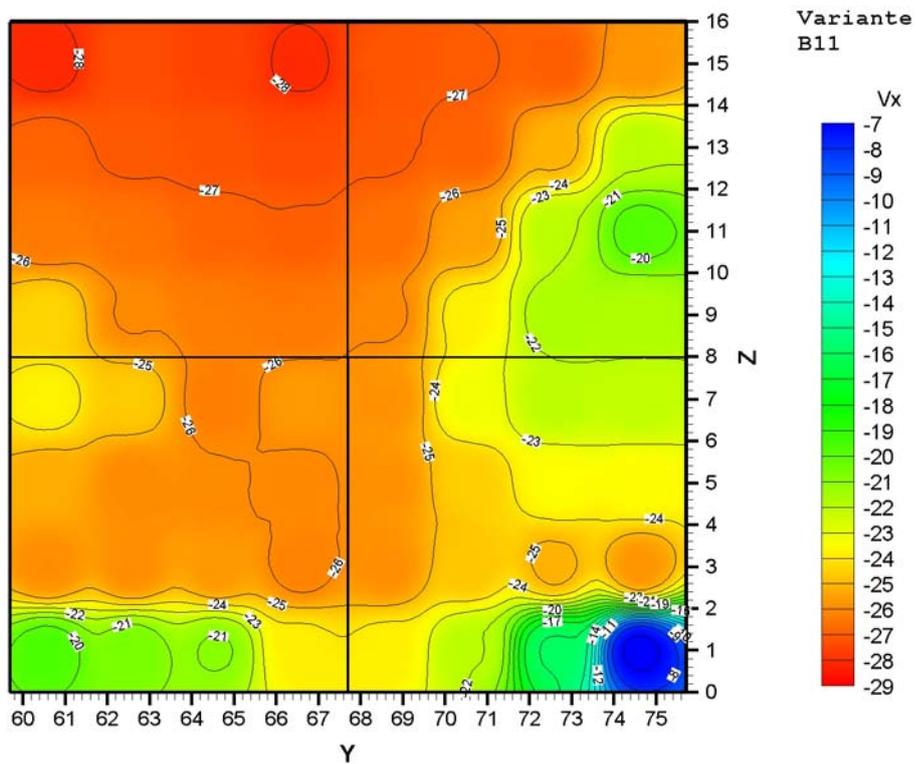


Abbildung 7.25.: Geschwindigkeitsverteilung im Einlauf der Turbine 2

Geschwindigkeitsverteilung der Turbine 2 - Variante B11

Gemessene Modellwerte

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-0,281	-0,273	-0,276	-0,281	-0,272	-0,270	-0,270	-0,258
2	-0,268	-0,271	-0,272	-0,274	-0,271	-0,269	-0,251	-0,220
3	-0,264	-0,266	-0,268	-0,270	-0,266	-0,255	-0,220	-0,197
4	-0,244	-0,260	-0,263	-0,264	-0,261	-0,238	-0,217	-0,218
5	-0,237	-0,246	-0,263	-0,257	-0,258	-0,232	-0,221	-0,222
6	-0,253	-0,260	-0,260	-0,261	-0,259	-0,245	-0,235	-0,235
7	-0,260	-0,259	-0,257	-0,262	-0,259	-0,247	-0,252	-0,258
8	-0,196	-0,206	-0,209	-0,238	-0,238	-0,220	-0,159	-0,068

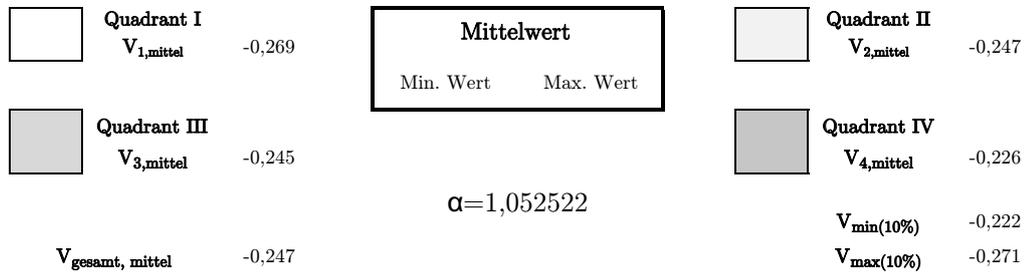


Tabelle 7.12.: Geschwindigkeitsverteilung vor der Turbine 2

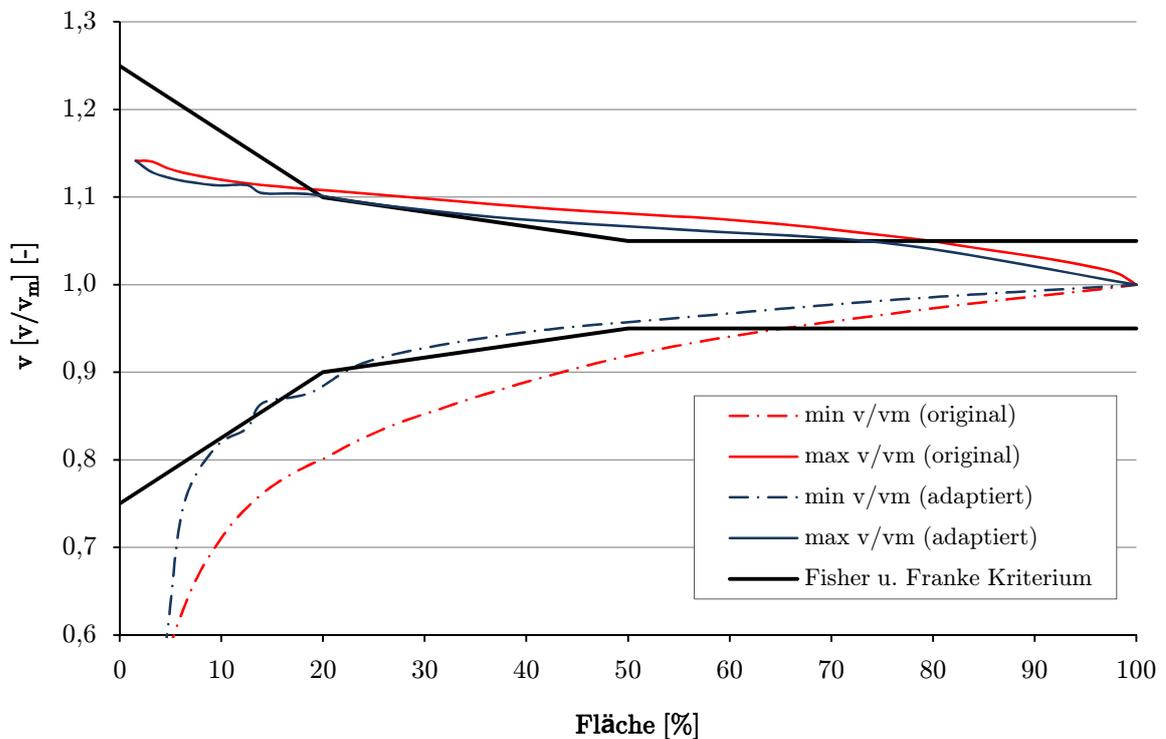


Abbildung 7.26.: Auswertung der Geschwindigkeitsverteilung vor der Turbine 2 nach Fisher und Franke

7.7. Variante B19

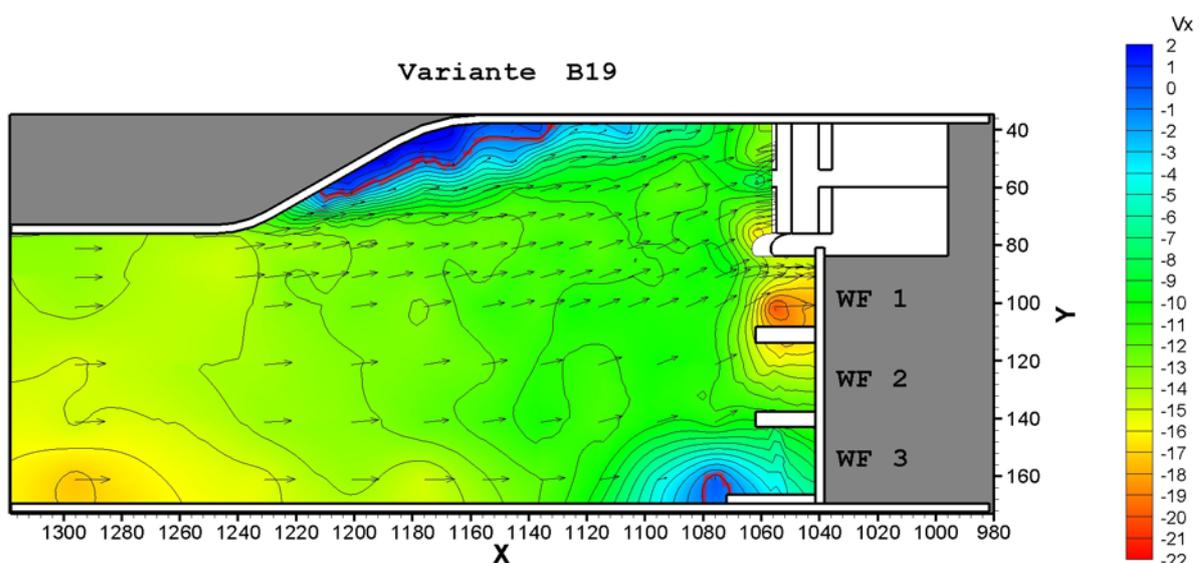
Oberwassermessung	Einfach	Trennpfeiler	Rouv�
Messung vor Rechenebene	Ja	Abfluss	$2 Q_a$
Messung vor Turbine 2	Ja	Oberwasserspiegel	± 0
Vorbodentyp	Flach	Unterwasserspiegel	± 0
seitlicher geneigter Vorboden	Ja	Hochwasserabfuhr	Klappe im WF 1 und 2

Tabelle 7.13.: Basisdaten Variante B19

Auch bei dieser Variante, bei der das Hochwasser über die Wehrfelder 1 und 2 abgeführt wird, wird die Bucht nicht vollkommen durchströmt (s. Abbildung 7.27).

In der Rechenebene zeigen sich aufgrund des Pfeilerstaus der Trennwand vor allem am Boden niedrigere Geschwindigkeiten als direkt vor den Turbineneinläufen. Vor dem Einlauf zur Turbine 2 ist die Strömung in Trennpfeilern he bis zum Boden beschleunigt (s. Abbildung 7.28). Mit Ausnahme von den seitenwandnahen Bereichen am Boden vergleichmäßigt sich die Strömung bis zur Turbine 2. In der Rechenebene weist nichts auf einen Abl sungswirbel aufgrund des seitlichen Vorbodens hin. Deshalb muss bei dem Bereich im rechten unteren Eck in der Turbinenebene von einem Messausreißer ausgegangen werden. Die Geschwindigkeit nimmt von oben nach unten in parallelen Schichten, vermutlich aufgrund der Einlaufhaube, ab (s. Abbildung 7.29).

Die Tabelle 7.14 zeigt die zugehörige Geschwindigkeitsverteilung in der Turbine 2 mit dem daraus folgenden α – Wert von 1,029. Die Grenzbedingung von Fisher und Franke wird nach der originalen Auswertungsmethode bis zu einem Flächenanteil von 60% und nach der adaptierten Methode bis zu 10% der anteiligen Fläche nicht eingehalten (s. Abbildung 7.30).

Abbildung 7.27.: Geschwindigkeitsverteilung Oberwasser $Z = 19,5$

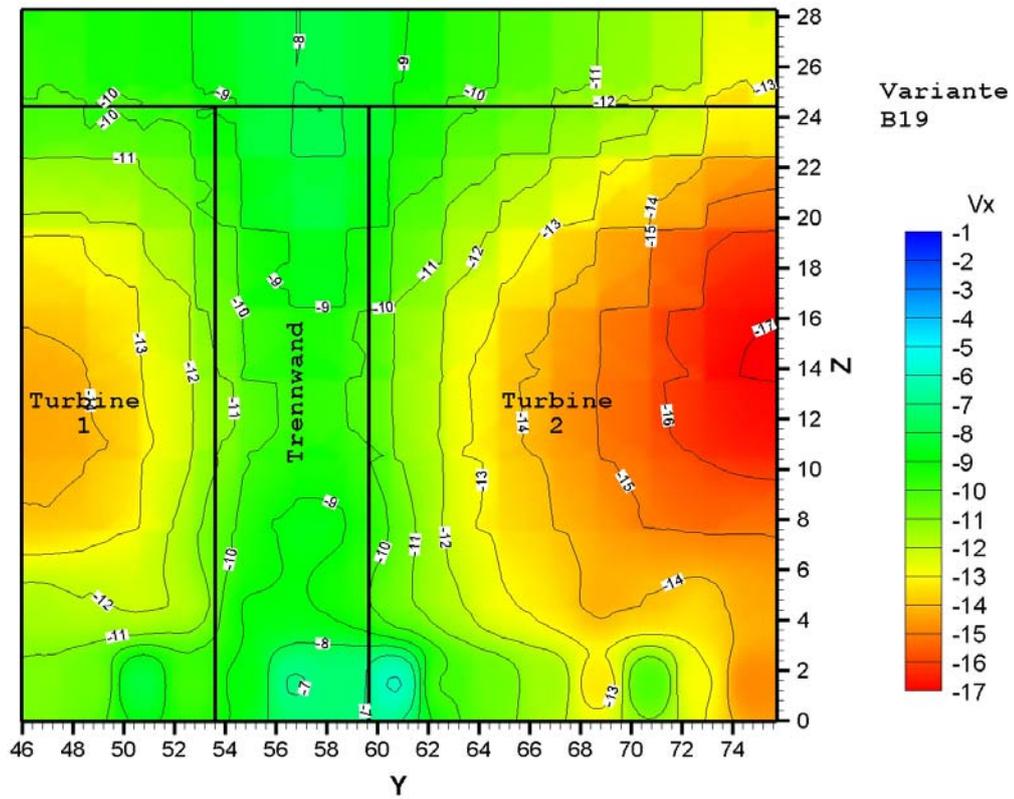


Abbildung 7.28.: Geschwindigkeitsverteilung vor der Rechenebene

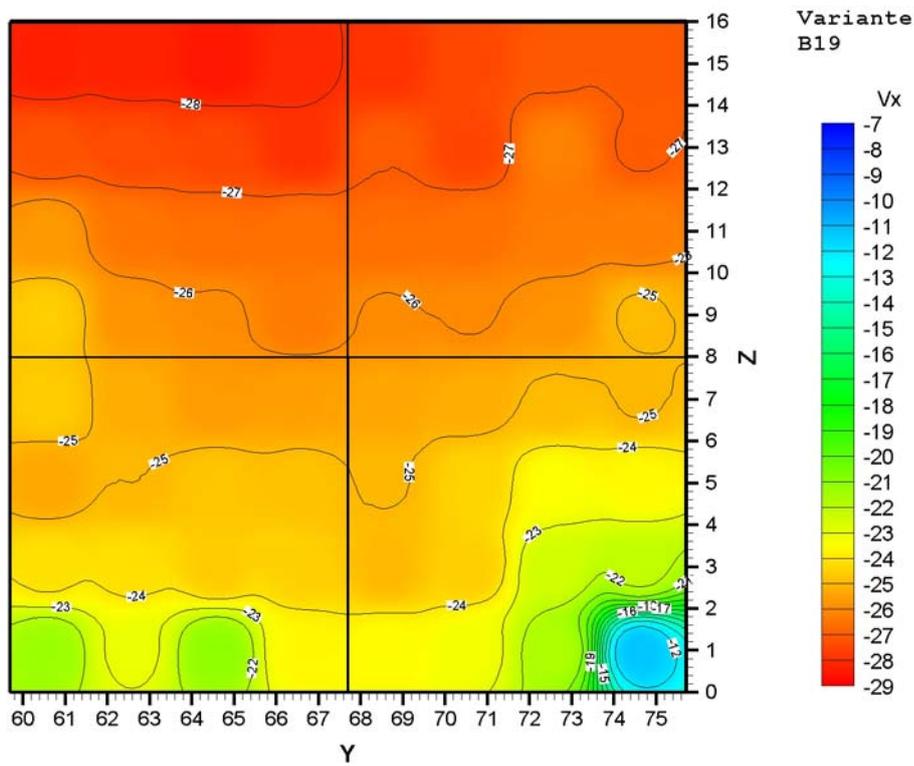


Abbildung 7.29.: Geschwindigkeitsverteilung im Einlauf der Turbine 2

Geschwindigkeitsverteilung der Turbine 2 - Variante B19

Gemessene Modellwerte

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-0,284	-0,283	-0,285	-0,281	-0,279	-0,275	-0,271	-0,271
2	-0,272	-0,274	-0,275	-0,280	-0,270	-0,276	-0,262	-0,270
3	-0,257	-0,265	-0,267	-0,266	-0,267	-0,266	-0,263	-0,263
4	-0,246	-0,258	-0,259	-0,263	-0,260	-0,260	-0,258	-0,249
5	-0,246	-0,252	-0,257	-0,256	-0,254	-0,253	-0,249	-0,250
6	-0,254	-0,250	-0,247	-0,248	-0,250	-0,244	-0,234	-0,236
7	-0,242	-0,242	-0,246	-0,245	-0,250	-0,245	-0,225	-0,222
8	-0,214	-0,231	-0,211	-0,236	-0,235	-0,233	-0,218	-0,113

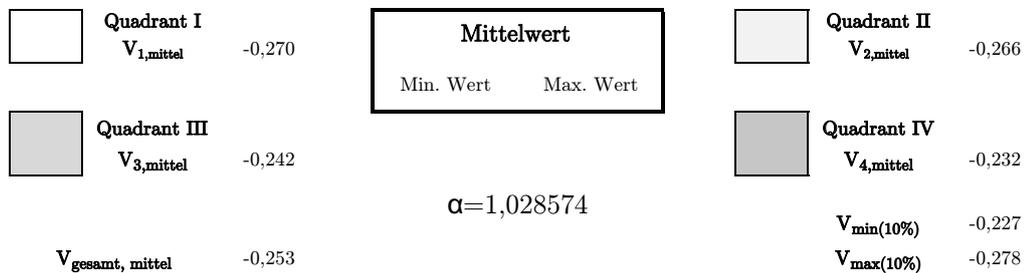


Tabelle 7.14.: Geschwindigkeitsverteilung vor der Turbine 2

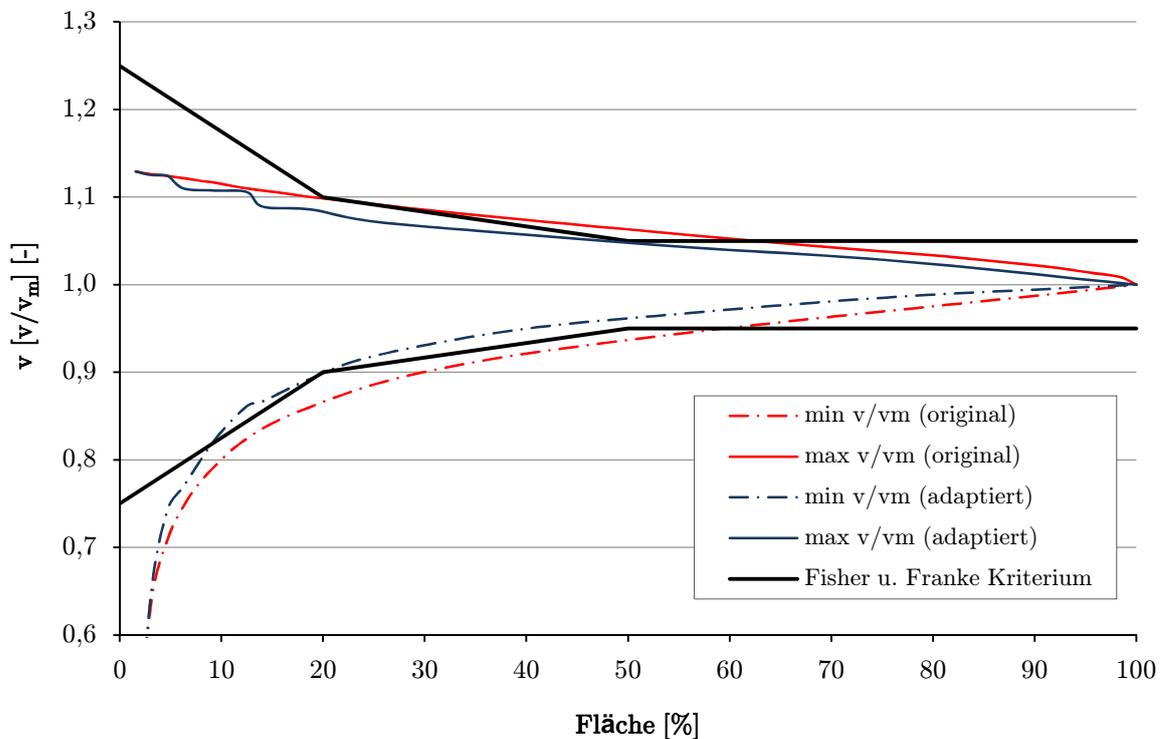


Abbildung 7.30.: Auswertung der Geschwindigkeitsverteilung vor der Turbine 2 nach Fisher und Franke

7.8. Variante B21

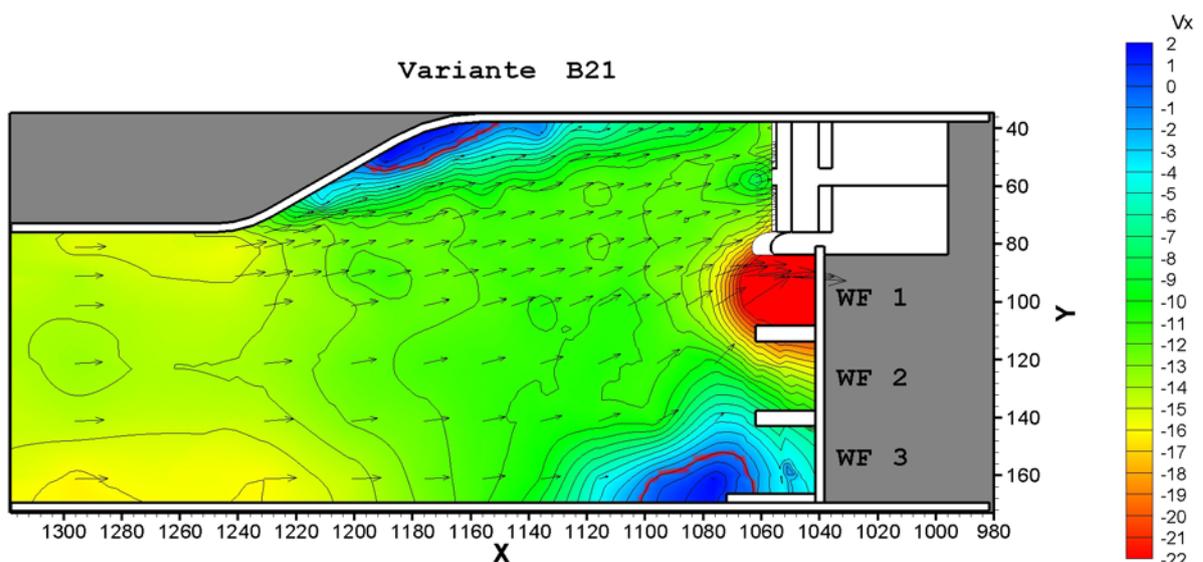
Oberwassermessung	Einfach	Trennpfeiler	Rouvé
Messung vor Rechenebene	Ja	Abfluss	$2 Q_a$
Messung vor Turbine 2	Ja	Oberwasserspiegel	± 0
Vorbodentyp	Flach	Unterwasserspiegel	± 0
seitlicher geneigter Vorboden	Ja	Hochwasserabfuhr	Segment im WF 1

Tabelle 7.15.: Basisdaten Variante B21

Die höchsten Geschwindigkeiten treten im Oberwasser vor dem Wehrfeld 1 wegen der Hochwasserabfuhr auf. Die Bucht wird nicht durchströmt (s. Abbildung 7.31).

Der Einfluss der Trennwand zwischen den Turbineneinläufen ist auch in der Rechenebene dieser Variante zu erkennen. Die gestörte Strömung aufgrund der seitlichen Rampe, im Bereich des Trennpfeilerfusspunktes, ist in diesem Fall nicht besonders ausgeprägt (s. Abbildung 7.32). Trotzdem ist in der Turbinenebene in der unteren Hälfte des Querschnittes auf der rechten Seite eine Geschwindigkeitsdifferenz zu erkennen, die auf die Anrampung zurückzuführen ist. Auch die Abnahme der Geschwindigkeit von oben nach unten ist bei dieser Variante vorhanden (s. Abbildung 7.33).

Wie die Geschwindigkeit vor der Turbine 2 verteilt ist, zeigt die Tabelle 7.16. Der α -Wert beträgt 1,023. Das Kriterium nach Fisher und Franke wird nach der adaptierten Auswertungsmethode, abgesehen von einem Flächenanteil von 5%, eingehalten. Werden die Werte nach der originalen Methode ausgewertet, wird das Kriterium bis zu einem Flächenanteil von 55% nicht erfüllt (s. Abbildung 7.34).

Abbildung 7.31.: Geschwindigkeitsverteilung Oberwasser $Z = 19,5$

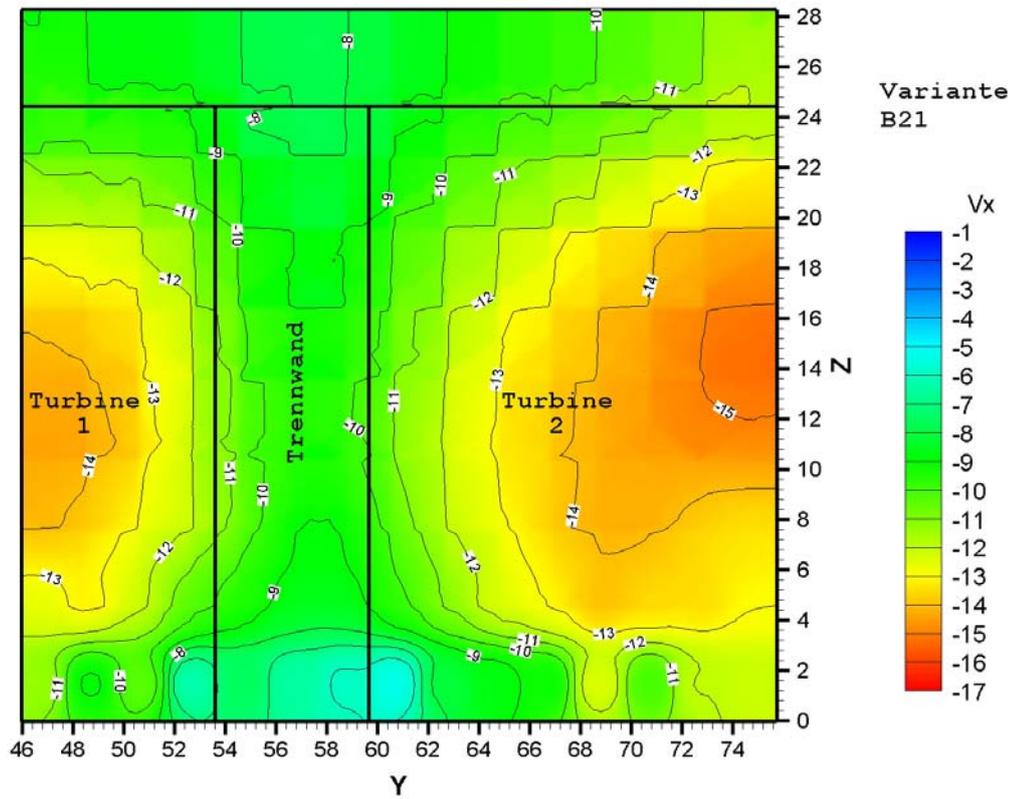


Abbildung 7.32.: Geschwindigkeitsverteilung vor der Rechenebene

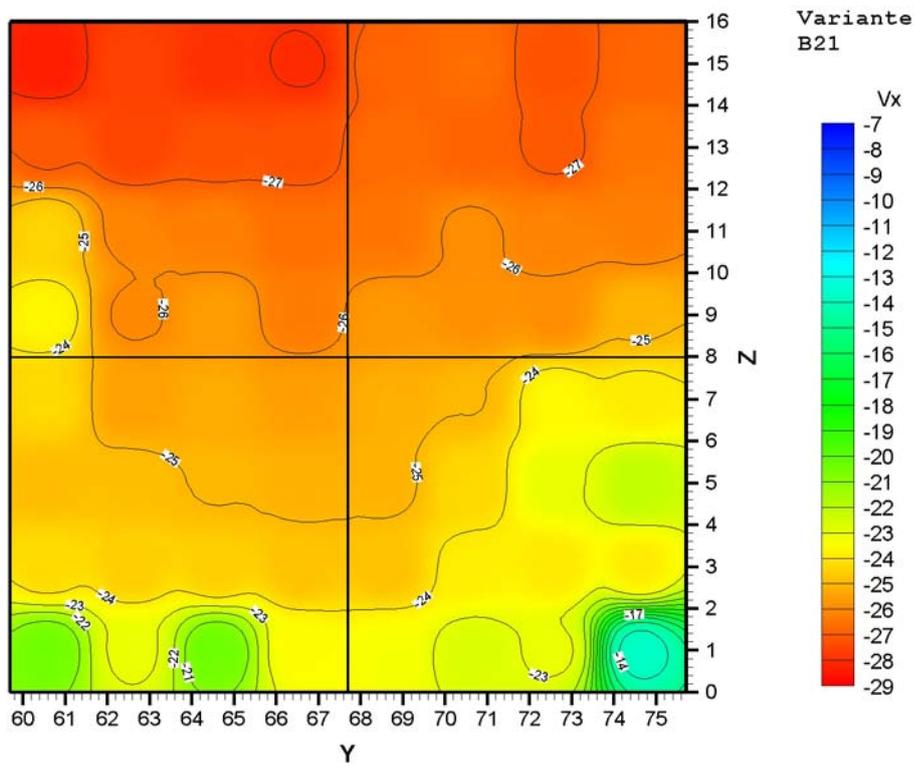


Abbildung 7.33.: Geschwindigkeitsverteilung im Einlauf der Turbine 2

Geschwindigkeitsverteilung der Turbine 2 - Variante B21

Gemessene Modellwerte

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-0,284	-0,276	-0,279	-0,281	-0,268	-0,267	-0,273	-0,268
2	-0,271	-0,275	-0,272	-0,272	-0,267	-0,268	-0,271	-0,264
3	-0,244	-0,261	-0,262	-0,266	-0,265	-0,259	-0,262	-0,262
4	-0,237	-0,261	-0,256	-0,263	-0,257	-0,259	-0,259	-0,251
5	-0,243	-0,255	-0,253	-0,256	-0,252	-0,250	-0,236	-0,239
6	-0,249	-0,249	-0,250	-0,252	-0,251	-0,244	-0,230	-0,222
7	-0,243	-0,245	-0,245	-0,248	-0,248	-0,238	-0,240	-0,239
8	-0,204	-0,231	-0,204	-0,235	-0,234	-0,227	-0,231	-0,137

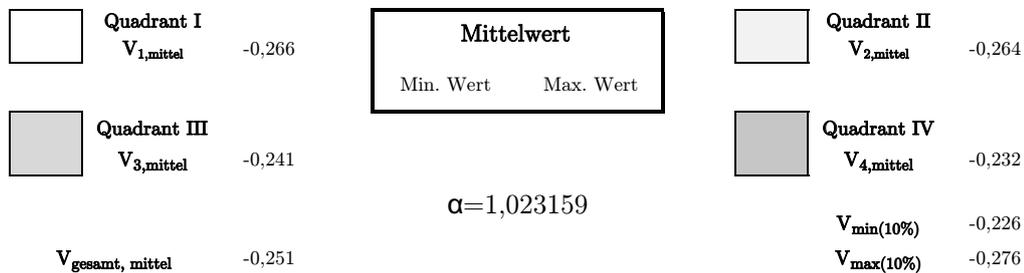


Tabelle 7.16.: Geschwindigkeitsverteilung vor der Turbine 2

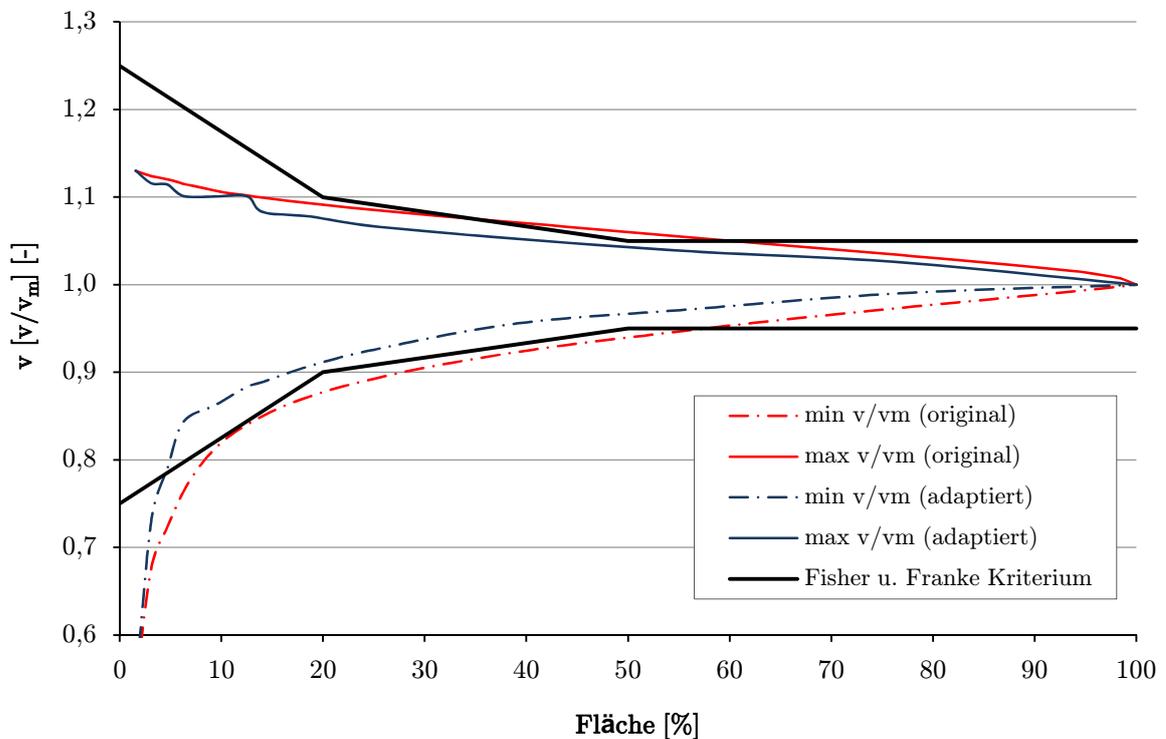


Abbildung 7.34.: Auswertung der Geschwindigkeitsverteilung vor der Turbine 2 nach Fisher und Franke

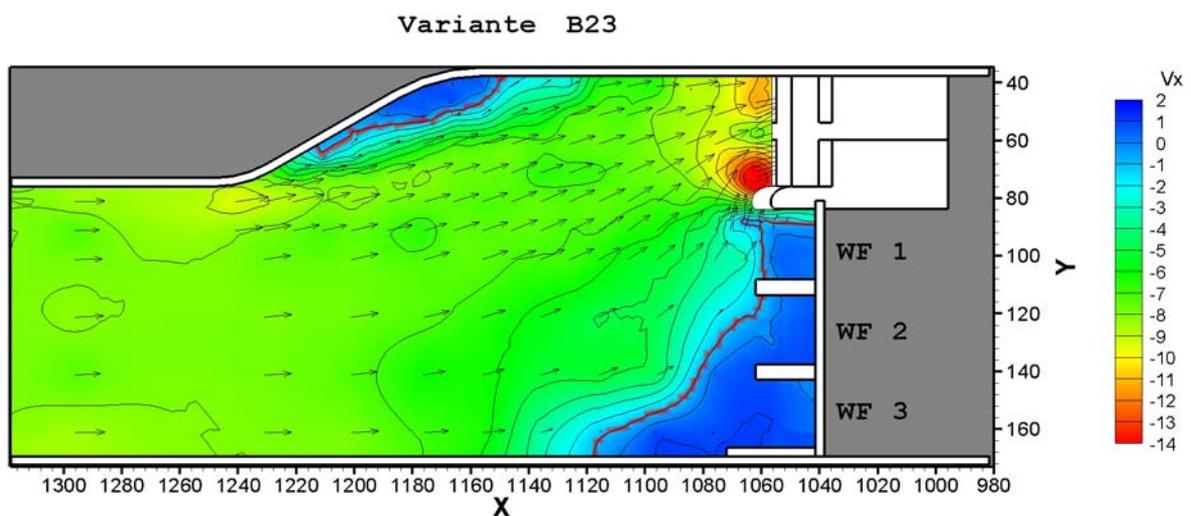
7.9. Variante B23

Oberwassermessung	Einfach	Trennpfeiler	Rouv�
Messung vor Rechenebene	Ja	Abfluss	Q_a
Messung vor Turbine 2	Ja	Oberwasserspiegel	- 2
Vorbodentyp	Flach	Unterswasserspiegel	± 0
seitlicher geneigter Vorboden	Ja	Hochwasserabfuhr	Nein

Tabelle 7.17.: Basisdaten Variante B23

Wie bei allen bisher beschriebenen Varianten, löst sich die Strömung in der Bucht ab (s. Abbildung 7.35). In der Rechenebene erkennt man auch im vorliegenden Fall die Einflüsse der Trennwand. Der seitliche Vorboden beeinflusst die Strömung bei dieser Variante nicht sonderlich, zumal sich die vom Trennpfeiler beschleunigte Strömung vor dem Einlauf der Turbine 2 über die gesamte Höhe erstreckt (s. Abbildung 7.36). Die Geschwindigkeitsverteilung der Turbine 2 ist aber über den gesamten Querschnitt nicht gleichm sig. Es sind große Geschwindigkeitsdifferenzen an der wehrfeldseitigen Wand und am Boden zu erkennen (s. Abbildung 7.37). Die am Trennpfeiler beschleunigte Strömung löst sich im Turbineneinlauf an der rechten Wandseite ab. Die niedrigen Geschwindigkeiten am Boden sind auf der linken Seite auf den sich durchziehenden Einfluss der Trennwand zurückzuführen. Auf der rechten Seite ist aufgrund von der Gr o e der Geschwindigkeitsdifferenz jedoch von Messausreißern auszugehen, da der seitliche Vorboden wie oben beschrieben wenig Einfluss hat.

Der α - Wert ergibt sich aus den Geschwindigkeiten der Tabelle 7.18 mit 1,078. Die Grenzbedingung nach Fisher und Franke wird nach der adaptierten und der originalen Auswertungsmethode bis zu einem Flächenanteil von 80% nicht eingehalten.

Abbildung 7.35.: Geschwindigkeitsverteilung Oberwasser $Z = 19,5$

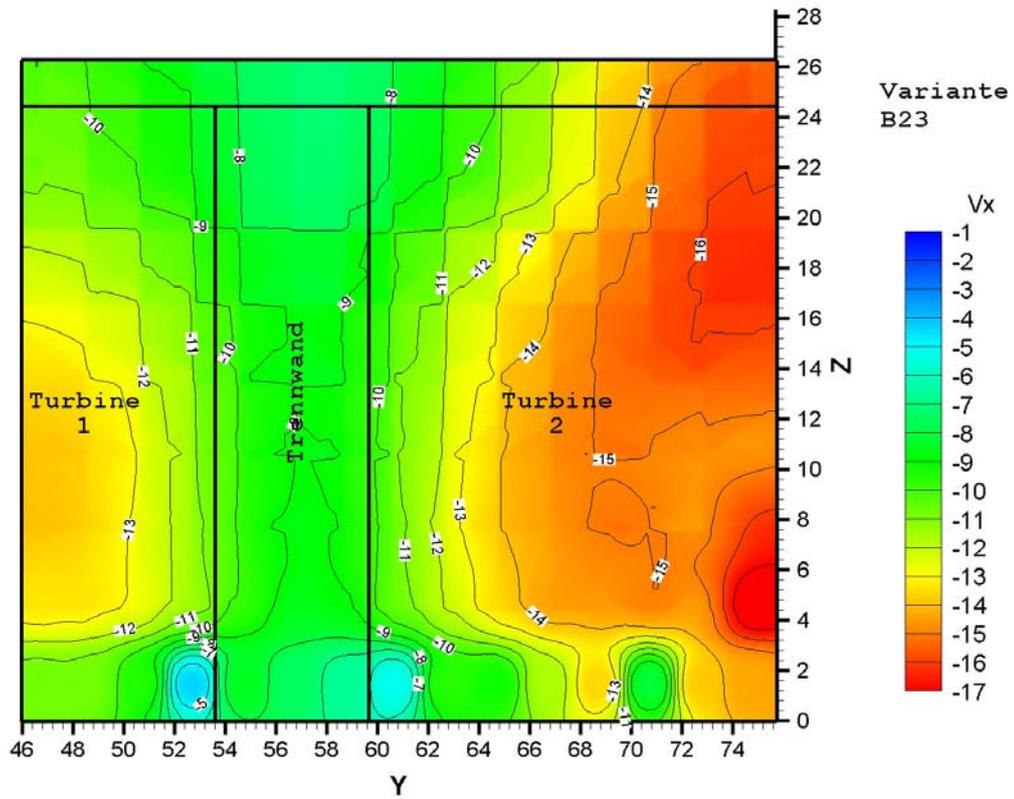


Abbildung 7.36.: Geschwindigkeitsverteilung vor der Rechenebene

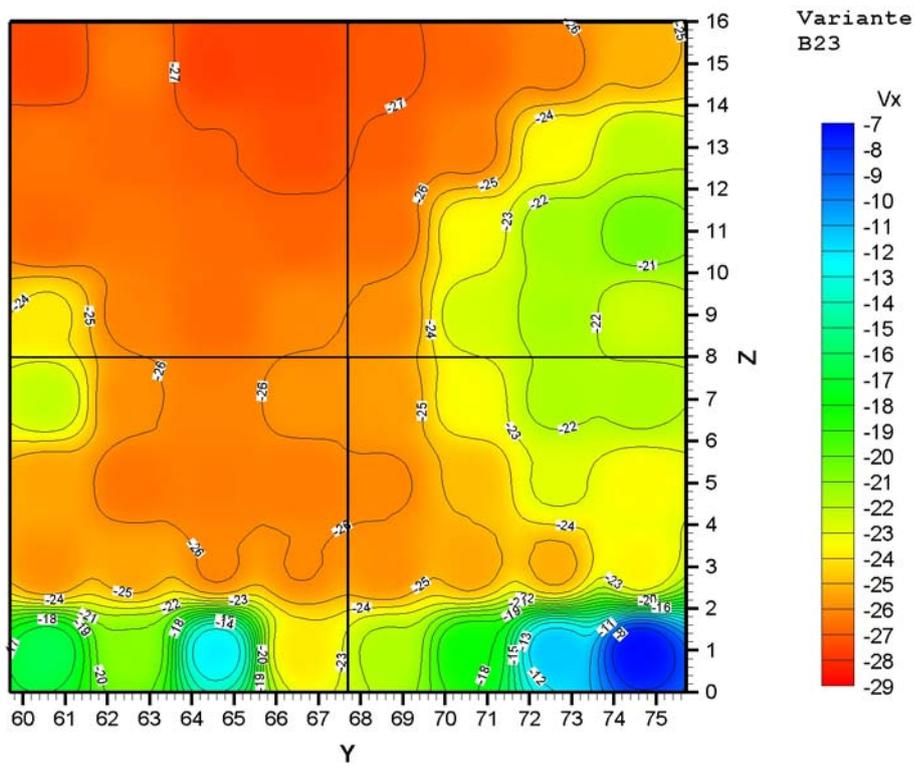


Abbildung 7.37.: Geschwindigkeitsverteilung im Einlauf der Turbine 2

Geschwindigkeitsverteilung der Turbine 2 - Variante B23

Gemessene Modellwerte

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-0,275	-0,264	-0,277	-0,276	-0,271	-0,269	-0,262	-0,252
2	-0,265	-0,267	-0,270	-0,273	-0,270	-0,262	-0,235	-0,221
3	-0,268	-0,265	-0,267	-0,269	-0,266	-0,234	-0,215	-0,205
4	-0,239	-0,262	-0,267	-0,261	-0,259	-0,226	-0,217	-0,225
5	-0,222	-0,259	-0,262	-0,258	-0,257	-0,234	-0,218	-0,218
6	-0,255	-0,265	-0,263	-0,263	-0,261	-0,249	-0,229	-0,235
7	-0,259	-0,255	-0,261	-0,260	-0,259	-0,254	-0,252	-0,237
8	-0,164	-0,209	-0,123	-0,239	-0,218	-0,181	-0,113	-0,072

<div style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px; margin: 0 auto;"></div> <p>Quadrant I $V_{1,mittel}$ -0,266</p>	<div style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px; margin: 0 auto;"></div> <p>Mittelwert Min. Wert Max. Wert</p>	<div style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px; margin: 0 auto;"></div> <p>Quadrant II $V_{2,mittel}$ -0,243</p>
<div style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px; margin: 0 auto;"></div> <p>Quadrant III $V_{3,mittel}$ -0,239</p>	<p>$\alpha=1,077644$</p>	<div style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px; margin: 0 auto;"></div> <p>Quadrant IV $V_{4,mittel}$ -0,218</p>
<p>$V_{gesamt, mittel}$ -0,242</p>		<p>$V_{min(10\%)}$ -0,217</p> <p>$V_{max(10\%)}$ -0,266</p>

Tabelle 7.18.: Geschwindigkeitsverteilung vor der Turbine 2

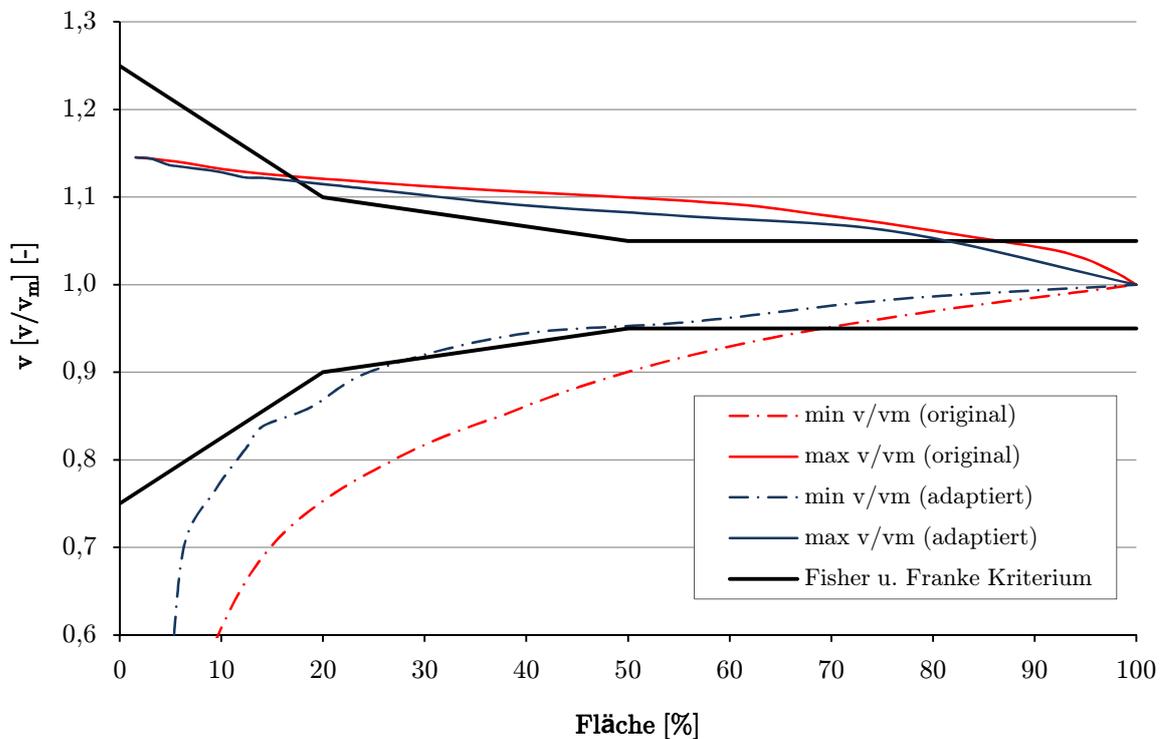


Abbildung 7.38.: Auswertung der Geschwindigkeitsverteilung vor der Turbine 2 nach Fisher und Franke

7.10. Variante B25

Oberwassermessung	Detailliert	Trennpfeiler	Halbkreis
Messung vor Rechenebene	Ja	Abfluss	Q_a
Messung vor Turbine 2	Ja	Oberwasserspiegel	± 0
Vorbodentyp	Steil	Unterswasserspiegel	± 0
seitlicher geneigter Vorboden	Ja	Hochwasserabfuhr	Nein

Tabelle 7.19.: Basisdaten Variante B25

Bei der Anströmung im Oberwasser ist im Gegensatz zu den bisher beschriebenen Varianten zu erkennen, dass sich die Strömung in der Bucht, aufgrund der näheren Anordnung zum Krafthaus, nicht ablöst. Diese vollkommene Durchströmung der Bucht ist in allen drei gemessene Höhenlagen zu sehen (s. Abbildung 7.39 bis 7.41).

Zu beobachten ist auch, dass der Totraum vor den geschlossenen Wehrfeldern in der mittleren Höhenlage $z = 19,5 \text{ cm}$ (s. Abbildung 7.40) kleiner ist als bei der oberen und unteren Lage.

In der Rechenebene zeigen sich die typischen drei Bereiche. Vor dem Einlauf der Turbine 2 ist der Bereich der hohen Geschwindigkeiten zum Trennpfeiler hin verschoben, aufgrund der vom Trennpfeiler beschleunigten Strömung. Die Verteilung der Geschwindigkeit am Boden ist in dieser Ebene nicht dargestellt, da die Messung dort aufgrund des steilen Vorbodens nicht möglich war (s. Abbildung 7.42). Im Verlauf zur Turbine 2 hin verschiebt sich der Bereich mit der hohen Geschwindigkeit auf die linke Seite hin und die am Trennpfeiler beschleunigte Strömung löst sich an der rechten Wand ab. Die großen Geschwindigkeitsdifferenzen am Boden sind auf den steilen Vorboden zurückzuführen, der eine zu plötzliche Aufweitung des Durchflussquerschnittes darstellt und zu einer Ablösung der Strömung führt (s. Abbildung 7.43).

Der α – Wert ergibt sich aus den gemessenen Geschwindigkeiten im Einlauf der Turbine 2 mit 1,049 (s. Abbildung 7.20). Das Kriterium nach Fisher und Franke wird im Bezug auf das Verhältnis der maximalen zur mittleren Geschwindigkeit nach der adaptierten und der originalen Auswertungsmethode zwischen einem Flächenanteil von 20% und 80% nicht eingehalten. Die Verhältnisse von minimaler zu mittlerer Geschwindigkeit liegen nach der adaptierten Auswertung nur bis 5% der anteiligen Fläche außerhalb der Grenzbedingung, wobei die originale Auswertung das Kriterium nach Fisher und Franke bis zu einem Anteil von 60% nicht einhält (s. Abbildung 7.44).

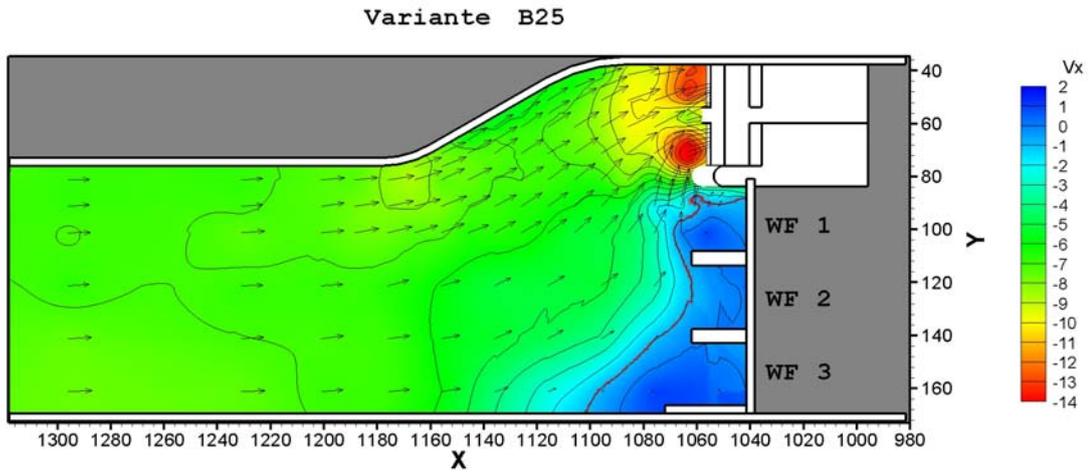


Abbildung 7.39.: Geschwindigkeitsverteilung Oberwasser $Z = 13,5$

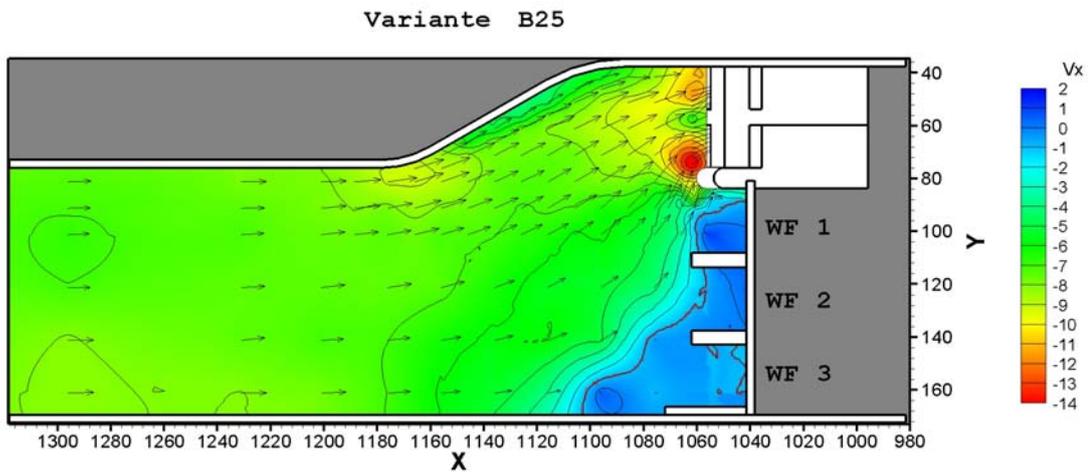


Abbildung 7.40.: Geschwindigkeitsverteilung Oberwasser $Z = 19,5$

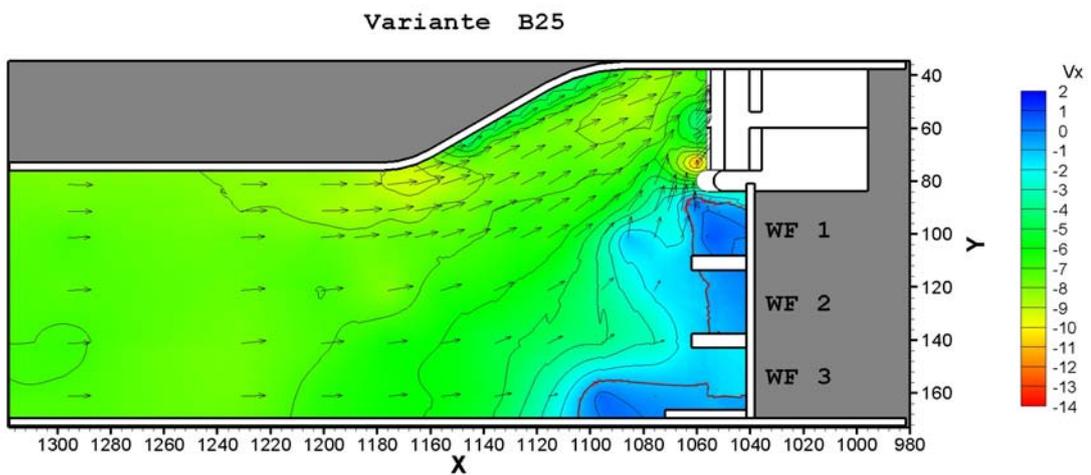


Abbildung 7.41.: Geschwindigkeitsverteilung Oberwasser $Z = 24,5$

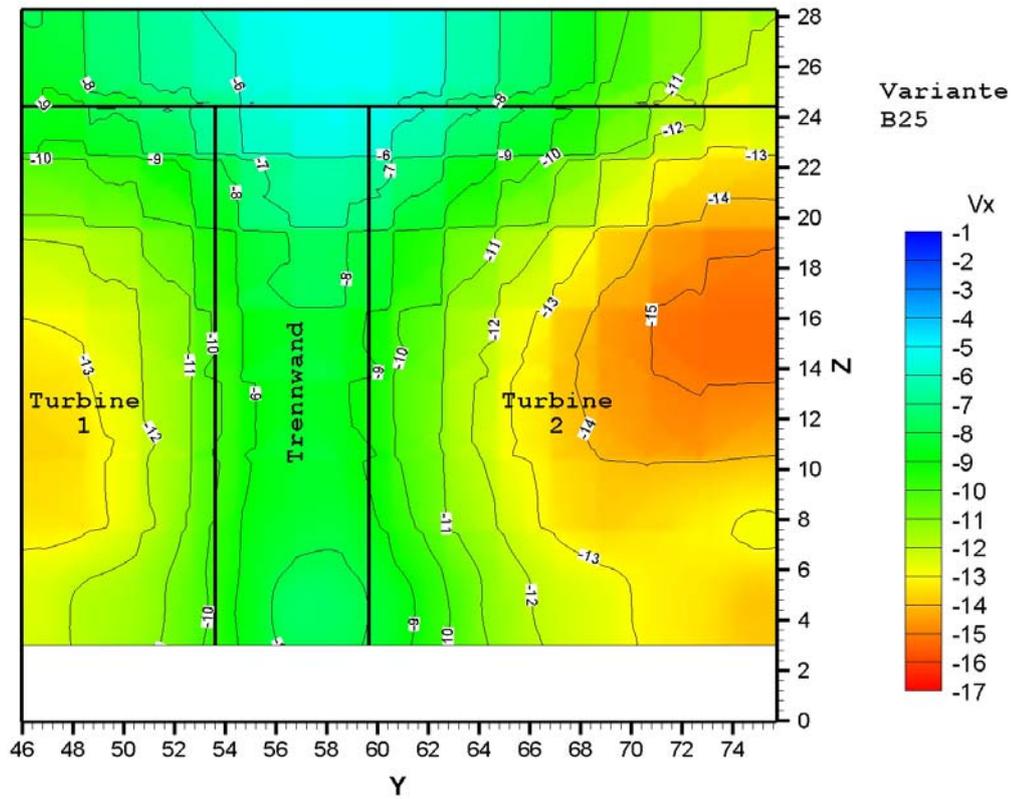


Abbildung 7.42.: Geschwindigkeitsverteilung vor der Rechenebene

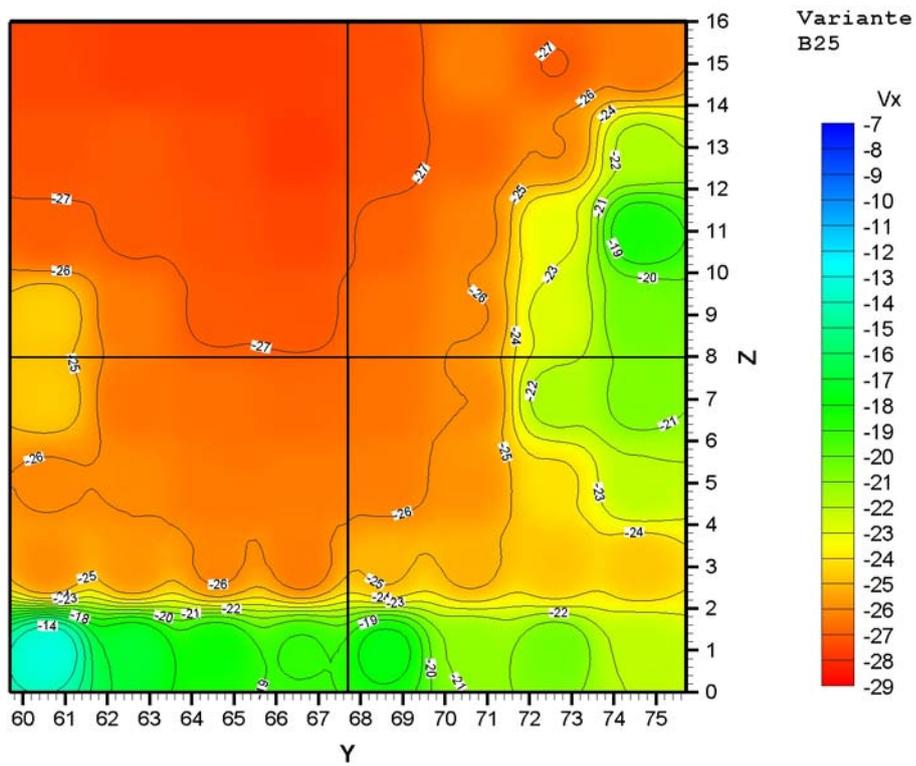


Abbildung 7.43.: Geschwindigkeitsverteilung im Einlauf der Turbine 2

Geschwindigkeitsverteilung der Turbine 2 - Variante B25

Gemessene Modellwerte

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-0,275	-0,277	-0,278	-0,277	-0,273	-0,262	-0,270	-0,264
2	-0,253	-0,296	-0,255	-0,290	-0,261	-0,293	-0,245	-0,291
3	-0,254	-0,291	-0,242	-0,286	-0,247	-0,291	-0,258	-0,288
4	-0,270	-0,271	-0,273	-0,278	-0,273	-0,268	-0,260	-0,218
5	-0,245	-0,264	-0,271	-0,272	-0,266	-0,260	-0,228	-0,205
6	-0,261	-0,261	-0,264	-0,264	-0,262	-0,258	-0,241	-0,221
7	-0,260	-0,258	-0,261	-0,264	-0,251	-0,252	-0,247	-0,247
8	-0,132	-0,170	-0,181	-0,189	-0,177	-0,211	-0,204	-0,221

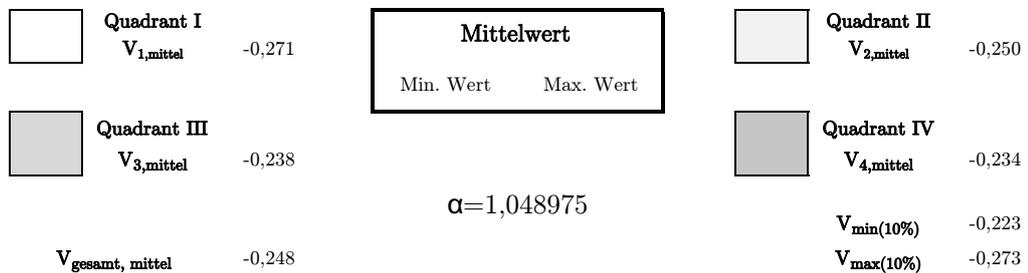


Tabelle 7.20.: Geschwindigkeitsverteilung vor der Turbine 2

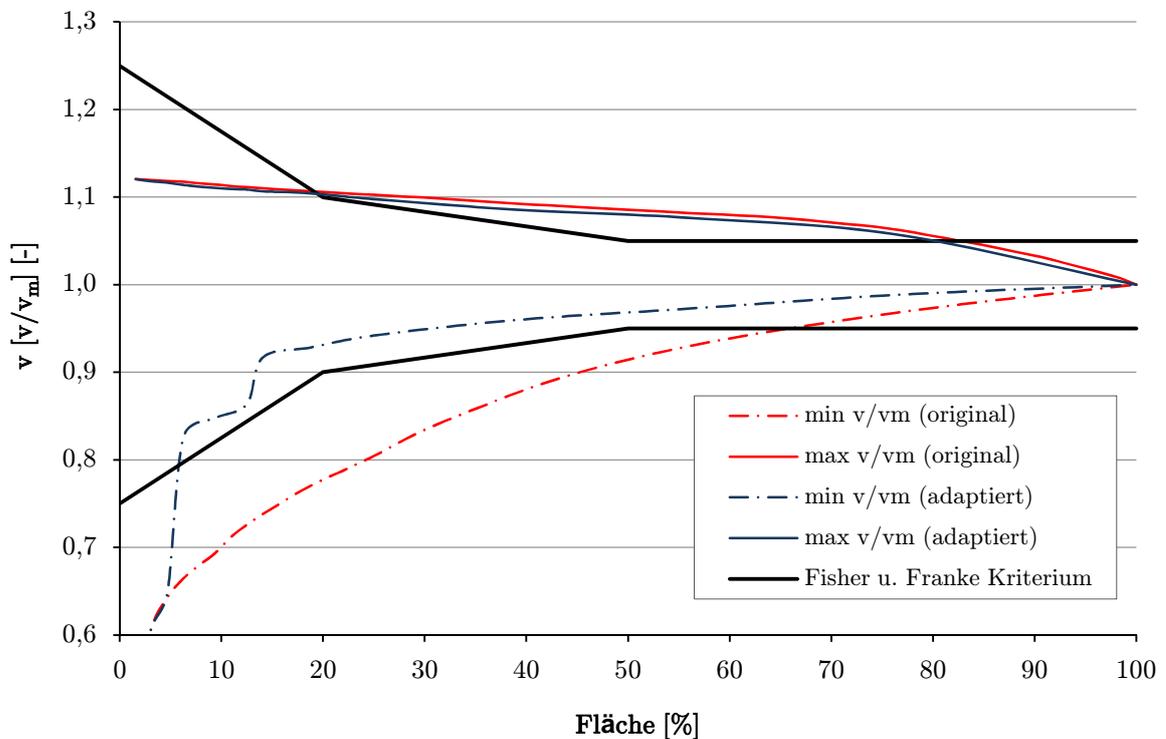


Abbildung 7.44.: Auswertung der Geschwindigkeitsverteilung vor der Turbine 2 nach Fisher und Franke

7.11. Variante B27

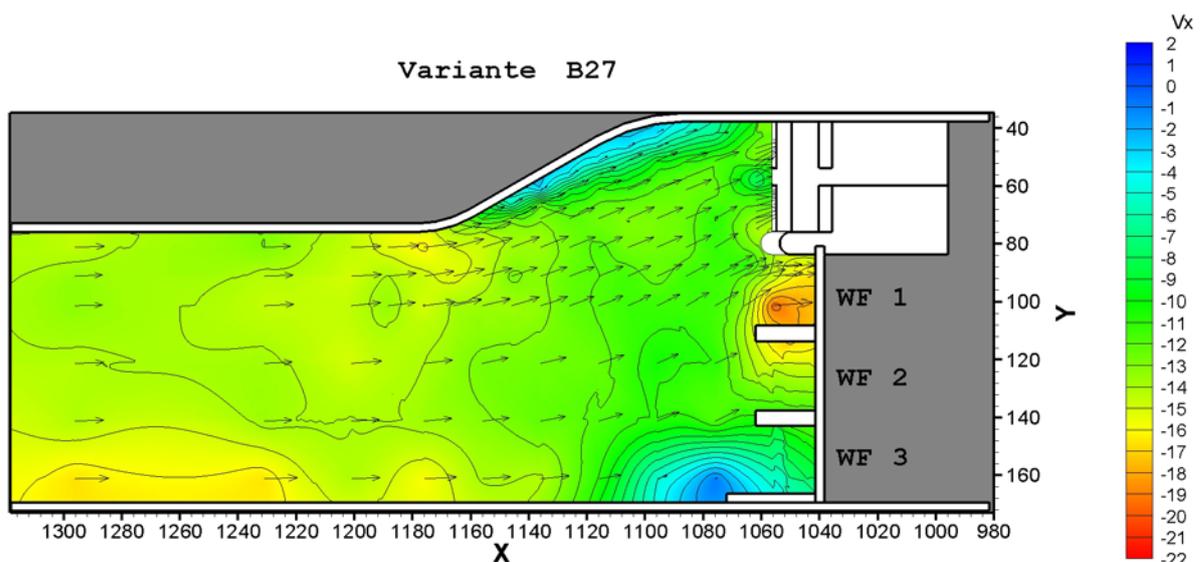
Oberwassermessung	Einfach	Trennpfeiler	Halbkreis
Messung vor Rechenebene	Ja	Abfluss	$2 Q_a$
Messung vor Turbine 2	Ja	Oberwasserspiegel	± 0
Vorbodentyp	Steil	Unterwasserspiegel	± 0
seitlicher geneigter Vorboden	Ja	Hochwasserabfuhr	Klappe im WF 1 und 2

Tabelle 7.21.: Basisdaten Variante B27

Durch die Hochwasserabfuhr über die Wehrfelder 1 und 2 erkennt man im Oberwasser, dass es in der Bucht zu einer leichten Verzögerung der Strömung kommt (s. Abbildung 7.45).

In der Rechenebene erkennt man wieder die Bereiche mit den hohen Geschwindigkeiten vor den Einläufen zu den Turbinen und den Bereich vor der Trennwand, wo aufgrund des Pfeilerstaus niedrigere Geschwindigkeiten auftreten. Wie bei allen vorherigen Versuchen ist das Feld der hohen Geschwindigkeiten vor dem Einlauf zur Turbine 2 zum Trennpfeiler hin verschoben. Dieses Feld wird in Bodennähe durch einen Bereich mit niedrigeren Geschwindigkeiten (aufgrund von Ablösungen aus dem seitlichen Vorboden) unterbrochen (s. Abbildung 7.46). Diese Ablösung zieht sich bis zur Turbinenebene durch. Zudem erkennt man in dieser Ebene auch wieder die Ablösungen am Boden durch den steilen Vorboden. Ansonsten nimmt die Geschwindigkeit von oben nach unten in parallelen Schichtungen ab (s. Abbildung 7.47).

Die Tabelle 7.22 zeigt die zugehörige Geschwindigkeitsverteilung in der Turbine 2 mit dem daraus folgenden α – Wert von 1,016. Die Grenzbedingung von Fisher und Franke wird nach der adaptierten Auswertungsmethode eingehalten. Die Auswertung nach der originalen Methode ergibt einen Flächenanteil von 20% bis 50% außerhalb der Bedingung (s. Abbildung 7.48).

Abbildung 7.45.: Geschwindigkeitsverteilung Oberwasser $Z = 19,5$

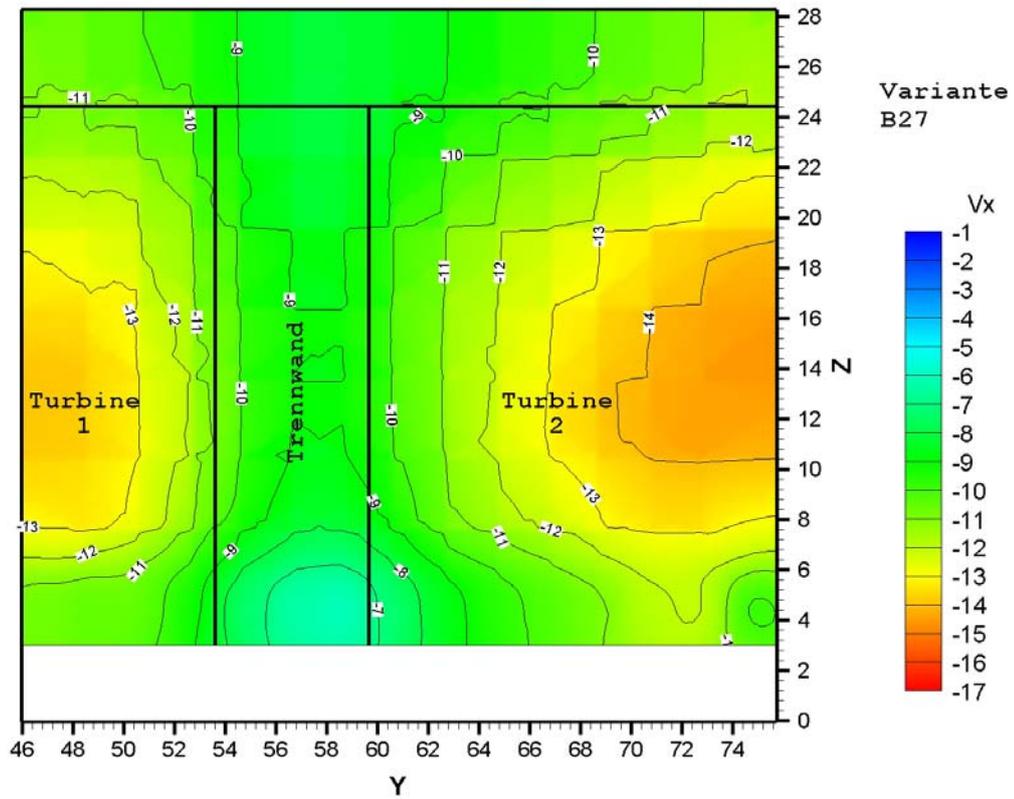


Abbildung 7.46.: Geschwindigkeitsverteilung vor der Rechenebene

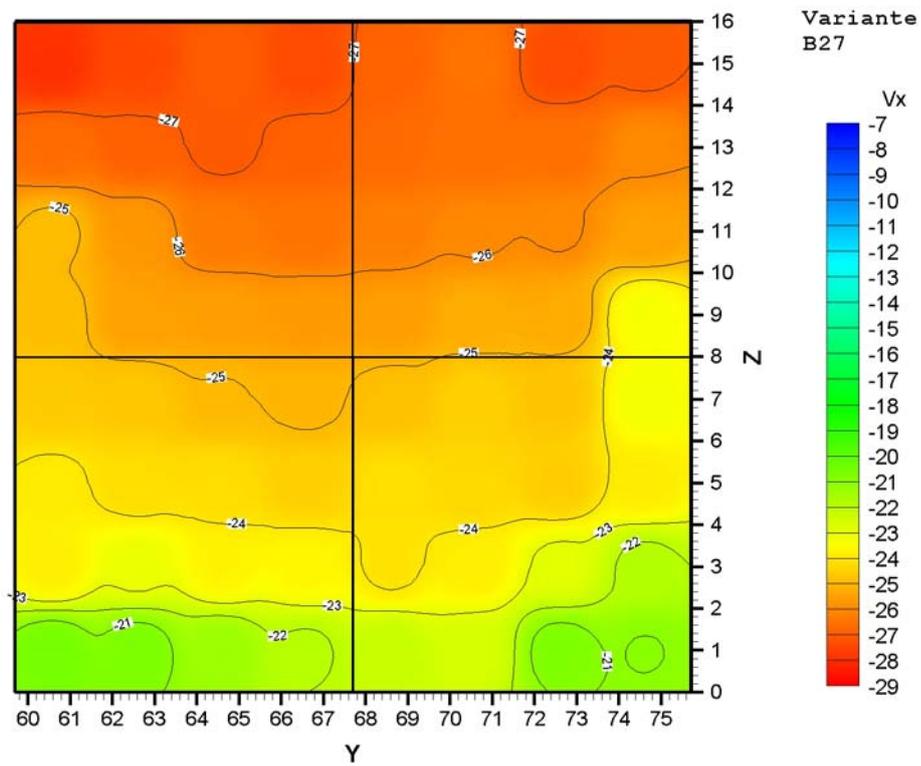


Abbildung 7.47.: Geschwindigkeitsverteilung im Einlauf der Turbine 2

Geschwindigkeitsverteilung der Turbine 2 - Variante B27

Gemessene Modellwerte

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-0,279	-0,274	-0,270	-0,274	-0,268	-0,265	-0,274	-0,271
2	-0,267	-0,269	-0,271	-0,269	-0,267	-0,266	-0,266	-0,260
3	-0,249	-0,257	-0,264	-0,265	-0,263	-0,261	-0,260	-0,255
4	-0,249	-0,256	-0,256	-0,257	-0,256	-0,253	-0,253	-0,233
5	-0,246	-0,247	-0,250	-0,251	-0,248	-0,245	-0,248	-0,232
6	-0,239	-0,242	-0,242	-0,245	-0,242	-0,244	-0,246	-0,239
7	-0,238	-0,231	-0,237	-0,237	-0,241	-0,238	-0,229	-0,219
8	-0,205	-0,207	-0,214	-0,219	-0,223	-0,226	-0,207	-0,210

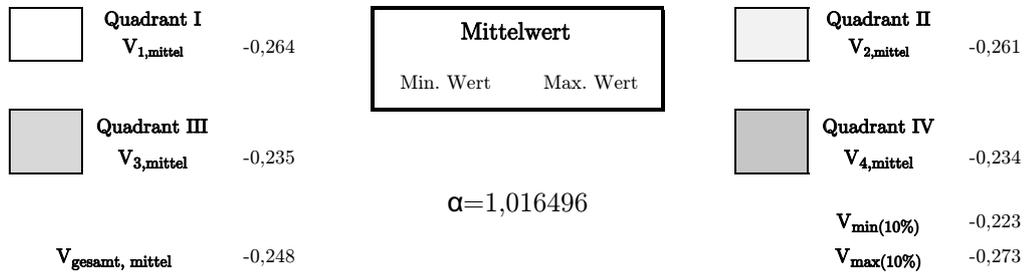


Tabelle 7.22.: Geschwindigkeitsverteilung vor der Turbine 2

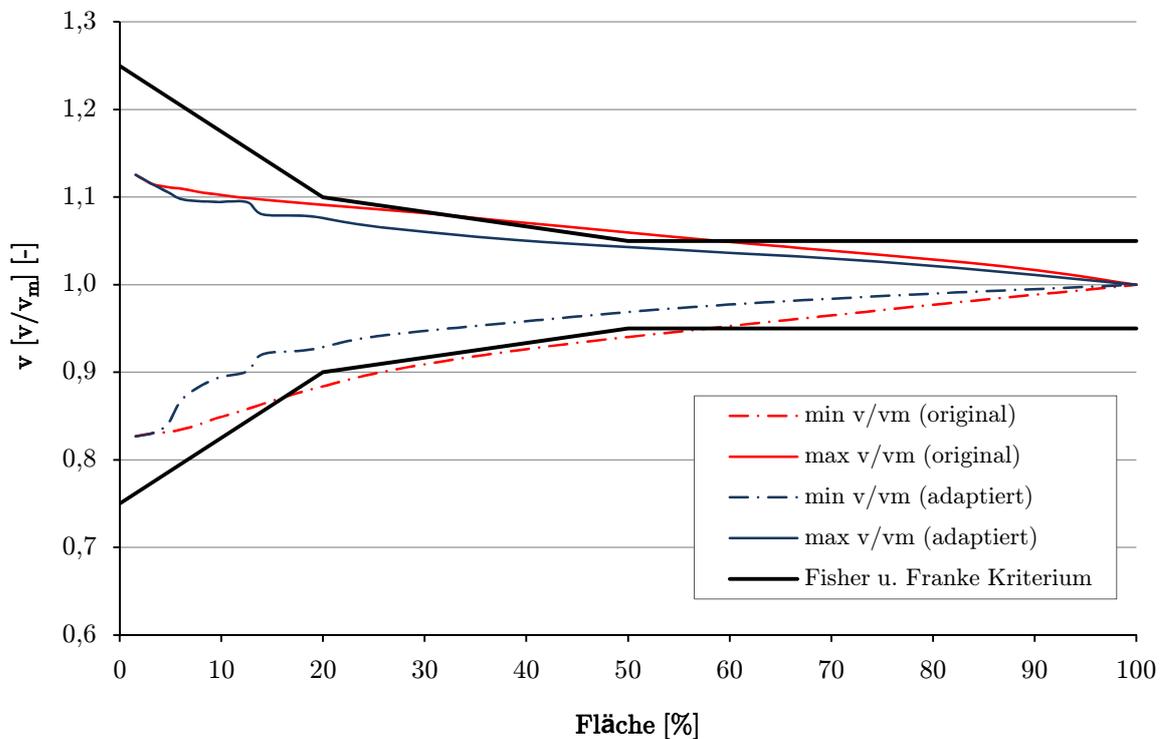


Abbildung 7.48.: Auswertung der Geschwindigkeitsverteilung vor der Turbine 2 nach Fisher und Franke

7.12. Variante B29

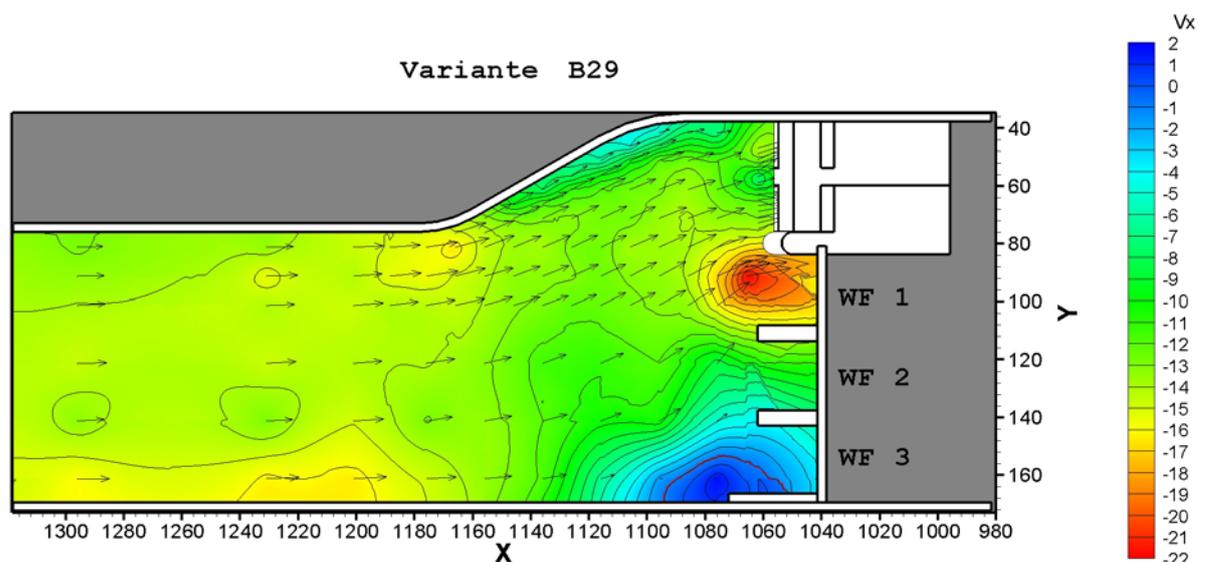
Oberwassermessung	Einfach	Trennpfeiler	Halbkreis
Messung vor Rechenebene	Ja	Abfluss	$2 Q_a$
Messung vor Turbine 2	Ja	Oberwasserspiegel	± 0
Vorbodentyp	Steil	Unterwasserspiegel	± 0
seitlicher geneigter Vorboden	Ja	Hochwasserabfuhr	Segment im WF 1

Tabelle 7.23.: Basisdaten Variante B29

In dieser Variante erfolgt die Abfuhr des Hochwassers über das Wehrfeld 1. Deshalb treten vor dem Wehrfeld 1 die höchsten Geschwindigkeiten im Oberwasser auf. Die Bucht wird nur in einem sehr kleinen Feld nicht vollkommen durchströmt (s. Abbildung 7.49).

Der Einfluss der Trennwand zwischen den Turbineneinläufen ist auch in der Rechenebene dieser Variante zu erkennen. Die gestörte Strömung aufgrund der seitlichen Rampe, im Bereich des Trennpfeilerfusspunktes, ist in diesem Fall nur schwach zu erkennen. Dies beruht auch auf der Tatsache, dass nicht der gesamte Querschnitt bis zum Boden messbar war und daher auch nicht dargestellt werden konnte (s. Abbildung 7.50). Die Ablösungen an der Rampe sind allerdings auch noch in der Turbinenebene sichtbar, da sich der Bereich mit den niedrigen Geschwindigkeiten am Boden (durch den steilen Vorboden), auf der rechten Seite weiter nach oben zieht. Ansonsten ist in dieser Ebene wieder die parallele Abnahme der Geschwindigkeit von oben nach unten zu erkennen (s. Abbildung 7.51).

Wie die Geschwindigkeit vor der Turbine 2 verteilt ist, zeigt die Tabelle 7.24. Der sich nach diesen Werten ergebende α – Wert beträgt 1,017. Das Kriterium nach Fisher und Franke wird nach der adaptierten Auswertungsmethode eingehalten. Bei der Auswertung nach der originalen Methode wird das Kriterium von einem Flächenanteil, der zwischen 15% und 55% liegt, geringfügig nicht erfüllt (s. Abbildung 7.52).

Abbildung 7.49.: Geschwindigkeitsverteilung Oberwasser $Z = 19,5$

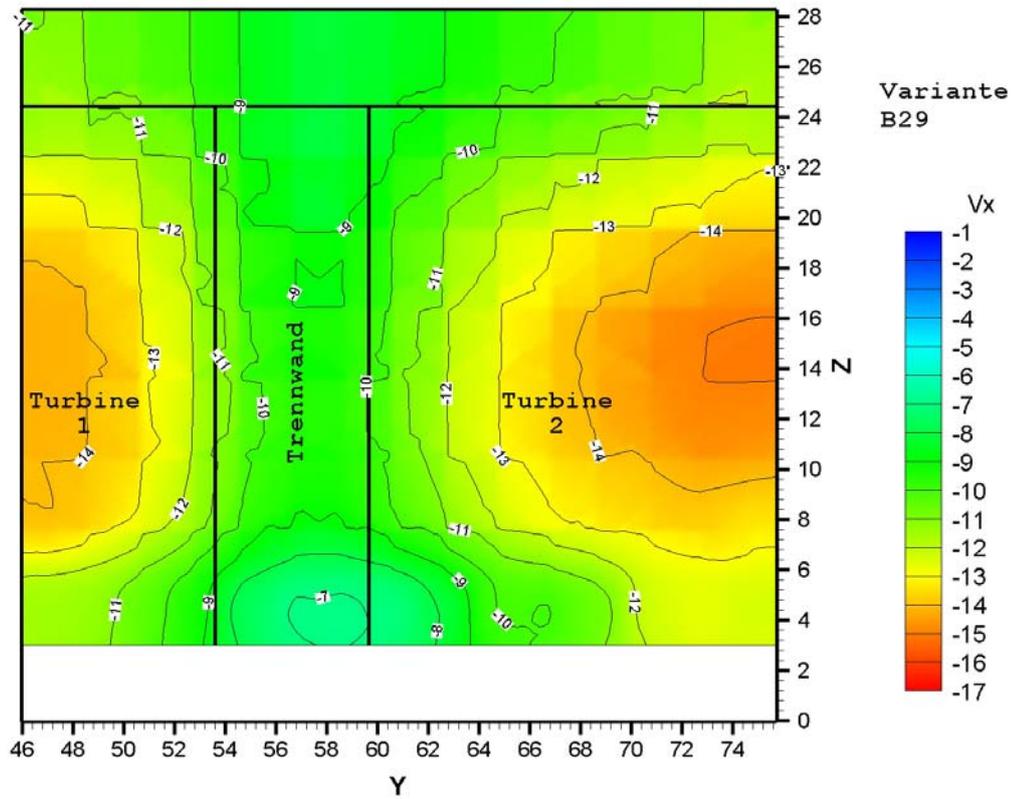


Abbildung 7.50.: Geschwindigkeitsverteilung vor der Rechenebene

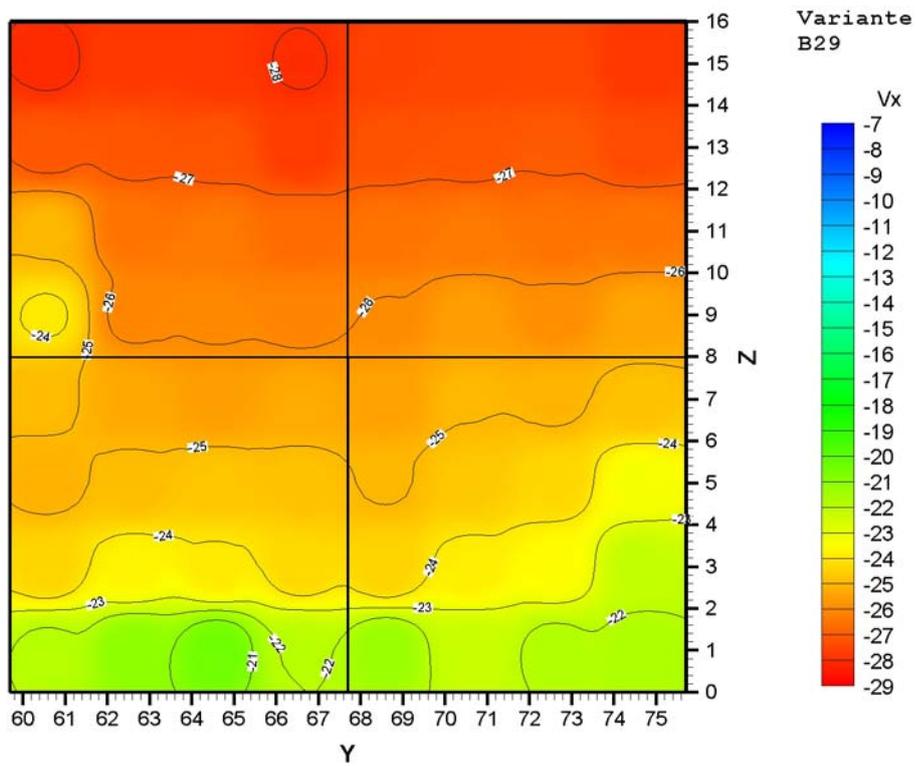


Abbildung 7.51.: Geschwindigkeitsverteilung im Einlauf der Turbine 2

Geschwindigkeitsverteilung der Turbine 2 - Variante B29

Gemessene Modellwerte

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-0,281	-0,278	-0,279	-0,280	-0,276	-0,275	-0,275	-0,278
2	-0,262	-0,259	-0,255	-0,263	-0,284	-0,283	-0,287	-0,291
3	-0,250	-0,265	-0,264	-0,267	-0,265	-0,264	-0,265	-0,265
4	-0,239	-0,261	-0,261	-0,262	-0,260	-0,256	-0,259	-0,254
5	-0,249	-0,253	-0,256	-0,253	-0,255	-0,250	-0,251	-0,248
6	-0,252	-0,249	-0,247	-0,248	-0,250	-0,247	-0,244	-0,233
7	-0,244	-0,237	-0,239	-0,243	-0,245	-0,238	-0,235	-0,222
8	-0,219	-0,211	-0,204	-0,220	-0,213	-0,223	-0,218	-0,218

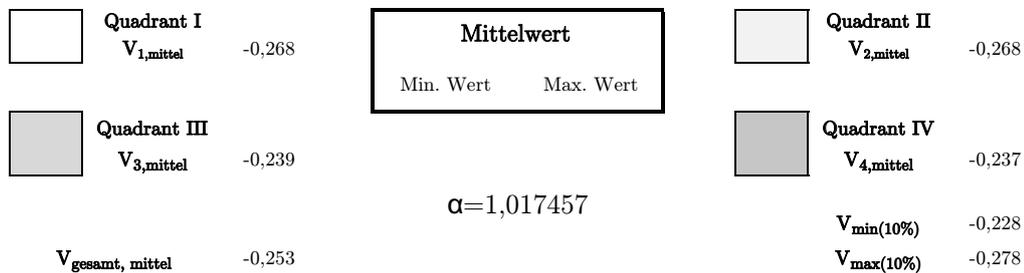


Tabelle 7.24.: Geschwindigkeitsverteilung vor der Turbine 2

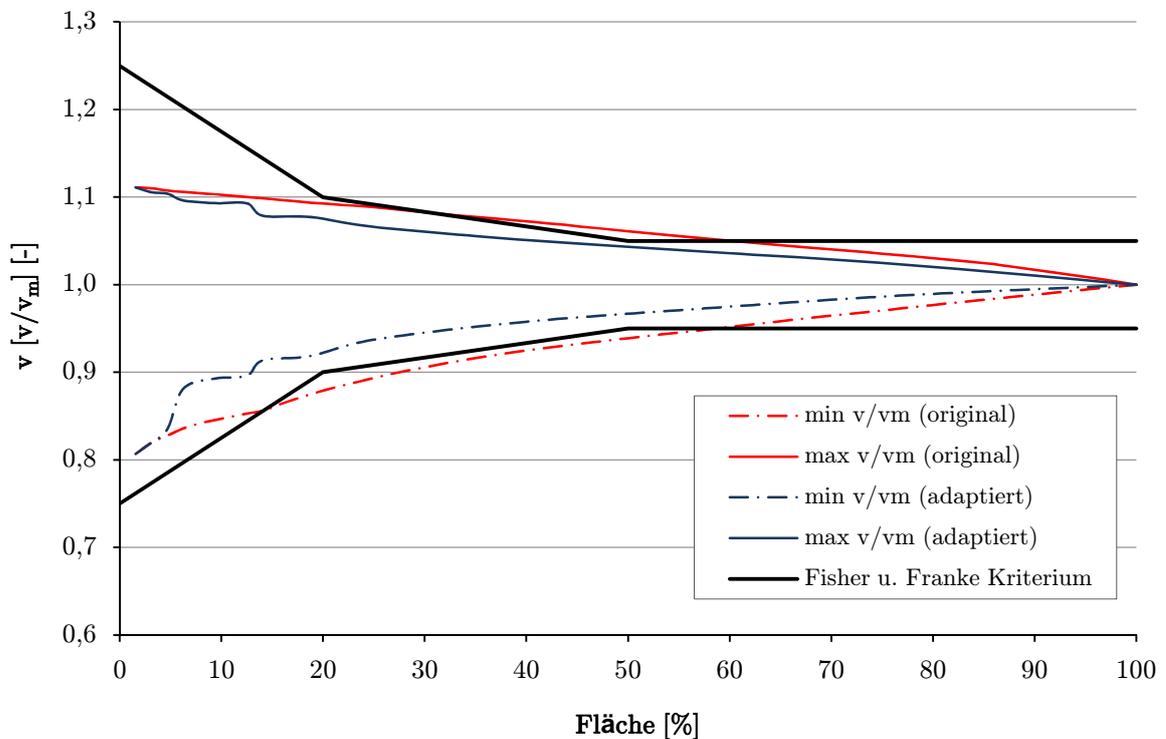


Abbildung 7.52.: Auswertung der Geschwindigkeitsverteilung vor der Turbine 2 nach Fisher und Franke

7.13. Variante B31

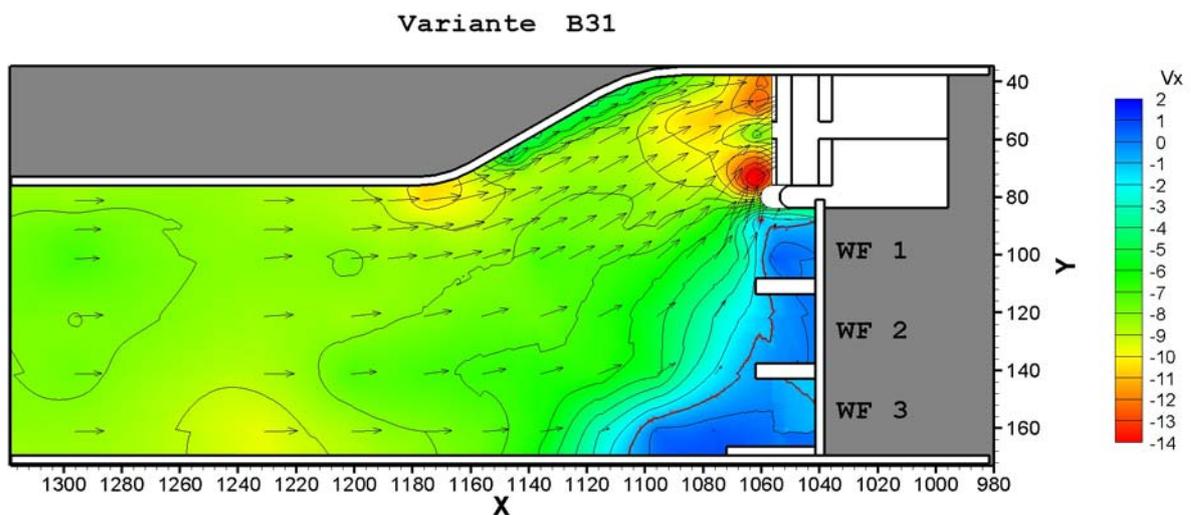
Oberwassermessung	Einfach	Trennpfeiler	Halbkreis
Messung vor Rechenebene	Ja	Abfluss	Q_a
Messung vor Turbine 2	Ja	Oberwasserspiegel	-2
Vorbodentyp	Steil	Unterwasserspiegel	± 0
seitlicher geneigter Vorboden	Ja	Hochwasserabfuhr	Nein

Tabelle 7.25.: Basisdaten Variante B31

Bei der Anströmung im Oberwasser ist ersichtlich, dass sich die Strömung in keinem Bereich der Bucht ablöst (s. Abbildung 7.53).

In der Rechenebene erkennt man die Einflüsse der Trennwand und des seitlichen Vorbodens im untersten Bereich der Messebene. Vor dem Einlauf der Turbine 2 zieht sich die vom Trennpfeiler beschleunigte Strömung nahezu bis zum Boden. Diese beschleunigte Zone wird durch eine Ablösung aus der seitliche Anrampung auf einer Höhe von $z = 9,0 \text{ cm}$ (entspricht der Sohle im Wehrfeldbereich) gestört (s. Abbildung 7.54). Dieser Bereich zieht sich bis zur Messebene bei der Turbine 2 weiter. Zudem ist wieder die Ablösung an der rechten Wand und am Boden zu erkennen (s. Abbildung 7.55).

Der α -Wert ergibt sich aus den gemessenen Geschwindigkeiten im Einlauf der Turbine 2 mit 1,048 (s. Tabelle 7.26). Das Kriterium nach Fisher und Franke wird im Bezug auf das Verhältnis der maximalen zur mittleren Geschwindigkeit nach der adaptierten und nach der originalen Auswertungsmethode zwischen einem Flächenanteil von 20% und 80% nicht eingehalten. Die Verhältnisse von minimaler zu mittlerer Geschwindigkeit liegen nach der adaptierten Auswertung nur bis 15% der anteiligen Fläche außerhalb der Grenzbedingung, wobei die originale Auswertung diese bis zu einem Anteil von 65% nicht einhält (s. Abbildung 7.56).

Abbildung 7.53.: Geschwindigkeitsverteilung Oberwasser $Z = 19,5$

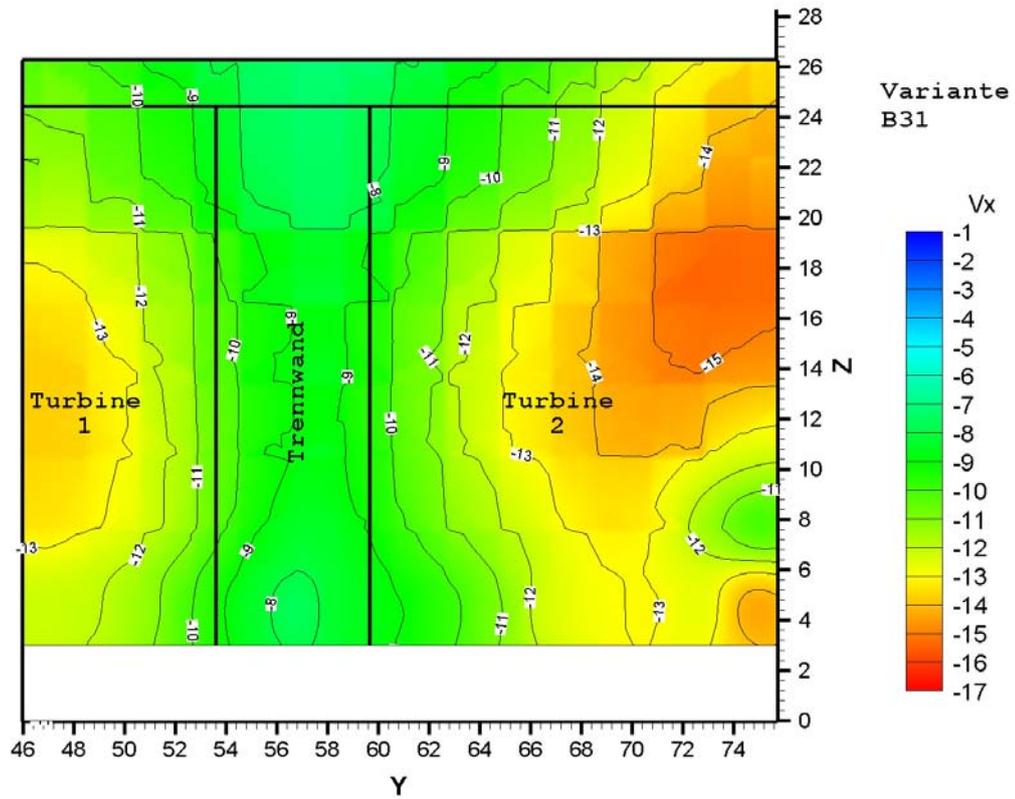


Abbildung 7.54.: Geschwindigkeitsverteilung vor der Rechenebene

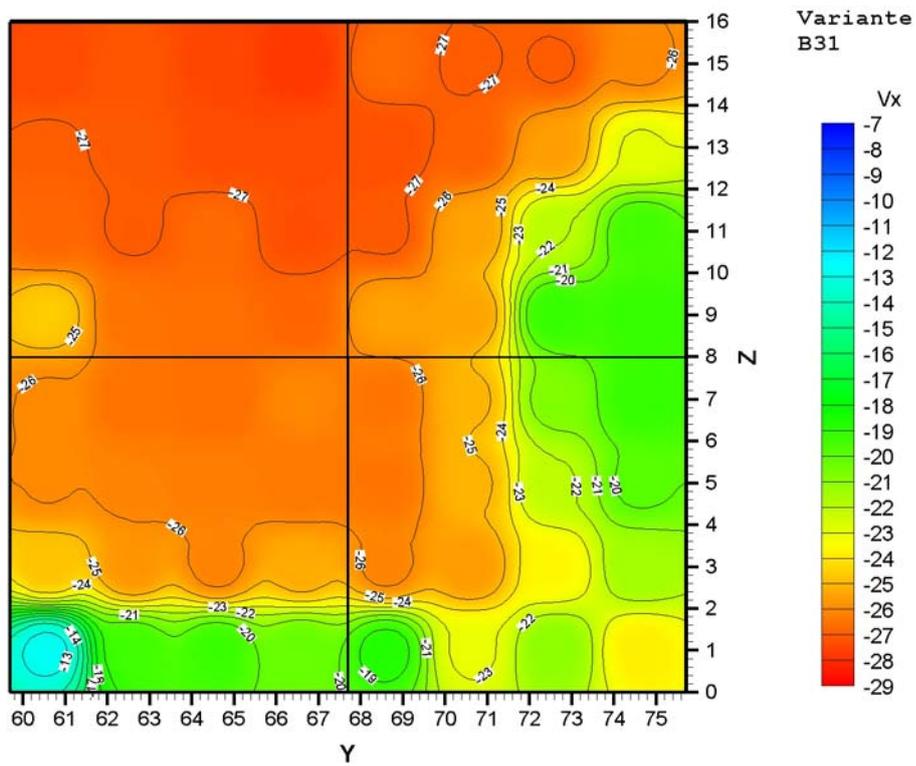


Abbildung 7.55.: Geschwindigkeitsverteilung im Einlauf der Turbine 2

Geschwindigkeitsverteilung der Turbine 2 - Variante B31

Gemessene Modellwerte

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-0,274	-0,272	-0,275	-0,278	-0,267	-0,270	-0,270	-0,261
2	-0,270	-0,271	-0,274	-0,274	-0,273	-0,269	-0,256	-0,229
3	-0,268	-0,270	-0,267	-0,273	-0,271	-0,255	-0,220	-0,194
4	-0,246	-0,265	-0,266	-0,268	-0,255	-0,255	-0,192	-0,191
5	-0,260	-0,266	-0,266	-0,261	-0,265	-0,251	-0,207	-0,192
6	-0,260	-0,262	-0,263	-0,264	-0,265	-0,251	-0,221	-0,198
7	-0,248	-0,258	-0,262	-0,253	-0,262	-0,257	-0,237	-0,215
8	-0,128	-0,194	-0,192	-0,202	-0,187	-0,231	-0,211	-0,238

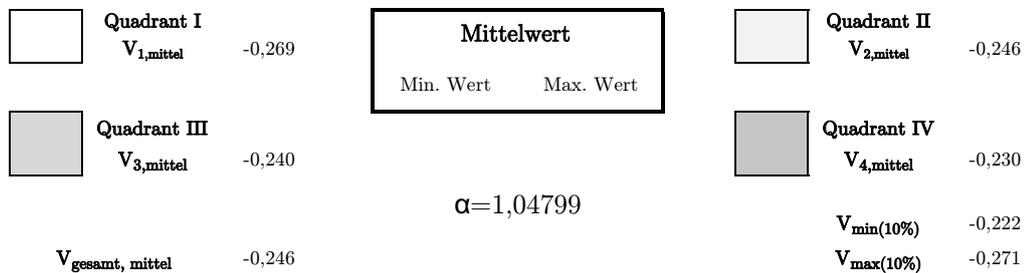


Tabelle 7.26.: Geschwindigkeitsverteilung vor der Turbine 2

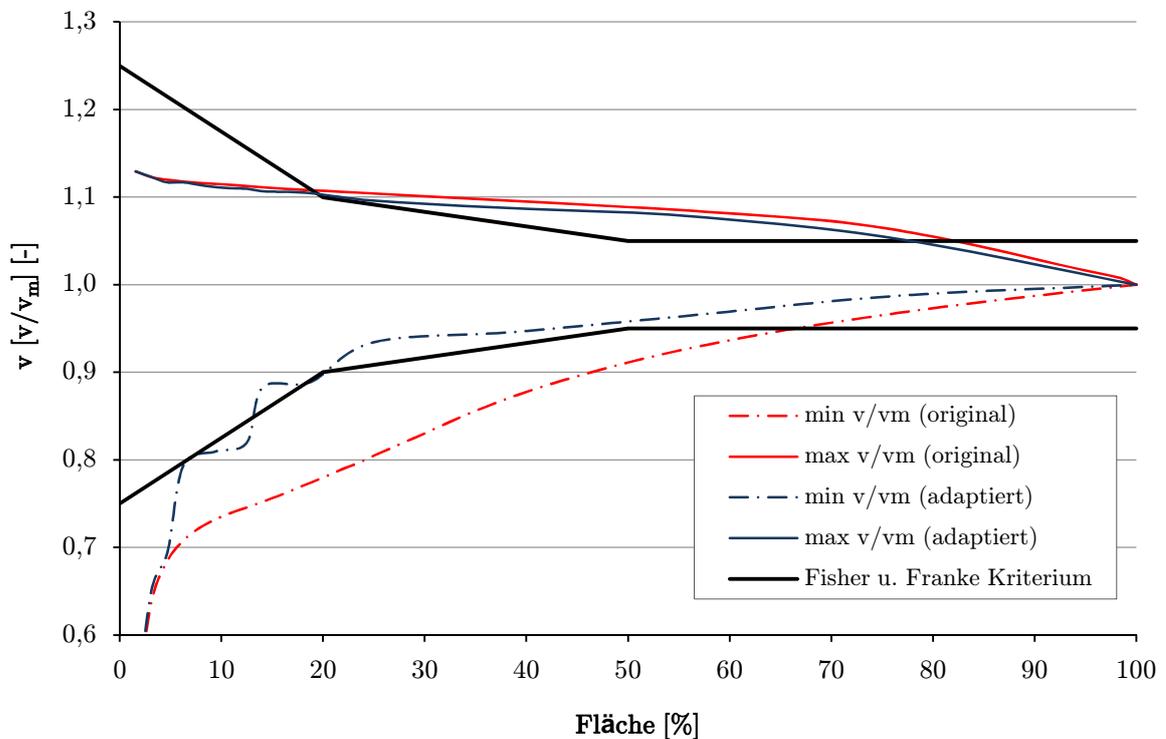


Abbildung 7.56.: Auswertung der Geschwindigkeitsverteilung vor der Turbine 2 nach Fisher und Franke

7.14. Variante B32

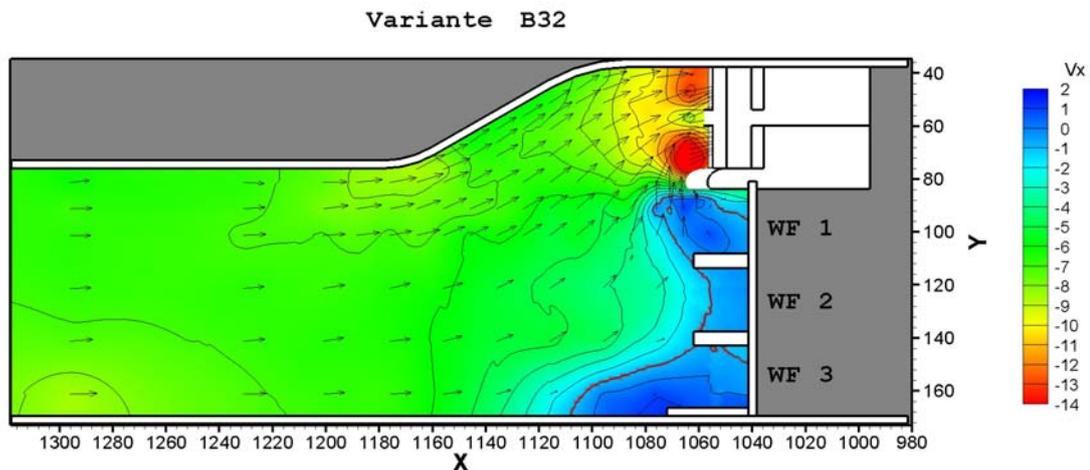
Oberwassermessung	Detailliert	Trennpfeiler	Rouvé
Messung vor Rechenebene	Ja	Abfluss	Q_a
Messung vor Turbine 2	Ja	Oberwasserspiegel	± 0
Vorbodentyp	Steil	Unterswasserspiegel	± 0
seitlicher geneigter Vorboden	Ja	Hochwasserabfuhr	Nein

Tabelle 7.27.: Basisdaten Variante B32

Die vollkommene Durchströmung der Bucht ist in allen drei gemessene Höhenlagen zu sehen (s. Abbildung 7.39 bis 7.59). Der Totraum vor den geschlossenen Wehrfeldern ist in der obersten gemessenen Lage, in $z = 24,5 \text{ cm}$ am größten ausgebildet (s. Abbildung 7.59).

In der Rechenebene zeigen sich die typischen drei Bereiche. Vor dem Einlauf der Turbine 2 ist der Bereich der hohen Geschwindigkeiten zum Trennpfeiler hin verschoben, aufgrund der vom Trennpfeiler beschleunigten Strömung. Diese Zone zieht sich bis zum noch dargestellten Bereich in Bodennähe (s. Abbildung 7.60). Im Verlauf zur Turbine 2 hin verschiebt sich der Bereich mit der hohen Geschwindigkeit auf die linke Seite hin und die am Trennpfeiler beschleunigte Strömung löst sich an der rechten Wand ab. Die großen Geschwindigkeitsdifferenzen am Boden sind auf den steilen Vorboden zurückzuführen (s. Abbildung 7.61).

Der α – Wert ergibt sich aus den gemessenen Geschwindigkeiten im Einlauf der Turbine 2 mit 1,027 (s. Tabelle 7.28). Die Grenzbedingung nach Fisher und Franke wird im Bezug auf das Verhältnis der maximalen zur mittleren Geschwindigkeit nach der adaptierten und nach der originalen Auswertungsmethode von einem Flächenanteil zwischen 35% und 65% nicht eingehalten. Die Verhältnisse von minimaler zu mittlerer Geschwindigkeit liegen nach der adaptierten Auswertung nur bis zu 15% der anteiligen Fläche außerhalb der Grenzbedingung, wobei die originale Auswertung die Grenzbedingungen bis zu einem Anteil von 60% nicht einhält (s. Abbildung 7.62).

Abbildung 7.57.: Geschwindigkeitsverteilung Oberwasser $Z = 13,5$

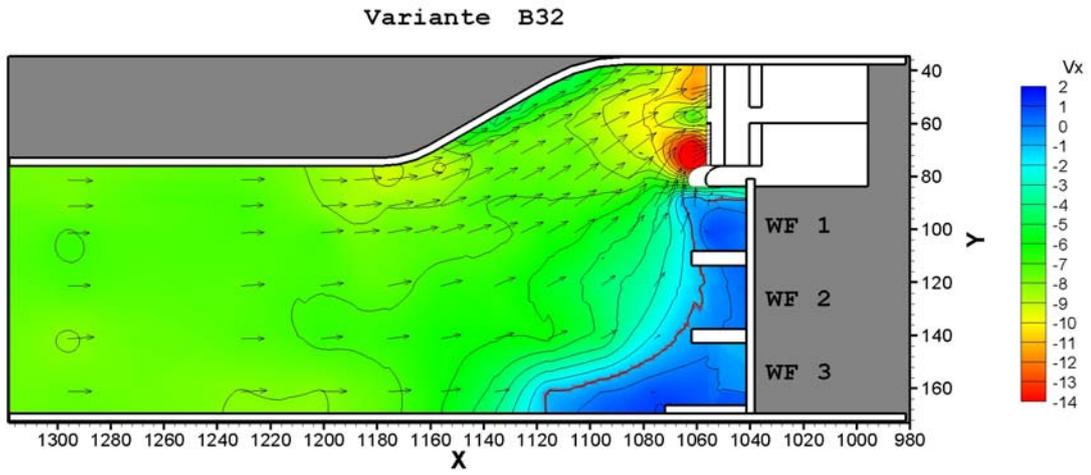


Abbildung 7.58.: Geschwindigkeitsverteilung Oberwasser $Z = 19,5$

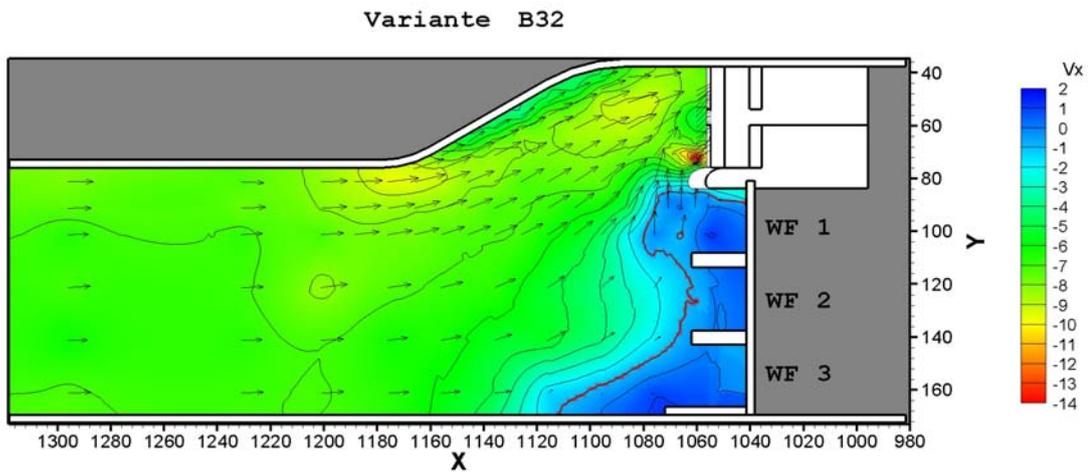


Abbildung 7.59.: Geschwindigkeitsverteilung Oberwasser $Z = 24,5$

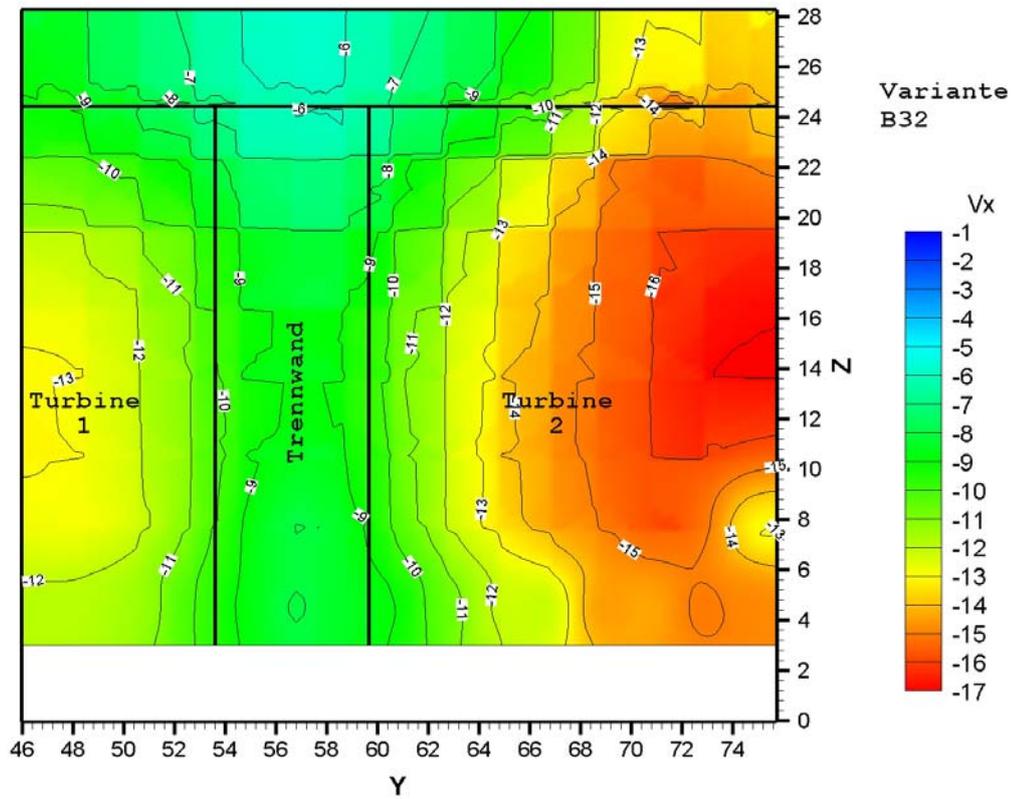


Abbildung 7.60.: Geschwindigkeitsverteilung vor der Rechenebene

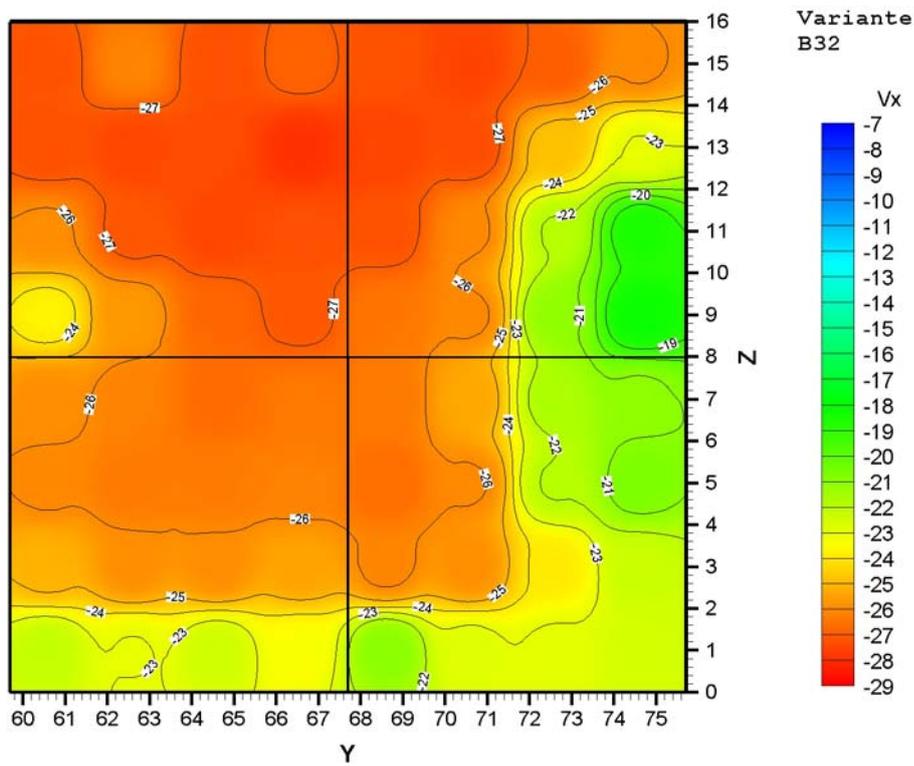


Abbildung 7.61.: Geschwindigkeitsverteilung im Einlauf der Turbine 2

Geschwindigkeitsverteilung der Turbine 2 - Variante B32

Gemessene Modellwerte

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-0,272	-0,261	-0,273	-0,268	-0,273	-0,276	-0,270	-0,261
2	-0,273	-0,275	-0,274	-0,279	-0,275	-0,273	-0,248	-0,230
3	-0,259	-0,271	-0,275	-0,273	-0,272	-0,261	-0,220	-0,185
4	-0,237	-0,257	-0,268	-0,271	-0,264	-0,261	-0,212	-0,182
5	-0,259	-0,262	-0,267	-0,264	-0,264	-0,254	-0,217	-0,211
6	-0,261	-0,264	-0,263	-0,262	-0,267	-0,260	-0,220	-0,207
7	-0,252	-0,259	-0,259	-0,255	-0,261	-0,259	-0,239	-0,224
8	-0,222	-0,230	-0,225	-0,234	-0,210	-0,228	-0,229	-0,225

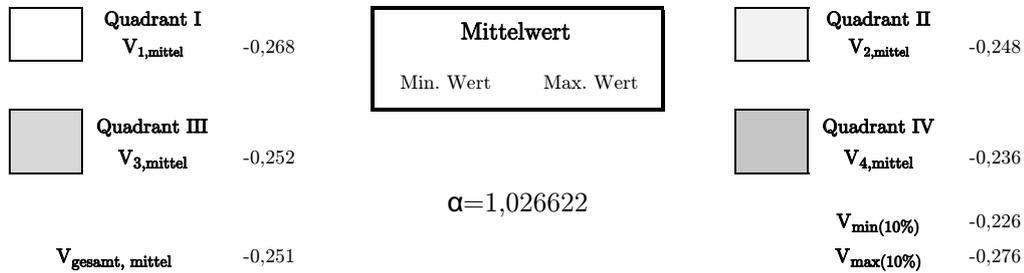


Tabelle 7.28.: Geschwindigkeitsverteilung vor der Turbine 2

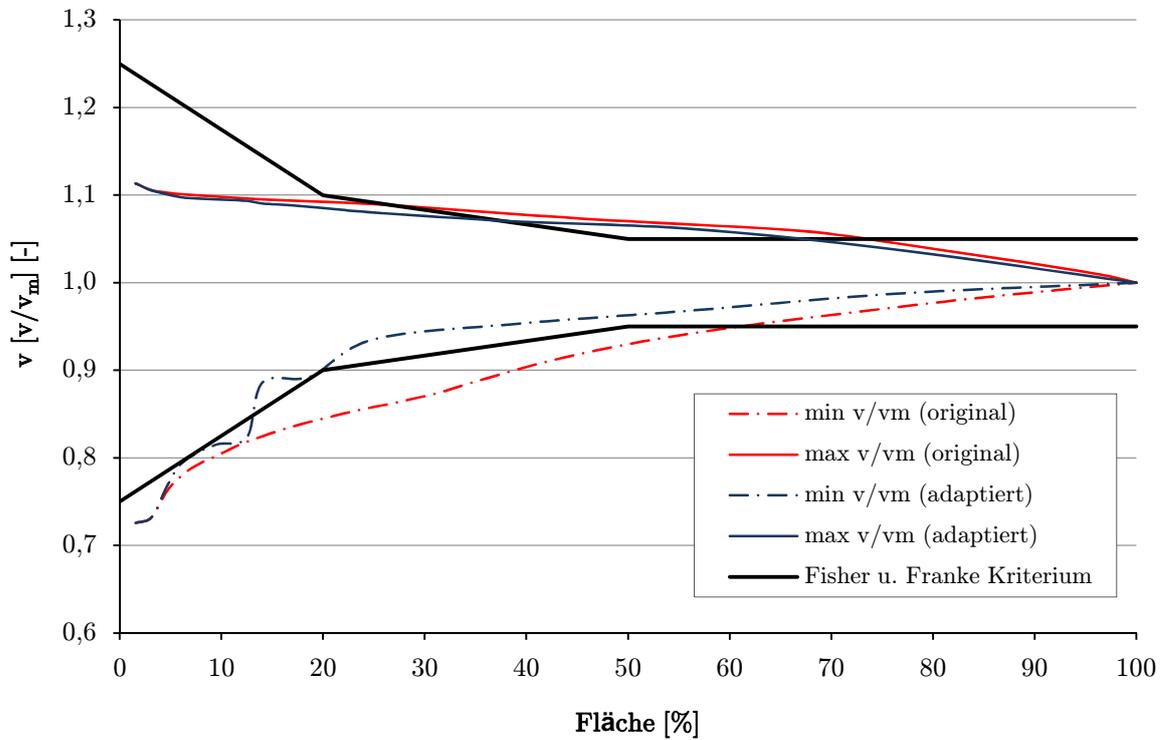


Abbildung 7.62.: Auswertung der Geschwindigkeitsverteilung vor der Turbine 2 nach Fisher und Franke

7.15. Variante B35

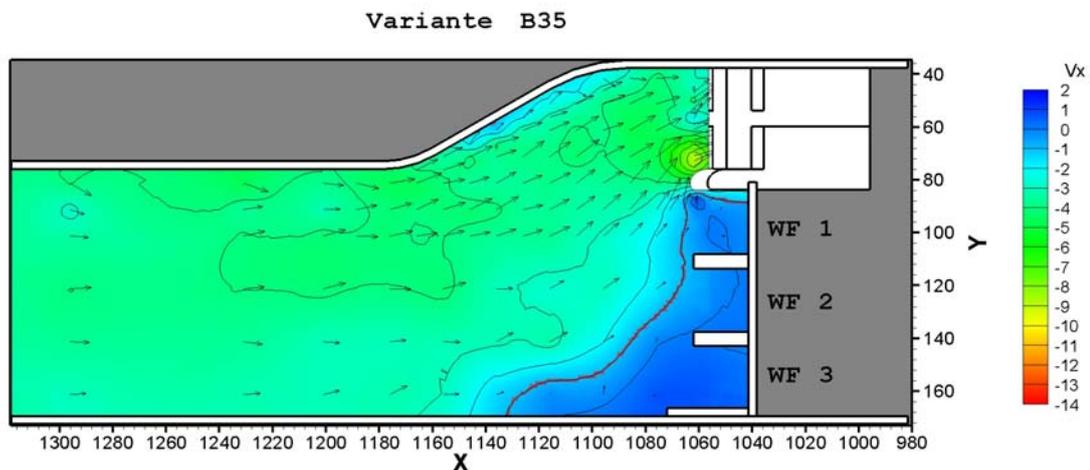
Oberwassermessung	Einfach	Trennpfeiler	Rouvé
Messung vor Rechenebene	Ja	Abfluss	$0,5 Q_a$
Messung vor Turbine 2	Ja	Oberwasserspiegel	± 0
Vorbodentyp	Steil	Unterwasserspiegel	± 0
seitlicher geneigter Vorboden	Ja	Hochwasserabfuhr	Nein

Tabelle 7.29.: Basisdaten Variante B35

Bei der Variante B35 treten in allen Ebenen, aufgrund der Durchführung des Versuches mit halber Ausbaumwassermenge, ungefähr die halben Geschwindigkeiten auf. Im Oberwasser ist in der Bucht eine leichte Verzögerung der Strömung festzustellen (s. Abbildung 7.63).

In der Rechenebene reicht der Einfluss der Trennwand nicht so weit in die Einläufe der Turbinen hinein wie bei allen bisherigen Varianten. Die beschleunigte Strömung am Trennpfeiler zieht sich bis zum untersten dargestellten Horizont (s. Abbildung 7.64). Die Geschwindigkeit ist relativ gleichmäßig verteilt. Im Einlauf der Turbine 2 treten dann allerdings viele Ungleichmäßigkeiten auf. Am Boden löst sich die Strömung wie bei allen Varianten mit dem steilen Vorboden ab. Die Ablösung an der wehrfeldseitigen Wand ist nicht so stark ausgebildet, was auf die niedrigeren Geschwindigkeiten zurückzuführen ist (s. Abbildung 7.61).

Die ungleichmäßige Verteilung der Geschwindigkeit vor der Turbine 2 ist in der Tabelle 7.30 mit dem zugehörigen α -Wert von 1,062 dargestellt. Das Kriterium nach Fisher und Franke wird beim Verhältnis der maximalen zur mittleren Geschwindigkeit nach beiden Auswertungsmethoden bis zu einem Flächenanteil von 80% nicht eingehalten. Die Verhältnisse von minimaler zu mittlerer Geschwindigkeit liegen nach der adaptierten Auswertung nur bis zu 5% der anteiligen Fläche außerhalb der Grenzbedingung, wobei die originale Auswertung diese bis zu einem Anteil von 75% nicht einhält (s. Abbildung 7.66).

Abbildung 7.63.: Geschwindigkeitsverteilung Oberwasser $Z = 19,5$

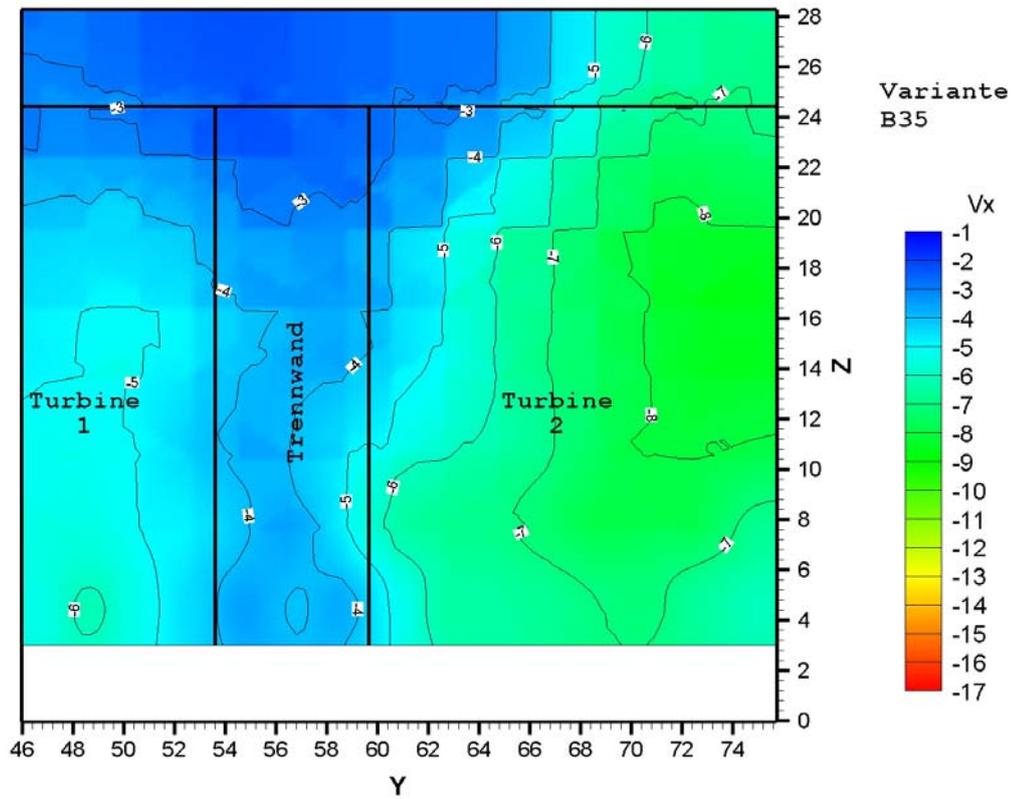


Abbildung 7.64.: Geschwindigkeitsverteilung vor der Rechenebene

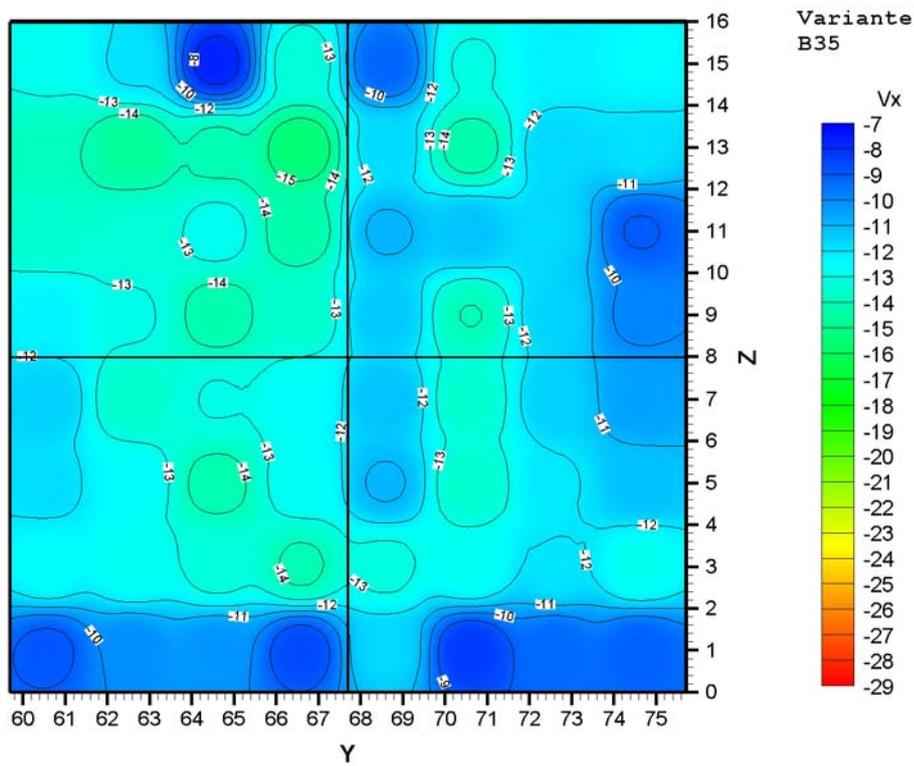


Abbildung 7.65.: Geschwindigkeitsverteilung im Einlauf der Turbine 2

Geschwindigkeitsverteilung der Turbine 2 - Variante B35

Gemessene Modellwerte

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-0,128	-0,119	-0,077	-0,134	-0,092	-0,131	-0,122	-0,125
2	-0,139	-0,147	-0,142	-0,155	-0,117	-0,143	-0,117	-0,119
3	-0,135	-0,134	-0,128	-0,143	-0,109	-0,113	-0,117	-0,090
4	-0,123	-0,129	-0,143	-0,136	-0,113	-0,140	-0,116	-0,099
5	-0,115	-0,136	-0,130	-0,126	-0,112	-0,136	-0,115	-0,105
6	-0,118	-0,125	-0,142	-0,127	-0,109	-0,136	-0,121	-0,112
7	-0,126	-0,128	-0,133	-0,141	-0,132	-0,128	-0,120	-0,129
8	-0,088	-0,101	-0,102	-0,086	-0,117	-0,082	-0,092	-0,091

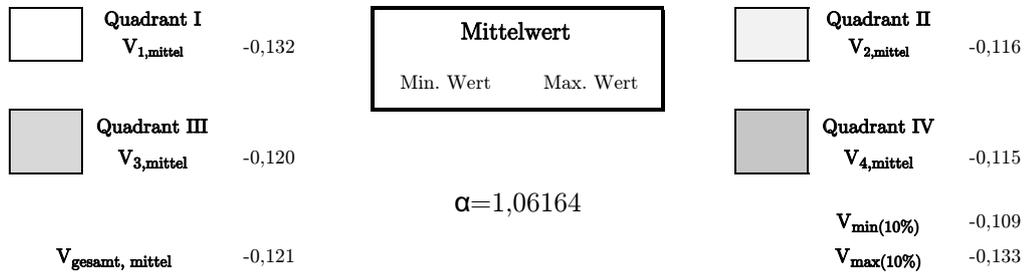


Tabelle 7.30.: Geschwindigkeitsverteilung vor der Turbine 2

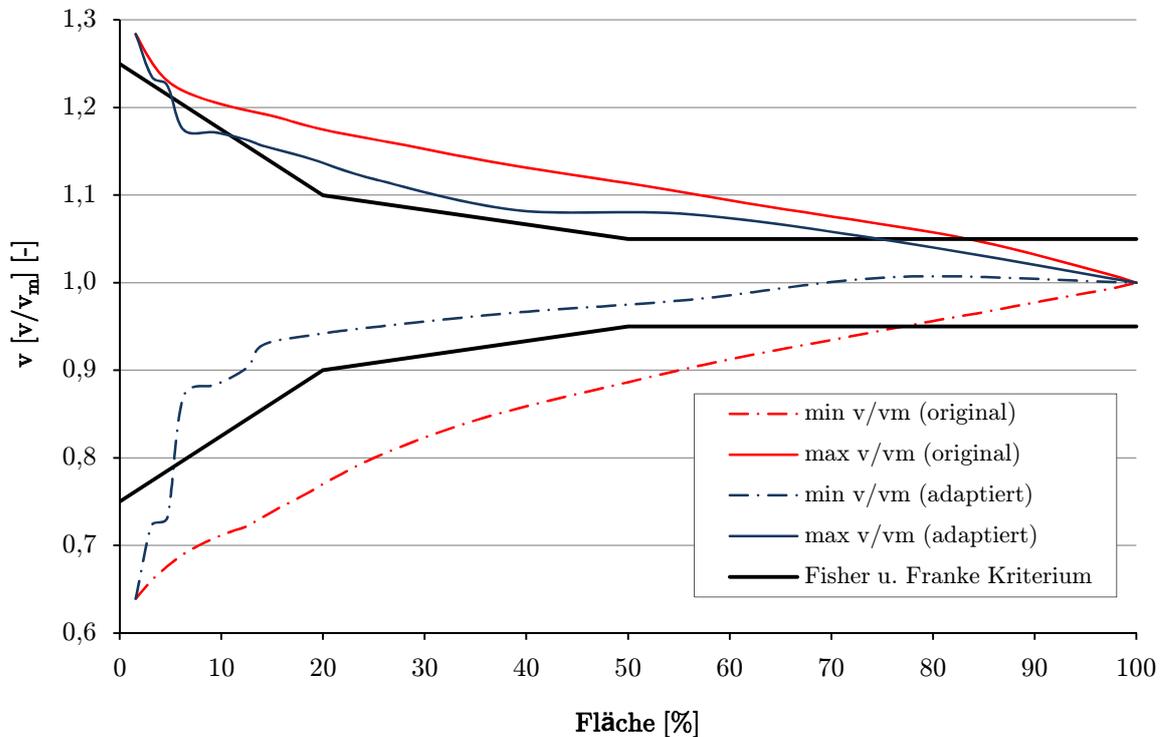


Abbildung 7.66.: Auswertung der Geschwindigkeitsverteilung vor der Turbine 2 nach Fisher und Franke

7.16. Variante B40

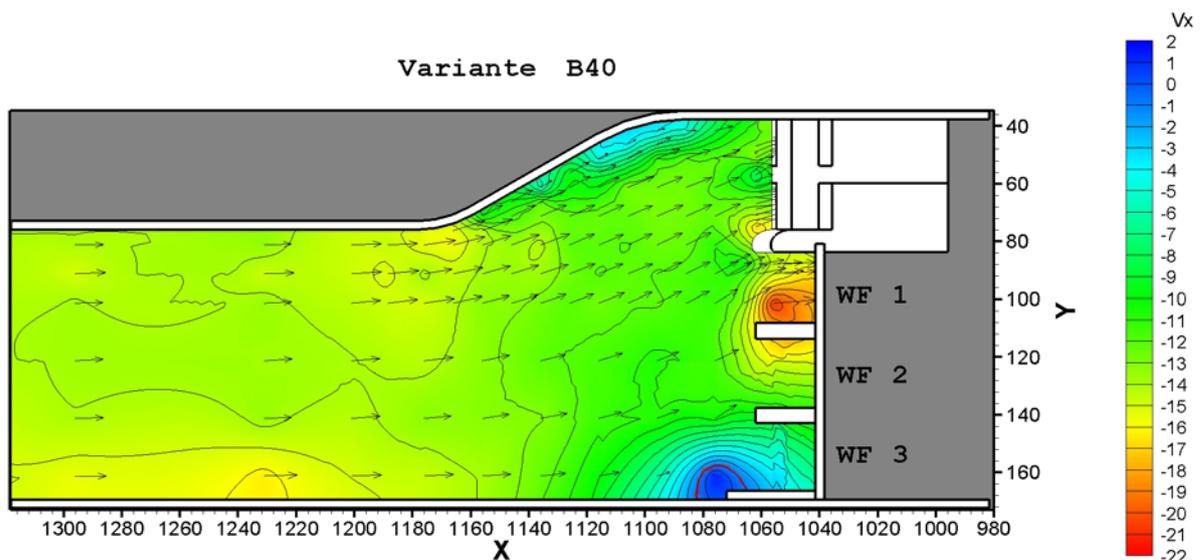
Oberwassermessung	Einfach	Trennpfeiler	Rouvé
Messung vor Rechenebene	Ja	Abfluss	$2 Q_a$
Messung vor Turbine 2	Ja	Oberwasserspiegel	± 0
Vorbodentyp	Steil	Unterwasserspiegel	± 0
seitlicher geneigter Vorboden	Ja	Hochwasserabfuhr	Klappe im WF 1 und 2

Tabelle 7.31.: Basisdaten Variante B40

Durch die Hochwasserabfuhr über die Wehrfelder 1 und 2 kommt es in der Bucht zu einer leichten Verzögerung der Strömung (s. Abbildung 7.67).

Die Geschwindigkeitsverteilung in der Rechenebene weist die drei Bereiche auf, mit den hohen Geschwindigkeiten vor den Einläufen zu den Turbinen und den Bereich mit niedrigerer Geschwindigkeit vor der Trennwand, wo sich der Pfeilerstau auswirkt. Vor dem Einlauf zur Turbine 2 wird die Strömung aus den Wehrfeldern am Trennpfeiler beschleunigt, wodurch die Zone der hohen Geschwindigkeiten auf die rechte Seite verschoben wird (s. Abbildung 7.68). In der Turbinenebene ist die Ablösung am Boden durch den steilen Vorboden zu erkennen. Ansonsten nimmt die Geschwindigkeit von oben nach unten in parallelen Schichtungen ab (s. Abbildung 7.69).

Wie die Geschwindigkeit vor der Turbine 2 verteilt ist, zeigt die Tabelle 7.32. Der sich nach diesen Werten ergebende α – Wert beträgt 1,017. Das Kriterium nach Fisher und Franke wird nach der adaptierten Auswertungsmethode eingehalten. Durch die Auswertung nach der originalen Methode wird das Kriterium von einem Flächenanteil zwischen 20% und 50% nicht erfüllt (s. Abbildung 7.70).

Abbildung 7.67.: Geschwindigkeitsverteilung Oberwasser $Z = 19,5$

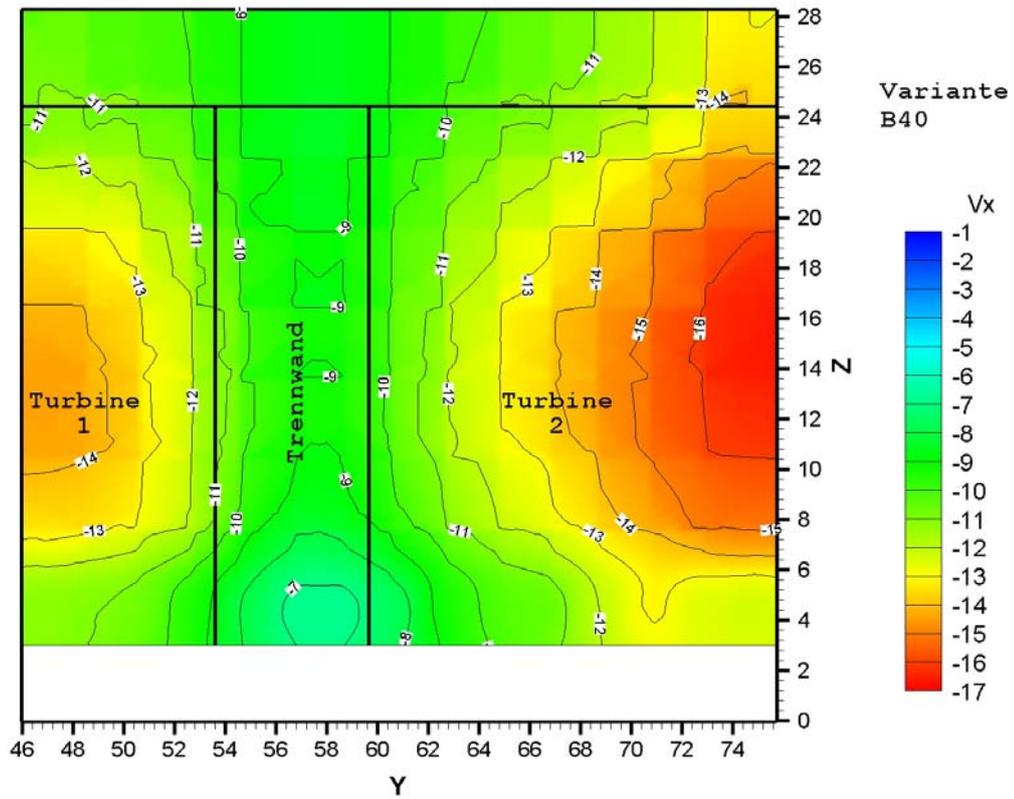


Abbildung 7.68.: Geschwindigkeitsverteilung vor der Rechenebene

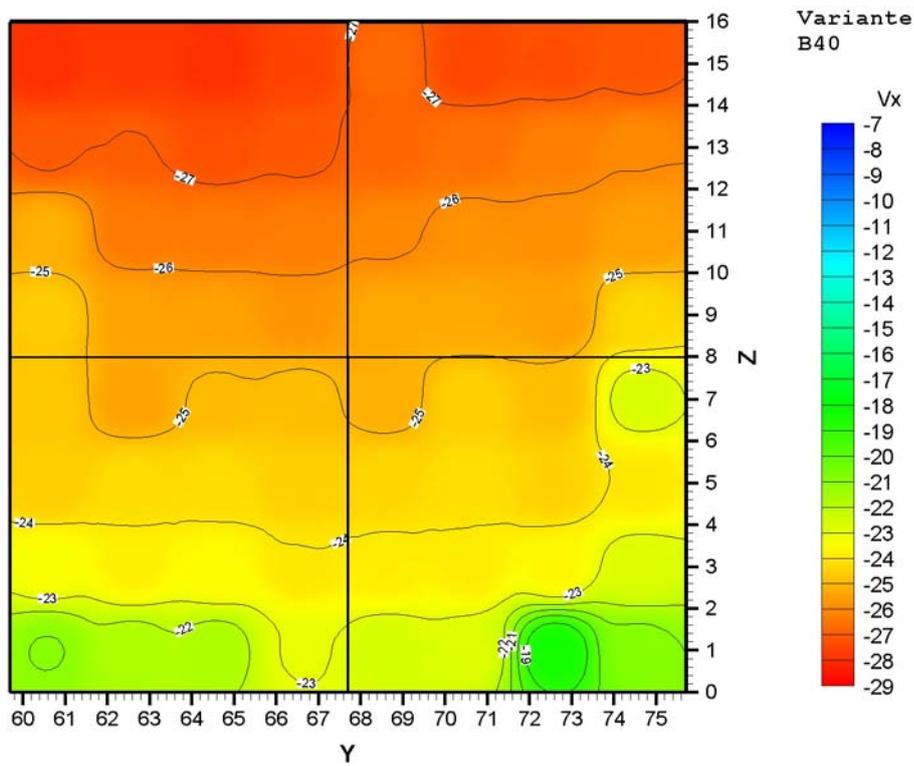


Abbildung 7.69.: Geschwindigkeitsverteilung im Einlauf der Turbine 2

Geschwindigkeitsverteilung der Turbine 2 - Variante B40

Gemessene Modellwerte

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-0,279	-0,278	-0,280	-0,276	-0,267	-0,275	-0,273	-0,272
2	-0,271	-0,270	-0,273	-0,271	-0,268	-0,266	-0,262	-0,260
3	-0,252	-0,264	-0,264	-0,263	-0,261	-0,258	-0,259	-0,255
4	-0,246	-0,255	-0,255	-0,258	-0,254	-0,253	-0,255	-0,243
5	-0,247	-0,255	-0,249	-0,249	-0,252	-0,245	-0,249	-0,227
6	-0,245	-0,243	-0,242	-0,245	-0,244	-0,242	-0,245	-0,240
7	-0,234	-0,238	-0,236	-0,240	-0,239	-0,239	-0,237	-0,228
8	-0,210	-0,217	-0,217	-0,230	-0,226	-0,228	-0,184	-0,209

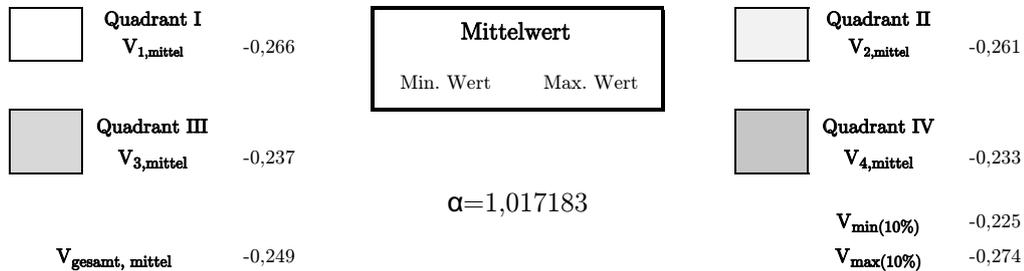


Tabelle 7.32.: Geschwindigkeitsverteilung vor der Turbine 2

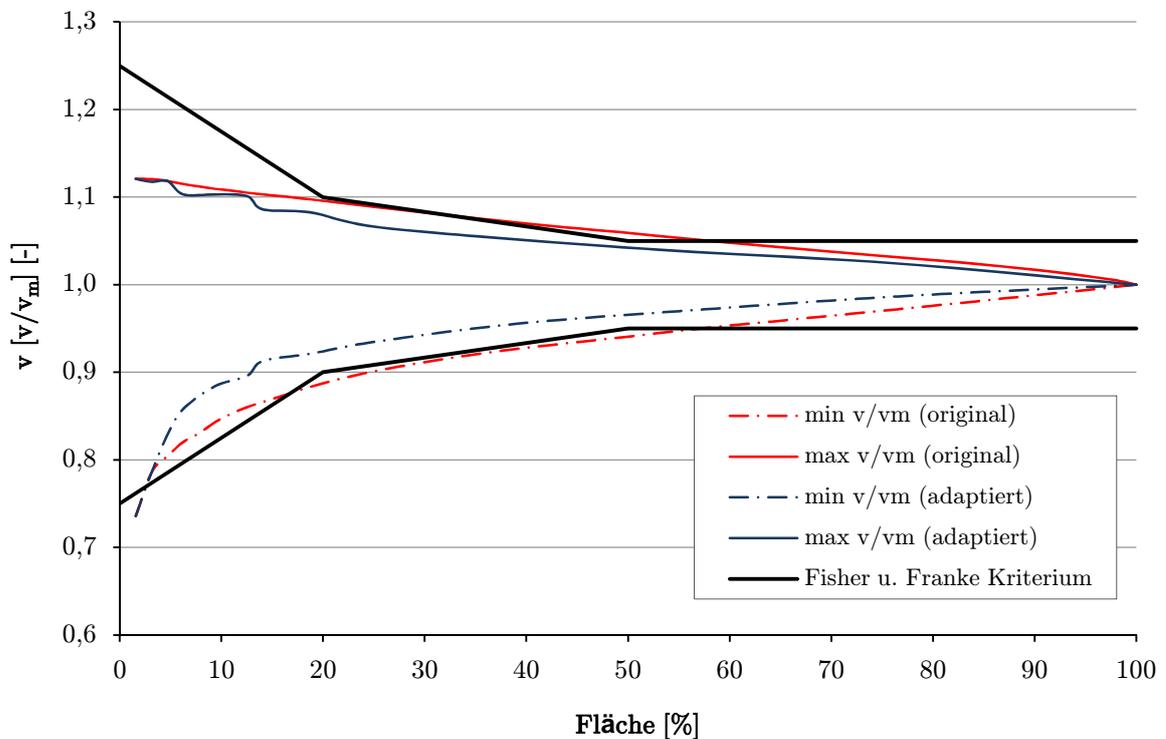


Abbildung 7.70.: Auswertung der Geschwindigkeitsverteilung vor der Turbine 2 nach Fisher und Franke

7.17. Variante B42

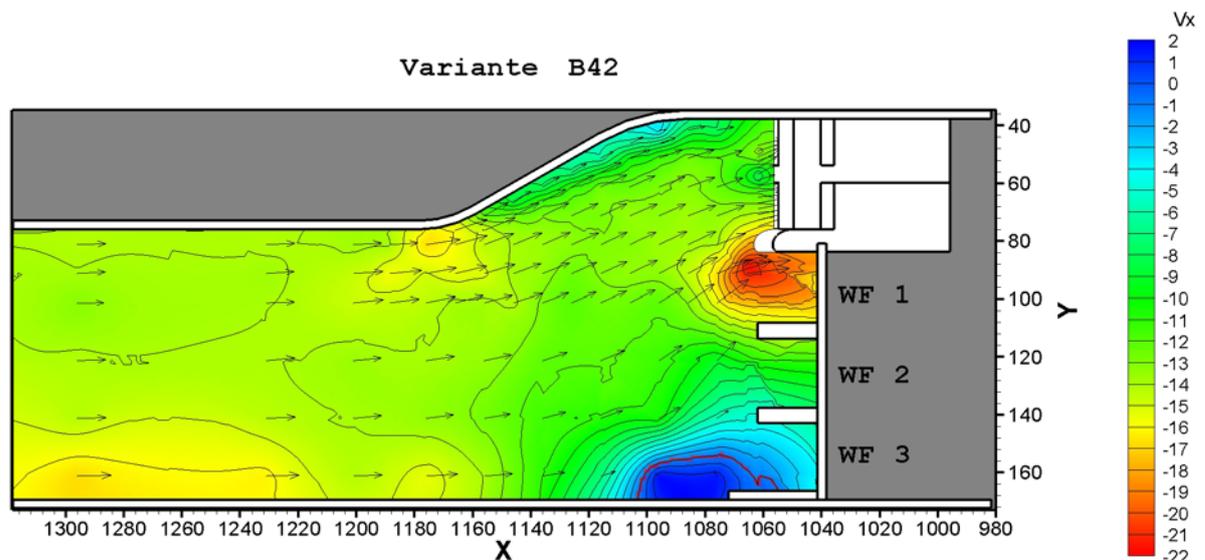
Oberwassermessung	Einfach	Trennpfeiler	Rouvé
Messung vor Rechenebene	Ja	Abfluss	$2 Q_a$
Messung vor Turbine 2	Ja	Oberwasserspiegel	± 0
Vorbodentyp	Steil	Unterwasserspiegel	± 0
seitlicher geneigter Vorboden	Ja	Hochwasserabfuhr	Segment im WF 1

Tabelle 7.33.: Basisdaten Variante B42

Durch die Hochwasserabfuhr über das Wehrfeld 1, treten vor diesem die höchsten Geschwindigkeiten im Oberwasser auf. Die Bucht wird nur in einem sehr kleinen Feld nicht vollkommen durchströmt (s. Abbildung 7.71).

In der Rechenebene bildet die Anströmung die bisher üblichen drei Bereiche aus (s. Abbildung 7.72). Die Strömung vergleichmäßigt sich bis zur Turbine 2 hin sehr gut, wobei die Geschwindigkeit in parallelen Schichten Richtung Boden abnimmt. Der Einfluss des steilen Vorbodens zeigt sich in den erheblich niedrigeren Geschwindigkeiten in Bodennähe (s. Abbildung 7.73).

Die Tabelle 7.34 zeigt die zugehörige Geschwindigkeitsverteilung in der Turbine 2 mit dem daraus folgenden α – Wert von 1,017. Die Grenzbedingung von Fisher und Franke wird nach der adaptierten Auswertungsmethode eingehalten und nach der originalen Methode von 15% bis 50% der anteiligen Fläche nicht eingehalten (s. Abbildung 7.74).

Abbildung 7.71.: Geschwindigkeitsverteilung Oberwasser $Z = 19,5$

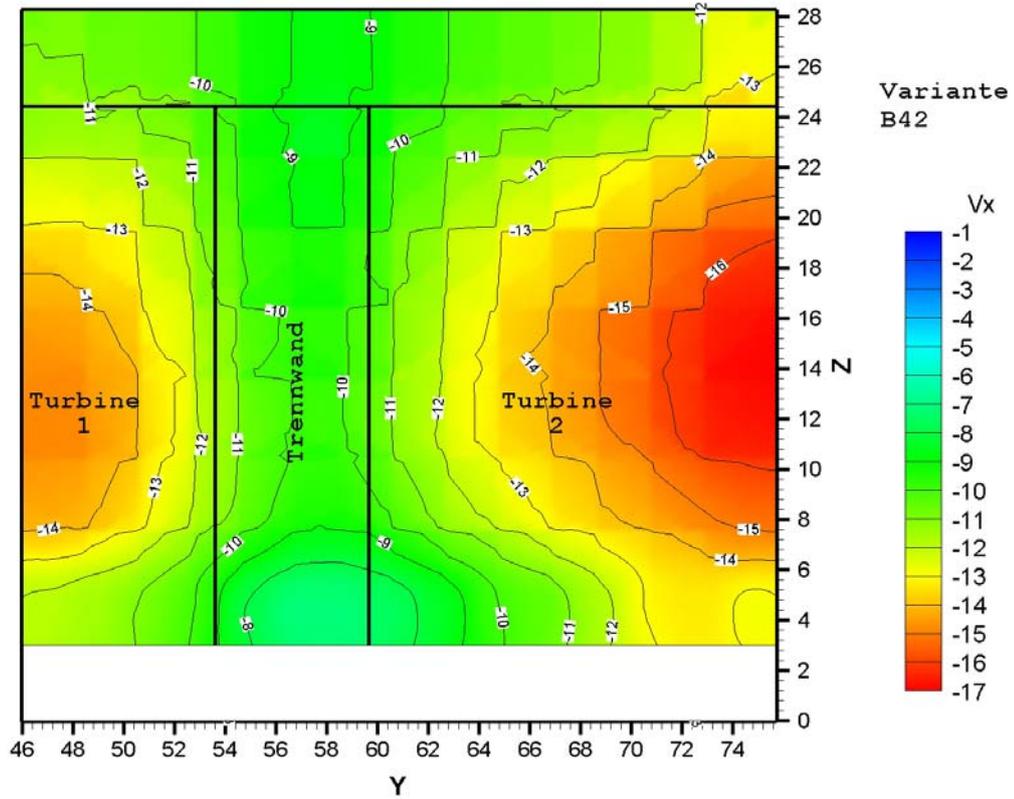


Abbildung 7.72.: Geschwindigkeitsverteilung vor der Rechenebene

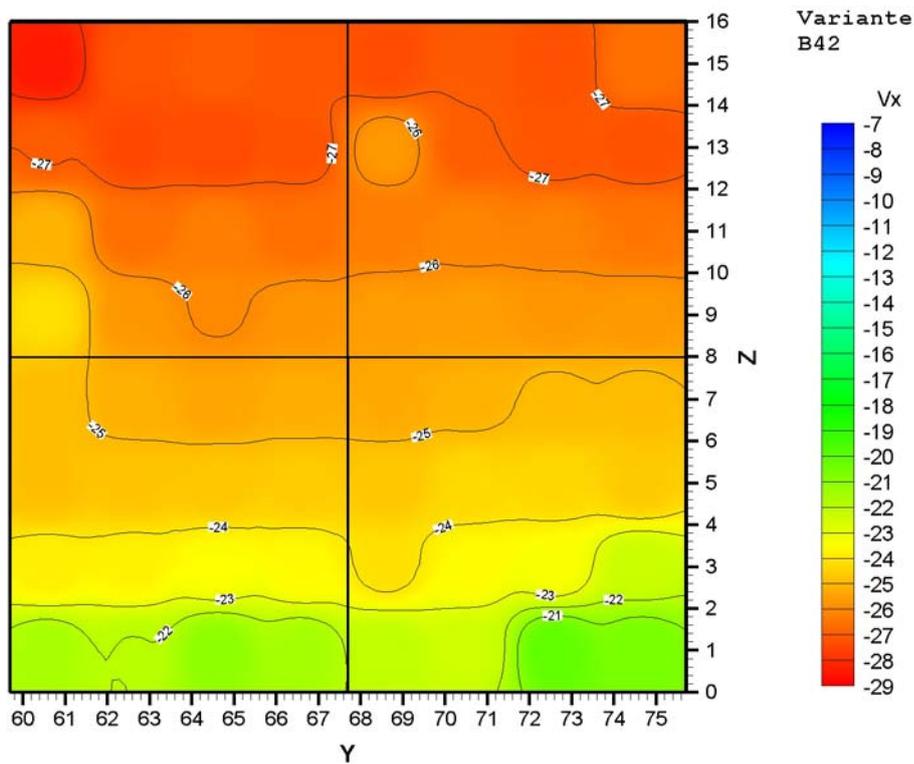


Abbildung 7.73.: Geschwindigkeitsverteilung im Einlauf der Turbine 2

Geschwindigkeitsverteilung der Turbine 2 - Variante B42

Gemessene Modellwerte

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-0,285	-0,272	-0,270	-0,271	-0,274	-0,271	-0,273	-0,266
2	-0,260	-0,281	-0,264	-0,283	-0,260	-0,287	-0,254	-0,284
3	-0,251	-0,266	-0,263	-0,266	-0,263	-0,261	-0,262	-0,265
4	-0,242	-0,257	-0,260	-0,258	-0,256	-0,256	-0,257	-0,257
5	-0,249	-0,252	-0,254	-0,252	-0,253	-0,252	-0,249	-0,249
6	-0,249	-0,248	-0,247	-0,246	-0,247	-0,243	-0,244	-0,246
7	-0,238	-0,238	-0,235	-0,236	-0,242	-0,236	-0,234	-0,223
8	-0,216	-0,220	-0,211	-0,216	-0,221	-0,224	-0,201	-0,206

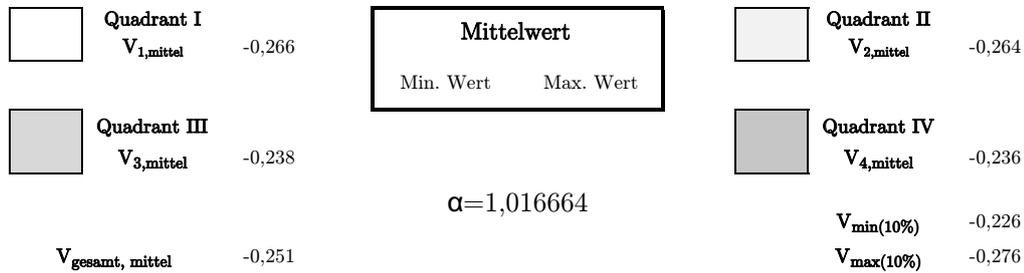


Tabelle 7.34.: Geschwindigkeitsverteilung vor der Turbine 2

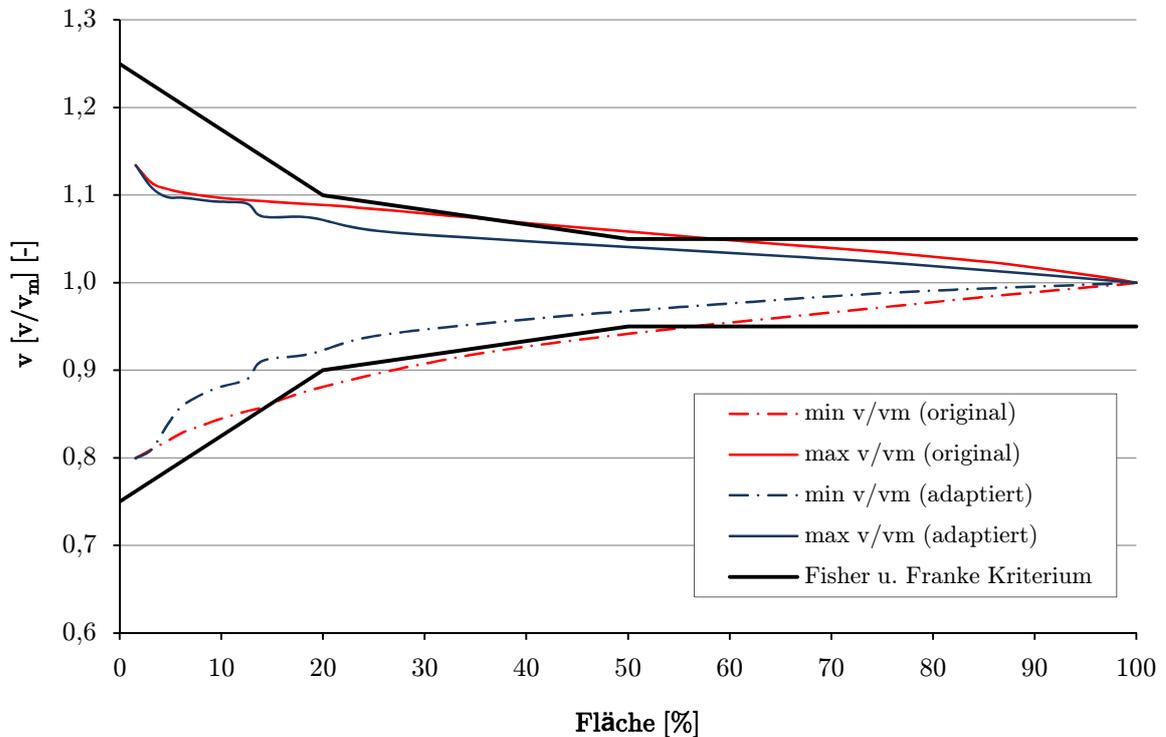


Abbildung 7.74.: Auswertung der Geschwindigkeitsverteilung vor der Turbine 2 nach Fisher und Franke

7.18. Variante B44

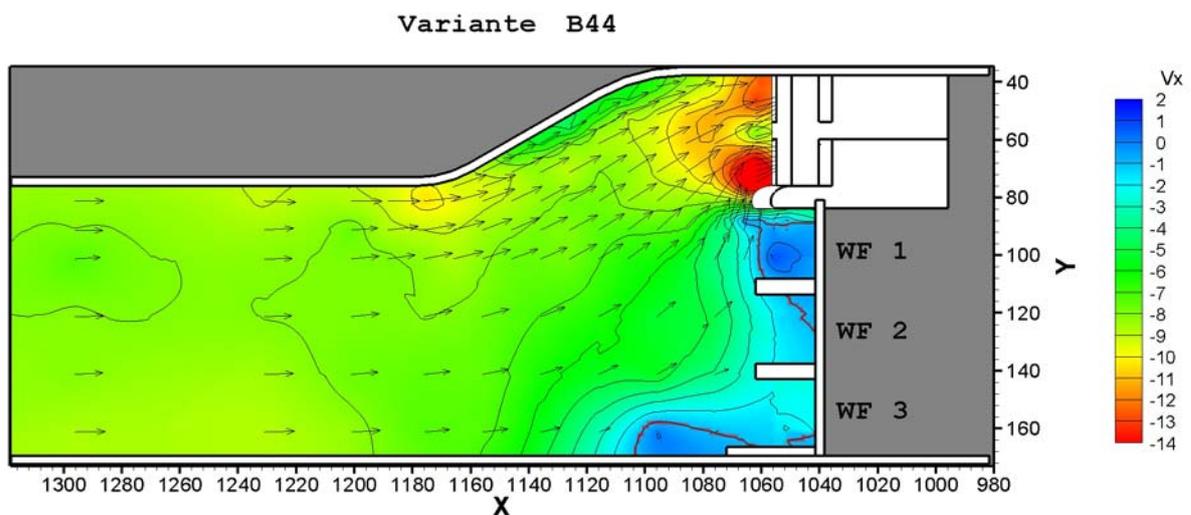
Oberwassermessung	Einfach	Trennpfeiler	Rouv�
Messung vor Rechenebene	Ja	Abfluss	Q_a
Messung vor Turbine 2	Ja	Oberwasserspiegel	-2
Vorbodentyp	Steil	Unterswasserspiegel	± 0
seitlicher geneigter Vorboden	Ja	Hochwasserabfuhr	Nein

Tabelle 7.35.: Basisdaten Variante B44

Bei der Anströmung im Oberwasser ist zu erkennen, dass sich die Strömung in keinem Bereich der Bucht ablöst (s. Abbildung 7.75).

Vor dem Einlauf der Turbine 2 zieht sich die vom Trennpfeiler beschleunigte Strömung bis zum Boden. Diese beschleunigte Zone wird durch eine geringe Ablösung aus der seitlichen Anrampung gestört (s. Abbildung 7.76). Dieser Bereich zieht sich bis zur Messebene bei der Turbine 2 weiter. Zudem ist wieder die Ablösung an der rechten Wand und am Boden zu erkennen (s. Abbildung 7.55).

Der α -Wert ergibt sich aus den gemessenen Geschwindigkeiten im Einlauf der Turbine 2 mit 1,029 (s. Tabelle 7.36). Das Kriterium nach Fisher und Franke wird im Bezug auf das Verhältnis der maximalen zur mittleren Geschwindigkeit nach der originalen Auswertungsmethode zwischen einem Flächenanteil von 20% und 70% nicht eingehalten. Die Verhältnisse von minimaler zu mittlerer Geschwindigkeit liegen nach der adaptierten Auswertung bis zu 20% der anteiligen Fläche außerhalb der Grenzbedingung, wobei die originale Auswertung diese bis zu einem Anteil von 65% nicht einhält (s. Abbildung 7.78).

Abbildung 7.75.: Geschwindigkeitsverteilung Oberwasser $Z = 19,5$

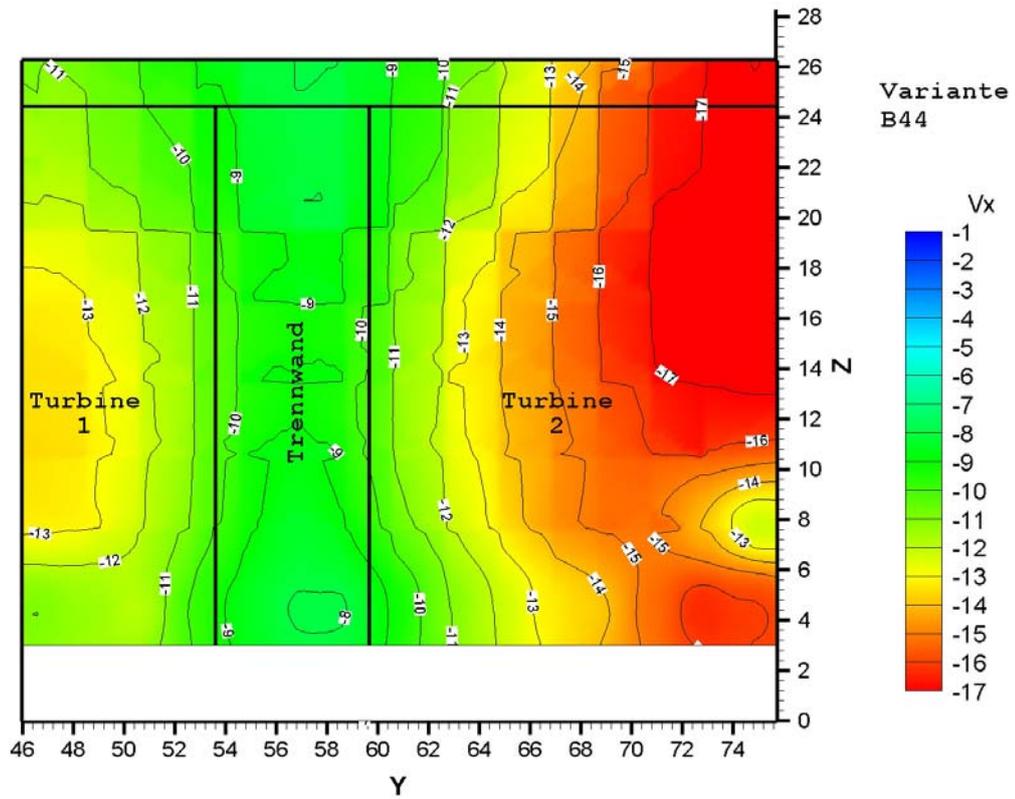


Abbildung 7.76.: Geschwindigkeitsverteilung vor der Rechenebene

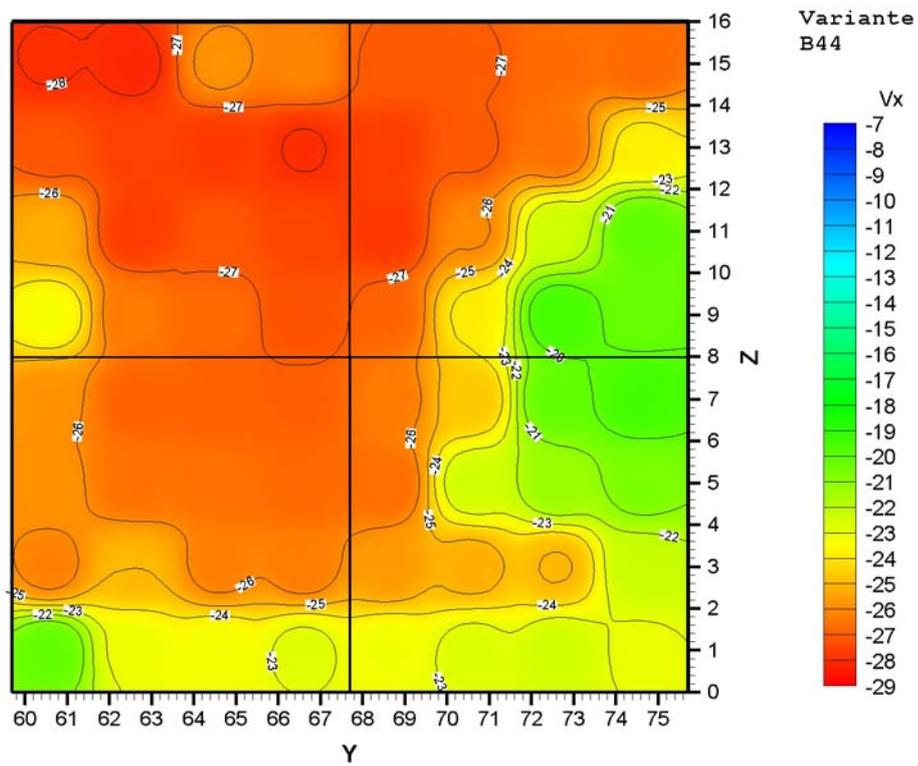


Abbildung 7.77.: Geschwindigkeitsverteilung im Einlauf der Turbine 2

Geschwindigkeitsverteilung der Turbine 2 - Variante B44

Gemessene Modellwerte

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-0,280	-0,282	-0,258	-0,261	-0,271	-0,271	-0,267	-0,268
2	-0,272	-0,276	-0,278	-0,280	-0,277	-0,271	-0,266	-0,238
3	-0,253	-0,277	-0,272	-0,275	-0,278	-0,260	-0,224	-0,200
4	-0,233	-0,264	-0,267	-0,273	-0,268	-0,239	-0,195	-0,202
5	-0,258	-0,266	-0,266	-0,268	-0,267	-0,225	-0,213	-0,206
6	-0,262	-0,250	-0,263	-0,263	-0,257	-0,252	-0,250	-0,223
7	-0,201	-0,232	-0,233	-0,228	-0,232	-0,227	-0,225	-0,231
8	-0,251	-0,294	-0,240	-0,297	-0,219	-0,288	-0,210	-0,298
	-0,286	-0,237	-0,293	-0,236	-0,285	-0,235	-0,287	-0,233
	-0,235	-0,291	-0,256	-0,292	-0,249	-0,291	-0,253	-0,297
	-0,293	-0,255	-0,293	-0,227	-0,289	-0,216	-0,276	-0,159
	-0,198	-0,284	-0,252	-0,292	-0,216	-0,291	-0,243	-0,291
	-0,292	-0,262	-0,283	-0,198	-0,270	-0,166	-0,262	-0,087
	-0,194	-0,265	-0,229	-0,284	-0,180	-0,288	-0,223	-0,289
	-0,287	-0,233	-0,276	-0,178	-0,241	-0,139	-0,259	-0,127
	-0,212	-0,282	-0,218	-0,289	-0,240	-0,283	-0,248	-0,284
	-0,285	-0,228	-0,274	-0,228	-0,274	-0,206	-0,249	-0,141
	-0,246	-0,266	-0,222	-0,290	-0,226	-0,290	-0,241	-0,290
	-0,279	-0,245	-0,272	-0,121	-0,276	-0,154	-0,251	-0,153
	-0,212	-0,288	-0,144	-0,286	-0,177	-0,292	-0,188	-0,287
	-0,284	-0,176	-0,276	-0,212	-0,281	-0,201	-0,266	-0,131
	-0,151	-0,248	-0,176	-0,265	-0,169	-0,270	-0,172	-0,257
	-0,269	-0,188	-0,262	-0,166	-0,258	-0,149	-0,267	-0,196

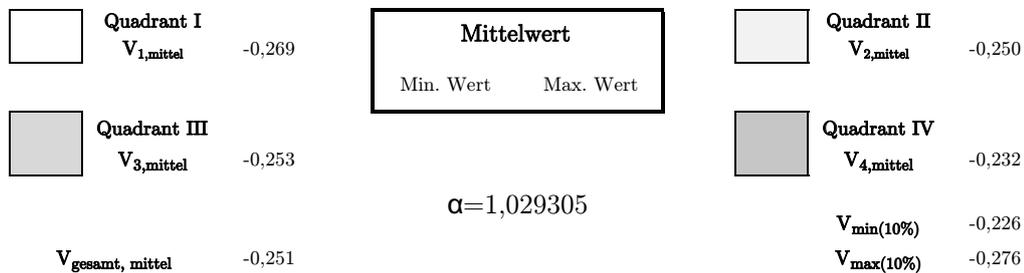


Tabelle 7.36.: Geschwindigkeitsverteilung vor der Turbine 2

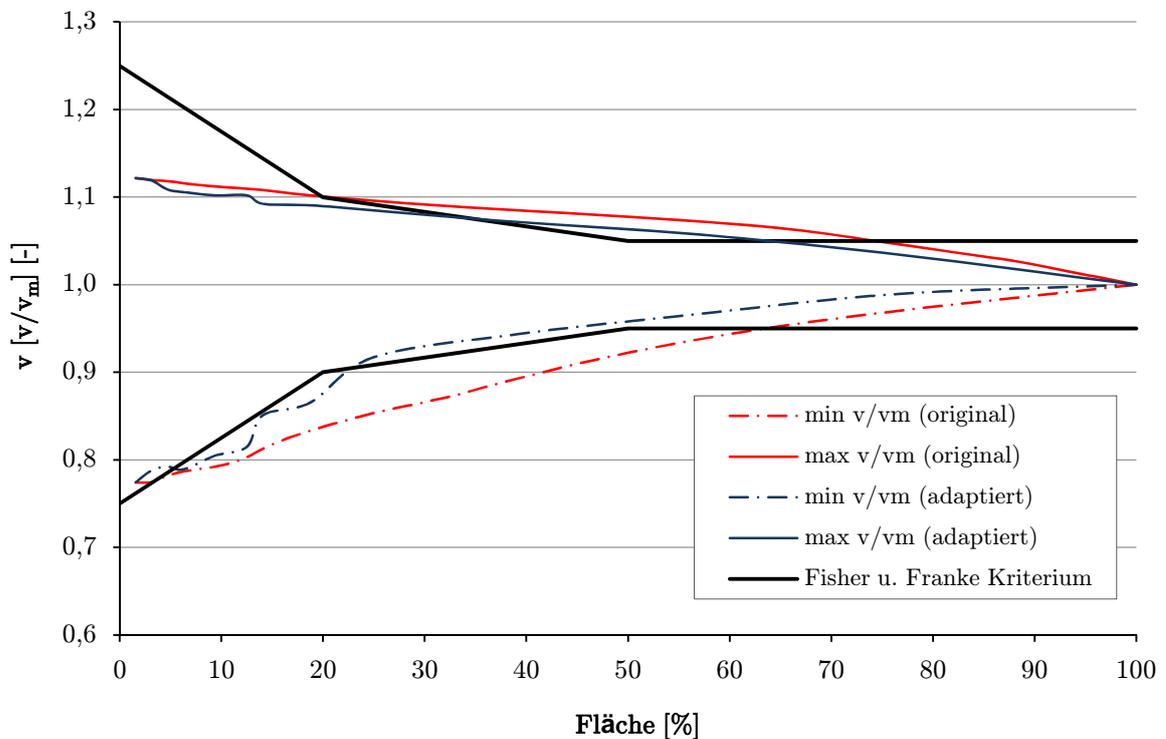


Abbildung 7.78.: Auswertung der Geschwindigkeitsverteilung vor der Turbine 2 nach Fisher und Franke

8. Diskussion der Ergebnisse

Um einen Überblick zu den gemessenen Varianten zu erhalten wurden diese in der Tabelle 8.1 zusammengefasst. Dabei ist für jede Variante als Kriterium für die Güte der Turbinenanströmung der α – Wert und die Abweichung vom Fisher und Franke Kriterium nach der originalen und der adaptierten Auswertungsmethode angegeben. Die Reihung der Varianten erfolgte, in Abhängigkeit vom α – Wert, aufsteigend von der Variante, welche die beste Turbinenanströmung aufweist, zu jener mit der schlechtesten Anströmung.

Entgegen den Empfehlungen aus der Literatur bezüglich des Trennpfeilers von z.B Godde (1994) und Lang (1999), weist die Variante B2 mit der Verwendung des halbkreisförmigen Trennpfeilers aufgrund des α – Wertes von 1,009 die beste Turbinenanströmung auf. Die zweitbeste Variante unterschied sich von der vorhergehenden Konfiguration nur durch die seitliche vertikale Stufe vom Vorboden zur Wehrfeldsohle. Dabei wurde ebenfalls der halbkreisförmige Trennpfeiler verwendet. Bei beiden Versuchsvarianten wurde der flache Vorboden eingesetzt wodurch die Bucht in einem größeren Abstand vom Krafthaus angeordnet war. Wie man aus dem Kapitel 7 sehen konnte, wurde die Bucht bei flachem Vorboden nie vollkommen durchströmt. Somit kann für die zwei besten Varianten gesagt werden, dass die Ablösungen in der Bucht keinen Einfluss auf die Turbinenanströmung hatten.

In weiterer Folge reihen sich bis auf eine Ausnahme (flacher Vorboden, halbkreisförmiger Trennpfeiler) immer die Varianten, bei denen die Messungen während Hochwasserabfuhr durchgeführt wurden, vor den laut Geometrie korrespondierenden Varianten. Als schlechteste untersuchte Variante stellte sich die Nummer B23 heraus, bei der der α – Wert 1,062 betrug.

Um einen genaueren Aufschluss über die Einflüsse der untersuchten Geometrien und Betriebszustände auf die Güte der Turbinenanströmung zu erhalten, werden diese im folgenden Kapitel miteinander verglichen. Diese Vergleiche werden basierend auf einem veränderten Element und dessen Auswirkung in verschiedenen Kombinationen auf die Geschwindigkeitsverteilung im Einlauf der Turbine 2 durchgeführt:

- Einfluss des Vorbodens bzw. der Bucht
- Einfluss des Trennpfeilers
- Einfluss der Hochwasserabfuhr
- Einfluss des Oberwasserspiegels

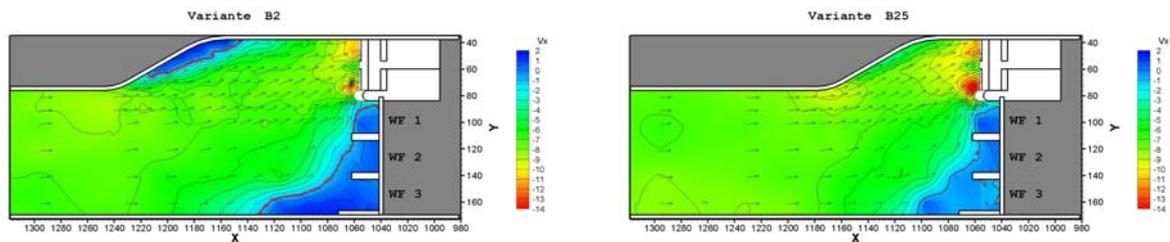
Nr.	Variante	Vorboden Trennpfeiler Seitenneigung	Q	Hochwasser- abfuhr	Oberwasser- stand	α -Wert	Fisher u. Franke	
							Abw. o.	Abw. u.
							original	
							adaptiert	
1	B2	flach Halbkreis ja	Q_a	nein	± 0	1,0089	4,124	3,036
							5,289	4,933
2	B1	flach Halbkreis nein	Q_a	nein	± 0	1,0105	3,329	2,776
							4,226	4,701
3	B27	steil Halbkreis ja	$2Q_a$	WF 1 u. 2	± 0	1,0165	2,236	1,303
							3,438	3,798
4	B42	steil Rouve ja	$2Q_a$	WF 1	± 0	1,0167	2,348	1,147
							3,714	3,511
5	B40	steil Rouve ja	$2Q_a$	WF 1 u. 2	± 0	1,0172	2,149	0,998
							3,364	3,192
6	B29	steil Halbkreis ja	$2Q_a$	WF 1	± 0	1,0175	2,186	1,063
							3,540	3,572
7	B10	flach Halbkreis ja	Q_a	nein	-2	1,0209	2,527	0,113
							3,540	3,259
8	B21	flach Rouve ja	$2Q_a$	WF 1	± 0	1,0232	2,080	-0,224
							3,341	2,334
9	B7	flach Halbkreis ja	$2Q_a$	WF 1	± 0	1,0238	1,392	-0,296
							2,897	2,740
10	B32	steil Rouve ja	Q_a	nein	± 0	1,0266	1,651	-0,786
							2,290	2,160
11	B19	flach Rouve ja	$2Q_a$	WF 1 u. 2	± 0	1,0286	1,707	-1,000
							2,944	1,054
12	B44	steil Rouve ja	Q_a	nein	-2	1,0293	1,056	-1,045
							2,190	1,727
13	B5	flach Halbkreis ja	$2Q_a$	WF 1 u. 2	± 0	1,0435	0,541	-3,390
							2,174	-0,974
14	B31	steil Halbkreis ja	Q_a	nein	-2	1,0480	0,129	-3,974
							0,838	1,185
15	B25	steil Halbkreis ja	Q	nein	± 0	1,0490	0,259	-4,250
							0,831	2,163
16	B11	flach Rouve ja	Q_a	nein	± 0	1,0525	0,339	-4,580
							1,454	-0,351
17	B35	steil Rouve ja	$0,5Q_a$	nein	± 0	1,0616	-3,475	-5,230
							-0,701	3,845
18	B23	flach Rouve ja	Q_a	nein	-2	1,0776	-1,006	-7,415
							0,150	-1,312

Tabelle 8.1.: Gegenüberstellung aller gemessenen Varianten

8.1. Einfluss des Vorbodens bzw. der Bucht

Die Einflüsse des Vorbodens und der Bucht müssen gemeinsam betrachtet werden, da sich die Grundform der Bucht während der Versuche nicht änderte. Nur der Abstand der Bucht vom Krafthaus änderte sich in Abhängigkeit von der Vorbodenneigung (s. Kap. 5.1.1).

In der Abbildung 8.1 ist zu erkennen, dass die Bucht bei zu großem Abstand vom Krafthaus nicht vollkommen durchströmt wird. Hingegen bei den untersuchten Varianten mit dem steilen Vorboden (Bucht näher am Krafthaus) löst sich die Strömung in der Bucht nicht ab. Dieser Unterschied besteht bei allen untersuchten Varianten.

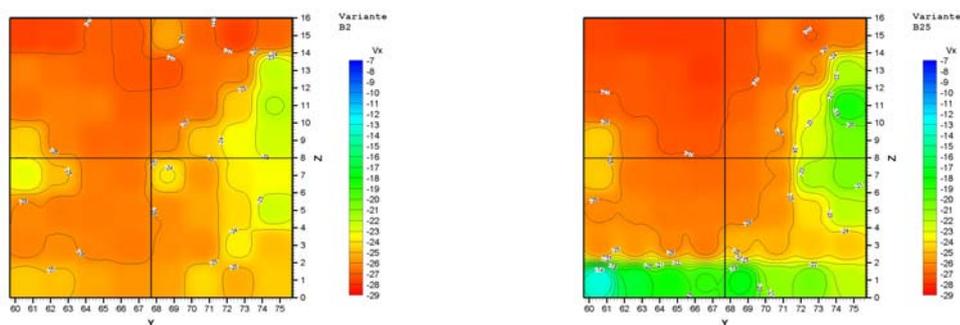


(a) flacher Vorboden (B2)

(b) steiler Vorboden (B25)

Abbildung 8.1.: Geschwindigkeitsverteilungen im Oberwasser bei Verwendung der zwei Vorböden kombiniert mit: halbkreisförmigen Trennpfeiler, keiner Hochwasserabfuhr, Oberwasserspiegel ± 0

Bei der Verwendung des halbkreisförmigen Trennpfeilers und der Wasserabfuhr nur über die Turbinen, ist die Geschwindigkeit über den Querschnitt des Einlaufes der Turbine 2 beim flachen Vorboden gleichmäßiger verteilt als beim steilen Vorboden. Vor allem am Boden erkennt man den Einfluss des steilen Vorbodens. Bei dieser Gegenüberstellung erkennt man zudem, dass die Ablösung in der weiten Bucht in diesem Fall keinen Einfluss auf die Turbinenanstömung hat (s. Abbildung 8.2).



(a) flacher Vorboden (B2)

(b) steiler Vorboden (B25)

Abbildung 8.2.: Geschwindigkeitsverteilungen im Einlauf der Turbine 2 bei Verwendung der zwei Vorböden kombiniert mit: halbkreisförmigen Trennpfeiler, keiner Hochwasserabfuhr, Oberwasserspiegel ± 0

In Kombination mit dem Trennpfeiler nach Rouvé ist die Charakteristik der Geschwindigkeitsverteilungen ähnlich, wobei beim flachen Vorboden die Geschwindigkeitsdifferenzen am Boden größer sind als beim steilen Vorboden (s. Abbildung 8.3). Dies spiegelt sich auch im α – Wert wieder, mit $\alpha = 1,053$ für den

flachen Vorboden und $\alpha = 1,027$ für den steilen Vorboden (s. Tab. 8.1).

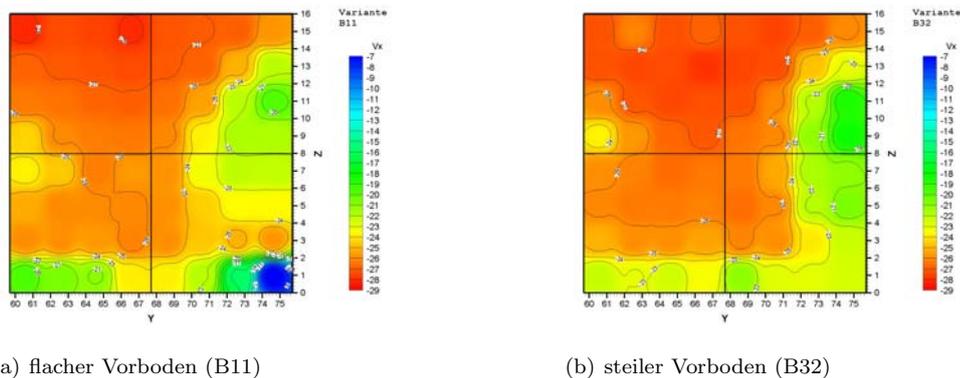


Abbildung 8.3.: Geschwindigkeitsverteilungen im Einlauf der Turbine 2 bei Verwendung der zwei Vorböden kombiniert mit: Trennpfeiler nach Rouvé, keiner Hochwasserabfuhr, Oberwasserspiegel ± 0

Wenn man die zwei untersuchten Vorbodenneigungen in Kombination mit dem Trennpfeiler nach Rouvé und zusätzlicher Hochwasserabfuhr über die Wehrfelder 1 und 2 vergleicht, ist die Strömung in der Turbinenebene beim steilen Vorboden gleichmäßiger. Einen negativen Einfluss auf das Strömungsbild hat vor allem der kleine Bereich mit erheblich niedrigerer Geschwindigkeit an der wehrfeldseitigen Sohle (s. Abbildung 8.4).

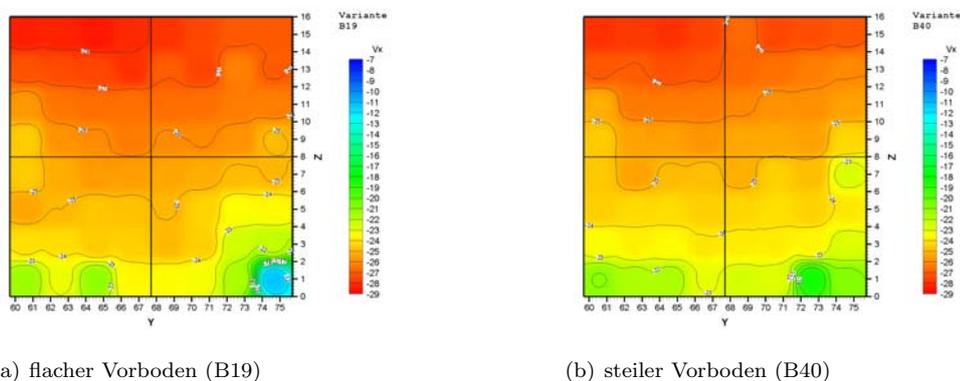
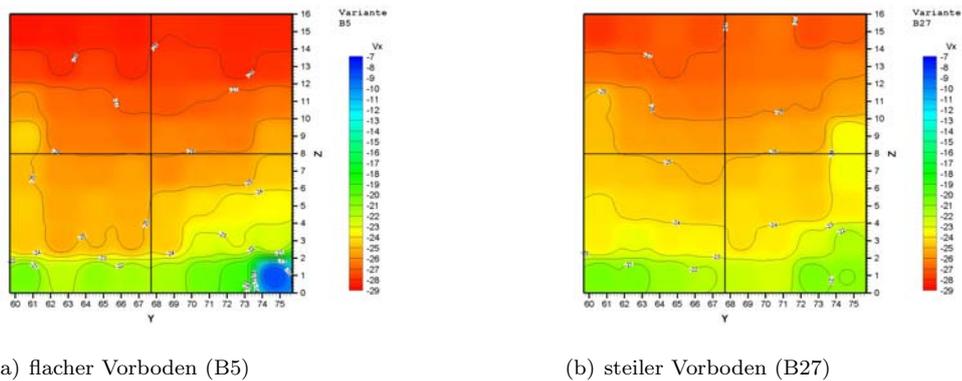


Abbildung 8.4.: Geschwindigkeitsverteilungen im Einlauf der Turbine 2 bei Verwendung der zwei Vorböden kombiniert mit: Trennpfeiler nach Rouvé, Hochwasserabfuhr WF1 und WF2, Oberwasserspiegel ± 0

Beim Vergleich in Abbildung 8.5 ist die Charakteristik der zwei Geschwindigkeitsverteilungen sehr ähnlich jener aus dem vorherigen Vergleich. Auch bei der Abfuhr des Hochwassers über ein Wehrfeld und der Verwendung des halbkreisförmigen Trennpfeilers stellt sich der steile Vorboden als vorteilhafter für die Geschwindigkeitsverteilung in der Turbinenebene heraus. Dies wird auch durch den α – Wert bestätigt. Alle Varianten bei Hochwasserabfuhr und Verwendung des steilen Vorbodens haben einen gleichen α – Wert von 1,017 der kleiner ist als bei den Varianten mit Hochwasserabfuhr und Verwendung des flachen Vorbodens (s. Tab. 8.1).



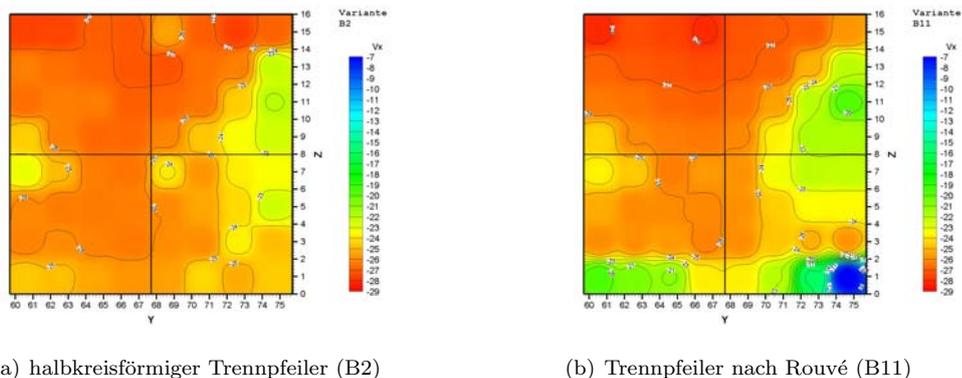
(a) flacher Vorboden (B5)

(b) steiler Vorboden (B27)

Abbildung 8.5.: Geschwindigkeitsverteilungen im Einlauf der Turbine 2 bei Verwendung der zwei Vorböden kombiniert mit: halbkreisförmiger Trennpfeiler, Hochwasserabfuhr WF1, Oberwasserspiegel ± 0

8.2. Einfluss des Trennpfeilers

Wie schon einführend vermerkt, weist der halbkreisförmige Trennpfeiler in Kombination mit dem flachen Vorboden und keiner Hochwasserabfuhr die beste Anströmung in der Turbinenebene auf. Im nachfolgenden Vergleich ist diese Variante mit der korrespondierenden Variante, abgesehen vom Trennpfeiler, gegenübergestellt. Der Unterschied zeigt sich im Strömungsbild vor allem an der rechten Wand und an der Sohle. An der rechten Wand ist die Ablösung, welche durch die am Trennpfeiler beschleunigte Strömung aus dem verschlossenen Wehrfeldbereich entsteht, bei der Variante mit dem Trennpfeiler nach Rouvé maßgeblicher ausgebildet. Zudem treten an der Sohle beim Trennpfeiler nach Rouvé erheblich niedrigere Geschwindigkeiten auf (s. Abbildung 8.6).



(a) halbkreisförmiger Trennpfeiler (B2)

(b) Trennpfeiler nach Rouvé (B11)

Abbildung 8.6.: Geschwindigkeitsverteilungen im Einlauf der Turbine 2 bei Verwendung der zwei Trennpfeiler kombiniert mit: flachem Vorboden, keiner Hochwasserabfuhr, Oberwasserspiegel ± 0

Beim Vergleich der Varianten mit verschiedenen Trennpfeilern, kombiniert mit dem steilen Vorboden und keiner Hochwasserabfuhr, ist die Charakteristik der Strömungsbilder ähnlich. An der Sohle treten bei der Geschwindigkeitsverteilung des halbkreisförmigen Trennpfeilers aber erheblich niedrigere Geschwindigkeiten auf (s. Abbildung 8.7). Dies spiegelt sich, wie man aus der Tabelle 8.1 entnehmen kann, auch im *alpha* – Wert wieder, mit $\alpha = 1,049$ für den halbkreisförmigen Trennpfeiler und $\alpha = 1,027$ für den

Trennpfeiler nach Rouvé.

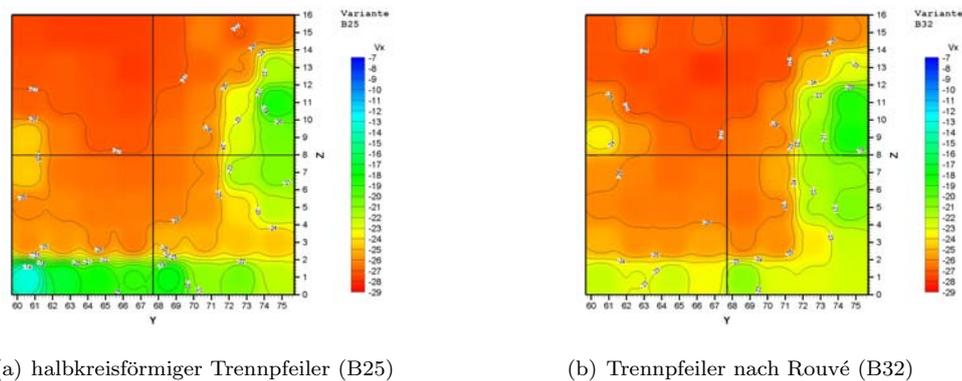


Abbildung 8.7.: Geschwindigkeitsverteilungen im Einlauf der Turbine 2 bei Verwendung der zwei Trennpfeiler kombiniert mit: steilem Vorboden, keiner Hochwasserabfuhr, Oberwasserspiegel ± 0

Die Geschwindigkeitsverteilung ist bei der Variante mit dem Trennpfeiler nach Rouvé, dem flachen Vorboden und der Hochwasserabfuhr über die Wehrfelder 1 und 2 gleichmäßiger als bei der Variante mit dem halbkreisförmigen Trennpfeiler (s. Abbildung 8.8). Bei der Hochwasserabfuhr über ein Wehrfeld und ansonsten derselben Kombination, sieht der Vergleich ähnlich aus.

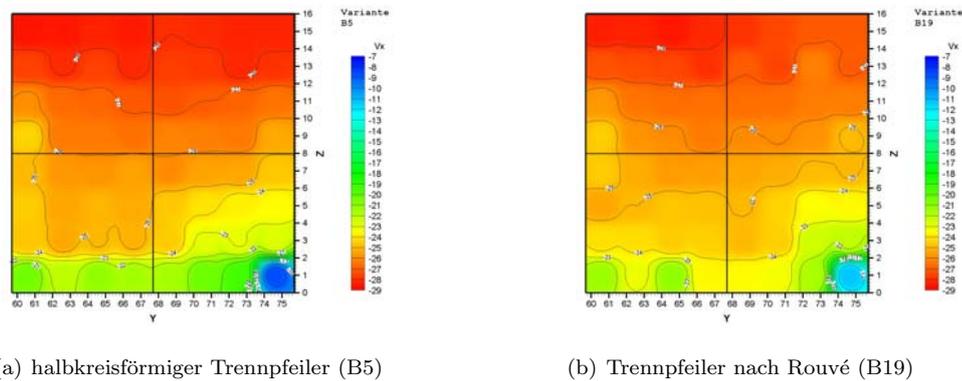


Abbildung 8.8.: Geschwindigkeitsverteilungen im Einlauf der Turbine 2 bei Verwendung der zwei Trennpfeiler kombiniert mit: flachem Vorboden, Hochwasserabfuhr WF1 und WF2, Oberwasserspiegel ± 0

Bei der Hochwasserabfuhr sowohl über ein Wehrfeld als auch über zwei Wehrfelder, kombiniert mit dem steilen Vorboden, besteht kein Unterschied zwischen den Geschwindigkeitsverteilungen. Der Trennpfeiler scheint auf die Strömung im Turbineneinlauf wie in Abbildung 8.9 dargestellt ist, bei diesen Varianten keinen Einfluss zu haben. Dies bestätigt auch der α -Wert in der Tabelle 8.1.

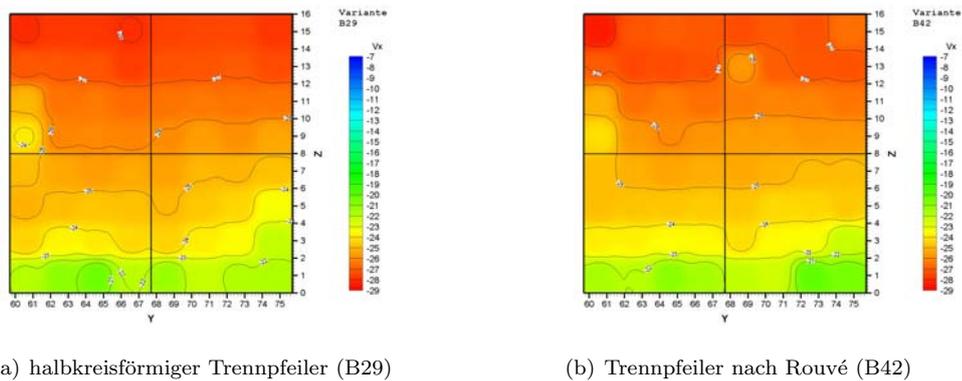


Abbildung 8.9.: Geschwindigkeitsverteilungen im Einlauf der Turbine 2 bei Verwendung der zwei Trennpfeiler kombiniert mit: steilem Vorboden, Hochwasserabfuhr WF1, Oberwasserspiegel ± 0

8.3. Einfluss der Hochwasserabfuhr

Durch den Vergleich der Geschwindigkeitsverteilungen vor der Turbine 2 von den Varianten bei keiner bzw. zusätzlicher Hochwasserabfuhr ist vor allem ein Unterschied an der wehrfeldseitigen Wand zu erkennen. Die Ablösung der am Trennpfeiler beschleunigten Strömung, welche aus dem Bereich der verschlossenen Wehrfelder in den Turbineneinlauf kommt, tritt bei den Varianten mit Hochwasserabfuhr nicht auf. Die Geschwindigkeit nimmt bei den Varianten mit Hochwasserabfuhr über die Wehrfelder in parallelen Schichten von oben nach unten ab (s. Abbildung 8.10 bis 8.13).

Die Gegenüberstellung in Abbildung 8.10 stellt den einzigen Fall dar, in dem die Variante ohne Hochwasserabfuhr die bessere Geschwindigkeitsverteilung vor der Turbine aufweist, als bei den korrespondierenden Varianten mit Hochwasserabfuhr. Dies wird auch durch den *alpha* – Wert laut Tabelle 8.1 bestätigt.

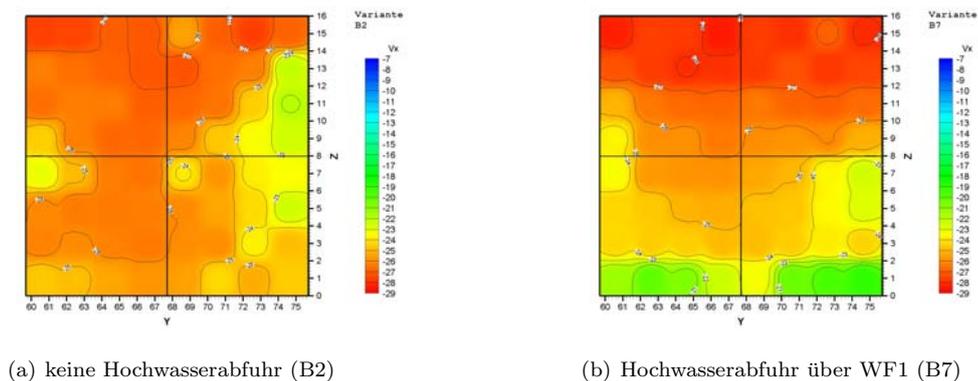


Abbildung 8.10.: Geschwindigkeitsverteilungen im Einlauf der Turbine 2 bei keiner bzw. zusätzlicher Hochwasserabfuhr kombiniert mit: halbkreisförmigen Trennpfeiler, flachem Vorboden, Oberwasserspiegel ± 0

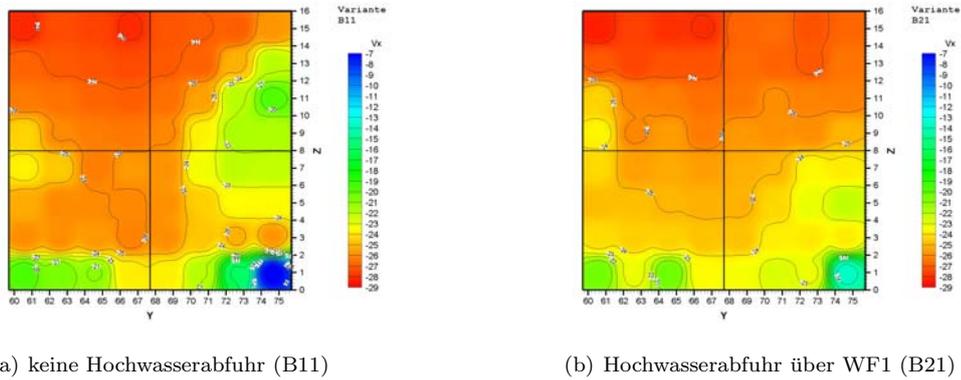


Abbildung 8.11.: Geschwindigkeitsverteilungen im Einlauf der Turbine 2 bei keiner bzw. zusätzlicher Hochwasserabfuhr kombiniert mit: Trennpfeiler nach Rouvé, flachem Vorboden, Oberwasserspiegel ± 0

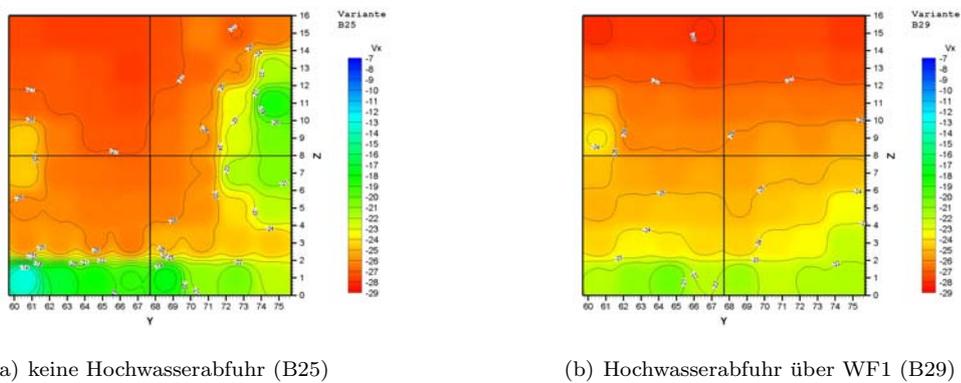


Abbildung 8.12.: Geschwindigkeitsverteilungen im Einlauf der Turbine 2 bei keiner bzw. zusätzlicher Hochwasserabfuhr kombiniert mit: halbkreisförmigen Trennpfeiler, steilem Vorboden, Oberwasserspiegel ± 0

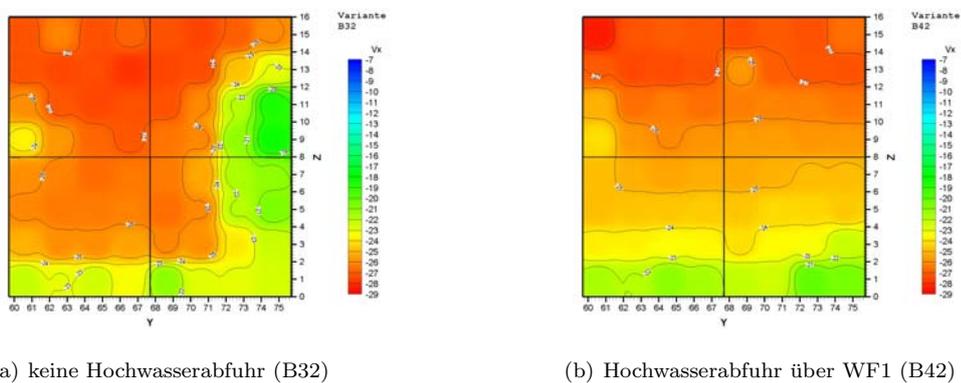


Abbildung 8.13.: Geschwindigkeitsverteilungen im Einlauf der Turbine 2 bei keiner bzw. zusätzlicher Hochwasserabfuhr kombiniert mit: Trennpfeiler nach Rouvé, steilem Vorboden, Oberwasserspiegel ± 0

In den vier dargestellten Abbildungen (8.10, 8.11, 8.12 u. 8.13) sind nur die Varianten mit der Hochwasserabfuhr über das Wehrfeld 1, den zugehörigen Varianten ohne Hochwasserabfuhr gegenübergestellt. Die Turbinenanströmung ist bei den Varianten mit der Hochwasserabfuhr über ein Wehrfeld geringfügig

besser als bei den Varianten mit der Hochwasserabfuhr über zwei Wehrfelder. Durch den Vergleich der Varianten bei reinem Turbinenbetrieb, mit den Varianten bei zusätzlicher Hochwasserabfuhr über zwei Wehrfelder würde sich dasselbe Ergebnis wie in den Abbildungen 8.10, 8.11, 8.12 und 8.13 ergeben. Deshalb wird hier auf die Gegenüberstellung dieser verzichtet.

8.4. Einfluss des Oberwasserspiegels

Durch den niedrigeren Wasserspiegel aber gleichen Durchfluss, treten die höheren Fließgeschwindigkeiten im Zulaufbereich zu den Turbinen auf. Dadurch sollten sich Ablösungen stärker ausbilden. Dies wird in den nachfolgenden Abbildungen 8.14 bis 8.17 bestätigt. Die Charakteristik der Geschwindigkeitsverteilungen ist bei den jeweils gegenübergestellten Varianten identisch. Die Zonen der Ablösungen sind aber bei allen Varianten stärker ausgebildet.

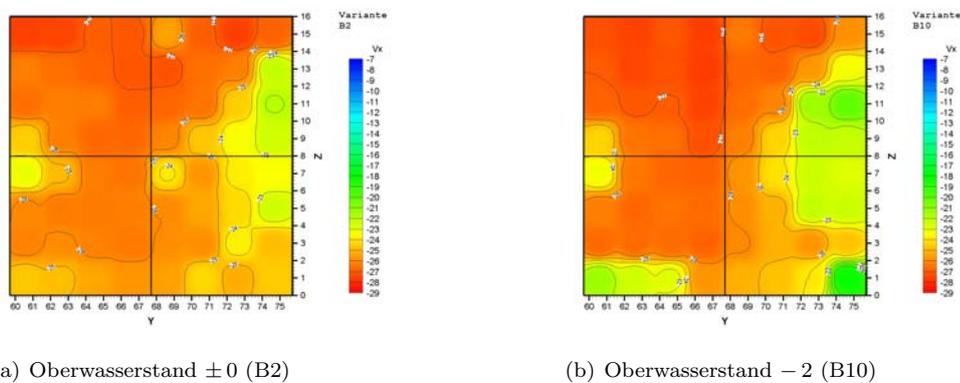


Abbildung 8.14.: Geschwindigkeitsverteilungen im Einlauf der Turbine 2 bei den zwei Oberwasserspiegeln kombiniert mit: halbkreisförmigen Trennpfeiler, flachem Vorboden, keiner Hochwasserabfuhr

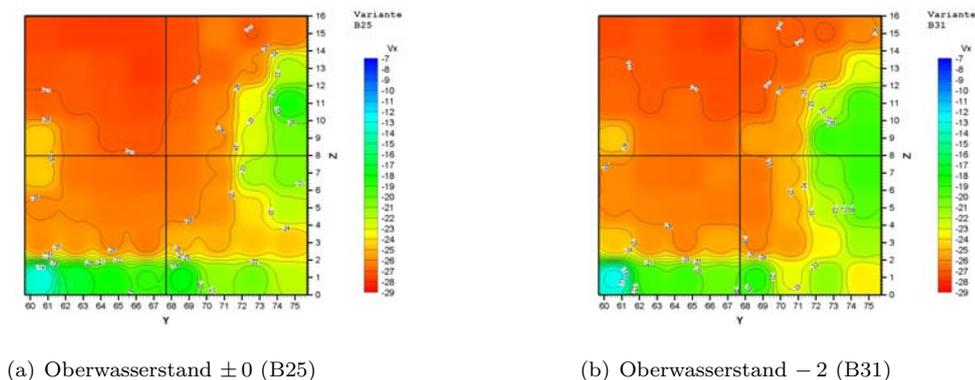
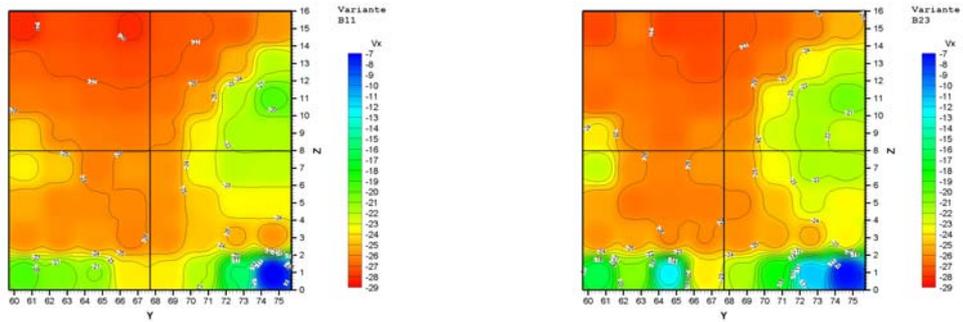


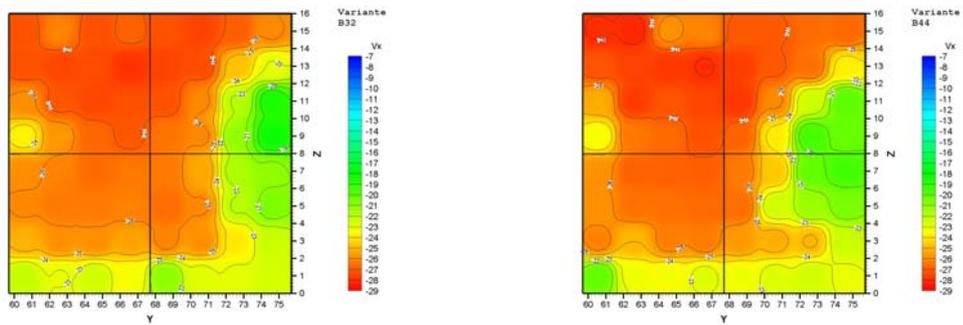
Abbildung 8.15.: Geschwindigkeitsverteilungen im Einlauf der Turbine 2 bei den zwei Oberwasserspiegeln kombiniert mit: halbkreisförmigen Trennpfeiler, steilem Vorboden, keiner Hochwasserabfuhr



(a) Oberwasserstand ± 0 (B11)

(b) Oberwasserstand $- 2$ (B23)

Abbildung 8.16.: Geschwindigkeitsverteilungen im Einlauf der Turbine 2 bei den zwei Oberwasserspiegeln kombiniert mit: Trennpfeiler nach Rouvé, flachem Vorboden, keiner Hochwasserabfuhr



(a) Oberwasserstand ± 0 (B32)

(b) Oberwasserstand $- 2$ (B44)

Abbildung 8.17.: Geschwindigkeitsverteilungen im Einlauf der Turbine 2 bei den zwei Oberwasserspiegeln kombiniert mit: Trennpfeiler nach Rouvé, steilem Vorboden, keiner Hochwasserabfuhr

9. Zusammenfassung

Die bauliche Beeinflussung der Anströmung an das Buchtenkraftwerk wurde durch die Analyse von drei Modellberichten, zu hydraulischen Versuchen von Kraftwerken an der Saar, und durch eigene Modellversuche untersucht. Im Gegensatz zu den Modellversuchen für die Saarkraftwerke, bei denen die Untersuchungen nur bei reinem Turbinenbetrieb durchgeführt wurden, beinhaltet der eigene Modellversuch neben geometrischen Varianten auch den Einfluss von verschiedenen Wehrbetriebszuständen der Gesamtanlage auf die Turbinenanströmung.

Bei der Analyse der drei Modellberichte zu den Saarkraftwerken wurden zunächst die Geschwindigkeitsverteilungen der wehrfeldseitigen Turbine nach dem α -Wert ausgewertet, um ein quantitatives Kriterium für die Beurteilung der Anströmverhältnisse der Turbine zu erhalten. Dabei wurde festgestellt, dass dieses quantitative Kriterium sehr gut mit der visuellen Beurteilung der Geschwindigkeitsverteilungen in den Modellberichten übereinstimmt. Durch das Parametrisieren der in den Modellversuchen verwendeten Trennpfeiler- und Buchtenformen wurde versucht ein Zusammenhang zwischen den einzelnen Parametern und dem α -Wert in Anlehnung an Godde (1994) herauszufinden. Aufgrund der vielen verschiedenen geometrischen Veränderungen an den Trennpfeilern und Buchten stellte sich ein einheitliches modellübergreifendes Vorgehen als sehr schwer heraus. Zudem wurde bei einem Kraftwerk die Geschwindigkeitsmessung in einem anderen Querschnitt durchgeführt, was sich im α -Wert widerspiegelt, und einen auf den α -Wert bezogenen Vergleich der Parameter zwischen den einzelnen Kraftwerken unmöglich machte. Es konnte für keinen Parameter ein lineares Verhältnis gefunden werden. Beim Kraftwerk Mettlach wurde anhand eines Trennpfeilers nachgewiesen, dass das von Godde (1994) als linear angenommene Verhältnis von abgewickelter Länge des Trennpfeilers zum α -Wert nicht immer zutrifft. Die Trennpfeiler- und Buchtenformen, welche im jeweiligen Modellversuch zum besten α -Wert beitrugen, wurden modellübergreifend nur über die Parameter verglichen. Dieser Vergleich ergab die Erkenntnis, dass auch bei den Grundformen der jeweils besten Trennpfeiler und Buchten keine Übereinstimmung gefunden werden konnte. Eine Gemeinsamkeit bei allen drei Kraftwerken war, dass die Trennpfeiler mit der vorgesetzten Leitwand immer zu einer günstigeren Turbinenanströmung bei reinem Turbinenbetrieb beitragen (s. Kap. 4).

Bei den eigenen Modellversuchen wurde die Anströmung an Buchtenkraftwerke hinsichtlich verschiedener Bauteilgeometrien (Bucht, Trennpfeiler und Vorböden) unter verschiedenen Betriebsführungsverhältnissen untersucht. Die Untersuchungen wurden an einem Vollmodell durchgeführt. Die Beurteilung der Anströmung erfolgte mit Hilfe von Geschwindigkeitsverteilungen im Oberwasserbereich, der Rechenebenen und der Ebene vor der wehrfeldseitigen Turbine. Zur Erstellung dieser Geschwindigkeitsverteilungen

wurde mit einer ADV-Sonde punktuell in den verschiedenen Ebenen die Geschwindigkeit gemessen. Als zusätzliche quantitative Beurteilungskriterien wurden die Geschwindigkeitsverteilungen für die Ebene vor der wehrfeldseitigen Turbine nach dem α -Wert und dem Kriterium nach Fisher und Franke ausgewertet. Entgegen den Erwartungen bezüglich der Ausbildung des Trennpfeilers erzielten die Varianten B1 und B2, bei welchen der halbkreisförmige Trennpfeiler verwendet wurde, die besten α -Werte. Bei diesen zwei Varianten war die Bucht, aufgrund des flachen Vorbodens, weiter ins Oberwasser verschoben. Wie im Kapitel 7 bei der detaillierten Betrachtung der einzelnen Varianten aufgezeigt ist, wird die lange Bucht (flacher Vorboden) bei keiner Variante vollkommen durchströmt. Diese Ablösungen in der Bucht scheinen aber keinen Einfluss auf die Anströmung der Turbine zu nehmen.

Aufgrund der Geschwindigkeitsverteilung vor der wehrfeldseitigen Turbine können laut Tabelle 8.1 die folgenden generellen Erkenntnisse erhalten werden:

- der flache Vorboden ist bei reinem Turbinenbetrieb besser, bei zusätzlicher Hochwasserabfuhr über die Wehrfelder verbessert sich die Geschwindigkeitsverteilung hingegen beim steilen Vorboden
- bei steilem Vorboden und gleichzeitiger Hochwasserabfuhr über die Wehrfelder scheint die Trennpfeilerform keinen Einfluss auf die Geschwindigkeitsverteilung zu haben
- mit Ausnahme der Varianten B1 und B2 verbessern sich die Strömungsverhältnisse bei gleichzeitiger Hochwasserabfuhr über die Wehrfelder
- bei niedrigerem Oberwasserspiegel aber gleichem Durchfluss verschlechtern sich durch die höheren Geschwindigkeiten die Geschwindigkeitsverteilungsverhältnisse

Aufgrund der Unterschiede zwischen den Messebenen im eigenen Modellversuch und den hydraulischen Modellversuchen zu den Kraftwerken an der Saar, können keine auf den α -Wert bezogene quantitative Affinitäten zwischen der Literaturanalyse und dem hydraulischen Modellversuch hergestellt werden. Allerdings kann sowohl durch die Analyse der Versuche zu den Saarkraftwerken als auch durch den eigenen Modellversuchen gezeigt werden, dass die gesonderte Betrachtung einzelner Elemente nicht ausreicht um schlüssige Aussagen über den Einfluss auf die Anströmung des Kraftwerkes zu erhalten. Es wurde festgestellt, dass immer die Kombination der einzelnen Elemente betrachtet werden muss. Dazu müssten aber mehr vergleichbare bestehende Kraftwerke analysiert werden und im Modellversuch noch zusätzliche Varianten, mit den Varianten dieser Arbeit, kombiniert werden. So könnten noch die selben Varianten, wie in den Modellversuchen dieser Arbeit betrachtet wurden, für ein Kraftwerk, das in einer Verengung des Flusses oder in einer geraden Zulaufstrecke liegt, verglichen werden. Des Weiteren ist im Bezug auf die Formgebung des Trennpfeilers mit Leitwand noch viel Forschungsarbeit offen, da es seit Rouvé (1958) keine Untersuchungen mehr zu diesem Thema gab.

Literaturverzeichnis

- [Bollrich 2007] BOLLRICH, G.: *Technische Hydromechanik 1 - Grundlagen*. 6. Auflage. Huss-Media GmbH Berlin, 2007
- [Giesecke und Mosonyi 2005] GIESECKE, J. ; MOSONYI, E.: *Wasserkraftanlagen; Planung, Bau und Betriebsführungsverhältnissen*. 4. Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005
- [Godde 1994] GODDE, D.: Experimentelle Untersuchungen zur Anströmung von Rohrturbinen. Ein Beitrag zur Optimierung des Turbineneinlaufes / Versuchsanstalt Obernach und Lehrstuhl für Wasserbau und Wassermengenwirtschaft der Technischen Universität München. 1994 (Nr. 75). – Forschungsbericht
- [HAÖ 2005] HAÖ: *Hydrologischer Atlas Österreich*. 2005. – Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW)
- [Jambor 1956] JAMBOR, F.: Formgebung des Trennpfeilers in Flusskraftwerken. In: *Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau* Nr. 7 (1956), S. 51–61
- [Lang 1999] LANG, T.: Geometrische Kriterien zur Gestaltung von Kraftwerkseinläufen. Experimentelle Untersuchungen an Rohr-S-Turbinen und Durchströmturbinen / Versuchsanstalt Obernach und Lehrstuhl für Wasserbau und Wassermengenwirtschaft der Technischen Universität München. 1999 (Nr. 88). – Forschungsbericht
- [Lasar und Kemnitz 1978] LASAR ; KEMNITZ: Gutachten über das Kraftwerk Mettlach/Saar / Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) Karlsruhe. 1978. – Forschungsbericht
- [Lasar und Kemnitz 1983] LASAR ; KEMNITZ ; (Hrsg.): Gutachten über das Kraftwerk Serrig/Saar / Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) Karlsruhe. , 1983. – Forschungsbericht
- [Lasar und Kemnitz 1984] LASAR ; KEMNITZ: Gutachten über den Einlauf des Kraftwerks Lisdorf/Saar / Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) Karlsruhe. 1984. – Forschungsbericht
- [Lebensministerium-VII 2004] LEBENSMINISTERIUM-VII: *Ziel ist die nachhaltige Wassernutzung in der Energiewirtschaft*. 2004. – <http://www.wassernet.at/article/articleview/19862/1/5658/>
- [Mayr 2008] MAYR, T.: *Bauliche und konstruktive Gestaltung von Buchtenkraftwerken*, Technische Universität Wien, Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, Diplomarbeit, 2008
- [Mosonyi 1966] MOSONYI, E.: *Wasserkraftwerke, Band 1 Niederdruckanlagen*. 2. Auflage. Düsseldorf, VDI-Verlag GmbH, 1966

- [Press 1959] PRESS, H.: *Stauanlagen und Wasserkraftwerke, II. Teil Wehre*. 2. Auflage. Berlin, Verlag von Wilhem Ernst & Sohn, 1959
- [Pöyry 2008] PÖYRY, Energy G.: *Wasserkraftpotentialstudie Österreich im Auftrag vom Verband der Elektrizitätsunternehmen Österreich*. 2008. – aus <http://www.veoe.at/8334.html>
- [Rouvé 1958] ROUVÉ, G.: *Der Krafthaustrennpfeiler; Strömungsverhältnisse an gekrümmten Wänden / Theodor Rehbock Flussbaulaboratorium der Technischen Hochschule Karlsruhe*. 1958 (Nr. 145). – Forschungsbericht
- [Statistik-Austria 2009] STATISTIK-AUSTRIA: *Energiebilanzen*. 2009. – http://www.statistik.at/web_de/statistiken/energie_und_umwelt/energie/energiebilanzen/index.html
- [Strobl und Zunic 2006] STROBL, T. ; ZUNIC, F.: *Wasserbau; Aktuelle Grundlagen - Neue Entwicklungen*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006
- [Todorov 2010] TODOROV, D.: *Anströmung von Niederdruckanlagen unter verschiedenen Betriebsführungsverhältnissen*, Technische Universität Wien, Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, Diplomarbeit, 2010
- [Tschernutter u. a. 2008] TSCHERNUTTER, P. ; PUCHER, M. ; MAYR, T. ; SCHÜLL, M.: *HCG Mur, Hydraulischer Modellversuch für das Kraftwerk Gössendorf / Technische Universität Wien, Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie*. 2008. – Forschungsbericht
- [Wittmann und Gabrecht 1954] WITTMANN, H. ; GABRECHT, G.: *Untersuchungen für Laufwasserkraftstufen*. In: *Die Wasserwirtschaft* Jg. 1954/55 H.45 (1954), S. 33–39

Abbildungsverzeichnis

2.1. Einteilung der Flusskraftwerke (Strobl und Zunic, 2006)	3
2.2. Relative Lage des Krafthauses zur Wehranlage (Giesecke und Mosonyi, 2005)	4
3.1. Strömungsverlauf eines Buchtenkraftwerks bei geschlossenem Wehr (a) und bei offenem Wehr (b) (Press, 1959)	5
3.2. Ausbildung der Buchten (Mosonyi, 1966)	6
3.3. Ausbildung der Buchte (Wittmann und Gabrecht, 1954)	7
3.4. Anordnung des Trennpfeilers (Godde, 1994)	8
3.5. Trennpfeilerform nach Wittmann und Gabrecht (1954)	9
3.6. Geschwindigkeitsverlauf entlang der Trennpfeilerwand (Rouvé, 1958)	9
3.7. Trennpfeilerform nach Rouvé (1958)	10
3.8. Beispiel für einen Trennpfeiler mit Leinwand nach Jambor (1956)	11
3.9. Totwasserzone bei verschieden positionierter Wehranlage (Godde, 1994)	12
3.10. Unterschied Trennpfeilerformen von Godde (1994)	13
3.11. Bezeichnungen der abgewinkelten Längen nach Godde (1994)	13
3.12. Beziehung zwischen L bzw. L' und dem α -Wert (Godde, 1994)	14
3.13. Untersuchte Trennpfeilerformen von Lang (1999)	14
3.14. Lokale und mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Fließquerschnitt (Bollrich, 2007)	16
3.15. Unterschied zwischen laminarer (a) und turbulenter Strömung (b) (Bollrich, 2007)	16
3.16. Auswertungsdiagramm nach Fisher und Franke	17
4.1. Parameter der Trennpfeiler	20
4.2. Parameter der OW-Buchten	21
4.3. Entwicklung des α -Wertes mit der Versuchsgeschichte beim KW Mettlach	22
4.4. Trennpfeiler beim KW Mettlach (Lasar und Kemnitz, 1978)	24
4.5. OW-Buchten beim KW Mettlach (Lasar und Kemnitz, 1978)	25
4.6. Zusammenhang zwischen der abgewinkelten Länge L' und dem α -Wert	25
4.7. Zusammenhang zwischen den Parametern und dem α -Wert beim KW Mettlach	26
4.8. Entwicklung des α -Wertes mit der Versuchsgeschichte beim KW Serrig	27
4.9. Trennpfeiler beim KW Serrig (Lasar und Kemnitz, 1983)	28
4.10. Zusammenhang zwischen den Parametern und dem α -Wert beim KW Serrig	29
4.11. Entwicklung des α -Wertes mit der Versuchsgeschichte beim KW Lisdorf	30
4.12. Trennpfeiler beim KW Lisdorf (Lasar und Kemnitz, 1984)	31
4.13. Zusammenhang zwischen den Parametern und dem α -Wert beim KW Lisdorf	32
4.14. Längsschnitt durch das KW Mettlach mit eingezeichneter Messebene (Lasar und Kemnitz, 1978)	34
4.15. Längsschnitt durch das KW Serrig mit eingezeichneter Messebene (Lasar und Kemnitz, 1983)	35
4.16. Ausgewählte Pfeiler aus den drei Modellberichten	36
4.17. Zusammenhang zwischen den Parametern und dem α -Wert bei den ausgewählten Trennpfeilern	37
4.18. Ausgewählte Pfeiler aus den drei Modellberichten übereinandergelegt	37
4.19. Ausgewählte Buchten aus den Modellberichten	38
5.1. Kraftwerk von OW gesehen	40
5.2. Skizze des Modellstandes	41
5.3. Modellstand mit flachem Vorboden	42
5.4. Modellstand mit steilem Vorboden	43
5.5. Halbkreisförmiger Trennpfeiler [cm]	44
5.6. Trennpfeiler nach Rouvé [cm]	44
5.7. Lochblender zur Regelung des Turbinendurchflusses	45
5.8. ADV-Sonde auf Messwagen	45
6.1. Zusammenstellung der untersuchten Varianten	47
6.2. Messraster OW bei flachem Vorboden	49
6.3. Messraster OW bei steilem Vorboden	50
6.4. Messraster vor der Rechenebene	50
6.5. Messraster im Turbineneinlauf	51

7.1. Geschwindigkeitsverteilung Oberwasser $Z = 13,5$	53
7.2. Geschwindigkeitsverteilung Oberwasser $Z = 19,5$	54
7.3. Geschwindigkeitsverteilung Oberwasser $Z = 24,5$	54
7.4. Geschwindigkeitsverteilung vor der Rechenebene	55
7.5. Geschwindigkeitsverteilung im Einlauf der Turbine 2	55
7.6. Auswertung der Geschwindigkeitsverteilung vor der Turbine 2 nach Fisher und Franke	56
7.7. Geschwindigkeitsverteilung Oberwasser $Z = 19,5$	57
7.8. Geschwindigkeitsverteilung vor der Rechenebene	58
7.9. Geschwindigkeitsverteilung im Einlauf der Turbine 2	58
7.10. Auswertung der Geschwindigkeitsverteilung vor der Turbine 2 nach Fisher und Franke	59
7.11. Geschwindigkeitsverteilung Oberwasser $Z = 19,5$	60
7.12. Geschwindigkeitsverteilung vor der Rechenebene	61
7.13. Geschwindigkeitsverteilung im Einlauf der Turbine 2	61
7.14. Auswertung der Geschwindigkeitsverteilung vor der Turbine 2 nach Fisher und Franke	62
7.15. Geschwindigkeitsverteilung Oberwasser $Z = 19,5$	63
7.16. Geschwindigkeitsverteilung vor der Rechenebene	64
7.17. Geschwindigkeitsverteilung im Einlauf der Turbine 2	64
7.18. Auswertung der Geschwindigkeitsverteilung vor der Turbine 2 nach Fisher und Franke	65
7.19. Geschwindigkeitsverteilung Oberwasser $Z = 19,5$	66
7.20. Geschwindigkeitsverteilung vor der Rechenebene	67
7.21. Geschwindigkeitsverteilung im Einlauf der Turbine 2	67
7.22. Auswertung der Geschwindigkeitsverteilung vor der Turbine 2 nach Fisher und Franke	68
7.23. Geschwindigkeitsverteilung Oberwasser $Z = 19,5$	69
7.24. Geschwindigkeitsverteilung vor der Rechenebene	70
7.25. Geschwindigkeitsverteilung im Einlauf der Turbine 2	70
7.26. Auswertung der Geschwindigkeitsverteilung vor der Turbine 2 nach Fisher und Franke	71
7.27. Geschwindigkeitsverteilung Oberwasser $Z = 19,5$	72
7.28. Geschwindigkeitsverteilung vor der Rechenebene	73
7.29. Geschwindigkeitsverteilung im Einlauf der Turbine 2	73
7.30. Auswertung der Geschwindigkeitsverteilung vor der Turbine 2 nach Fisher und Franke	74
7.31. Geschwindigkeitsverteilung Oberwasser $Z = 19,5$	75
7.32. Geschwindigkeitsverteilung vor der Rechenebene	76
7.33. Geschwindigkeitsverteilung im Einlauf der Turbine 2	76
7.34. Auswertung der Geschwindigkeitsverteilung vor der Turbine 2 nach Fisher und Franke	77
7.35. Geschwindigkeitsverteilung Oberwasser $Z = 19,5$	78
7.36. Geschwindigkeitsverteilung vor der Rechenebene	79
7.37. Geschwindigkeitsverteilung im Einlauf der Turbine 2	79
7.38. Auswertung der Geschwindigkeitsverteilung vor der Turbine 2 nach Fisher und Franke	80
7.39. Geschwindigkeitsverteilung Oberwasser $Z = 13,5$	82
7.40. Geschwindigkeitsverteilung Oberwasser $Z = 19,5$	82
7.41. Geschwindigkeitsverteilung Oberwasser $Z = 24,5$	82
7.42. Geschwindigkeitsverteilung vor der Rechenebene	83
7.43. Geschwindigkeitsverteilung im Einlauf der Turbine 2	83
7.44. Auswertung der Geschwindigkeitsverteilung vor der Turbine 2 nach Fisher und Franke	84
7.45. Geschwindigkeitsverteilung Oberwasser $Z = 19,5$	85
7.46. Geschwindigkeitsverteilung vor der Rechenebene	86
7.47. Geschwindigkeitsverteilung im Einlauf der Turbine 2	86
7.48. Auswertung der Geschwindigkeitsverteilung vor der Turbine 2 nach Fisher und Franke	87
7.49. Geschwindigkeitsverteilung Oberwasser $Z = 19,5$	88
7.50. Geschwindigkeitsverteilung vor der Rechenebene	89
7.51. Geschwindigkeitsverteilung im Einlauf der Turbine 2	89
7.52. Auswertung der Geschwindigkeitsverteilung vor der Turbine 2 nach Fisher und Franke	90
7.53. Geschwindigkeitsverteilung Oberwasser $Z = 19,5$	91
7.54. Geschwindigkeitsverteilung vor der Rechenebene	92
7.55. Geschwindigkeitsverteilung im Einlauf der Turbine 2	92
7.56. Auswertung der Geschwindigkeitsverteilung vor der Turbine 2 nach Fisher und Franke	93
7.57. Geschwindigkeitsverteilung Oberwasser $Z = 13,5$	94
7.58. Geschwindigkeitsverteilung Oberwasser $Z = 19,5$	95
7.59. Geschwindigkeitsverteilung Oberwasser $Z = 24,5$	95
7.60. Geschwindigkeitsverteilung vor der Rechenebene	96
7.61. Geschwindigkeitsverteilung im Einlauf der Turbine 2	96
7.62. Auswertung der Geschwindigkeitsverteilung vor der Turbine 2 nach Fisher und Franke	97
7.63. Geschwindigkeitsverteilung Oberwasser $Z = 19,5$	98

7.64. Geschwindigkeitsverteilung vor der Rechenebene	99
7.65. Geschwindigkeitsverteilung im Einlauf der Turbine 2	99
7.66. Auswertung der Geschwindigkeitsverteilung vor der Turbine 2 nach Fisher und Franke	100
7.67. Geschwindigkeitsverteilung Oberwasser $Z = 19,5$	101
7.68. Geschwindigkeitsverteilung vor der Rechenebene	102
7.69. Geschwindigkeitsverteilung im Einlauf der Turbine 2	102
7.70. Auswertung der Geschwindigkeitsverteilung vor der Turbine 2 nach Fisher und Franke	103
7.71. Geschwindigkeitsverteilung Oberwasser $Z = 19,5$	104
7.72. Geschwindigkeitsverteilung vor der Rechenebene	105
7.73. Geschwindigkeitsverteilung im Einlauf der Turbine 2	105
7.74. Auswertung der Geschwindigkeitsverteilung vor der Turbine 2 nach Fisher und Franke	106
7.75. Geschwindigkeitsverteilung Oberwasser $Z = 19,5$	107
7.76. Geschwindigkeitsverteilung vor der Rechenebene	108
7.77. Geschwindigkeitsverteilung im Einlauf der Turbine 2	108
7.78. Auswertung der Geschwindigkeitsverteilung vor der Turbine 2 nach Fisher und Franke	109
8.1. Geschwindigkeitsverteilungen im Oberwasser bei Verwendung der zwei Vorböden kombiniert mit: halbkreisförmigen Trennpfeiler, keiner Hochwasserabfuhr, Oberwasserspiegel ± 0	112
8.2. Geschwindigkeitsverteilungen im Einlauf der Turbine 2 bei Verwendung der zwei Vorböden kombini- niert mit: halbkreisförmigen Trennpfeiler, keiner Hochwasserabfuhr, Oberwasserspiegel ± 0	112
8.3. Geschwindigkeitsverteilungen im Einlauf der Turbine 2 bei Verwendung der zwei Vorböden kombini- niert mit: Trennpfeiler nach Rouvé, keiner Hochwasserabfuhr, Oberwasserspiegel ± 0	113
8.4. Geschwindigkeitsverteilungen im Einlauf der Turbine 2 bei Verwendung der zwei Vorböden kombini- niert mit: Trennpfeiler nach Rouvé, Hochwasserabfuhr WF1 und WF2, Oberwasserspiegel ± 0	113
8.5. Geschwindigkeitsverteilungen im Einlauf der Turbine 2 bei Verwendung der zwei Vorböden kombini- niert mit: halbkreisförmiger Trennpfeiler, Hochwasserabfuhr WF1, Oberwasserspiegel ± 0	114
8.6. Geschwindigkeitsverteilungen im Einlauf der Turbine 2 bei Verwendung der zwei Trennpfeiler kombi- niert mit: flachem Vorboden, keiner Hochwasserabfuhr, Oberwasserspiegel ± 0	114
8.7. Geschwindigkeitsverteilungen im Einlauf der Turbine 2 bei Verwendung der zwei Trennpfeiler kombi- niert mit: steilem Vorboden, keiner Hochwasserabfuhr, Oberwasserspiegel ± 0	115
8.8. Geschwindigkeitsverteilungen im Einlauf der Turbine 2 bei Verwendung der zwei Trennpfeiler kombi- niert mit: flachem Vorboden, Hochwasserabfuhr WF1 und WF2, Oberwasserspiegel ± 0	115
8.9. Geschwindigkeitsverteilungen im Einlauf der Turbine 2 bei Verwendung der zwei Trennpfeiler kombi- niert mit: steilem Vorboden, Hochwasserabfuhr WF1, Oberwasserspiegel ± 0	116
8.10. Geschwindigkeitsverteilungen im Einlauf der Turbine 2 bei keiner bzw. zusätzlicher Hochwasserab- fuhr kombiniert mit: halbkreisförmigen Trennpfeiler, flachem Vorboden, Oberwasserspiegel ± 0	116
8.11. Geschwindigkeitsverteilungen im Einlauf der Turbine 2 bei keiner bzw. zusätzlicher Hochwasserab- fuhr kombiniert mit: Trennpfeiler nach Rouvé, flachem Vorboden, Oberwasserspiegel ± 0	117
8.12. Geschwindigkeitsverteilungen im Einlauf der Turbine 2 bei keiner bzw. zusätzlicher Hochwasserab- fuhr kombiniert mit: halbkreisförmigen Trennpfeiler, steilem Vorboden, Oberwasserspiegel ± 0	117
8.13. Geschwindigkeitsverteilungen im Einlauf der Turbine 2 bei keiner bzw. zusätzlicher Hochwasserab- fuhr kombiniert mit: Trennpfeiler nach Rouvé, steilem Vorboden, Oberwasserspiegel ± 0	117
8.14. Geschwindigkeitsverteilungen im Einlauf der Turbine 2 bei den zwei Oberwasserspiegeln kombiniert mit: halbkreisförmigen Trennpfeiler, flachem Vorboden, keiner Hochwasserabfuhr	118
8.15. Geschwindigkeitsverteilungen im Einlauf der Turbine 2 bei den zwei Oberwasserspiegeln kombiniert mit: halbkreisförmigen Trennpfeiler, steilem Vorboden, keiner Hochwasserabfuhr	118
8.16. Geschwindigkeitsverteilungen im Einlauf der Turbine 2 bei den zwei Oberwasserspiegeln kombiniert mit: Trennpfeiler nach Rouvé, flachem Vorboden, keiner Hochwasserabfuhr	119
8.17. Geschwindigkeitsverteilungen im Einlauf der Turbine 2 bei den zwei Oberwasserspiegeln kombiniert mit: Trennpfeiler nach Rouvé, steilem Vorboden, keiner Hochwasserabfuhr	119
A.1. Strömungsbilder der Variante B1	129
A.2. Strömungsbilder der Variante B2	130
A.3. Strömungsbilder der Variante B5	131
A.4. Strömungsbilder der Variante B7	132
A.5. Strömungsbilder der Variante B11	133
A.6. Strömungsbilder der Variante B19	134
A.7. Strömungsbilder der Variante B21	135
A.8. Strömungsbilder der Variante B23	136
A.9. Strömungsbilder der Variante B25	137
A.10. Strömungsbilder der Variante B27	138
A.11. Strömungsbilder der Variante B29	139
A.12. Strömungsbilder der Variante B31	140
A.13. Strömungsbilder der Variante B32	141

A.14.Strömungsbilder der Variante B40	142
A.15.Strömungsbilder der Variante B42	143
A.16.Strömungsbilder der Variante B44	144

Tabellenverzeichnis

4.1. Nummerierung für das KW Mettlach	22
4.2. Parameter der Trennpfeiler beim KW Mettlach	23
4.3. Parameter der OW-Buchten beim KW Mettlach	23
4.4. Nummerierung für das KW Serrig	27
4.5. Parameter der Trennpfeiler beim KW Serrig	28
4.6. Parameter der OW-Bucht beim KW Serrig	29
4.7. Nummerierung für das KW Lisdorf	30
4.8. Parameter der Trennpfeiler beim KW Lisdorf	31
4.9. Auflistung aller Versuche	33
4.10. Vergleich der ausgewählten Trennpfeiler	35
4.11. Verhältnis von Eintrittsbreite zu Austrittsbreite	36
4.12. Vergleich der OW-Buchten	39
7.1. Basisdaten Variante B1	52
7.2. Geschwindigkeitsverteilung vor der Turbine 2	56
7.3. Basisdaten Variante B2	57
7.4. Geschwindigkeitsverteilung vor der Turbine 2	59
7.5. Basisdaten Variante B5	60
7.6. Geschwindigkeitsverteilung vor der Turbine 2	62
7.7. Basisdaten Variante B7	63
7.8. Geschwindigkeitsverteilung vor der Turbine 2	65
7.9. Basisdaten Variante B10	66
7.10. Geschwindigkeitsverteilung vor der Turbine 2	68
7.11. Basisdaten Variante B11	69
7.12. Geschwindigkeitsverteilung vor der Turbine 2	71
7.13. Basisdaten Variante B19	72
7.14. Geschwindigkeitsverteilung vor der Turbine 2	74
7.15. Basisdaten Variante B21	75
7.16. Geschwindigkeitsverteilung vor der Turbine 2	77
7.17. Basisdaten Variante B23	78
7.18. Geschwindigkeitsverteilung vor der Turbine 2	80
7.19. Basisdaten Variante B25	81
7.20. Geschwindigkeitsverteilung vor der Turbine 2	84
7.21. Basisdaten Variante B27	85
7.22. Geschwindigkeitsverteilung vor der Turbine 2	87
7.23. Basisdaten Variante B29	88
7.24. Geschwindigkeitsverteilung vor der Turbine 2	90
7.25. Basisdaten Variante B31	91
7.26. Geschwindigkeitsverteilung vor der Turbine 2	93
7.27. Basisdaten Variante B32	94
7.28. Geschwindigkeitsverteilung vor der Turbine 2	97
7.29. Basisdaten Variante B35	98
7.30. Geschwindigkeitsverteilung vor der Turbine 2	100
7.31. Basisdaten Variante B40	101
7.32. Geschwindigkeitsverteilung vor der Turbine 2	103
7.33. Basisdaten Variante B42	104
7.34. Geschwindigkeitsverteilung vor der Turbine 2	106
7.35. Basisdaten Variante B44	107
7.36. Geschwindigkeitsverteilung vor der Turbine 2	109
8.1. Gegenüberstellung aller gemessenen Varianten	111

A. Strömungsbilder

A.1. Variante B1



Z - Wasserspiegel



Z - 19,5

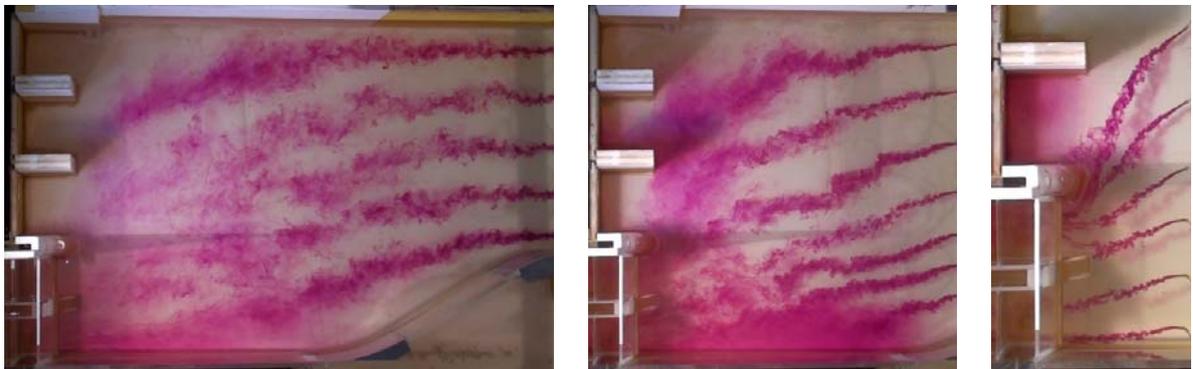


Z - Boden

Abbildung A.1.: Strömungsbilder der Variante B1

A.2. Variante B2

Z – Wasserspiegel



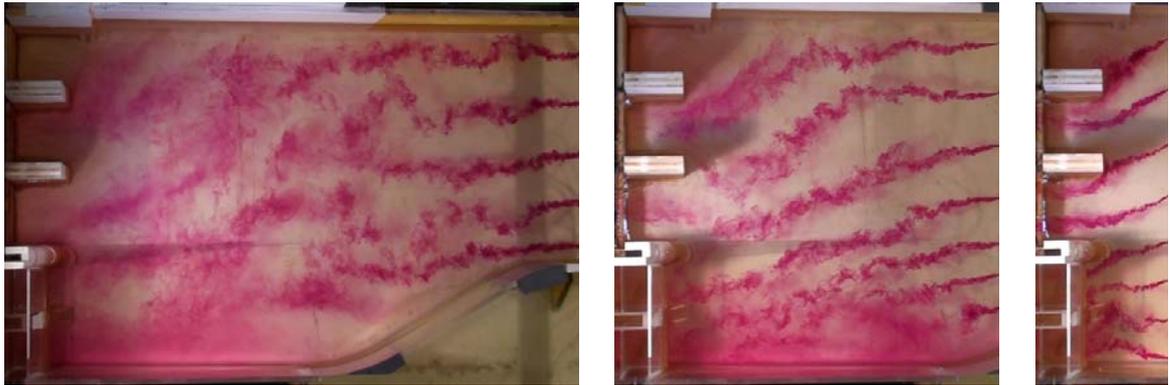
Z – 19,5



Z – Boden

Abbildung A.2.: Strömungsbilder der Variante B2

A.3. Variante B5



Z - Wasserspiegel

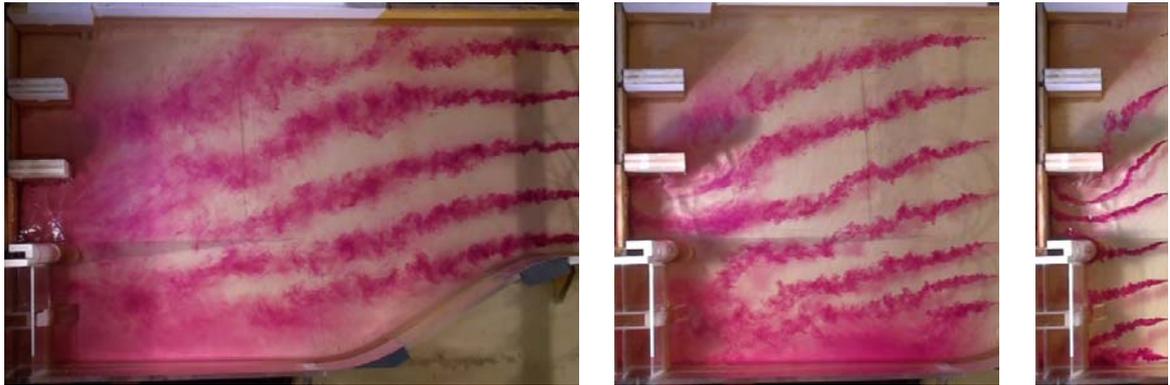


Z - 19,5



Z - Boden

Abbildung A.3.: Strömungsbilder der Variante B5

A.4. Variante B7

Z – Wasserspiegel



Z – 19,5

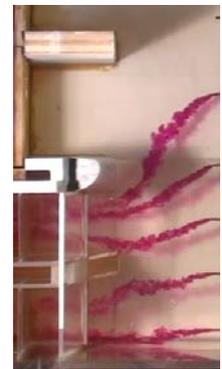


Z – Boden

Abbildung A.4.: Strömungsbilder der Variante B7

A.5. Variante B11

Z – Wasserspiegel

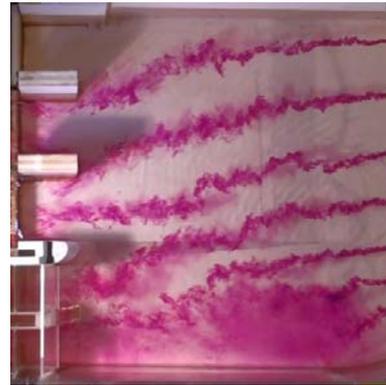


Z – 19,5

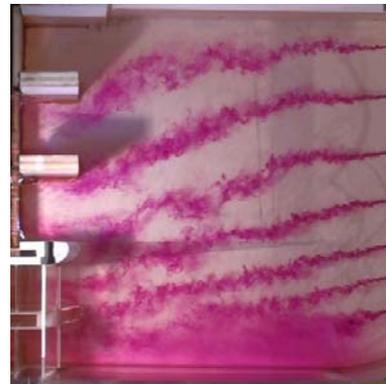


Z – Boden

Abbildung A.5.: Strömungsbilder der Variante B11

A.6. Variante B19

Z – Wasserspiegel



Z – 19,5



Z – Boden

Abbildung A.6.: Strömungsbilder der Variante B19

A.7. Variante B21

Z – Wasserspiegel

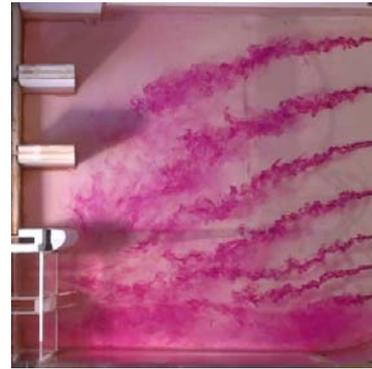


Z – 19,5



Z – Boden

Abbildung A.7.: Strömungsbilder der Variante B21

A.8. Variante B23

Z – Wasserspiegel



Z – 19,5



Z – Boden

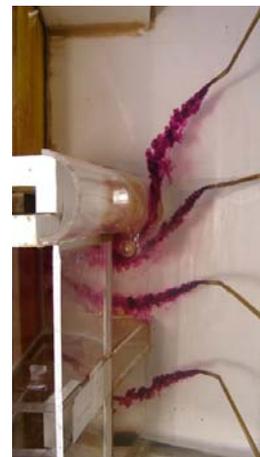
Abbildung A.8.: Strömungsbilder der Variante B23

A.9. Variante B25

Z - Wasserspiegel



Z - 19,5



Z - Boden

Abbildung A.9.: Strömungsbilder der Variante B25

A.10. Variante B27

Z – Wasserspiegel



Z – 19,5



Z – Boden

Abbildung A.10.: Strömungsbilder der Variante B27

A.11. Variante B29

Z – Wasserspiegel



Z – 19,5



Z – Boden

Abbildung A.11.: Strömungsbilder der Variante B29

A.12. Variante B31

Z - Wasserspiegel



Z - 19,5



Z - Boden

Abbildung A.12.: Strömungsbilder der Variante B31

A.13. Variante B32

Z - Wasserspiegel



Z - 19,5



Z - Boden

Abbildung A.13.: Strömungsbilder der Variante B32

A.14. Variante B40

Z – Wasserspiegel



Z – 19,5



Z – Boden

Abbildung A.14.: Strömungsbilder der Variante B40

A.15. Variante B42

Z – Wasserspiegel



Z – 19,5



Z – Boden

Abbildung A.15.: Strömungsbilder der Variante B42

A.16. Variante B44

Z – Wasserspiegel



Z – 19,5



Z - Boden

Abbildung A.16.: Strömungsbilder der Variante B44