

# ENERGIESPEICHER RIEDL

**DONAU-  
KRAFTWERK  
JOCHENSTEIN**  
AKTIENGESELLSCHAFT

# Planfeststellungsverfahren

## Technischer Bericht

RMD CONSULT

# Hydraulische Verhältnisse im Oberwasser der Staustufe Jochenstein



Erstellt	RMD-Consult GmbH	S. Kanne	22.11.2011
Geprüft	RMD-Consult GmbH	C. Göhl	23.11.2011
Freigegeben	DKJ / ES-R	D. Mayr	24.01.2012
	Unternehmen / Abteilung	Vorname Nachname	Datum

Fremdfirmen-Nr.:												Aufstellungsort:						Bl. von Bl.																											
												+																																	
Unterlagennummer																																													
SKS		Projekt-Nr.			Gliederungszeichen		Ersteller		Gliederungszeichen		Zählteil		KKS												DCC(UAS)																				
Vorzeichen		S1	S2	S3					Dokumenttyp			Nummer	Gliederungszeichen	Battnummer	Gliederungszeichen	Änderungsindex	Planstatus	Planart	GA	F0	F1	F2	F3	FN	A1	A2	AN	A3	Vorzeichen																
*	A	A	A	~	A	N	N	N	/	A	A	A	N	/	A	N	N	N	N	/	N	N	/	A	A	A	=	N	N	A	A	N	N	A	&	A	A	A	N	N	N	N			
*	J	E	S	-	A	0	0	1	-	R	M	D	C	1	-	B	6	2	0	0	1	-	0	0	-	-	F	E	=	G	F0	F1	F2	F3	FN	A1	A2	AN	N	N	A	N	N	N	N



## Inhaltsverzeichnis

1.	Allgemeines .....	4
2.	Auswirkungen der instationären Betriebsübergänge.....	5
2.1.	Vorgehensweise .....	5
2.2.	Grundlagen.....	6
2.2.1.	Geländedaten .....	6
2.2.2.	Berechneter Lastfall.....	6
2.2.3.	Randbedingungen Donau.....	7
2.3.	Berechnung Schwallwelle aus Lastfall10 .....	8
2.3.1.	Einfluss auf die Schifffahrt allgemein.....	10
2.3.2.	Schleuse Jochenstein .....	10
2.3.3.	Liegestelle Haus am Strom .....	11
2.3.4.	Lände Roning .....	12
2.3.5.	Fährbetrieb Obernzell.....	12
3.	Pump- und Turbinenbetrieb stationär (3D-Berechnungen).....	13
3.1.	Grundlagen der 3D Berechnung.....	13
3.1.1.	Geländedaten, Bauwerksdaten .....	13
3.1.2.	Berechnete Lastfälle .....	13
3.1.3.	Verwendete Software.....	14
3.1.4.	Verwendete Randbedingungen .....	15
3.2.	Fließgeschwindigkeiten und Verluste im Ein- und Auslaufbauwerk Donau.....	16
3.3.	Geschwindigkeitsverteilung am Einlaufrechen .....	19
3.4.	Einfluss auf die Schifffahrt .....	21
3.5.	Einfluss auf die Anströmung KW Jochenstein.....	25

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Übersichtslageplan Untersuchungsbereich Staustufe Jochenstein.....	5
Abbildung 2:	Durchflussänderung Lastfall 10, Lastabwurf aus Pumpbetrieb einer Pumpe (Quelle: Bericht JES-A001-UIHS1-B40041-00-BFE) .....	6
Abbildung 3:	Vergleich Wasserspiegel von Schwall- und Sunkwellen für die Donauabflüsse MQ und NNQ und einen Standort vor dem Ein- und Auslaufbauwerk und vor der Schleuse.....	7
Abbildung 4:	Wasserspiegellagen 34 Sekunden nach Lastabwurf.....	8
Abbildung 5:	Wasserspiegellagen 60 Sekunden nach Lastabwurf.....	9
Abbildung 6:	Wasserspiegellagen 80 Sekunden nach Lastabwurf.....	9
Abbildung 7:	Wasserspiegelneigung in der Schleusenkammer für den Lastfall 10 .....	11
Abbildung 8:	Wasserspiegelneigung an der Lände „Haus am Strom“ für den Lastfall 10 .....	11
Abbildung 9:	Wasserspiegelneigung an der Lände Roning für den Lastfall 10 .....	12
Abbildung 10:	Lageplan des Ein-/Auslaufbauwerks .....	16
Abbildung 11:	Schnitt durch den oberen Teil des Ein-/Auslaufbauwerks .....	16
Abbildung 12:	Schnitt durch den unteren Teil des Ein-/Auslaufbauwerks .....	17
Abbildung 13:	Geometrie des Einlaufbauwerks .....	17
Abbildung 14:	Darstellung der Strömungsgeschwindigkeiten bei $Q = 1430 \text{ m}^3/\text{s}$ ....	19
Abbildung 15:	Darstellung der Strömungsgeschwindigkeiten bei $Q = 2050 \text{ m}^3/\text{s}$ ....	20
Abbildung 16:	Geometrie der Flussohle im Oberwasser der Stauhaltung Jochenstein .....	21
Abbildung 17:	Horizontale Fließgeschwindigkeiten bei $MQ = 1430 \text{ m}^3/\text{s}$ . Horizontalschnitt in 1,0 m Tiefe.....	22
Abbildung 18:	Horizontale Fließgeschwindigkeiten bei $QA = 2050 \text{ m}^3/\text{s}$ . Horizontalschnitt in 1,0 m Tiefe.....	23

Abbildung 19:	Horizontale Fließgeschwindigkeiten bei RNQ = 680 m <sup>3</sup> /s.	
	Horizontalschnitt in 1,0 m Tiefe .....	24
Abbildung 20:	Absolute Strömungsgeschwindigkeiten bei	
	$Q = MQ = 1430 \text{ m}^3/\text{s}$ .....	26
Abbildung 21:	Absolute Strömungsgeschwindigkeiten bei	
	$Q = MQ = 1430 \text{ m}^3/\text{s}$ .....	26
Abbildung 22:	Absolute Strömungsgeschwindigkeiten bei	
	$Q = MQ = 1430 \text{ m}^3/\text{s}$ .....	27
Abbildung 23:	Absolute Strömungsgeschwindigkeiten bei	
	$Q = QA = 2050 \text{ m}^3/\text{s}$ .....	27
Abbildung 24:	Absolute Strömungsgeschwindigkeiten bei	
	$Q = QA = 2050 \text{ m}^3/\text{s}$ .....	28
Abbildung 25:	Absolute Strömungsgeschwindigkeiten bei	
	$Q = QA = 2050 \text{ m}^3/\text{s}$ .....	28
Abbildung 26:	Absolute Strömungsgeschwindigkeiten bei	
	$Q = Q_{\max}(3D\text{-Ber.}) = 5450 \text{ m}^3/\text{s}$ .....	29
Abbildung 27:	Absolute Strömungsgeschwindigkeiten bei	
	$Q = Q_{\max}(3D\text{-Ber.}) = 5450 \text{ m}^3/\text{s}$ .....	29
Abbildung 28:	Absolute Strömungsgeschwindigkeiten bei	
	$Q = Q_{\max}(3D\text{-Ber.}) = 5450 \text{ m}^3/\text{s}$ .....	30



## 1. Allgemeines

Die RMD CONSULT wurde beauftragt, die Auswirkungen des geplanten Energiespeichers Riedl (ES Riedl) auf die hydraulischen Verhältnisse im Oberwasser der Staustufe Jochenstein zu untersuchen. Hierfür waren sowohl instationäre Betriebsübergänge als auch stationärer Pump- oder Turbinenbetrieb für folgende Fragestellungen zu beurteilen:

- Auswirkung von instationären Betriebsübergängen auf den Wasserspiegel und die Wasserspiegelneigung im Stauraum Jochenstein und Beurteilung der Auswirkungen auf die Schifffahrt,
- Rechenanströmung bei stationärem Pumpbetriebs des ES Riedl,
- Auswirkung des stationären Pump- oder Turbinenbetriebs des ES Riedl auf die Schifffahrt,
- Auswirkung des stationären Pump- oder Turbinenbetriebs des ES Riedl auf die Anströmung des Kraftwerks Jochenstein.

Die Auswirkungen von Betriebsübergängen auf den Wasserspiegel im Stauraum Jochenstein wurden mit einem numerischen 2D-Modell untersucht. Die Untersuchung der stationären Betriebszustände wurden mit einem detaillierten numerischen 3D-Modell durchgeführt.

In allen Fällen reicht der Untersuchungsbereich von Donau km ca. 2205,0 bis zur Staustufe Jochenstein bei Donau-km ca. 2203,4. Der Untersuchungsbereich ist in Abbildung 1 dargestellt.

Alle Untersuchungen wurden im deutschen Gauss-Krüger-Format im 4. Band durchgeführt, die Höhenangaben beziehen sich auf Normalnull. Grundlagen mit österreichischem Bezug wurden umgerechnet.

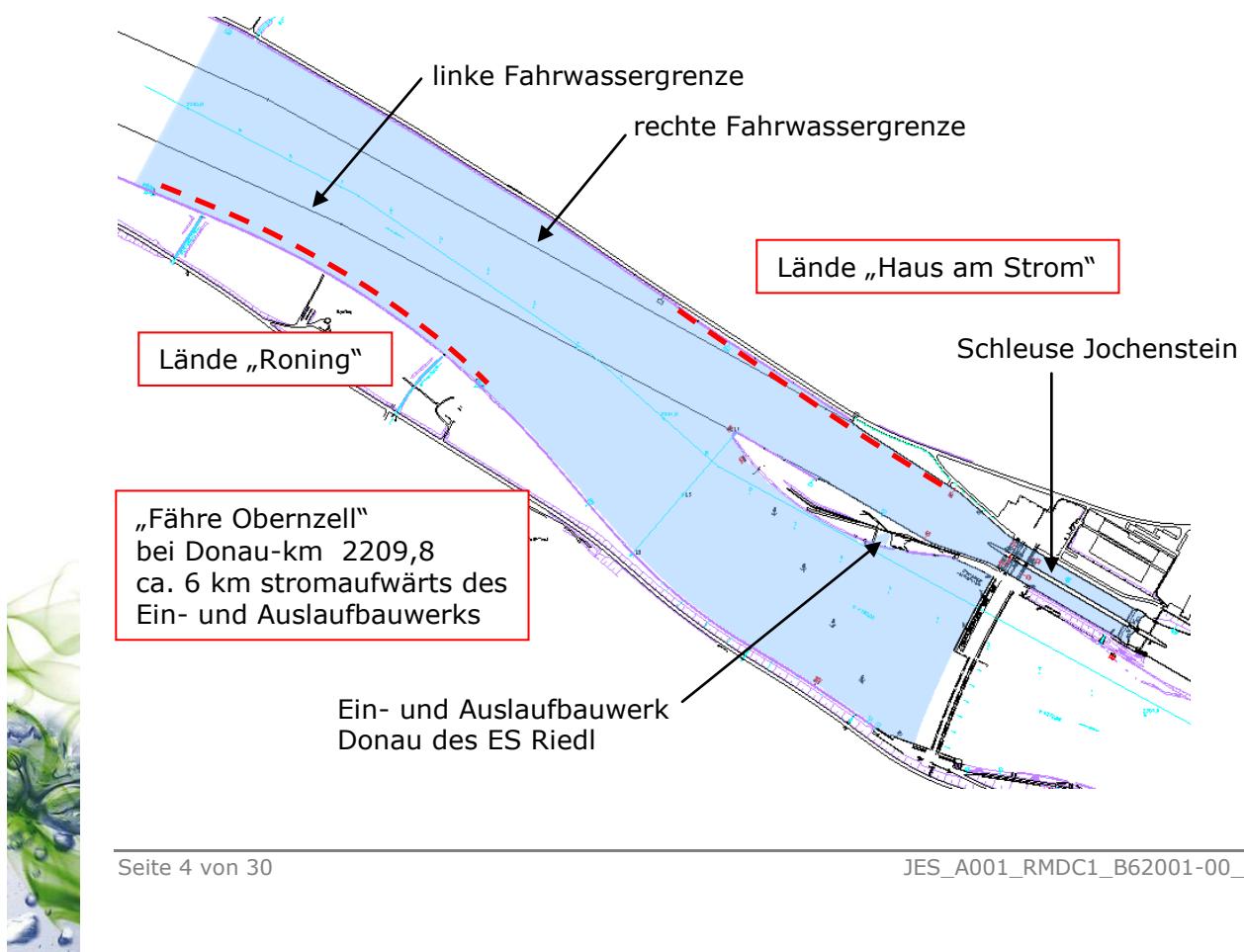


Abbildung 1: Übersichtslageplan Untersuchungsbereich Staustufe Jochenstein

## 2. Auswirkungen der instationären Betriebsübergänge

Instationäre Betriebsübergänge sind das Anfahren oder Abschalten der Turbinen oder Pumpen oder der Übergang aus dem Pump- in den Turbinenbetrieb bzw. aus dem Turbinenbetrieb in den Pumpbetrieb. Diese Vorgänge verursachen Schwall- oder Sunkwellen in der Donau, welche die Schifffahrt beeinträchtigen können. Es werden die Auswirkungen betrachtet auf

- die in Fahrt befindlichen Wasserfahrzeuge,
- die an den Liegestellen „Roning“ bzw. „Haus am Strom“ oder in der Schleuse festgemachten Fahrzeuge
- den Fährbetrieb in Obernzell

Die an den Liegestellen oder in der Schleuse festgemachten Fahrzeuge erfahren durch die Schwall- oder Sunkwellen aufgrund der geneigten Wasserspiegel Beschleunigungskräfte, die durch die Trossen aufgenommen werden müssen. Im Allgemeinen werden Schiffshaltekräfte toleriert, die durch ein Wasserspiegelgefälle von 1 Promille erzeugt werden.

### 2.1. Vorgehensweise

An der Universität Stuttgart wurden die instationären Betriebsübergänge hinsichtlich der Druckverhältnisse im Triebwasserweg untersucht und die Öffnungs- bzw. Schließzeiten der Verschlussorgane festgelegt (Bericht JES-A001-UIHS1-B40041-00-BFE, „Instationäre hydraulische Berechnungen“). Ein Ergebnis dieser Berechnungen sind die Durchflussänderungen, die sich bei den verschiedenen untersuchten Lastfällen einstellen. Als für die Auswirkungen auf die Schifffahrt maßgebender Lastfall wurde derjenige mit der größten Durchflussänderung und dem größten Gradienten der Änderung pro Zeit herangezogen.

Für eine Schwallwelle in der Donau ist dies der Lastfall 10 mit einem Lastabwurf bei Pumpenbetrieb, bei dem der Kugelschieber im Anschluss geöffnet bleibt (vgl. Abbildung 2).

Die Betriebsübergänge, die eine Sunkwelle erzeugen würden, wie Lastabwurf beim Turbinieren oder das Anfahren der Pumpen, verlaufen im Vergleich zu diesem Lastfall 10 wesentlich langsamer oder mit geringeren Durchflussänderungen und erzeugen somit wesentlich weniger stark geneigte Wellenfronten. Auf die Berechnung von Sunkwellen wurde deshalb verzichtet.

Die Berechnung der Wasserspiegellage im Stauraum Jochenstein und in der Schleuse erfolgt mit einem numerischen 2D-Modell zur Berechnung von Fließtiefen und Fließgeschwindigkeiten. Es wurde das Programm Basement, Version 2.1, der ETH Zürich verwendet.

Vergleichsberechnungen von Schwallwellen in einem Rechteckgerinne mit dem 2D-Programm Basement, Version 2.1, der ETH Zürich, dem 2D-Progarmm Hydro\_AS-2D von Dr. Nujic, Rosenheim, sowie mit dem 3D-Programm Flow-3D haben gezeigt, dass mit dem Programm Basement die Neigung der Wellenfronten genauer berechnet wird als mit Hydro:AS-2d, welches die Neigung der Wellenfront stark überschätzt.

## 2.2. Grundlagen

### 2.2.1. Geländedaten

Grundlage des 2D-Berechnungsmodells sind ein digitales Geländefmodell (DGM) aus einer Laser-Scan-Aufnahme vom März 2010 sowie die Sohlpeilung der Donau vom Juli 2009. Das Ein- und Auslaufbauwerk wurde anhand der Pläne der Projektierung modelliert.

Das Berechnungsmodell enthält 115.000 Elemente mit einer mittleren Elementfläche von ca.  $5 \text{ m}^2$  und reicht von der Staustufe Jochenstein bis ca. 1,7 km Richtung Oberwasser (Abbildung 1).

### 2.2.2. Berechneter Lastfall

Der für die Berechnung der Schwallwelle angesetzte Lastfall 10 ist in Abbildung 2 dargestellt. Der abgebildete Durchfluss ist für eine Pumpe angegeben. Die Abflussänderung beträgt für beide Pumpen somit 180  $\text{m}^3/\text{s}$  in ca. 20 Sekunden. In dem 2D-Modell ist der Pumpendurchfluss wie in Abbildung 2 dargestellt am Ein- und Auslaufbauwerk angesetzt, jedoch für 2 Pumpen.

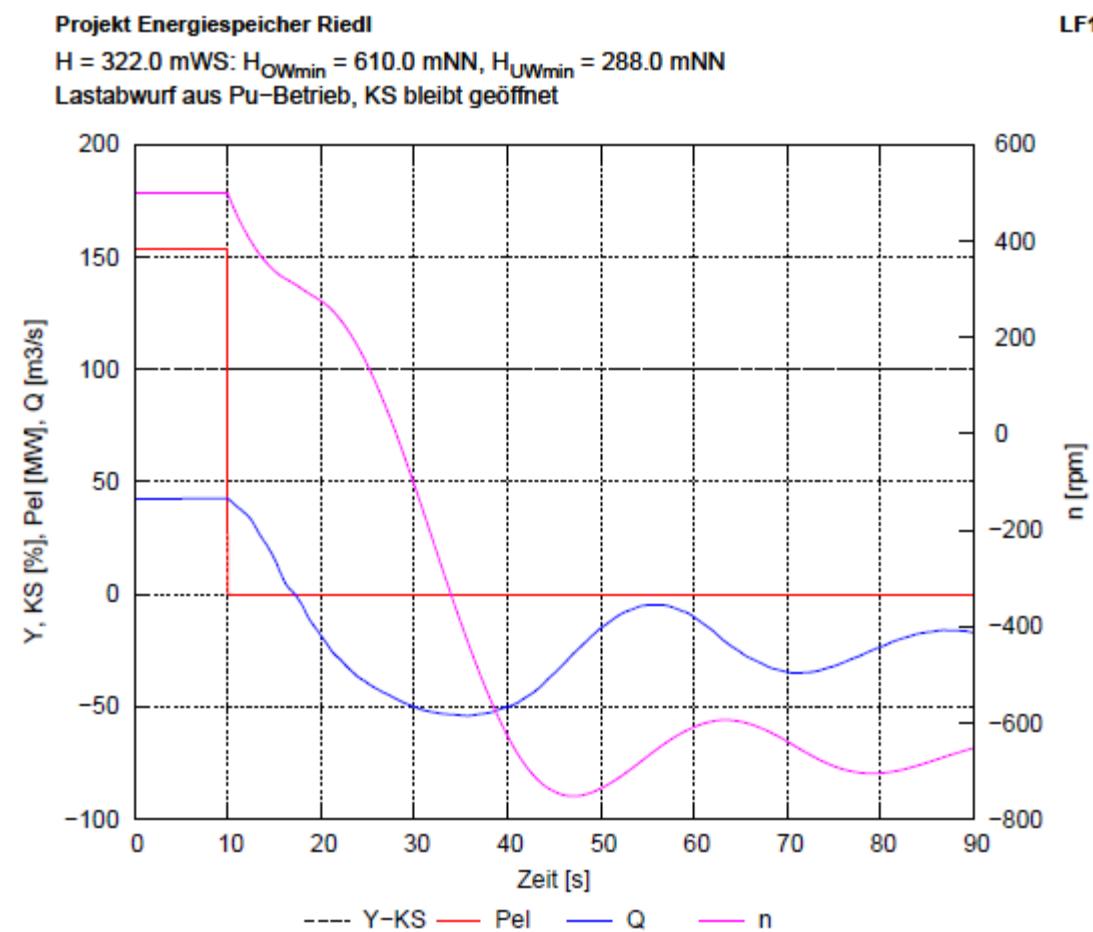


Abbildung 2: Durchflussänderung Lastfall 10, Lastabwurf aus Pumpbetrieb einer Pumpe (Quelle: Bericht JES-A001-UIHS1-B40041-00-BFE)

### 2.2.3. Randbedingungen Donau

Der Abfluss in der Donau wird mit einem  $MQ = 1430 \text{ m}^3/\text{s}$  angenommen. Dieser Abfluss wird am oberen Modellrand angesetzt. Die Entnahme des Abflusses aus dem Modell findet am Kraftwerk Jochenstein statt. Es wird kein Überfall am Wehr angesetzt.

Der Wasserstand am Kraftwerk Jochenstein ist mit dem Stauziel 290,00 m ü.NN angesetzt. Für die Simulation der maximalen Wasserspiegelneigungen in einer Schleusenkammer ist das Obertor der linken Schleuse als geschlossen angenommen. Das Wehr Jochenstein wird als nicht überströmt angesetzt.

Der Schwall- und Sunkwellen sind im Wesentlichen von der Wassertiefe und der Durchflussänderung abhängig. Zur Überprüfung des Einflusses des Donauabflusses auf die Schall- und Sunkwellen wurde der Lastfall 10 mit den Abflüssen MQ und NNQ in der Donau berechnet. Die entsprechenden Wasserspiegel sind in Abbildung 3 dargestellt.

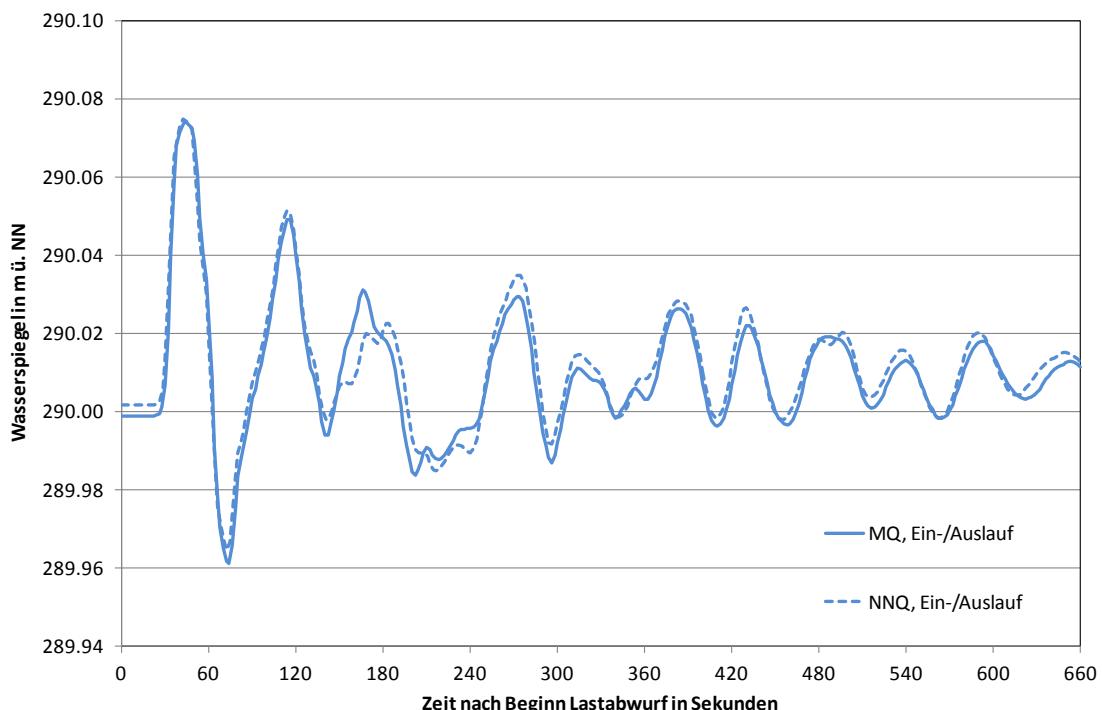


Abbildung 3: Vergleich Wasserspiegel von Schwall- und Sunkwellen für die Donauabflüsse MQ und NNQ und einen Standort vor dem Ein- und Auslaufbauwerk und vor der Schleuse

Für den Standort vor dem Ein- und Auslaufbauwerk hat der Abfluss in der Donau nur einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Schwall- und Sunkwellen. Bei größeren Abflüssen mit Überfall über das Wehr Jochenstein wird durch den Abfluss über das Wehr die Schwallwelle im Lastfall 10 zusätzlich gedämpft.

## 2.3. Berechnung Schwallwelle aus Lastfall10

Die Berechnung des instationären Vorgangs zeigt, dass die Höhe der Schwallwelle unmittelbar vor dem Ein- und Auslaufbauwerk maximal ca. 10 cm erreicht und dass die Schwallhöhe im Bereich vor dem Kraftwerk und dem Wehr Jochenstein mit ca. 7 cm am gegenüberliegenden Ufer am größten ist. (Abbildung 4, Höhenabstand der Wasserspiegelisolinien 1 cm).

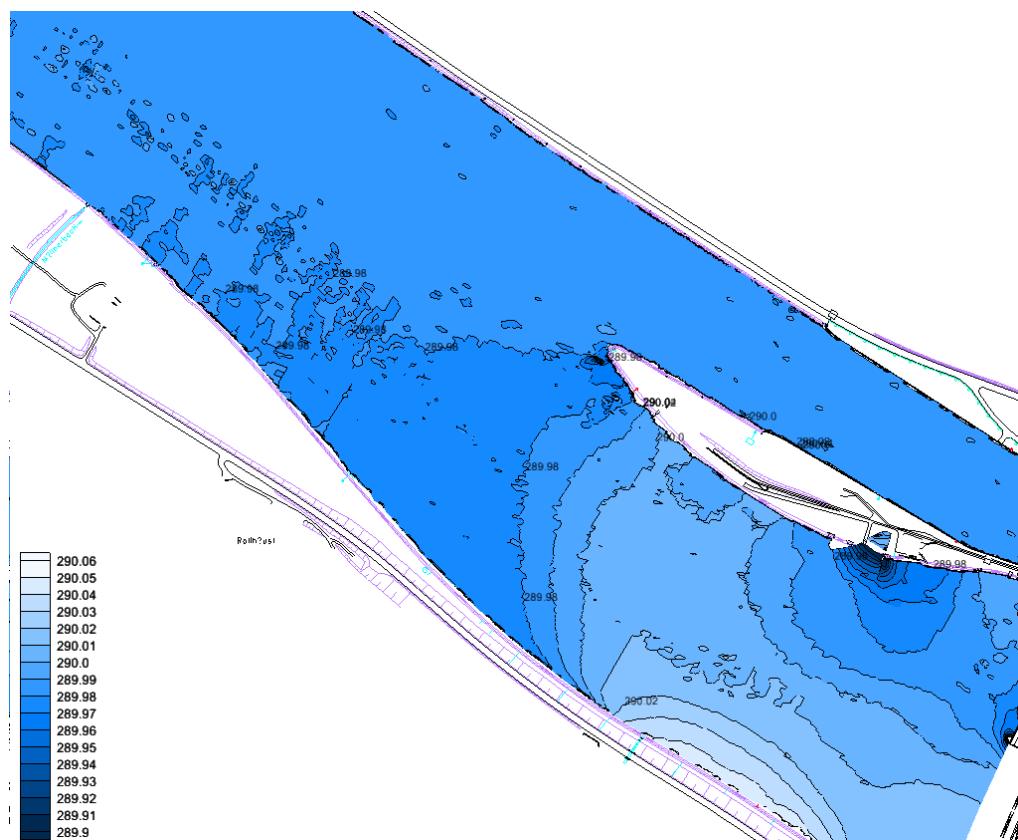


Abbildung 4: Wasserspiegellagen 34 Sekunden nach Lastabwurf

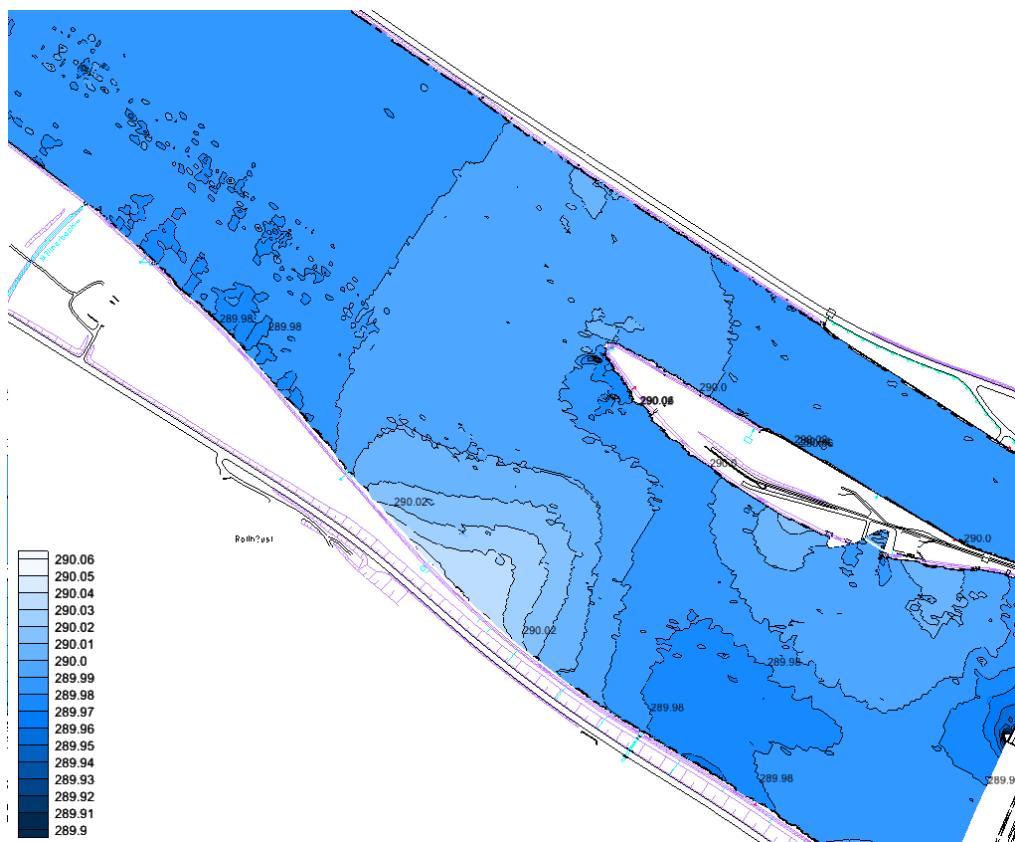


Abbildung 5: Wasserspiegellagen 60 Sekunden nach Lastabwurf

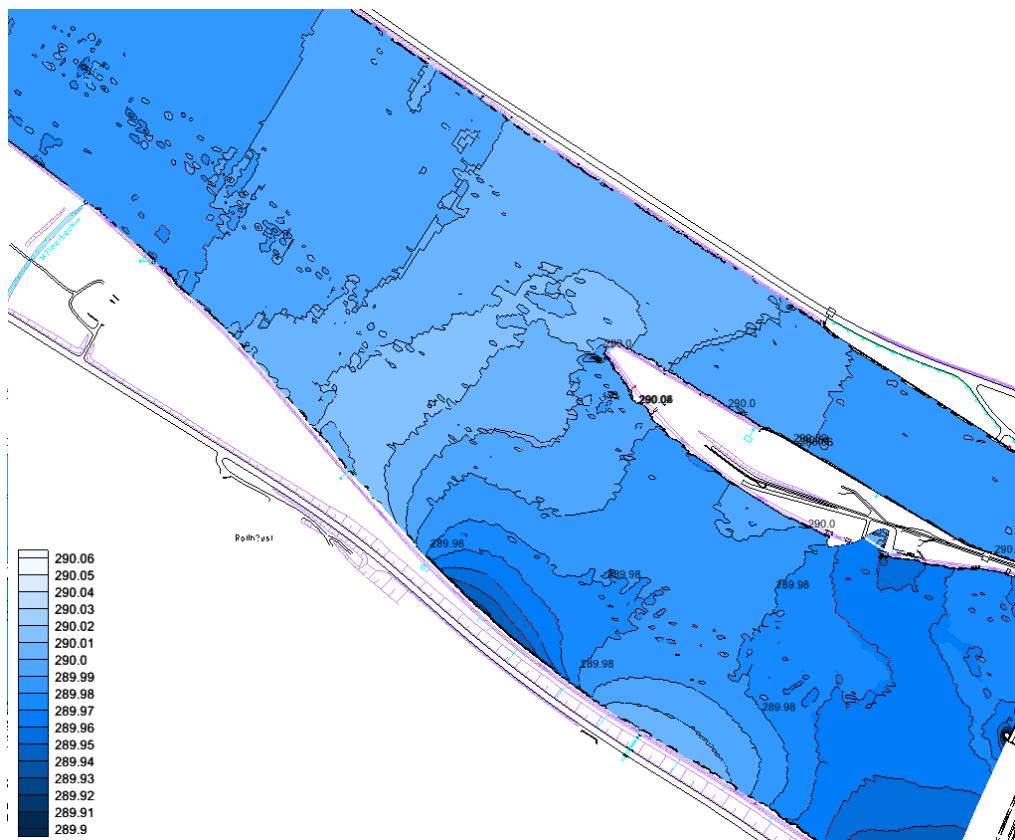


Abbildung 6: Wasserspiegellagen 80 Sekunden nach Lastabwurf

Wie die Abbildung 5 und Abbildung 6 zeigen, beträgt die Schwalhöhe im Bereich des Fahrwassers nur noch wenige Zentimeter.

### **2.3.1. Einfluss auf die Schifffahrt allgemein**

Die Neigung des Wasserspiegels quer zum einem Schiff beträgt an der Einfahrt in den Schleusenvorhafen nur etwa 2 bis 3 cm über die Breite dieser Einfahrt von gut 110 m. Das Quergefälle des Wasserspiegels bezogen auf die Längsachse eines Schiffes beträgt somit weniger als 0,3 Promille und währt zudem nur einige Sekunden. Eine Beeinträchtigung der Einfahrt in den Schleusenvorhafen ist somit nicht gegeben.

In Längsrichtung hat die Schwallwelle mit dieser geringen Wellenhöhe ebenfalls keine negativen Auswirkungen auf ein fahrendes Wasserfahrzeug.

### **2.3.2. Schleuse Jochenstein**

In der Schleuse erreicht die Schwallwelle eine Höhe von maximal ca. 5 cm. Da für die Bewertung des Einflusses auf die Schifffahrt die Neigung des Wasserspiegels von Bedeutung ist, wurde diese auf eine Schiffslänge von 85 m bezogen ausgewertet. Hierbei wurde jedoch nicht einfach die Differenz der Wasserspiegellagen an den beiden Endpunkten des 85 m Abstandes gebildet. Ein nicht horizontaler Wasserspiegel übt Kräfte auf ein Schiff aus. Um für einen beliebigen Wasserspiegel mit unterschiedlichen Neigungen diese Kräfte in eine mittlere Neigung bezogen auf die Schiffslänge umzurechnen, wurden die Wasserspiegellagen auf 1 m Abstand diskretisiert und um den Mittelwert ein „Auftriebsmoment“ berechnet und summiert. Die gesuchte mittlere, konstante Neigung muss die gleiche Summe der Auftriebsmomente aufweisen. Diese Berechnung wurde in 2-Sekunden-Schritten bis zum Zeitpunkt 11 Minuten nach dem Lastabwurf durchgeführt. Nach diesem Zeitpunkt klingen die Wellenhöhen ab.

In Abbildung 7 ist für den Zeitpunkt 378 Sekunden nach Lastabwurf der Wasserspiegel in der Schleuse dargestellt, sowie für jeden Punkt in der Schleusenkammer die Neigung des Wasserspiegels bezogen auf eine Schiffslänge von 85 m. Die angegebene rote Linie gibt den maximalen Wert an, den diese Wasserspiegelneigung erreicht hat. In der Schleusenkammer sind nach der Auswertung der gesamten Berechnungsdauer keine Wasserspiegelneigungen größer als 0,3 Promille zu erwarten.



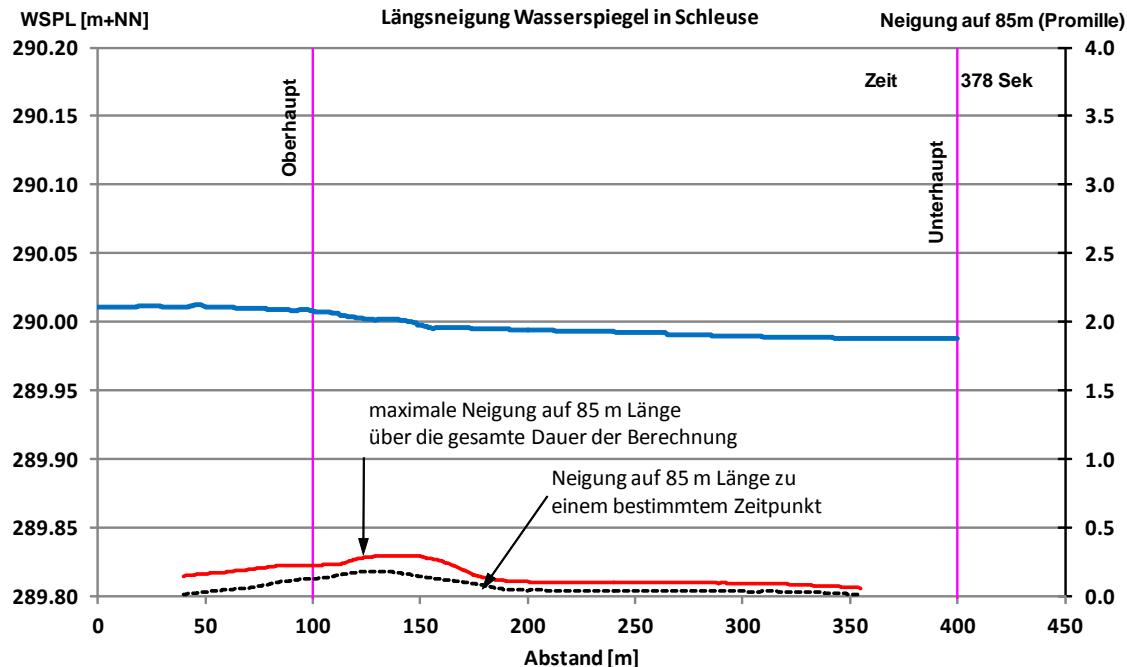


Abbildung 7: Wasserspiegelneigung in der Schleusenkammer für den Lastfall 10

### 2.3.3. Liegestelle Haus am Strom

Entsprechend der in Kapitel 2.3.2 beschriebenen Vorgehensweise wird die Neigung des Wasserspiegels bezogen auf eine Schiffslänge von 85 m für die Liegestelle am linken Ufer im oberen Schleusenvorhafen ermittelt. Die Lage der Wasserspiegellagen in der Abbildung entsprechen der Längsachse eines am Ufer vertäuten, 10m breiten Schiffes.

Das Ergebnis ist in Abbildung 8 dargestellt. Die maximale Neigung des Wasserspiegels liegt mit ca. 0,3 Promille weit unter dem kritischen Wert von etwa einem Promille.

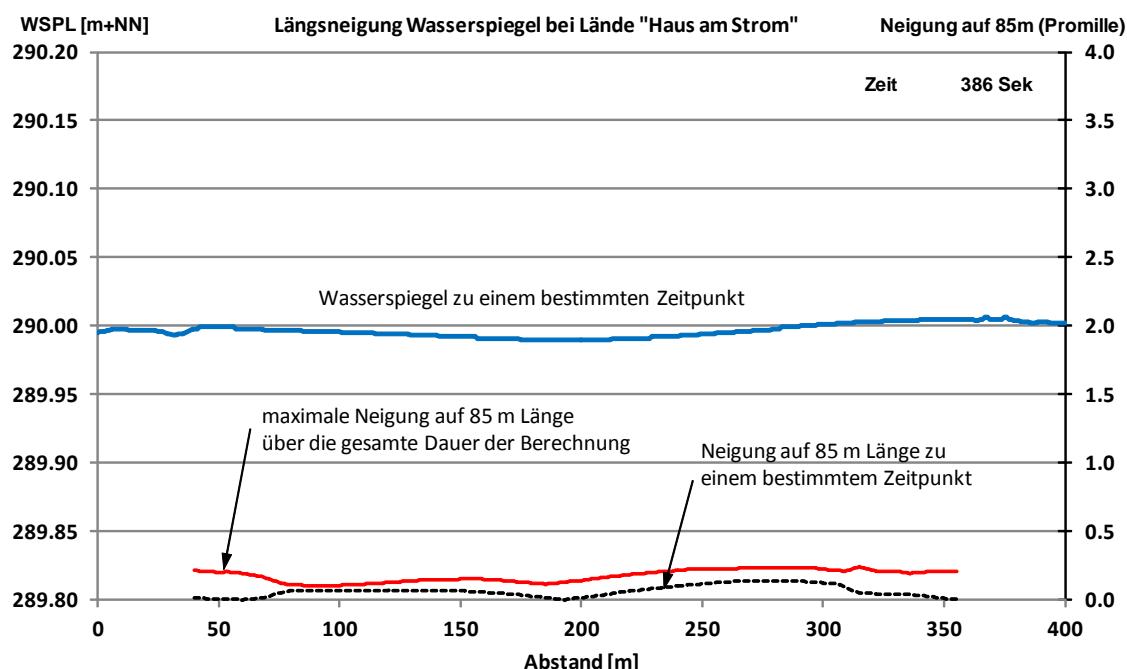


Abbildung 8: Wasserspiegelneigung an der Lände „Haus am Strom“ für den Lastfall 10

### 2.3.4. Lände Roning

Entsprechend der in Kapitel 2.3.2 beschriebenen Vorgehensweise wird die Neigung des Wasserspiegels bezogen auf eine Schiffslänge von 85 m für die Lände Roning am rechten Donauufer ermittelt. Die Lage der Wasserspiegellagen in der Abbildung entsprechen der Längsachse eines am Ufer vertäuten, 10m breiten Schifffes.

Das Ergebnis ist in Abbildung 9 dargestellt. Die maximale Neigung des Wasserspiegels liegt bei ca. 0,4 Promille und somit ebenfalls deutlich unter dem Grenzwert von 1 Promille.

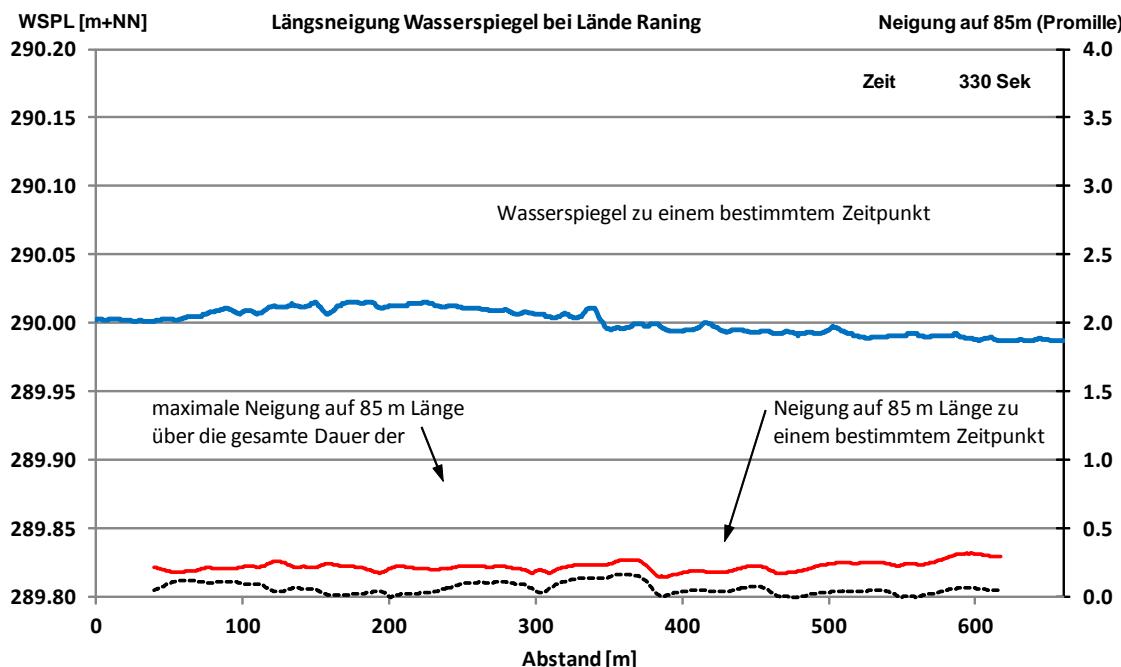


Abbildung 9: Wasserspiegelneigung an der Lände Roning für den Lastfall 10

### 2.3.5. Fährbetrieb Obernzell

Die Fähre Obernzell befindet sich bei Donau-km 2209,8 und liegt ca. 5 km stromaufwärts des oberen Modellrandes. Die Höhe der Schwallwelle in der Donau oberhalb des Abzweigs in den Schleusenvorhafen beträgt nur ca. 2-3 cm, die Neigung des Wasserspiegels ist mit ca. 0,1 Promille sehr gering.

Auch mit der Annahme, dass die Schwallwelle unverändert bis zur Lage der Fährstelle wandert, ist eine Beeinträchtigung des Fährbetriebs dadurch nicht gegeben. Es kann davon ausgegangen werden, dass vorbeifahrende Schiffe größere Kräfte auf die Fähre ausüben.

### 3. Pump- und Turbinenbetrieb stationär (3D-Berechnungen)

#### 3.1. Grundlagen der 3D Berechnung

##### 3.1.1. Geländedaten, Bauwerksdaten

Grundlage des 3D-Berechnungsmodells sind ein digitales Geländemodell (DGM) aus einer Laser-Scan-Aufnahme vom März 2010 sowie die Sohlpeilung der Donau vom Juli 2009. Das Ein- und Auslaufbauwerk wurde anhand der Pläne der Projektierung modelliert. Die Lage des Bauwerks und der Winkel zwischen Rechenebene und der Uferlinie wurden im Verlauf der Berechnungen angepasst, um eine möglichst gleichmäßige Anströmung des Rechens bei Pumpbetrieb zu erreichen.

##### 3.1.2. Berechnete Lastfälle

Die Strömungsbedingungen wurden bei drei unterschiedlichen Abflüssen berechnet:

NNQ	$Q = 535 \text{ m}^3/\text{s}$
MQ	$Q = 1430 \text{ m}^3/\text{s}$
QA	$Q = 2050 \text{ m}^3/\text{s}$
$Q_{\max(3D\text{-Ber.})}$	$Q = 5450 \text{ m}^3/\text{s}$

Das Stauziel beträgt bei  $Q = MQ$  und  $Q = QA$  jeweils 290 m ü.NN an der Wehrkrone. Aus dieser Restriktion ergeben sich geringfügig geringere Wasserspiegellagen im Berechnungsgebiet, die sich aufgrund des Einflusses der Fließgeschwindigkeit (Geschwindigkeitshöhe) und der Verluste ergeben.

Der höchste gewählte Abfluss  $Q_{\max(3D\text{-Ber.})}$  betrug  $Q = 5450 \text{ m}^3/\text{s}$ . Bei diesem Abfluss beträgt der Wasserspiegel am Ein-/ Auslaufbauwerk lediglich 288,0 m ü.NN, somit etwa 2,0 m unter dem Stauziel.

Bei den gewählten Abflüssen der Donau wurden jeweils drei verschiedene Lastfälle des Ein-/ Auslaufbauwerks untersucht:

- Kein Betrieb
- Pumpbetrieb mit  $Q_P = 83 \text{ m}^3/\text{s}$
- Turbinenbetrieb mit  $Q_T = 108 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Beim Pumpbetrieb und beim Turbinenbetrieb wird ein Drittel des Wassers des ES Riedl im Stauraum Jochenstein gepuffert und zwei Drittel im Stauraum Aschach. Dies bedeutet, dass der Donauabfluss im Untersuchungsbereich Oberwasser Jochenstein beim Pumpen um  $27,7 \text{ m}^3/\text{s}$  erhöht wird und beim Turbinieren um  $36,0 \text{ m}^3/\text{s}$  reduziert wird. Dies ist in den Simulationsrechnungen berücksichtigt.

In den folgenden Abschnitten werden die sich ergebenden 9 Kombinationen aus Betrieb und Donauabfluss diskutiert. Zusätzlich wurde der Urzustand der Sohle ohne das Ein-/ Auslaufbauwerk simuliert, um die Diskussion der Auswirkungen des baulichen Eingriffes zu komplettieren.

### 3.1.3. Verwendete Software

Zur Berechnung des gegebenen Systems wurde das kommerzielle Simulationsprogramm Flow3D® der Firma FlowScience® Inc., eingesetzt. Im Gegensatz zu anderen Strömungslösern wurde das Programm speziell für die Berechnung von Strömungen mit freien Oberflächen entwickelt und optimiert. Die Besonderheit des Programms besteht darin, dass eine Strömung mit einer freien Oberfläche nicht nur als Zweiphasenströmung, sondern auch als Einphasenströmung berechnet werden kann.

Das Programm bietet verschiedenste Berechnungsmethoden und Diskretisierungsmöglichkeiten an, um die physikalischen Randbedingungen zu beschreiben. In der verwendeten Programmkonfiguration löst Flow3D die inkompressiblen Navier-Stokes-Gleichungen auf einem kartesischen Gitter mit einem Finite-Volumen-Verfahren: Die räumliche Approximation der Flüsse erfolgt mit der Monotonicity-Preserving-Second-Order Methode. Diese stellt eine Kombination aus einem Zentraldifferenzenverfahren (CDS, zweiter Ordnung) und einem Upwind-Verfahren (erster Ordnung) dar. Die Zeitintegration wird mit einem expliziten Verfahren durchgeführt, wobei der Druck implizit durch eine iterative Berechnung gelöst wird. Die Länge der Zeitschritte wurde automatisch durch das Programm über eine Betrachtung der Courant-Zahl bestimmt. Für die Berechnung der freien Oberfläche wird der Algorithmus von Hirt und Nichols benutzt.

Um Hindernisse in der Strömung zu beschreiben, bedient sich das Programm der Fractional Area/ Volume Obstacle Representation Methode (FAVOR TM-Methode). Es wird hierbei an jeder Zelle der Anteil bestimmt, der mit Fluid gefüllt werden kann. Dieser Bereich wird durch Flächen- und Kantenanteile der Zelle beschrieben. Die im Programm verwendeten Interpolationen werden derart modifiziert, dass die im Finite-Volumen-Verfahren verwendeten Erhaltungsgleichungen weiterhin gültig sind.



### 3.1.4. Verwendete Randbedingungen

Für die Berechnung wurde das Berechnungsgebiet an allen seitlichen Flächen mit Wänden versehen und als Startrandbedingung das Stauziel des Kraftwerks Jochenstein vorgegeben. Das Berechnungsgebiet wurde nach unten durch die Sohle und nach oben durch eine Druckrandbedingung geschlossen. Aus diesem Vorgehen ergibt sich zu Beginn der Simulationen „ein ruhender See“ mit dem Stauziel als Wasserspiegellage.

Das Kraftwerk Jochenstein ist primär stauzielgeregelt, so dass ein konstantes Stauziel am Wehr eingehalten werden muss. Daneben wird der Abfluss des Kraftwerks in Zukunft mit dem Betrieb des Einlaufbauwerks gekoppelt. Bei Pumpbetrieb wird der Durchfluss des Jochensteinkraftwerks um zwei Drittel des gepumpten Abflusses gedrosselt. Analog wird der Kraftwerksdurchfluss bei Turbinenbetrieb um zwei Drittel des turbinierten Abflusses erhöht. Die Verteilung des Abflusses auf die einzelnen Turbinen ist leistungsgeregelt, so dass alle Turbinen etwa denselben Durchfluss haben. Daraus ergibt sich die Möglichkeit, das Kraftwerk in der Simulation mit einer Druck- oder einer Geschwindigkeitsrandbedingung abzubinden. Eine Gegenüberstellung der beiden Randbedingungen ergab nur eine geringe Abweichung im Simulationsergebnis. Da sich Druckrandbedingungen im Simulationsverlauf als wesentlich stabiler erweisen, wurde das Kraftwerk mit einer konstanten Druckrandbedingung, vergleichbar einem Wehr abgebildet.

Bei Abflüssen der Donau größer als der Ausbaudurchfluss der Donau von  $Q_A = 2050 \text{ m}^3/\text{s}$  wurde sowohl am Wehr, als auch am Kraftwerk eine konstante Druckrandbedingung eingestellt. Durch eine Variation der offenen Fläche am Wehr wurde der Abfluss zwischen Wehr und Kraftwerk aufgeteilt.

Es sei angemerkt, dass das Wehr bei allen Simulationen von  $Q_A$  geschlossen war. Es ergibt sich zwar ein höherer für das Kraftwerk nutzbarer Abfluss aus  $Q_A$  and  $Q_T$  von  $2152 \text{ m}^3/\text{s}$ , was theoretisch über der Leistungsfähigkeit des Kraftwerks liegt. Durch die Induktion eines Wehrüberfalls in diesem Fall wäre jedoch die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zwischen den einzelnen Betriebszuständen eingeschränkt.

Am westlichen Ende des Berechnungsgebietes wurde der Durchfluss über eine Bodenöffnung zugegeben. Dieses Vorgehen verhindert einen inkorrekt horizontalen Impulseintrag in das Berechnungsgebiet. Das horizontale Geschwindigkeitsfeld entwickelt sich innerhalb einer kurzen Lauflänge.

Für eine möglichst realitätsnahe Simulation der Durchflüsse am Ein-/Auslaufbauwerk wurde das Berechnungsgebiet in der Nähe des Ein-/Auslaufbauwerks zuerst zweimal verfeinert. Im Pumpbetrieb wurde der Abfluss etwa in der Mitte des Vertikalschachtes nach unten über eine Geschwindigkeitsrandbedingung abgezogen. Da das Wasser nach horizontalem Einströmen in das Ein-/Auslaufbauwerk nach unten umgelenkt werden muss, ist davon auszugehen, dass die Entfernung der Randbedingung ausreichend groß ist, um die Strömungsverhältnisse im Einlaufbereich des Ein-/Auslaufbauwerks nicht mehr zu verfälschen.

Bei Turbinenbetrieb wurde der Abfluss außerhalb des Ein-/Auslaufbauwerks im horizontalen Triebstollen zugegeben. Dies war notwendig, da die Umlenkung der Strömung in den Vertikalschacht eine ungleichmäßige Geschwindigkeitsverteilung in diesem verursacht. Die einseitig anliegende Strömung beeinflusst anschließend die Verteilung des Abflusses über die beiden Rechenfelder des Ein-/Auslaufbauwerks.

Abschließend sei angemerkt, dass die strömungsvergleichmäßigende Wirkung des Rechens mit Hilfe eines auf die Geschwindigkeitshöhe bezogenen Rechenverlustes berücksichtigt wurde.

### 3.2. Fließgeschwindigkeiten und Verluste im Ein- und Auslaufbauwerk Donau

Vor Beginn der Simulationen wurde das Einlaufbauwerk hydraulisch ausgelegt. In Abbildung 10 bis Abbildung 13 ist die Geometrie dargestellt.

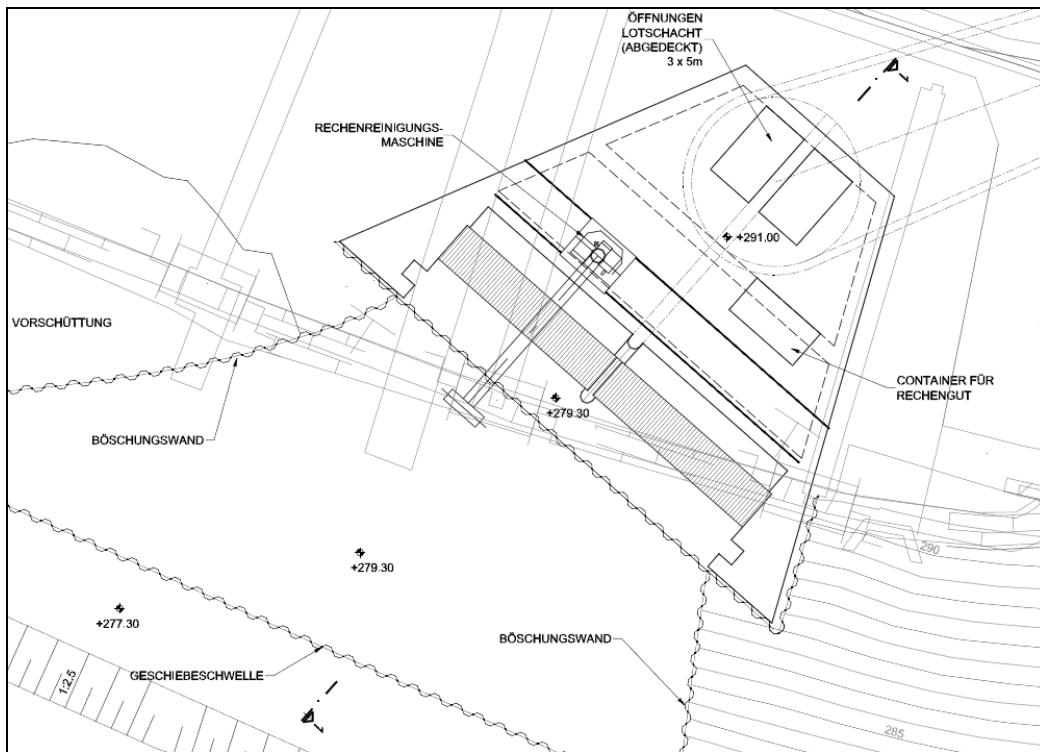


Abbildung 10: Lageplan des Ein-/Auslaufbauwerks

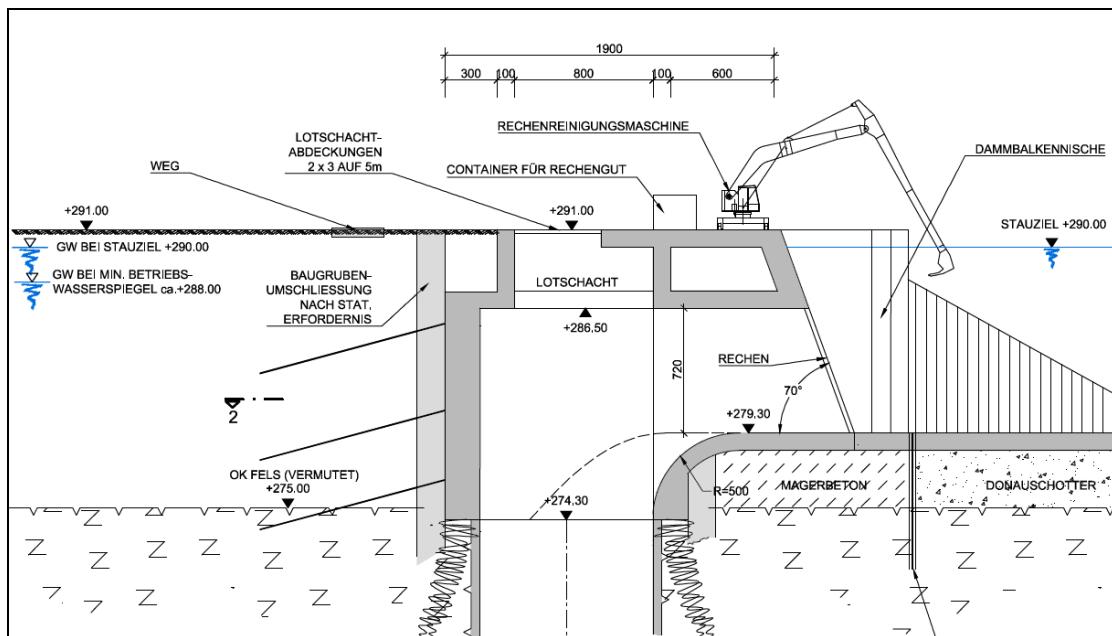


Abbildung 11: Schnitt durch den oberen Teil des Ein-/Auslaufbauwerks

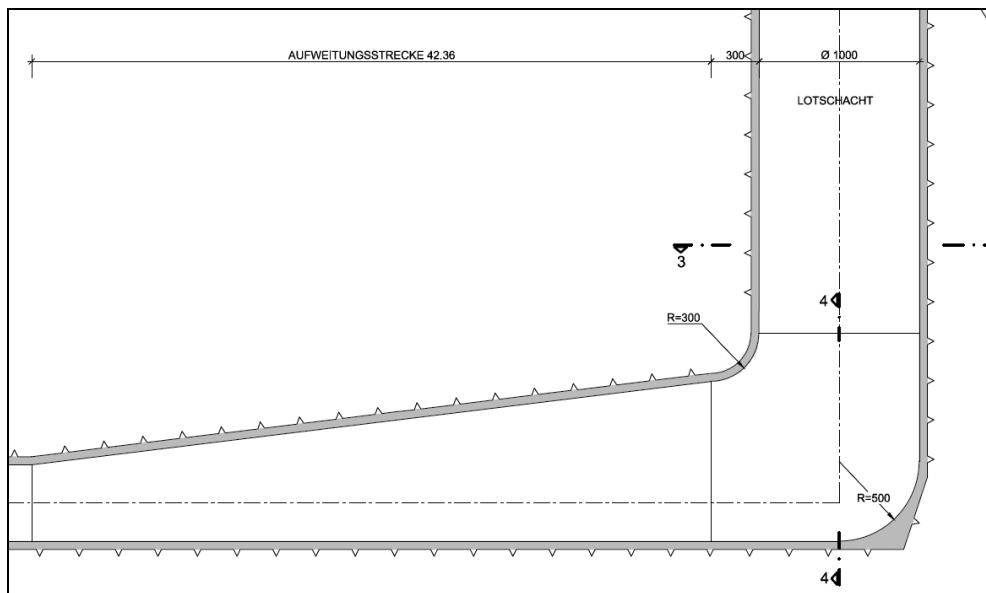


Abbildung 12: Schnitt durch den unteren Teil des Ein-/Auslaufbauwerks

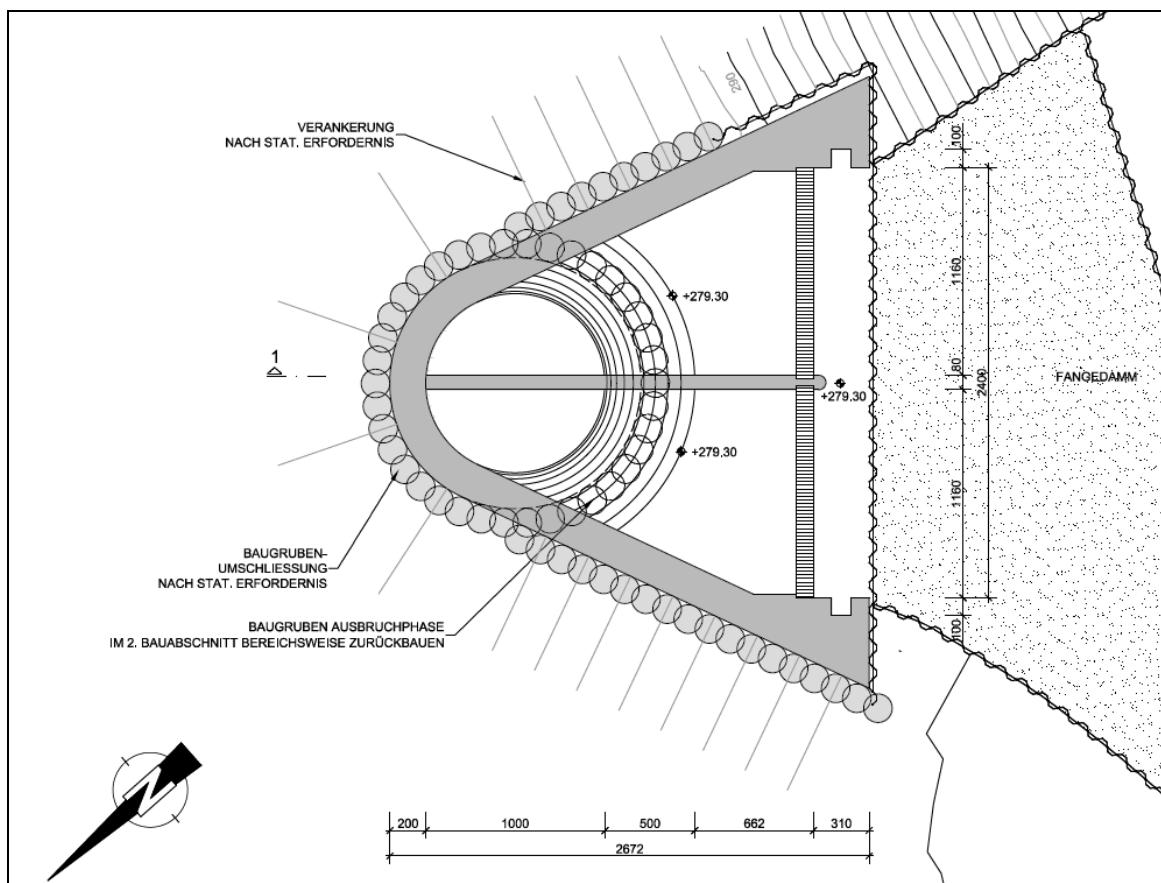


Abbildung 13: Geometrie des Einlaufbauwerks

Aus Richtung des Speichersees führt ein Triebstollen mit Innendurchmesser  $d = 4,80\text{ m}$  zum Ein-/ Auslaufbauwerk. Um Strömungsablösungen und damit Verluste zu vermeiden, wird dieser Stollen vor dem Ein-/ Auslaufbauwerk auf der Firste mit  $7^\circ$  bis auf  $d = 10\text{ m}$  aufgeweitet. Die Umlenkung in den Vertikalschacht mit  $d = 10\text{ m}$  wurde mit einem Innenradius von  $R = 3,0\text{ m}$  ausgeführt. Der Außenradius beträgt  $5,0\text{ m}$ . Bei der Wahl der Ausrundungsgeometrie wurde zum einen darauf geachtet,

dass eine ausreichende Fläche für das Einheben von Geräten durch den Vertikalschacht verbleibt. Des Weiteren sollten Kanten vermieden werden, die einen erhöhten Bewehrungsgrad verursachen.

Auf der Oberseite des Vertikalschnitts wird die Strömung mit einem Radius  $d = 5,0$  m in die Horizontale umgeleitet. Das Einlaufbauwerk ist durch eine Leitwand in 2 Kammern unterteilt. Diese Leitwand wird bis über den Vertikalschacht verlängert und verhindert dort Rotationsströmungen.

Vor dem Einlauf des Bauwerks sind zwei Rechenfelder mit einer Neigung von  $20^\circ$  gegen die Vertikale, einer jeweiligen Breite von 11,60 m und einer Höhe von 7,20 m angebracht.

An dieser Stelle sei angemerkt, dass die Simulationen mit einem Sohlenniveau des Einlaufbauwerks von 279,65 m ü.NN durchgeführt wurden. Im Laufe der Planungen wurde dieses Niveau auf 279,30 m ü.NN gesenkt. Die Projektbeteiligten waren sich einig, dass die bereits vorliegenden Simulationsergebnisse verwendet werden können, da die Absenkung der Sohle eine Vergrößerung der Rechenfläche verursacht, was die Fließgeschwindigkeiten am Einlauf verringert. Die Geschwindigkeiten ändern sich jedoch nicht signifikant, was eine Neuberechnung aller Lastfälle nicht rechtfertigt



### 3.3. Geschwindigkeitsverteilung am Einlaufrechen

Ein wichtiger Gesichtspunkt bei der Dimensionierung des Einlaufbauwerks war die Anforderung einer möglichst homogenen und uniformen Verteilung der Anströmgeschwindigkeit über den Rechen, um eine Gefährdung für aquatische Lebewesen zu vermeiden.

In Abbildung 15 und in Abbildung 16 sind die sich bei unterschiedlichen Donauabflüssen ergebenden Absolutgeschwindigkeiten sowie die entsprechende Horizontalgeschwindigkeit normal zum Rechen angetragen. Dabei ist deutlich zu sehen, dass die Anströmgeschwindigkeit am Rechen in großen Teilen der Rechenfläche teils deutlich unter den geforderten 0,5 m/s liegt. Lediglich im Bereich der Sohle können Geschwindigkeiten bis 0,8 m/s auftreten. Diese Bereiche sind jedoch relativ klein.

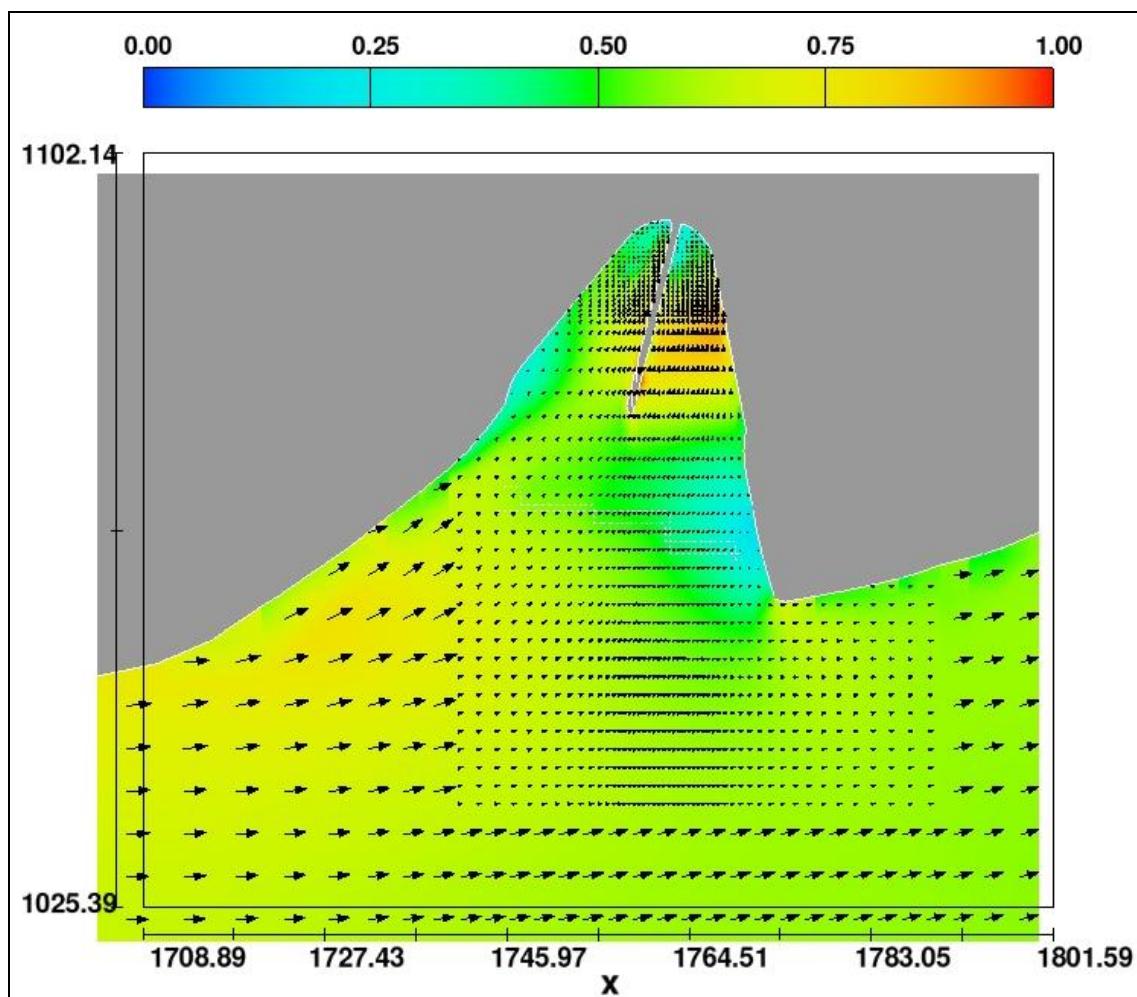


Abbildung 14: Darstellung der Strömungsgeschwindigkeiten bei  $Q = 1430 \text{ m}^3/\text{s}$ .  
Absolutgeschwindigkeiten in einem Schnitt bei  $z = 283,30 \text{ m ü.NN}$  in halber Rechenhöhe

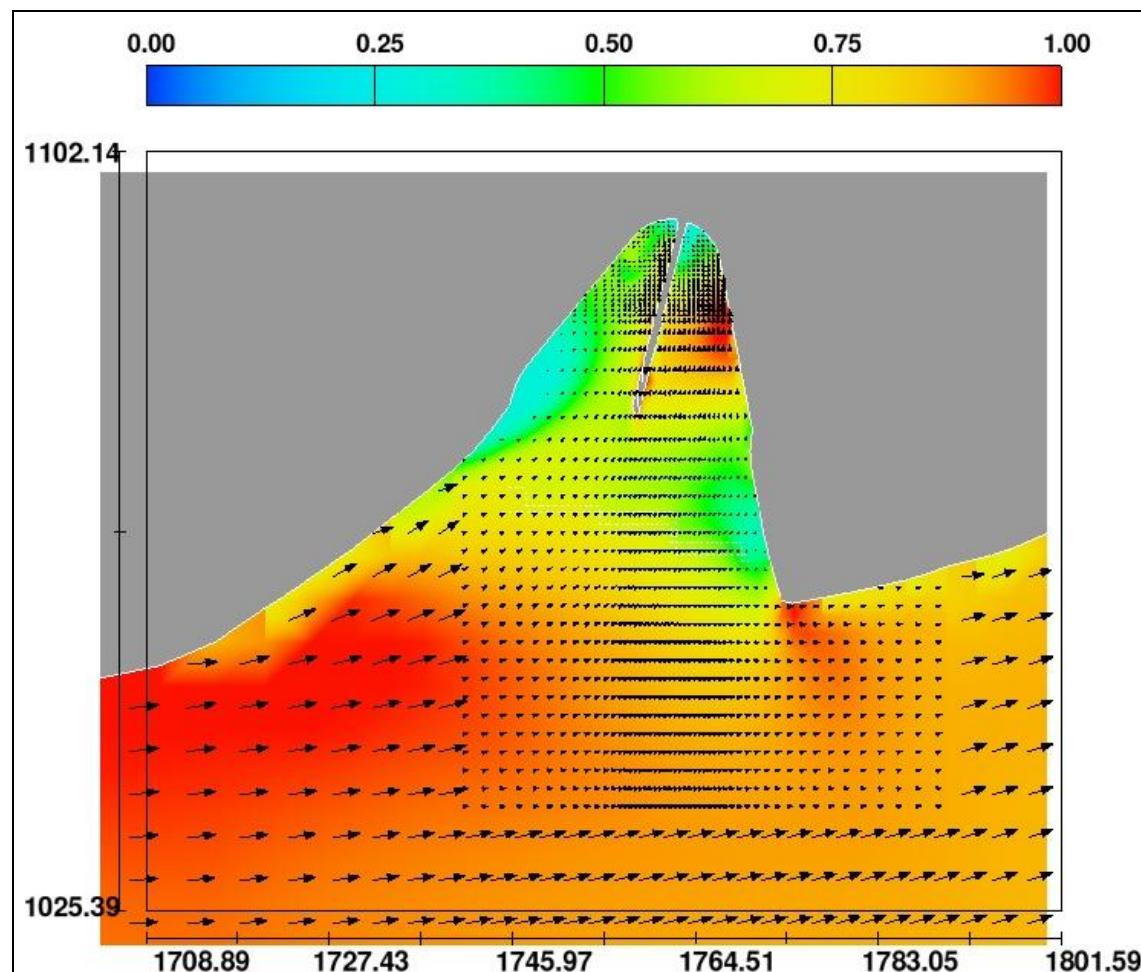


Abbildung 15: Darstellung der Strömungsgeschwindigkeiten bei  $Q = 2050 \text{ m}^3/\text{s}$ .  
Absolutgeschwindigkeiten in einem Schnitt bei  $z = 283,30 \text{ m ü.NN}$  in halber Rechenhöhe;



### 3.4. Einfluss auf die Schifffahrt

Neben dem Einfluss der Strömungsbedingungen am Einlaufbauwerk auf aquatische Lebewesen ist im Rahmen der Planungen sicherzustellen, dass die Schifffahrt durch den Betrieb des Einlaufbauwerks nicht negativ beeinflusst wird.

In Abbildung 16 ist die Sohlengeometrie im Untersuchungsgebiet dargestellt. Der Talweg führt am Eingang zum Schleusenvorhafen vorbei zum den Kraftwerkseinläufen bzw. zum Wehr. Am Eingang zum Schleusenvorhafen findet ein deutlicher Höhensprung statt.

Zur Verdeutlichung der Einflüsse des Pumpbetriebs des Ein-/ Auslaufbauwerks auf die Schifffahrt, sind in Abbildung 17 bis Abbildung 19 die absoluten Strömungsgeschwindigkeiten auf einem Horizontalschnitt in einer Wassertiefe von 1,00 m für verschiedenen Donauabflüsse dargestellt. Dabei wird jeweils der Fall ohne Betrieb im ES Riedl mit dem Fall Pumpbetrieb ES Riedl gegenübergestellt. Es wird deutlich, dass der Betrieb des Ein-/ Auslaufbauwerks keinen Einfluss auf die Strömung an der Ausleitung des Schleusenkanals hat.

Da beim Turbinenbetrieb ein Drittel der Turbinenwassermenge in der Stauhaltung Jochenstein gespeichert wird, werden der Donaudurchfluss und damit die Fließgeschwindigkeiten reduziert. Dieser Fall ist für die Betrachtung der Auswirkungen auf die Schifffahrt von untergeordneter Bedeutung und wurde nicht untersucht.

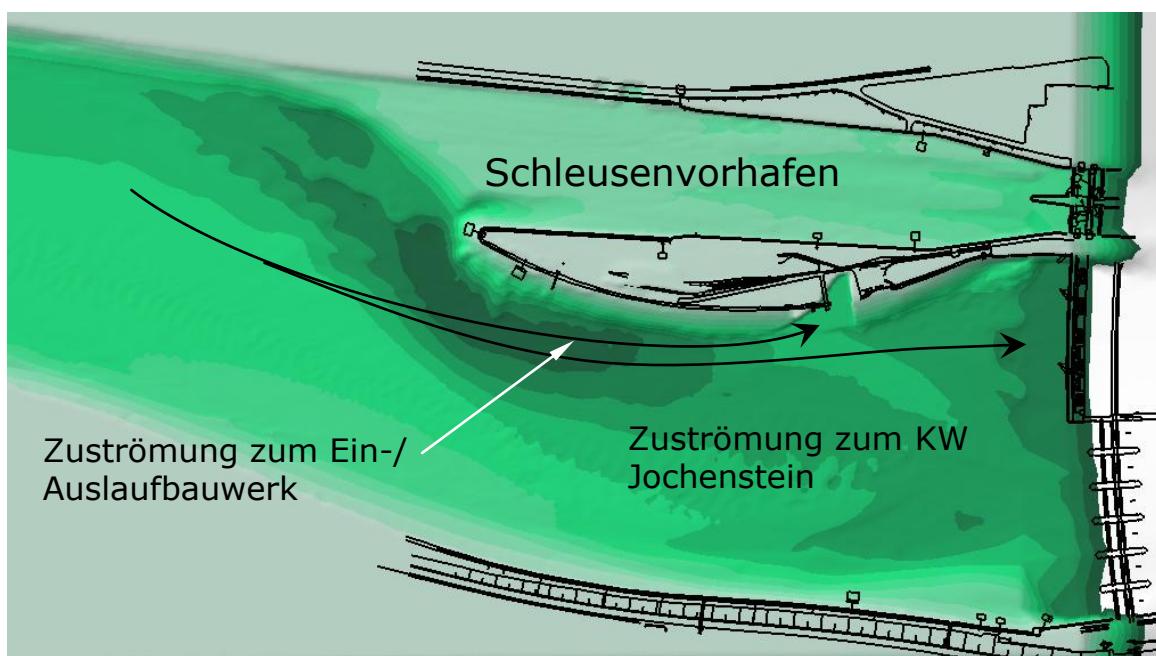


Abbildung 16: Geometrie der Flusssohle im Oberwasser der Stauhaltung Jochenstein

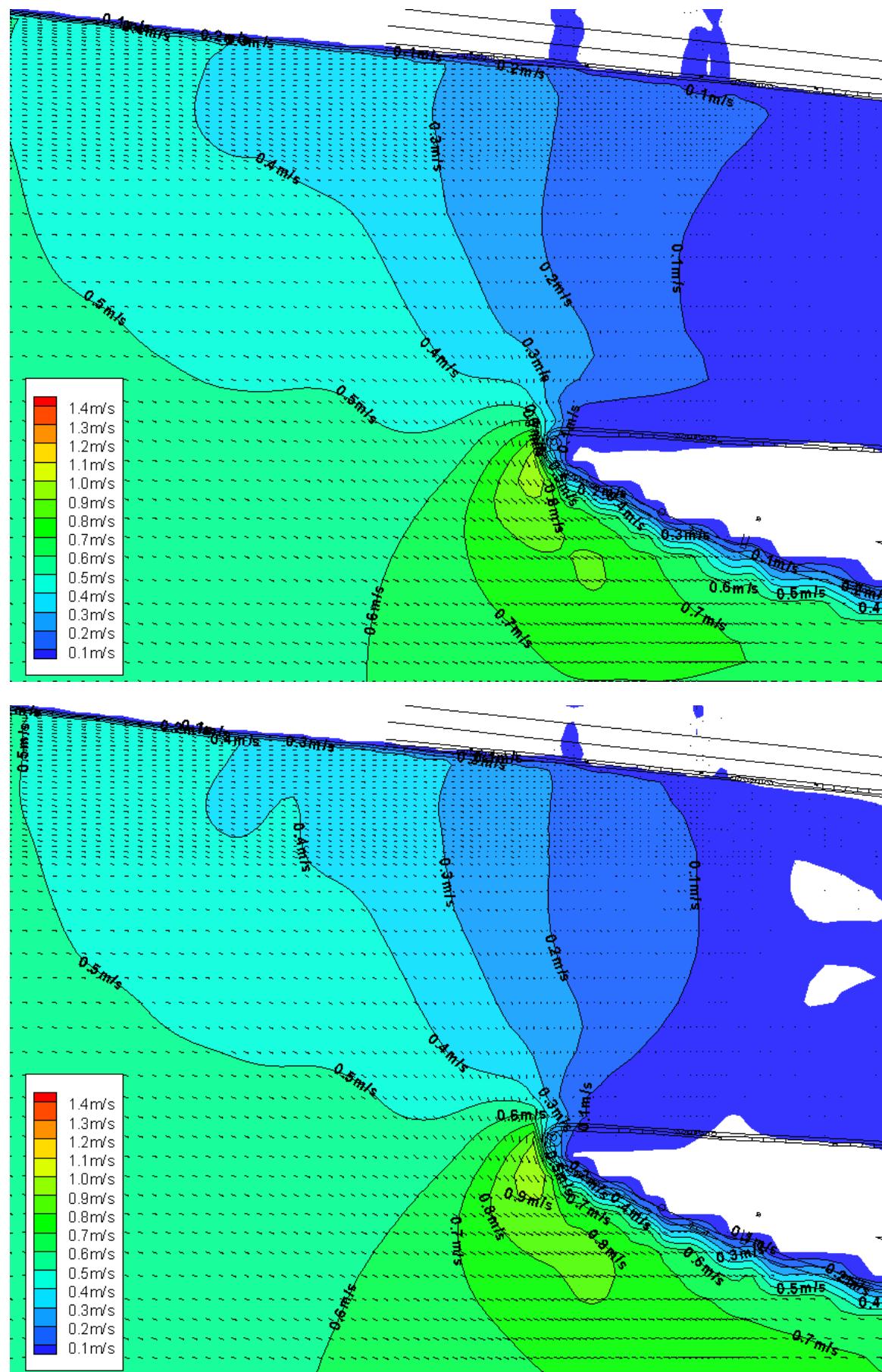


Abbildung 17: Horizontale Fließgeschwindigkeiten bei  $MQ = 1430 \text{ m}^3/\text{s}$ . Horizontalschnitt in 1,05 m Tiefe  
Oben: Ohne Betrieb, Unten: Pumpbetrieb  $Q = 83 \text{ m}^3/\text{s}$

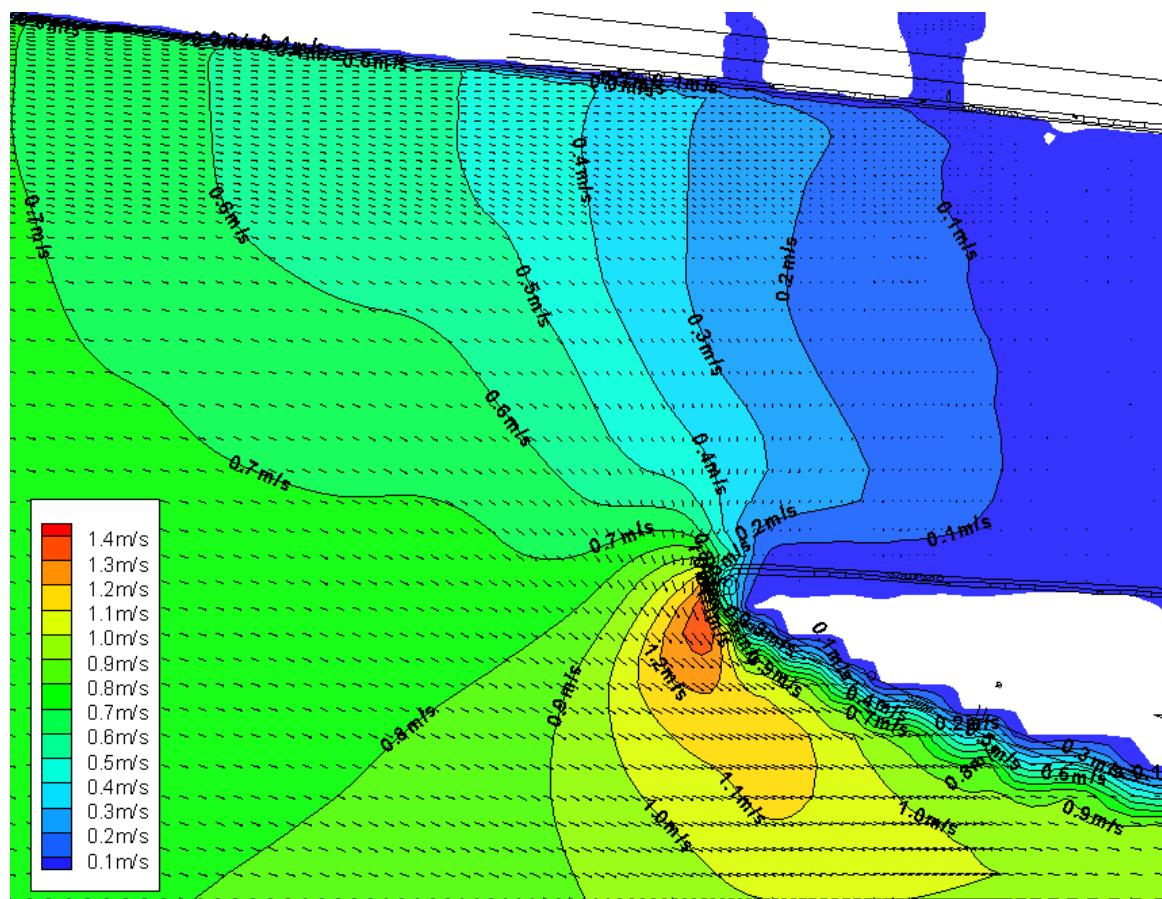
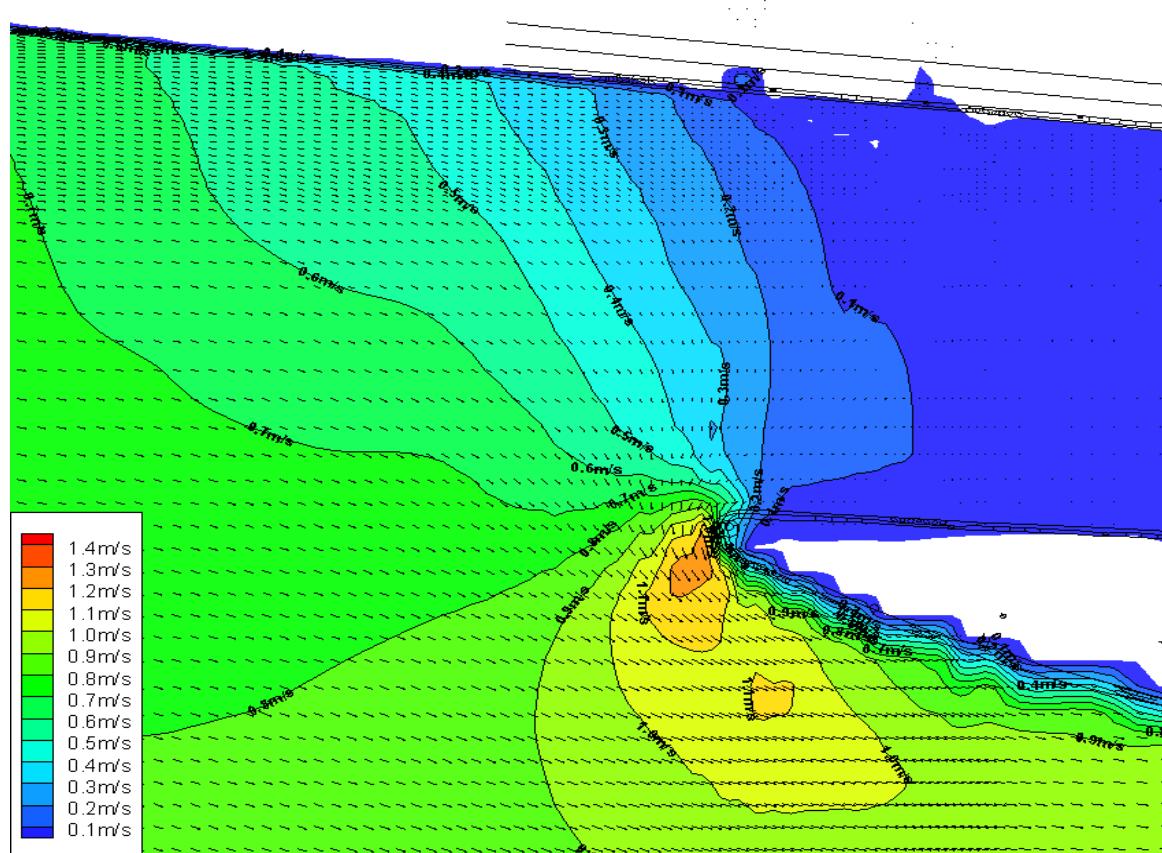


Abbildung 18: Horizontale Fließgeschwindigkeiten bei  $Q_A = 2050 \text{ m}^3/\text{s}$ . Horizontalschnitt in 1,0 m Tiefe  
Oben: Ohne Betrieb, Unten: Pumpbetrieb  $Q = 83 \text{ m}^3/\text{s}$



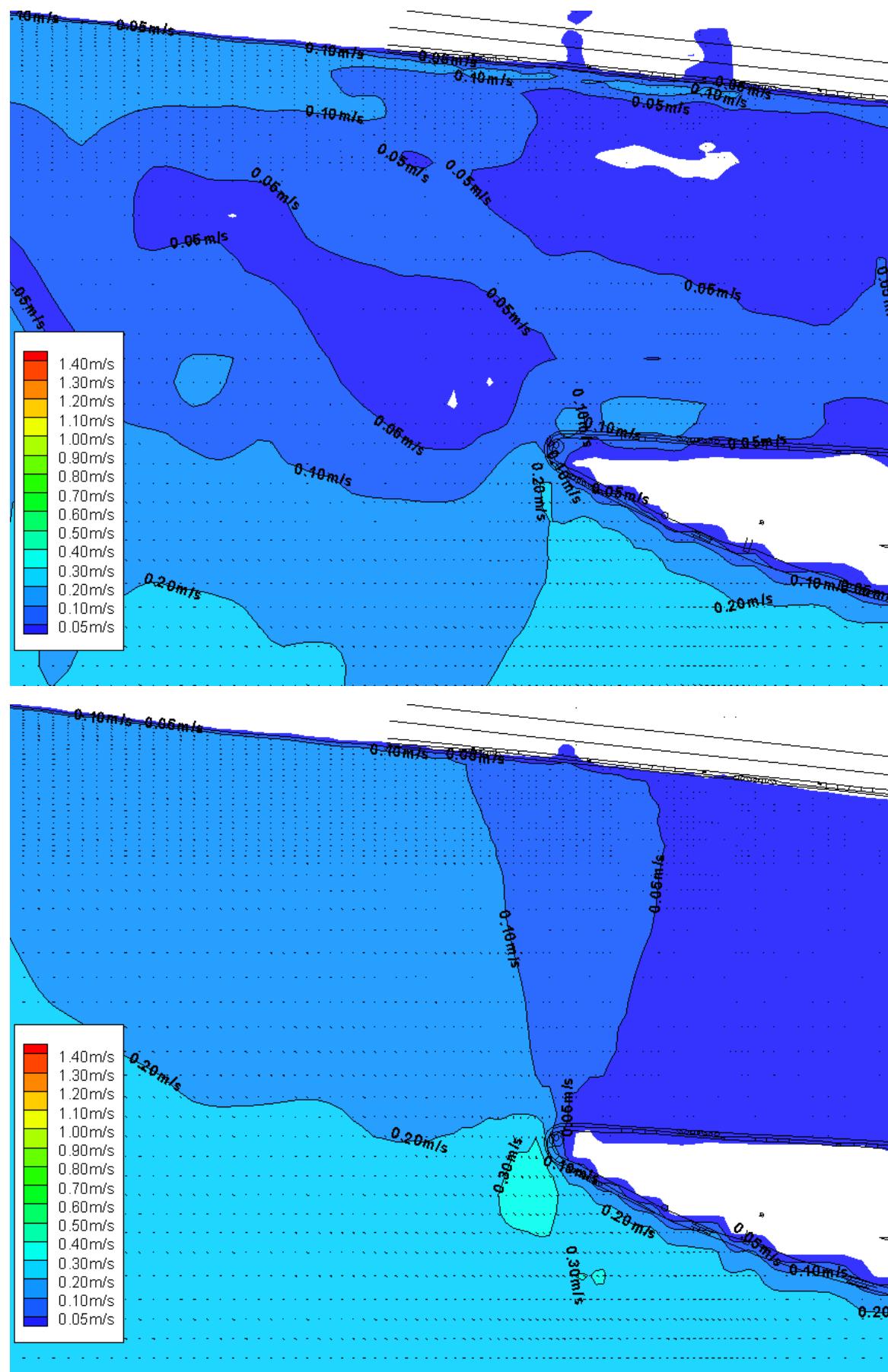


Abbildung 19: Horizontale Fließgeschwindigkeiten bei RNQ = 680 m<sup>3</sup>/s. Horizontalschnitt in 1,0 m Tiefe  
Oben: Ohne Betrieb, Unten: Pumpbetrieb Q = 83 m<sup>3</sup>/s

### 3.5. Einfluss auf die Anströmung KW Jochenstein

Abschließend sollte auf Grundlage der Ergebnisse aus den Strömungssimulationen die Frage erörtert werden, wie der Betrieb des Ein-/ Auslaufbauwerks die Anströmungsbedingungen des Kraftwerks beeinflusst.

Im Bestandsfall legt sich die Strömung an der nördlichen Kante der Insel an. Im Bereich des Kraftwerks löst sich die Strömung von der Insel ab, und es kommt zu einer Kehrströmung, die mit der Tendenz einer Sedimentanlagerung verbunden ist.

Für die Strömungsberechnungen wurden RANS Turbulenzmodelle verwendet, da genauere Berechnungsmethoden einen zu hohen zeitlichen Aufwand bei gleichzeitiger geringer Genauigkeitserhöhung bedeutet hätten. Von diesen Turbulenzmodellen ist bekannt, dass sie Ablösepunkte zu spät und damit die Größe von Kehrströmungen zu klein vorhersagen. Die im Rahmen dieses Kapitels getroffenen Aussagen können daher nur qualitativ erfolgen.

In Abbildung 20 bis 28 sind die Absolutgeschwindigkeiten auf einem Horizontalschnitt in einer Tiefe von 1,0 m dargestellt. Aus den Abbildungen können folgende Rückschlüsse gezogen werden.

- Die Geometrie des Ein-/ Auslaufbauwerks bzw. der notwenige seitliche Einschnitt in die Insel zum Schifffahrtskanal definiert eine Abrisskante, nach der sich eine Kehrströmung einstellt.
- Der Pumpbetrieb zieht die Anströmung nach Norden, was die Kehrströmung deutlich verkleinert.
- Der Turbinenbetrieb drückt die Anströmung nach Süden in Richtung der Wehrfelder, die Kehrströmung wird vergrößert, die Anströmung des Kraftwerks verschlechtert sich leicht.

In der Anströmung zum Kraftwerk Jochenstein entwickelt sich derzeit auf der nördlichen Uferseite eine strömungsberuhigte Zone, in der sich Sedimente ablagern. Die Größe dieser Zone ist dabei im Wesentlichen vom Kraftwerksabfluss abhängig.

Im Planungszustand ändern sich die Anströmbedingungen zum Kraftwerk in Abhängigkeit von den Betriebszuständen des Ein-/ Auslaufbauwerks. Diese Änderungen werden die Sedimentationsvorhänge am nördlichen Ufer signifikant beeinflussen. Diese Beeinflussung kann von einer Reduzierung der Sedimentation bis zu einer Dynamisierung der Sedimente gehen. In jedem Fall ist mit deutlich geringeren Sedimentationsraten zu Rechnen.

Das Ein-/ Auslaufbauwerk wird im Mittel keine negativen Einflüsse auf die Leistung des Kraftwerks Jochenstein haben. Die Einflüsse zwischen Turbinen- und Pumpbetrieb gleichen sich aus. Diese Einflüsse dürften jedoch aufgrund der Leistungsregelung der Turbinen nicht signifikant ausfallen.

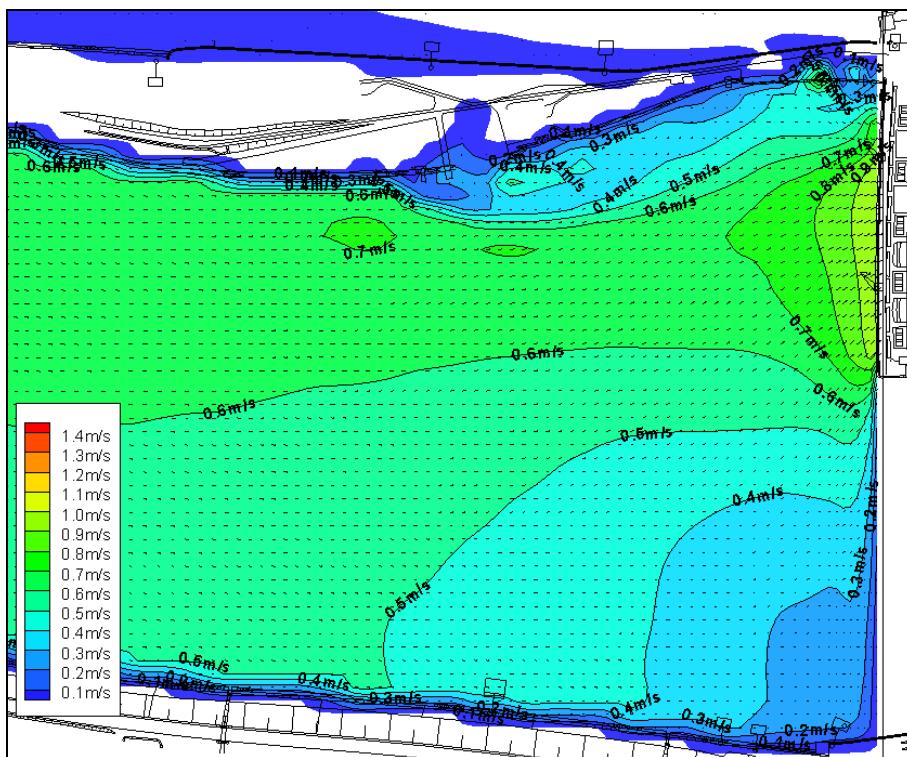


Abbildung 20: Absolute Strömungsgeschwindigkeiten bei  $Q = MQ = 1430 \text{ m}^3/\text{s}$ .  
Horizontalschnitt in 1,0 m Tiefe, Betriebsfall: Ohne Betrieb

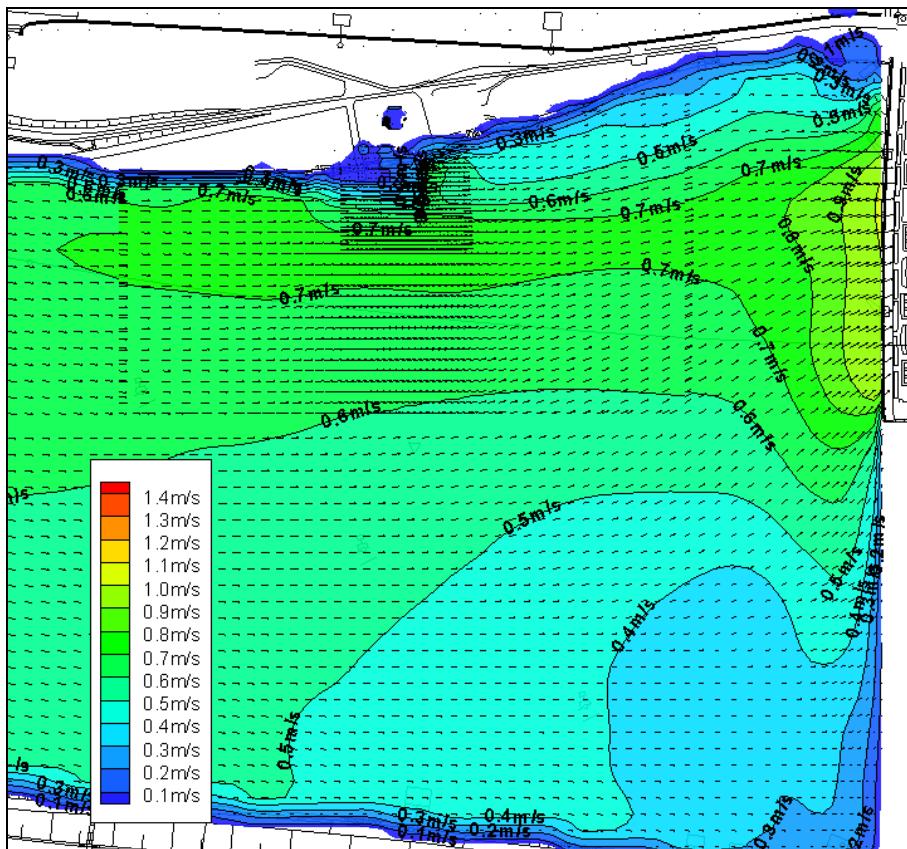


Abbildung 21: Absolute Strömungsgeschwindigkeiten bei  $Q = MQ = 1430 \text{ m}^3/\text{s}$ .  
Horizontalschnitt in 1,0 m Tiefe, Betriebsfall: Pumpbetrieb:  $Q = 83 \text{ m}^3/\text{s}$

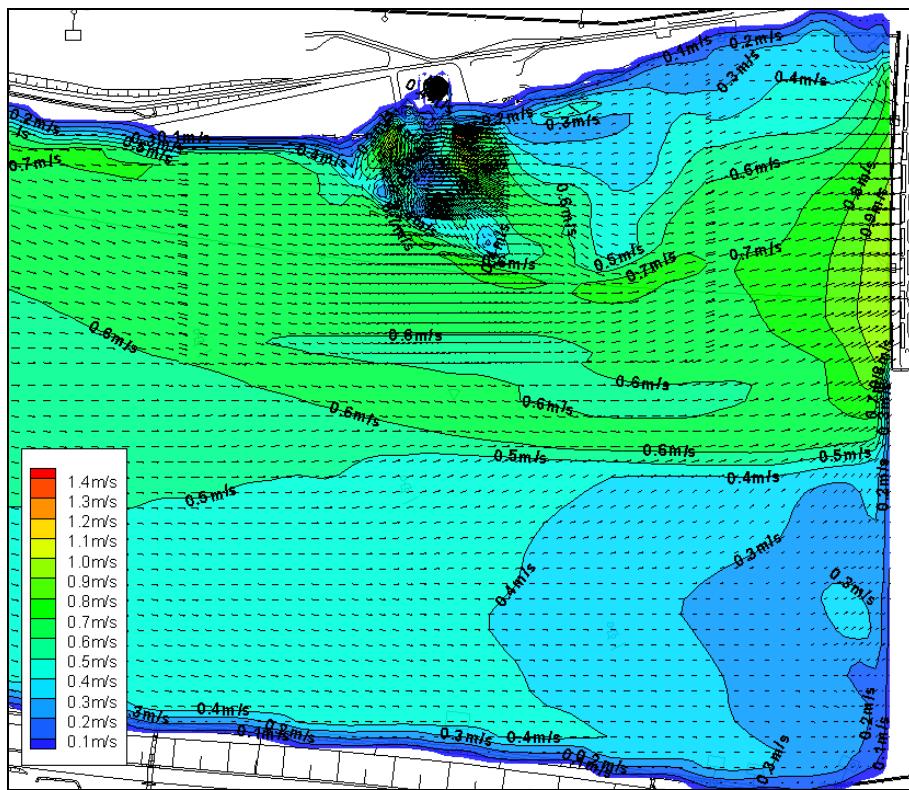


Abbildung 22: Absolute Strömungsgeschwindigkeiten bei  $Q = MQ = 1430 \text{ m}^3/\text{s}$ .  
Horizontalschnitt in 1,0 m Tiefe, Betriebsfall: Turbinenbetrieb:  $Q = 108 \text{ m}^3/\text{s}$

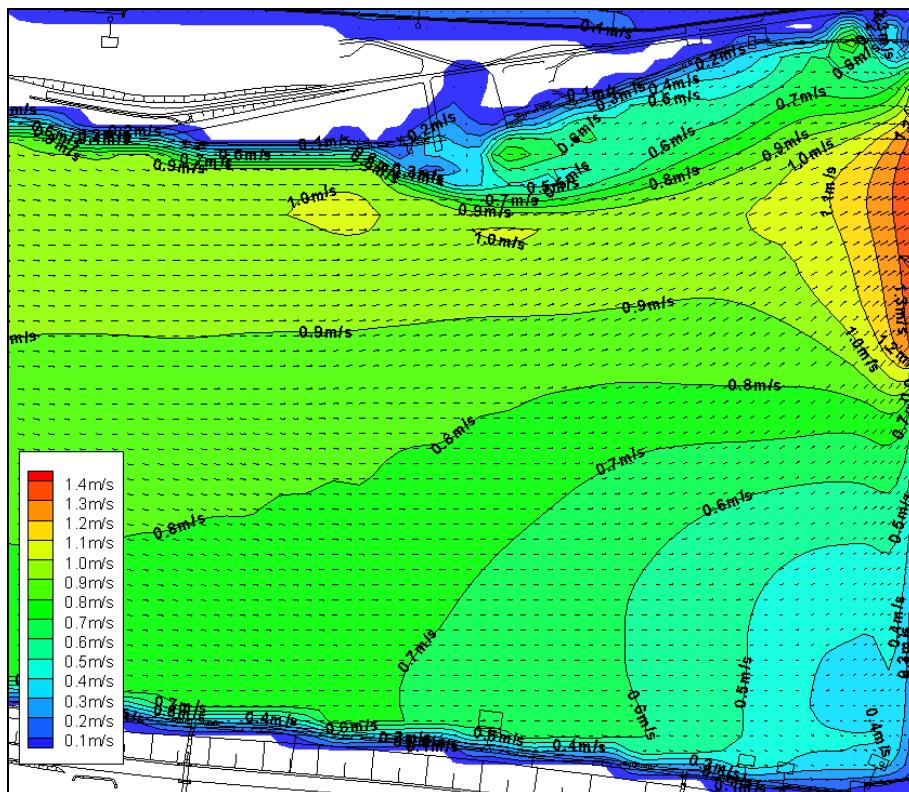


Abbildung 23: Absolute Strömungsgeschwindigkeiten bei  $Q = QA = 2050 \text{ m}^3/\text{s}$ .  
Horizontalschnitt in 1,0 m Tiefe, Betriebsfall: Ohne Betrieb

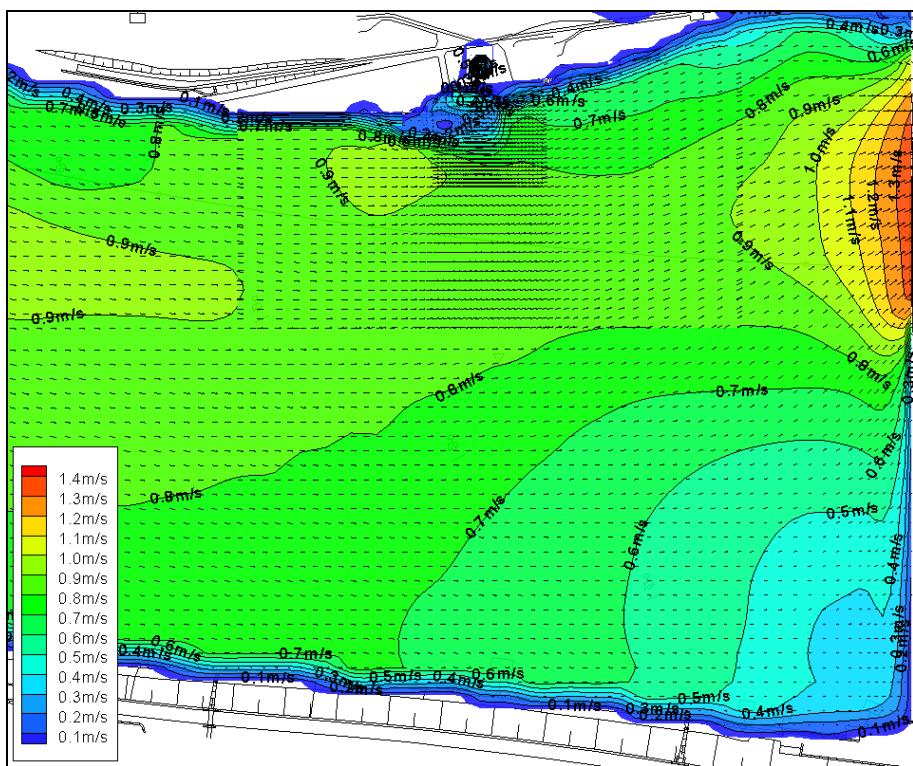


Abbildung 24: Absolute Strömungsgeschwindigkeiten bei  $Q = QA = 2050 \text{ m}^3/\text{s}$ .  
Horizontalschnitt in 1,0 m Tiefe, Betriebsfall: Pumpbetrieb:  $Q = 83 \text{ m}^3/\text{s}$

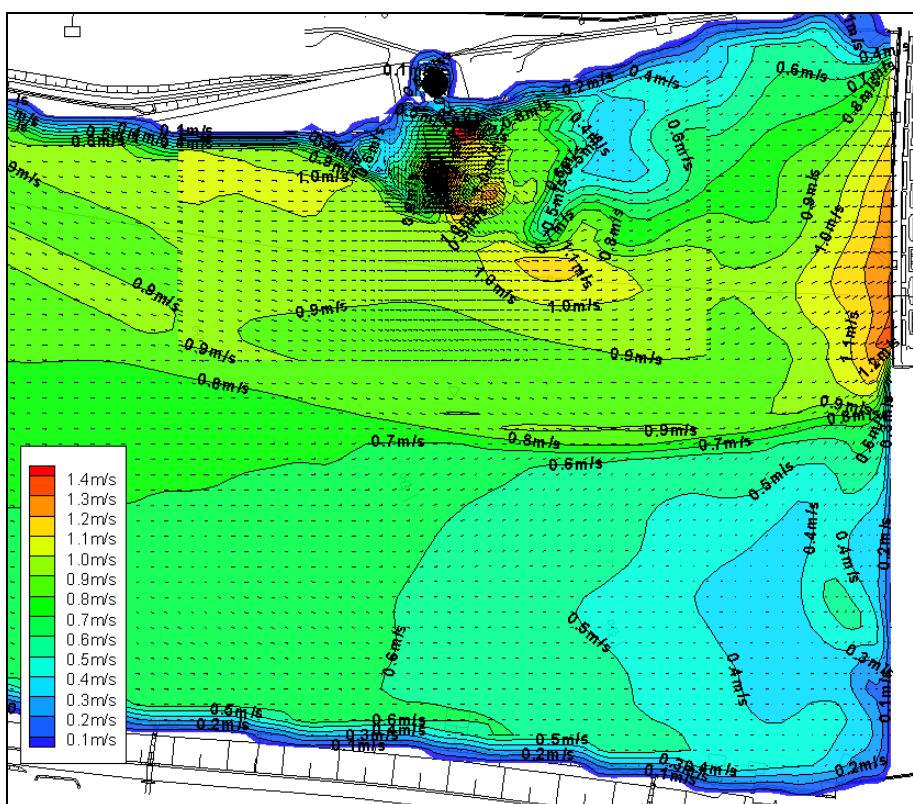


Abbildung 25: Absolute Strömungsgeschwindigkeiten bei  $Q = QA = 2050 \text{ m}^3/\text{s}$ .  
Horizontalschnitt in 1,0 m Tiefe, Betriebsfall: Turbinenbetrieb:  $Q = 108 \text{ m}^3/\text{s}$

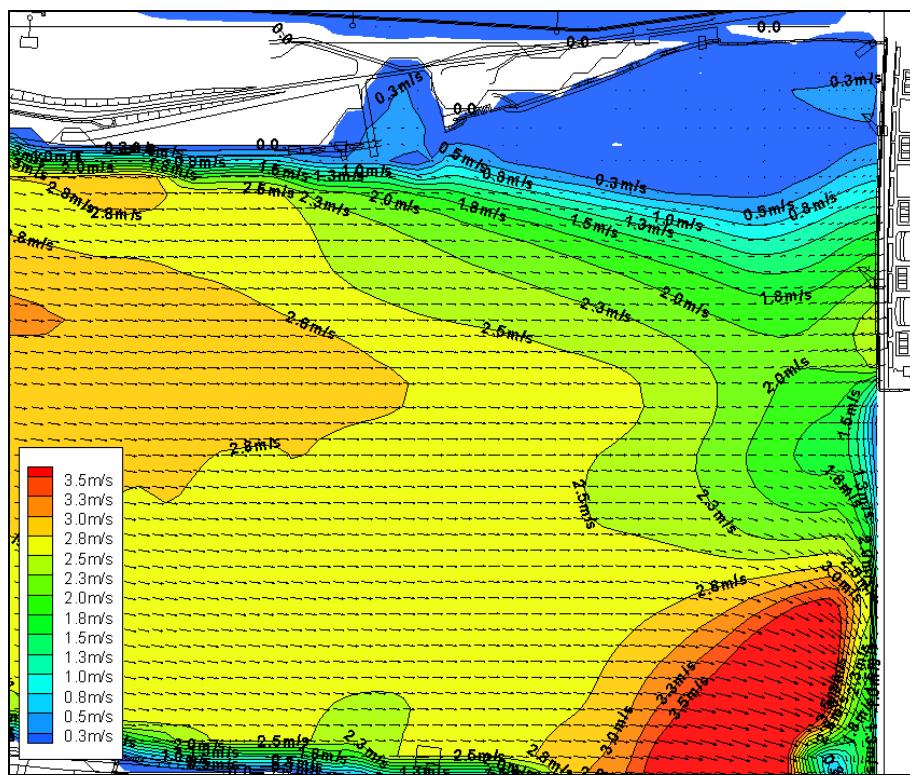


Abbildung 26: Absolute Strömungsgeschwindigkeiten bei  $Q = Q_{\max}(3D\text{-Ber.}) = 5450 \text{ m}^3/\text{s}$ .  
Horizontalschnitt in 1,0 m Tiefe, Betriebsfall: Ohne Betrieb

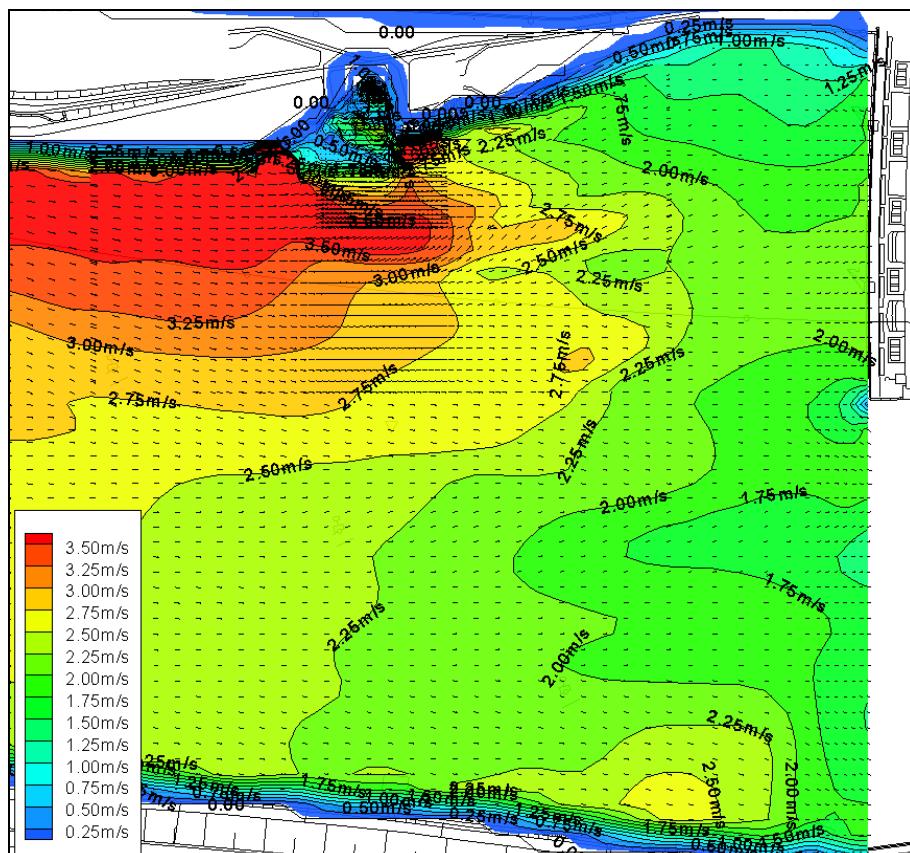


Abbildung 27: Absolute Strömungsgeschwindigkeiten bei  $Q = Q_{\max}(3D\text{-Ber.}) = 5450 \text{ m}^3/\text{s}$ .  
Horizontalschnitt in 1,0 m Tiefe, Betriebsfall: Pumpbetrieb:  $Q = 83 \text{ m}^3/\text{s}$

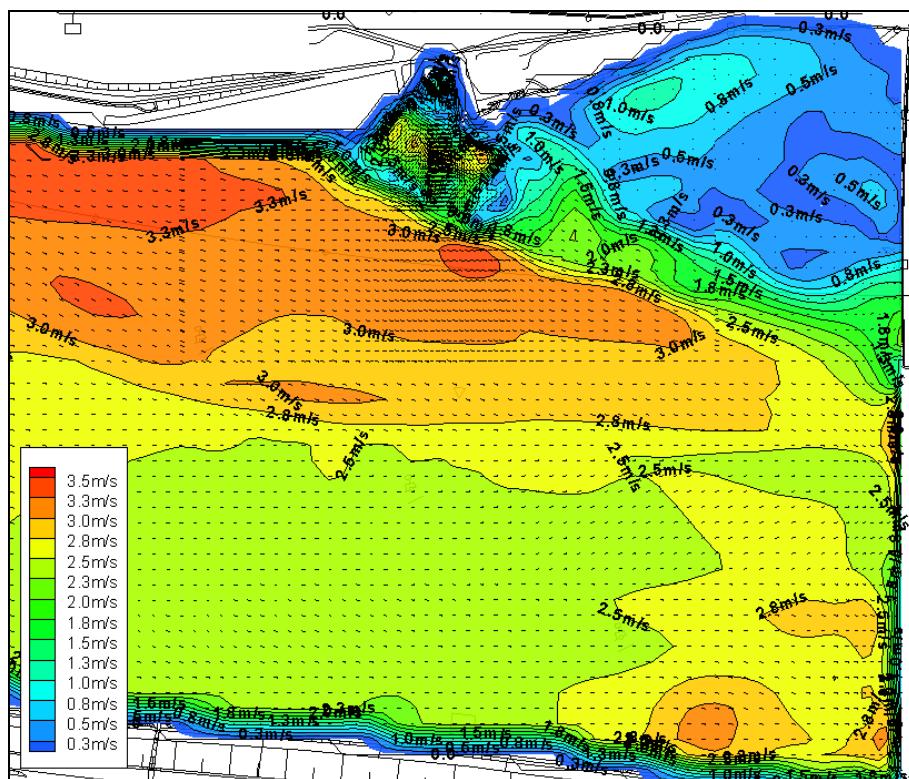


Abbildung 28: Absolute Strömungsgeschwindigkeiten bei  $Q = Q_{\text{max}}(3D\text{-Ber.}) = 5450 \text{ m}^3/\text{s}$ .  
Horizontalschnitt in 1,0 m Tiefe, Betriebsfall: Turbinenbetrieb:  $Q = 108 \text{ m}^3/\text{s}$