

# Bericht

## Hydraulische Berechnungen und Untersuchungen zum Kavernenspeicher des PSW Forbach – Arbeitspaket 1

Oktober 2017

AUFTRAGGEBER



Planer



BETREUUNG AM INSTITUT

Univ.-Prof. DI Dr. techn. Gerald Zenz

DI Wolfgang Richter



# PROJEKTBETEILIGTE

## AUFTRAGGEBER

EnBW Energie Baden-Württemberg AG

Eichwiesenring 14

70567 Stuttgart

Vertreten durch

Frau Dipl.-Met. Angelika Böhringer

Herrn DI Nikolas Beeker

Herrn DI Ingo Kamuf

## PLANER

Ingenieursgemeinschaft Forbach

Vertreten durch Herrn DI Robert Achatz, Lahmeyer Hydroprojekt, München

und durch Herrn DI Christoph Grass, Lahmeyer International, Bad Vibel

## AUFTRAGNEHMER

Technische Universität Graz

Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft

Stremayrgasse 10/II

A-8010 Graz

Vertreten durch:

Institutsvorstand / Projektleitung: Univ.-Prof. DI Dr. Gerald Zenz

Projektmitarbeiter: DI Wolfgang Richter

# 1. Inhaltsverzeichnis

<b>1. Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>2</b>
<b>2. Beschreibung der Untersuchungen .....</b>	<b>4</b>
<b>3. Übersicht der Anlage .....</b>	<b>5</b>
<b>4. Randbedingungen Kraftwerke Schwarzenbach und Murgwerk.....</b>	<b>10</b>
<b>5. Geometrie - Volumenbetrachtung .....</b>	<b>14</b>
<b>6. Modellierung.....</b>	<b>15</b>
<b>6.1 1D-numerische Simulationen.....</b>	<b>15</b>
6.1.1 Modellierung 1D-Numerik.....	16
6.1.2 Rauigkeitsansätze .....	19
6.1.3 Kalibrierung der Rauigkeit für die 1D-Numerk.....	23
<b>6.2 3D-numerische Simulationen - Vorgangsweise .....</b>	<b>26</b>
6.2.1 Ermittlung Verlustbeiwert 3d-Numerik.....	26
6.2.2 Ermittlung des Widerstandsbeiwertes mittels Ansys CFX Post-Processing .....	29
6.2.3 Pumpfalluntersuchung mit freier Wasseroberfläche.....	32
<b>7. Ausgangsgeometrie 1D-Numerik .....</b>	<b>33</b>
<b>7.1 Stauziel –Rauigkeiten - Sensitivitätsuntersuchung .....</b>	<b>34</b>
<b>7.2 Absenkziel - Reibungsverluste und Rauigkeiten .....</b>	<b>36</b>
<b>7.3 Resonanz STZ –UW System rau .....</b>	<b>37</b>
<b>7.4 Resonanz STZ – UW System ungünstig glatt.....</b>	<b>38</b>
<b>7.5 Anfahren der Turbinen bei ASZ .....</b>	<b>39</b>
<b>7.6 Anfahren der Pumpen bei ASZ .....</b>	<b>40</b>
<b>7.7 Pumpen SBW Aus.....</b>	<b>41</b>
<b>7.8 Max. Q am Rechen Ausgleichsbecken Forbach.....</b>	<b>43</b>
<b>7.9 Zusammenfassung Ausgangssituation .....</b>	<b>43</b>
<b>8. 3D-Numerische Untersuchungen .....</b>	<b>44</b>
<b>8.1 Gesamte Kaverne Ausgangsgeometrie .....</b>	<b>44</b>
<b>8.2 Pumpenlastfall bei ASZ Ausgangsgeometrie.....</b>	<b>48</b>
8.2.1 Hydraulischer Kurzschluss - Ausgangsgeometrie.....	48
8.2.2 Pumpenlastfall – Ausführungsvorschlag .....	50
<b>8.3 Zulaufkaverne hydraulische Verluste Ausgangsgeometrie .....</b>	<b>52</b>
<b>8.4 Zulaufkaverne Variantenstudie - hydraulische Verluste.....</b>	<b>59</b>
8.4.1 Variante 1 – MUW Stollen direkt .....	61

8.4.2	Variante 2 – MUW Stollen direkt ohne Diffusoren.....	64
8.4.3	Variante 3 – Keilkaverne Ulmen ohne Diffusoren .....	67
8.4.4	Variante 4 – Keilkaverne Ulmen und Firste ohne Diffusoren .....	70
8.4.5	Variante 5 – Diffusorkaverne .....	72
8.4.6	Variante 5b – Diffusorkaverne mit MUW Radius 4 m.....	74
8.4.7	Variante 6 – Diffusorkaverne mit MUW Stollen Anpassung.....	76
8.4.8	Variante 7 – Achsensymmetrische Diffusoren .....	77
8.4.9	Variante 8 – Stollenanbindung MUW und SBW .....	79
8.4.10	Variante 9 – Ausführungsvorschlag Zulaufkaverne Druckstollen.....	82
8.4.11	Zusammenfassung – Vergleich der Varianten .....	87
<b>9.</b>	<b>Untersuchungen zur Volumenoptimierung .....</b>	<b>90</b>
<b>9.1</b>	<b>Transiente Verlusthöhe Hauptstollen optimierte Geometrie.....</b>	<b>94</b>
<b>9.2</b>	<b>Ermittlung des minimal erforderlichen Wasserschlossquerschnitts ..</b>	<b>97</b>
<b>9.3</b>	<b>Sicherheitsreserve des Wasserschlossschachtes .....</b>	<b>101</b>
<b>9.4</b>	<b>1D-Numerik zur Minimierung der Kavernengeometrie .....</b>	<b>105</b>
9.4.1	LF 1- Firste 0,4 m über STZ – Hauptstollen glatt – WS 26,7 m <sup>2</sup> .....	107
9.4.2	LF 2- Firste 0,4 m über STZ – Hauptstollen KST 29 – WS 26,7 m <sup>2</sup> .....	107
9.4.3	LF 3- Firste 0,4 m über STZ – Hauptstollen KST 29 – 80 - 29 – WS 26,7 m <sup>2</sup> .....	108
9.4.4	Firste 0,4 m über STZ Hauptstollen rau - Variantenstudie WS-Querschnitte .....	109
9.4.5	LF 4- ASZ – Verschluss am Zulauf FB-Becken.....	111
9.4.6	LF 5- ASZ – Sohle Hauptstollen um 1 m angehoben – glatte Ausführung .....	113
9.4.7	LF 6- ASZ – Sohle Hauptstollen um 1 m angehoben – raue Ausführung.....	115
<b>10.</b>	<b>Zusammenfassung der Untersuchungen .....</b>	<b>117</b>
<b>10.1</b>	<b>Ausgangsvariante gesamter Kavernenspeicher - 1D-Numerik.....</b>	<b>118</b>
<b>10.2</b>	<b>Ausgangsvariante Zulaufkaverne 3D-Numerik.....</b>	<b>119</b>
<b>10.3</b>	<b>Ausgangsvariante gesamter Kavernenspeicher 3D-Numerik .....</b>	<b>119</b>
<b>10.4</b>	<b>Optimierungsvorschläge des Kavernenspeichers.....</b>	<b>119</b>
<b>11.</b>	<b>Vorschläge für weitere Bearbeitungen im Arbeitspaket 2 (AP2) .....</b>	<b>122</b>
<b>12.</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>123</b>
<b>13.</b>	<b>ANHANG .....</b>	<b>125</b>
<b>13.1</b>	<b>Strömungssituation Variante 1 - Darstellungen .....</b>	<b>125</b>
<b>13.2</b>	<b>Strömungssituation Variante 4 – Darstellungen .....</b>	<b>134</b>
<b>13.3</b>	<b>Strömungssituation Variante 5b – Darstellungen .....</b>	<b>135</b>
<b>13.4</b>	<b>Strömungssituation Variante 6 – Darstellungen .....</b>	<b>138</b>
<b>13.5</b>	<b>Strömungssituation Variante 7 – Darstellungen .....</b>	<b>141</b>
<b>13.6</b>	<b>Strömungssituation Variante 8 – Darstellungen .....</b>	<b>146</b>
<b>13.7</b>	<b>Strömungssituation Variante 9 -Ausführungsvorschlag.....</b>	<b>150</b>

## 2. Beschreibung der Untersuchungen

In diesem Bericht werden die hydraulischen Untersuchungen zum Kavernenspeicher des PSW Forbach – Unterstufe dargelegt.

Aufgrund von Planungsänderungen werden die von TU Graz angebotenen Untersuchungen in zwei Arbeitspakete unterteilt. Hierin werden die Ergebnisse des 1. Arbeitspaketes dargelegt. Ziel der Untersuchungen ist eine hydraulische Überprüfung des vorliegenden Kavernendesigns und die Identifizierung von hydraulischen Optimierungen der Anlagenteile im Bereich des Kavernenspeichers. Folgende Untersuchungen werden durchgeführt und in diesem Bericht dargestellt:

- 1D-numerische Strömungssimulation des Kavernenspeichers
  - Bemessungs-LF bei Stauziel im Ausgleichsbecken Forbach (Abbildung 1)
  - Bemessungs-LF bei Absenkziel
- 3D-numerische Strömungssimulation Gesamtgeometrie
- 3D-numerische Strömungssimulation Zulaufkaverne
  - Variantenstudie zur hydraulischen Verlustminimierung
  - Konservativer Druckstoß der Pumpturbine SBW
- 1D-numerische Untersuchungen zur Nutzungsoptimierung des Volumens
  - Veränderter Betriebsbereich (Stauziel, Absenkziel)
  - Zulassen von Drucksystem
  - Angepasste Sohle im Hauptstollen
  - Einrichtungen für sicheren Betrieb (Wasserschloss – Einlaufbauwerk)
- Ausarbeitungsvorschläge für das 2. Arbeitspaket

Die detaillierte Vorgangsweise für das AP 2 wird zum gegebenen Zeitpunkt von AG definiert und wird in Kapitel 0 vorgeschlagen.

### Verwendete Abkürzungen

AFB	...	Ausgleichsbecken Forbach
AG	...	Auftraggeber (EnBW)
AP 1	...	Arbeitspaket 1
ASZ	...	Absenkziel
CFD	...	Computational Fluid Dynamics
IWB-TU GRAZ	...	Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft (TU Graz)
LF	...	Lastfall
m WS	...	Meter Wassersäule
MW	...	Mega Watt
MUW	...	Murgwerk
Q	...	Durchfluss
SBW	...	Schwarzenbachwerk
STZ	...	Stauziel
WS	...	Wasserschloss

### 3. Übersicht der Anlage

Abbildung 1 zeigt den Gesamtbereich der Wasserkraftanlagen Forbach mit den Ausbauvorhaben PSW – Oberstufe Seekopf und der gegenständlichen Untersuchung des Kavernenspeichers – Unterstufe. Abbildung 2 zeigt den Gesamtgrundriss der geplanten Unterstufe mit Kavernensystem.

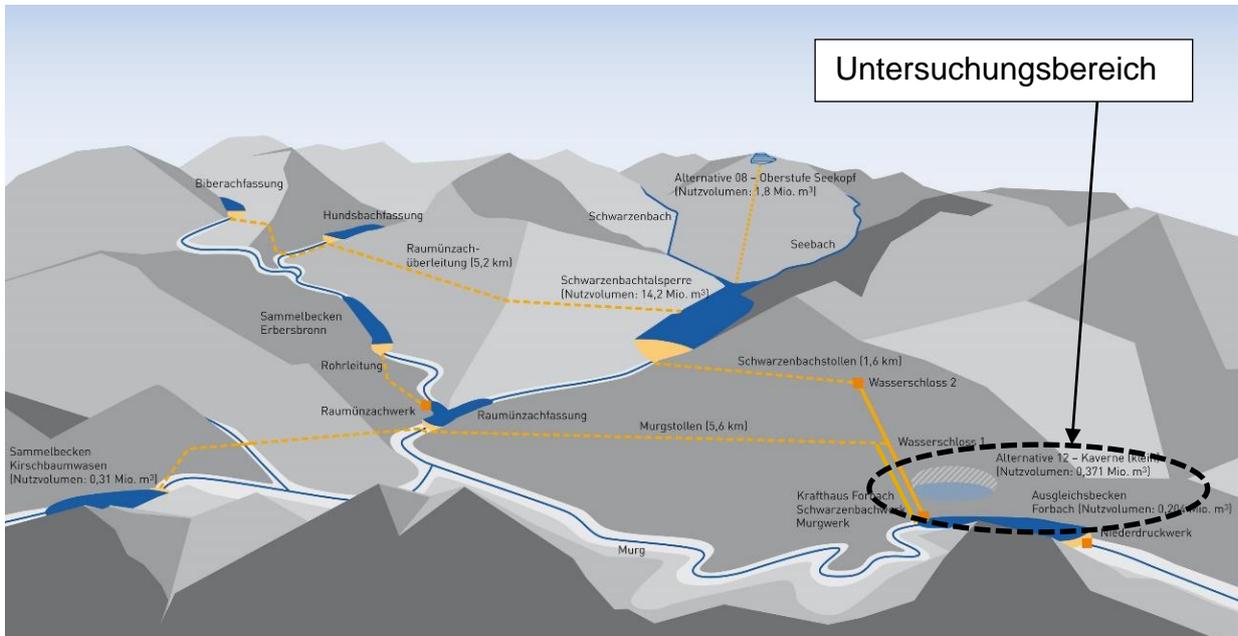


Abbildung 1: Übersicht Kraftwerkssystem Forbach mit Ausbauvorhaben

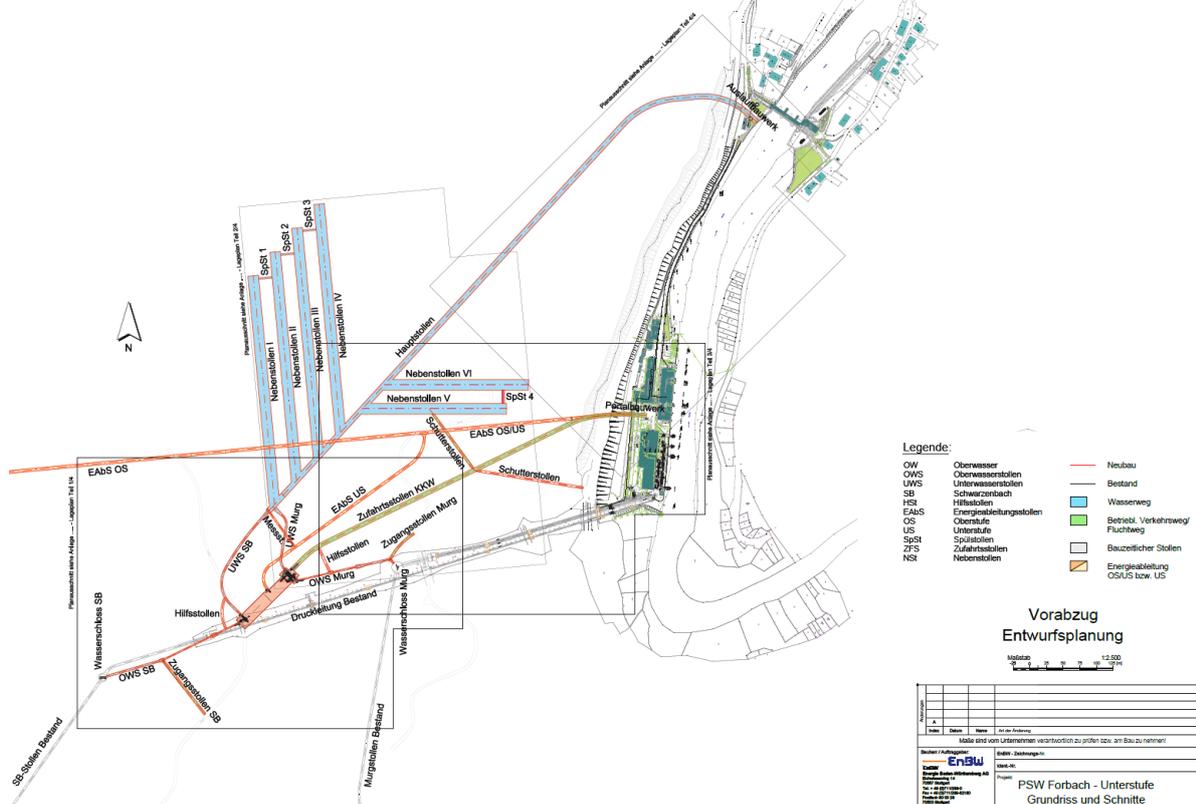


Abbildung 2: Übersichtslageplan Unterwasserspeicher (US) des PSW Forbach

Abbildung 3 zeigt den hydraulischen Untersuchungsbereich des Kavernenspeichers Forbach.

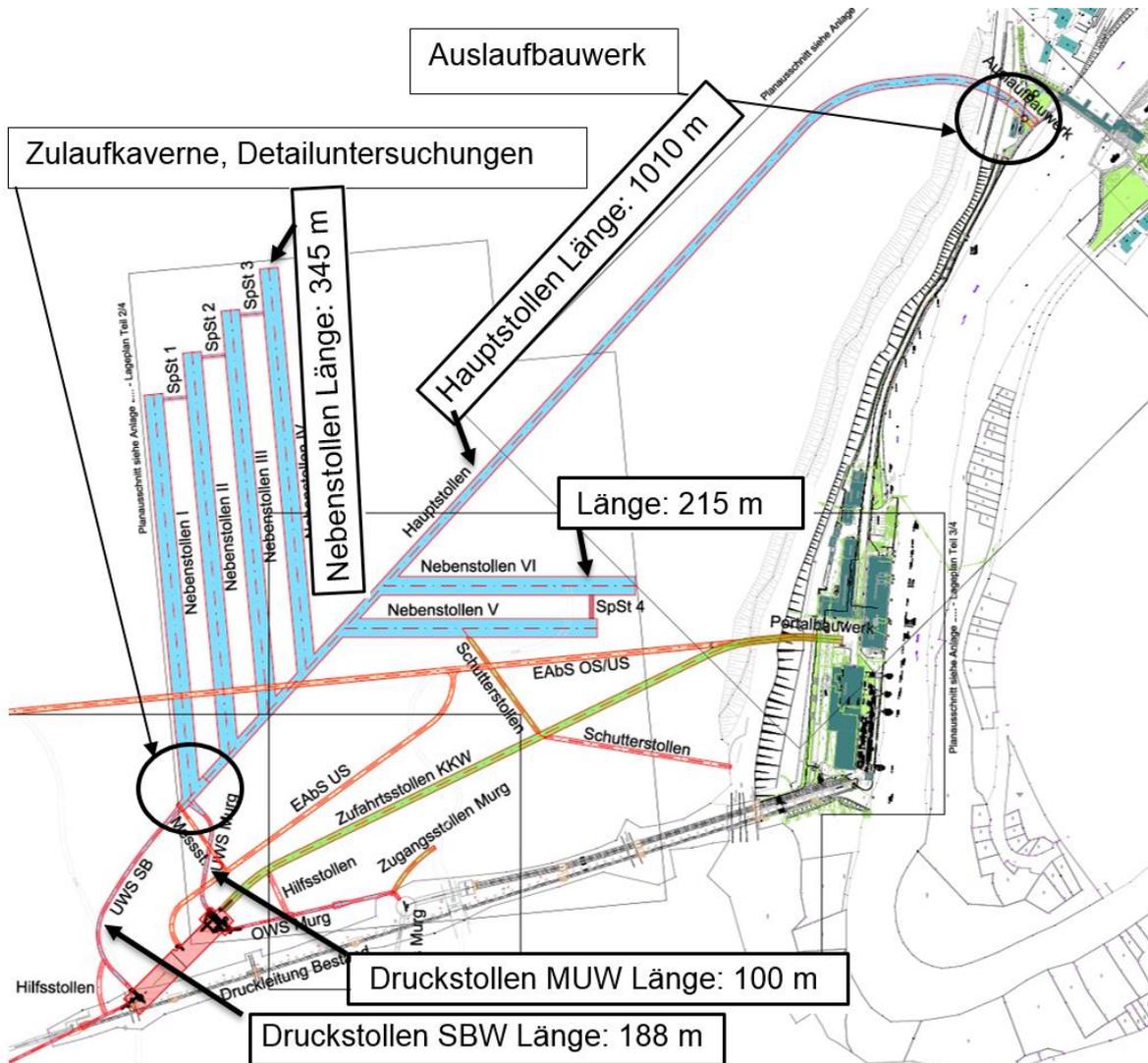


Abbildung 3: Übersichtslageplan Unterwasserspeicher (US) des PSW Forbach, Detail 1

Abbildung 4 und Abbildung 5 zeigen den geplanten Übergang in das Ausgleichsbecken Forbach.

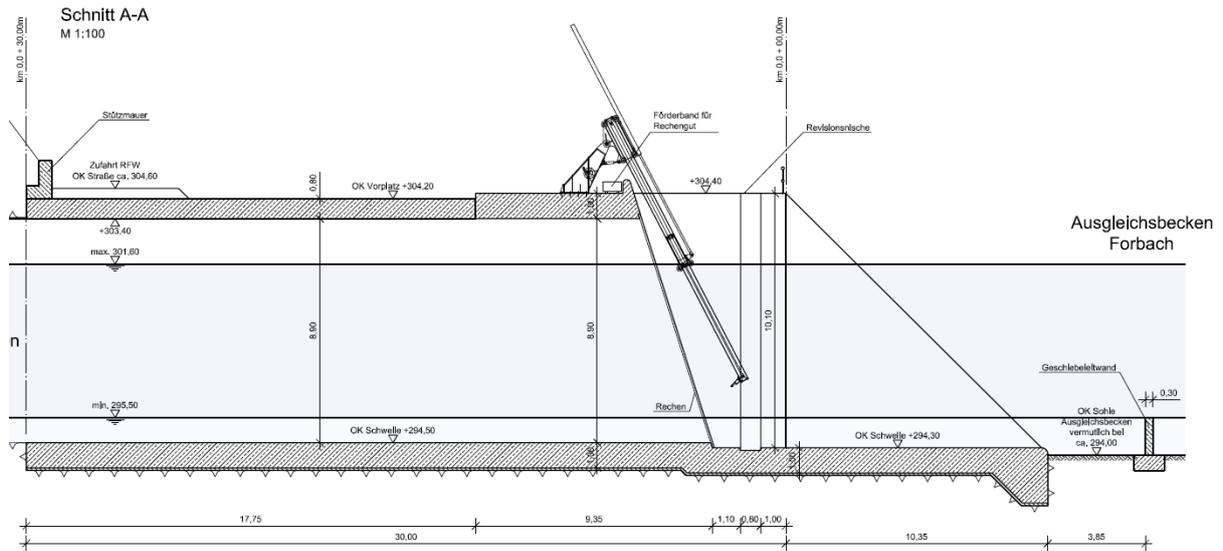


Abbildung 4: Einlaufbauwerk ins Ausgleichsbecken Forbach, Schnitt

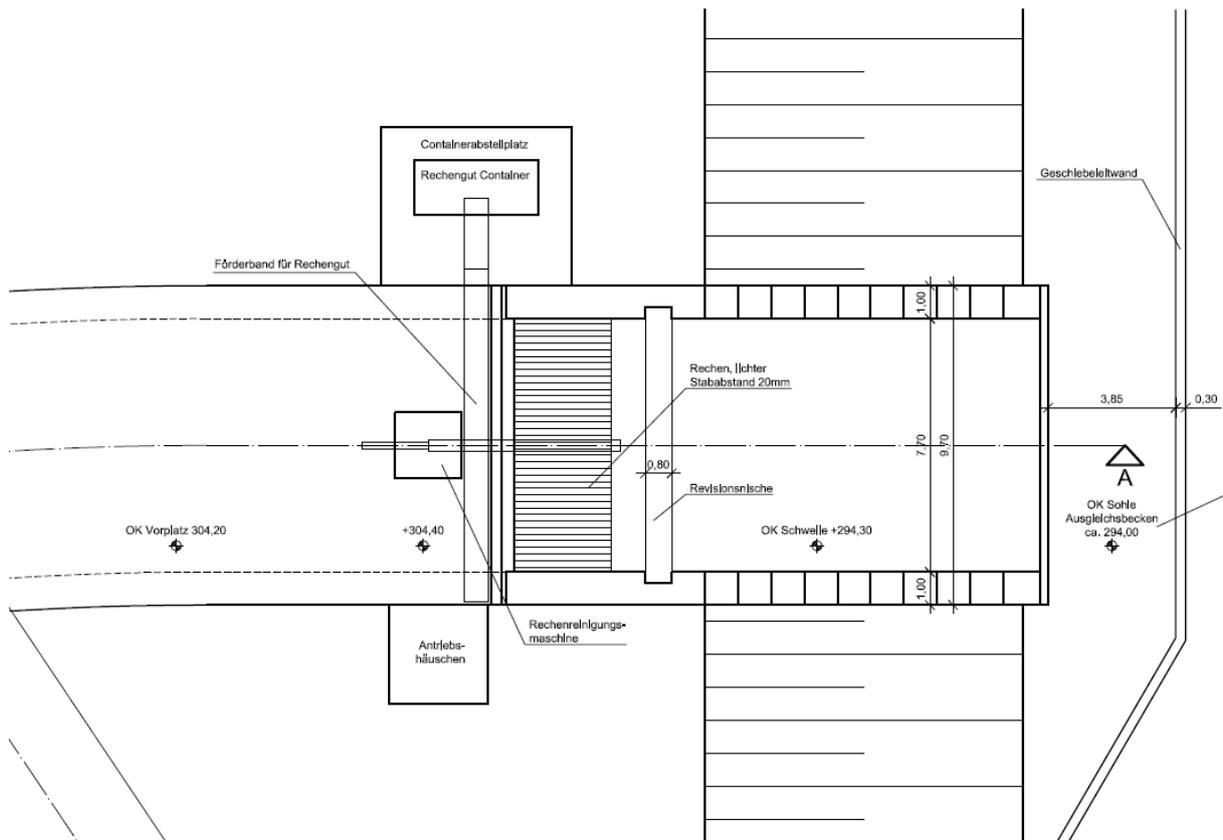


Abbildung 5: Einlaufbauwerk ins Ausgleichsbecken Forbach, Grundriss

Abbildung 6, bis Abbildung 8 zeigen die Querschnittsgeometrien im Bereich Nebenstollen, Zulaufkaverne und Hauptstollen.

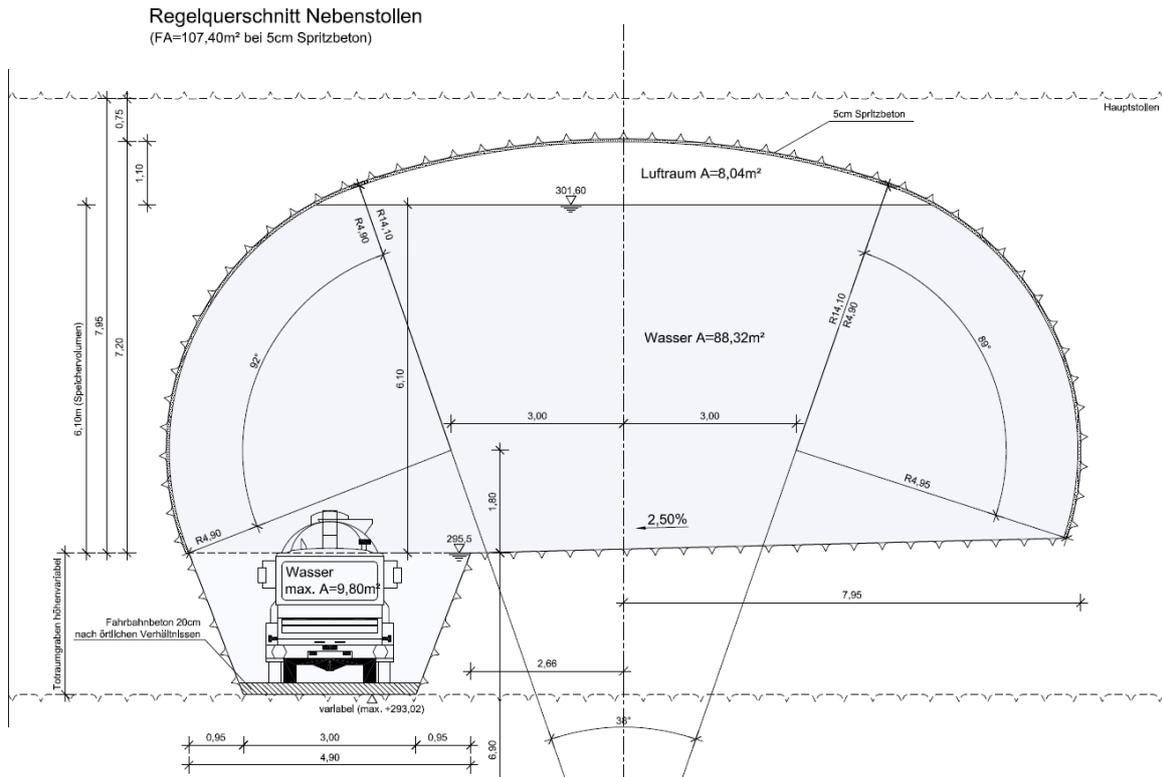


Abbildung 6: Regelquerschnitt Nebenstollen

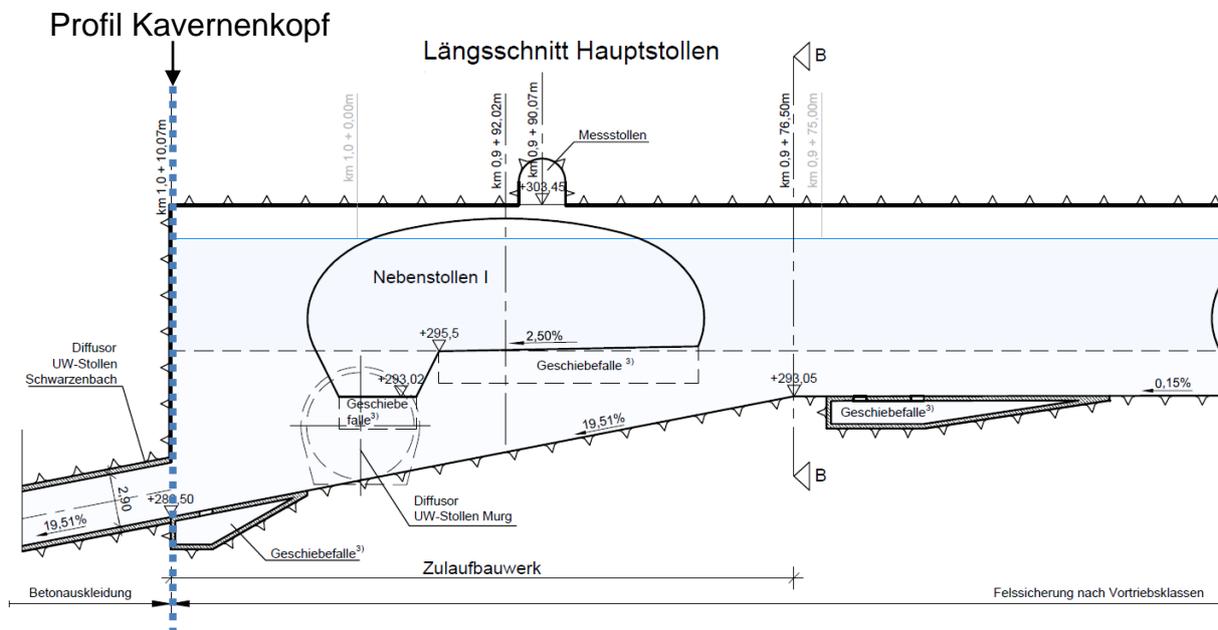


Abbildung 7: Zulaufkaverne zu den Kraftwerken SBW und MUW

### Regelquerschnitt Hauptstollen

(FA=61,53m<sup>2</sup> bei 5cm Spritzbeton)  
km 0,0+00,00

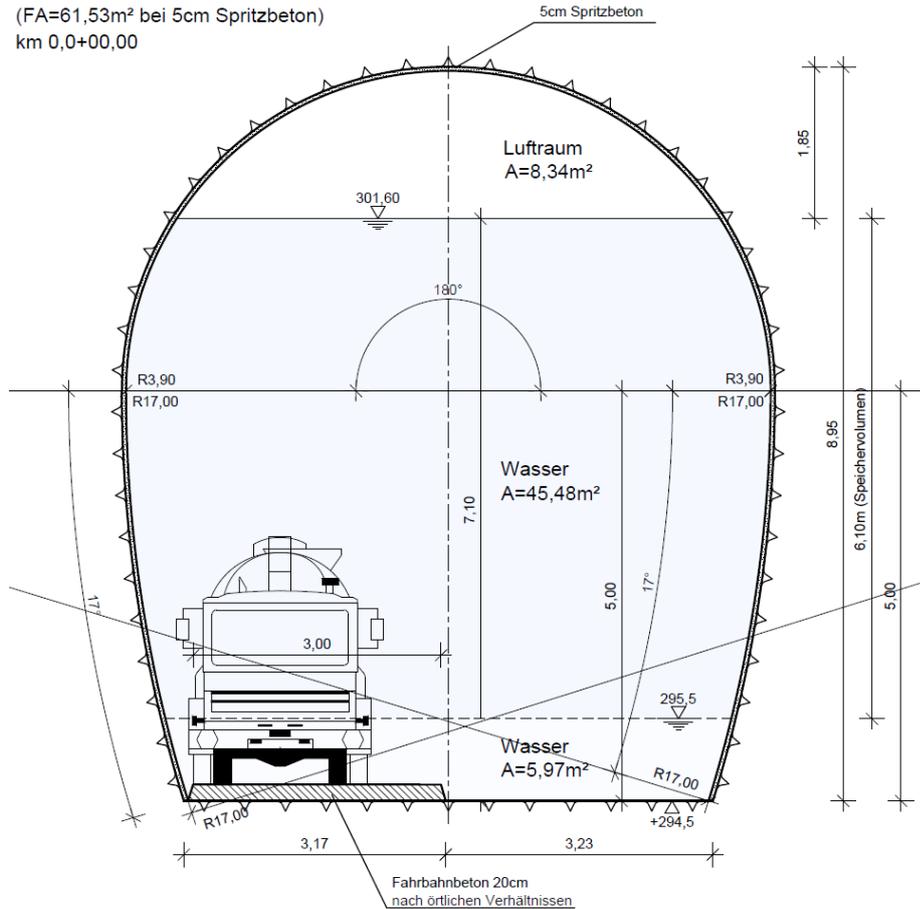


Abbildung 8: Regelquerschnitt Hauptstollen

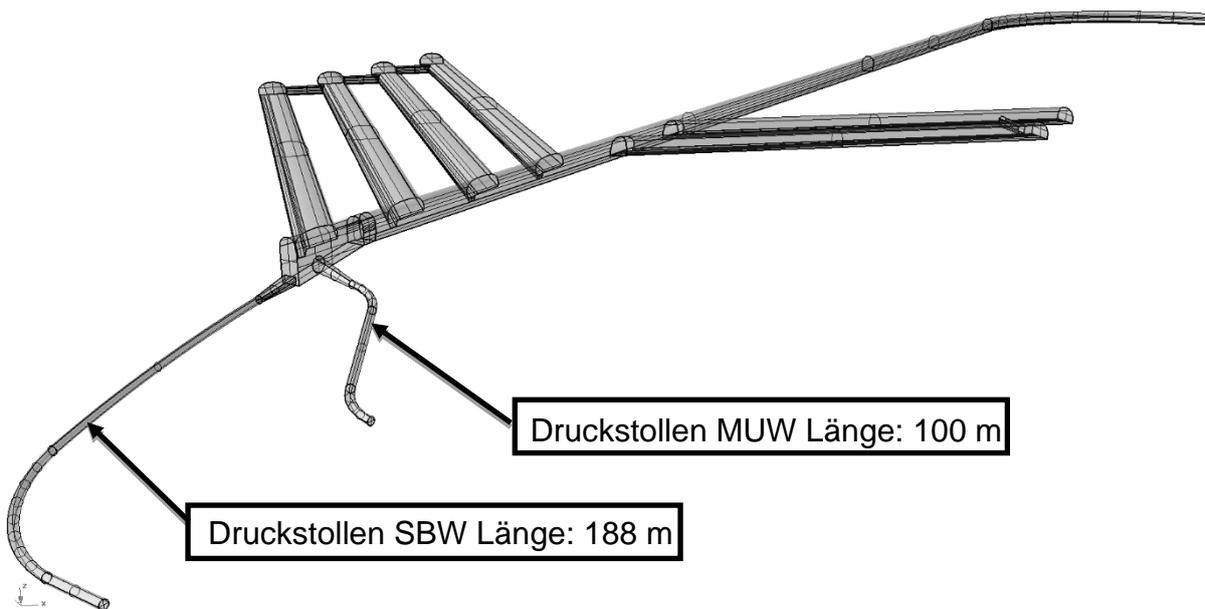


Abbildung 9: Darstellung des gesamten UW-Speichersystems mit den Druckstollen SBW und MUW

#### 4. Randbedingungen Kraftwerke Schwarzenbach und Murgwerk

Tabelle 1: Maschinendaten für Pumpturbine Schwarzenbachwerk (EnBW Stand 22.04.2015)

Anordnung der Welle	vertikal
Typ hydraulische Maschinen	reversible Pump-Turbine
Nennzahl $n$ [ $\text{min}^{-1}$ ]	750
Nennleistung $P_{\text{Geno}}$ [MW]	51,4
$\cos \varphi$ im Tu- u. Pu-Betr.	0,85
Scheinleistung $P_s$ [MVA]	60,5
Nennleistung $P_{\text{Turb}}$ [MW]	51,4
Nenndurchfluss $Q_{\text{Turb}}$ [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]	16,4
ca. max. Turbinendurchfluss ( $\sim 1.1 * Q_{\text{Nenn}}$ ) [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]	18
Durchfluss im Pumpbetrieb $Q_{\text{Pump}}$ bei $H_{\text{Nenn}}$ [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]	11,2
Nennfallhöhe $H_{\text{net}}$ [m]	352,0
Saughöhe $h_s$ [m] bzw. Einbaukote Mitte Spirale [m ü. NN]	-34,0 261,5

Die Leistungen beruhen auf den vorläufig angenommenen Werten  $\eta_{\text{Trafo}} = 99,2 \%$  und  $\eta_{\text{Gen}} = 98,0 \%$ .

Tabelle 2: Maschinendaten für Maschinen des Murgwerks (Ing. ARGE PSW Forbach Juli 2015)

Turbinenleistung	MW	13	5	0,8
Turbinentyp		Francis, 1-stufig		
Anordnung des Wellenstranges		horizontal	horizontal	vertikal
Lageranordnung des Maschinensatzes		2 Führungslager und 1 Spurlager, alle beim Generator		
Lauftrad-Drehrichtung (vom Generator Richtung Turbine gesehen)		links drehend	rechts drehend	rechts drehend
Nennfallhöhe	m	137,87	137,87	137,87
Nenndurchfluss	m <sup>3</sup> /s	10,3	4,0	0,7
Synchrondrehzahl	min <sup>-1</sup>	750	1000	1500
Durchgangsdrehzahl	min <sup>-1</sup>	1360	1770	2515
Einbaukote der Spiralmittle	m NN	274,16	273,73	272,25
Lauftrad-Nenndurchmesser	m	1,03	0,69	0,36
Spiralgehäuse: Eintrittsdurchmesser	m	1,4	0,8	0,5
Gesamtbreite OW-UW	m	3,19	2,24	1,33
Gesamthöhe	m	3,65	2,53	-
Saugrohr: Krümmer-Fuß zu Lauftradmitte	m	3,10	2,24	1,50
Länge	m	5,21	3,70	2,43

Tabelle 3: Umschaltzeiten der Pumpturbine Schwarzenbachwerk (EnBW Stand 22.04.2015)

Betriebsübergänge	Max. Umsteuerzeiten [s]	Bemerkung
ST → TU	90	„Anfahren der Turbine“: Anfahren der Tu aus dem Stillstand (Drehzahl $n = 0$ ) auf Volllast. $P_{Tu} = 0 \rightarrow P_{Tu} = \text{Max}$
TU → ST	200	„Abstellen der Turbine“: Abstellen der Tu aus Volllast bis Stillstand (Drehzahl $n = 0$ ). $P_{Tu} = \text{Max} \rightarrow P_{Tu} = 0$
ST → PU	300	„Anfahren der Pumpe“: Anfahren der Pu aus dem Stillstand (Drehzahl $n = 0$ )

		auf Volllast. $P_{Pu} = 0 \rightarrow P_{Pu} = \text{Max}$
PU → ST	200	„Abstellen der Pumpe“: Abstellen der Pu aus Volllast bis Stillstand (Drehzahl $n = 0$ ). $P_{Pu} = \text{Max} \rightarrow P_{Pu} = 0$
TU → PU	500 (=200+300)	„Von Volllast Turbinenbetrieb auf Volllast Pumpenbetrieb“: Abstellen der Tu aus Volllast bis Stillstand (Drehzahl $n = 0$ ); Direkt anschließend Anfahren der Pu aus dem Stillstand (Drehzahl $n = 0$ ) auf Volllast. $P_{Tu} = \text{Max} \rightarrow P_{Pu} = \text{Max}$
PU → TU	290 (=200 + 90)	„Von Volllast Pumpenbetrieb auf Volllast Turbinenbetrieb“: Abstellen der Pu aus Volllast bis Stillstand (Drehzahl $n = 0$ ); Direkt anschließend Anfahren der Tu aus dem Stillstand (Drehzahl $n = 0$ ) auf Volllast. $P_{Pu} = \text{Max} \rightarrow P_{Tu} = \text{Max}$
PH → TU	80	„Aus Phasenschieberbetrieb in Turbinenbetrieb“: Aus dem Phasenschieberbetrieb (Drehrichtung Turbine) bis Turbinenbetrieb auf Volllast. $P_{Tu} = 0 \rightarrow P_{Tu} = \text{Max}$
PH → PU	80	„Aus Phasenschieberbetrieb in Pumpbetrieb“: Aus dem Phasenschieberbetrieb (Drehrichtung Pumpe) bis Pumpbetrieb auf Volllast. $P_{Pu} = 0 \rightarrow P_{Pu} = \text{Max}$

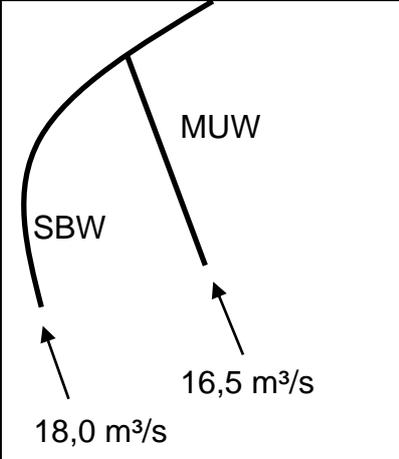
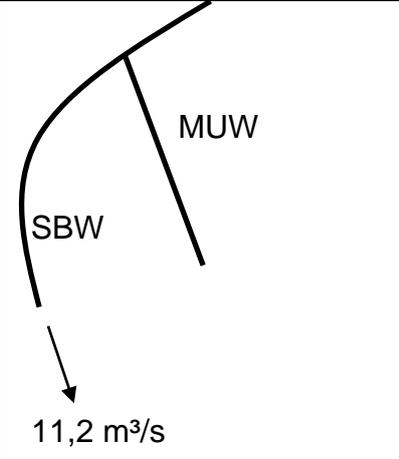
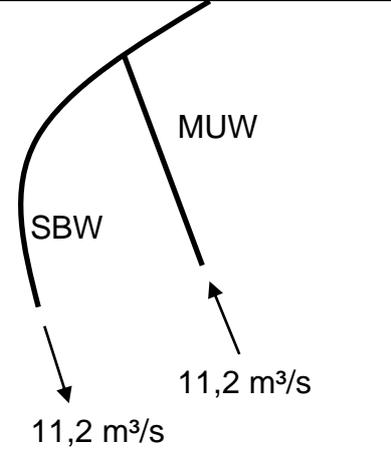
Abkürzungen:

ST = Stillstand    TU = Turbinenbetrieb    Pu = Pumpbetrieb    PH = Phasenschieberbetrieb

Tabelle 4: Umschaltzeiten der Francisturbinen Murgwerk (Email EnBW 05.11.2015)

Betriebs- übergänge	Max. Umsteuer- zeiten [s]	Bemerkung
ST → TU	30	„Anfahren der drei Turbinen“:  Anfahren der Tu aus dem Stillstand (Drehzahl $n = 0$ ) auf Volllast.  $P_{Tu} = 0 \rightarrow P_{Tu} = \text{Max}$
TU → ST	30	„Abstellen der Turbine“:  Abstellen der Tu aus Volllast bis Stillstand (Drehzahl $n = 0$ ).  $P_{Tu} = \text{Max} \rightarrow P_{Tu} = 0$

Tabelle 5: Lastfallübersicht

		
Turbinenlastfall MUW und SBW	Pumpenlastfall SBW	Ungünstiger Pumplastfall mit hydraulischem Kurzschluss

## 5. Geometrie - Volumenbetrachtung

Die Ausgangsgeometrie für die hydraulische Untersuchung für TU Graz weist folgendes hydraulisches Konzept auf:

Kavernenspeicher wird immer als Freispiegelsystem betrieben – dadurch definiert sich der Luftraum über dem Staupegel im Speichersystem.

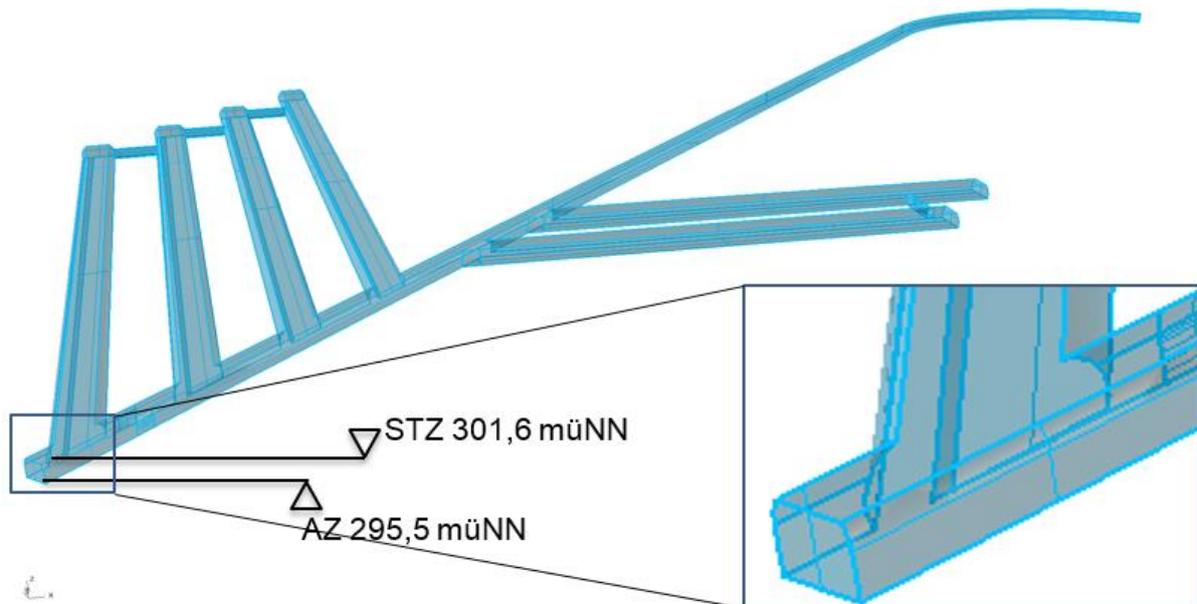


Abbildung 10: Nettogeometrie des Kavernenspeichers zwischen Stauziel und Absenkeziel

Folgende Luft- bzw. Totraumvolumina im Speicherbereich werden ermittelt:

- Firste Hauptstollen (Luftvolumen zwischen STZ und Firste) 8550 m<sup>3</sup>
- Firste Nebenstollen (Luftvolumen zwischen STZ und Firste) 14455 m<sup>3</sup>
- Sohle Hauptstollen (Totraum zwischen ASZ und Sohle) 13123 m<sup>3</sup>
- Totraum Nebenstollen (Wasservolumen in Zufahrtsrampe) 9872 m<sup>3</sup>
- Summe: 46000 m<sup>3</sup> (23% von Netto-Gesamtvolumen 200 000 m<sup>3</sup>)

In Summe werden ca. 46000 m<sup>3</sup> als Luft- oder Totvolumen ermittelt. Von IWB TU Graz wird hier ein erhebliches Optimierungspotenzial gesehen und in weiterer Folge untersucht.

Bezüglich des Totraums im Hauptstollen ist anzumerken, dass dieser zwar nicht als Netto-Speichervolumen dient allerdings hat der größere Fließquerschnitt im Falle von tieferen Wasserpegeln einen positiven Einfluss bezüglich der Reibungsverluste im Turbinen – bzw. Pumpfall. Der Einfluss sinkt bei höherem Speicherpegel (vgl. Pkt. 9.1).

## 6. Modellierung

Die hydraulischen Untersuchungen werden mittels 1D- und 3D-numerischer Simulationen durchgeführt. Die 1D-numerischen Berechnungen werden herangezogen, um die Massenschwingung des Gesamtsystems bei Stauziel und bei Absenkziel zu untersuchen und um Variantenstudien anhand des gesamten Speichers durchzuführen.

Die 3D-numerischen Untersuchungen werden durchgeführt um die lokalen hydraulischen Verluste in der Zulaufkaverne für die Variantenstudie zu ermitteln, um die Strömungszustände im Gesamtsystem für den Staupegel und den Absenkpegel zu ermitteln und um eine eventuelle Wirbelbildung mit Lufteinzug in den Druckstollen SBW bei Absenkziel und Pumpbetrieb ermitteln zu können.

### 6.1 1D-numerische Simulationen

Für die numerische Berechnung wird die Software WANDA, Version 4.3 eingesetzt. Hersteller ist die niederländische Firma Delft Hydraulics (<http://www.wldelft.nl>). Es handelt sich bei diesem Produkt um eine Software für 1D-numerische Simulationen in Rohrleitungssystemen, welches die Druckstoßberechnung nach dem Charakteristiken-Verfahren durchführt. Dabei werden die Elastizitäts-Module des Rohres und Flüssigkeit berücksichtigt.

#### Beschreibung des Rechenprogramms:

Das Rechenmodell ist so aufgebaut, dass in Steuerfiles die Struktur der Anlage (Nutzfile) und die Daten der einzelnen Anlagenteile eingegeben werden. Die Eingaben werden in einem Dokumentationsfile gespeichert.

Das Wasserschlossmodul kann aus verschiedenen hydraulischen Elementen erstellt werden. Dazu gehören Elemente der Rohrhydraulik (z.B. Rohr, Abzweig, Drossel) und der Gerinne Hydraulik (z.B. Freispiegelkanal oder -becken, Überfall). Die Berechnung erfolgt mit den Differentialgleichungen für die Ausbreitung von Oberflächenwellen.

Das Rohrleitungsmodul hat die konstanten Parameter: Länge, Durchmesser, Reibungsbeiwert und Druckwellenfortpflanzungsgeschwindigkeit. Die Berechnung erfolgt gemäß dem Standard-Charakteristiken-Verfahren. Die Geschwindigkeitshöhe ist in der Energiehöhe enthalten. Rohrleitungsmodule mit den jeweiligen Parametersätzen können mit Serien- oder Parallelschaltung zu Netzen kombiniert werden.

Die Energiehöhenverluste werden mit konstantem Reibungsbeiwert  $k_s$  [mm] (äquivalente Sandrauigkeit) berechnet. Bei den Rohrleitungen mit Freispiegelabfluss werden die hydraulischen Verluste der Schwall- und Sunkwellen in den Reibungsbeiwert integriert. Bei sehr geringem Durchfluss wird der tatsächliche Beiwert höher (mit abnehmender Reynold'scher Zahl).

Für die Modellierung des Kavernensystems wird insbesondere ein Freispiegelrohr-

Modul verwendet. Da dieses keine konische Querschnittsveränderung direkt berücksichtigen kann wird für die Haupt- und Nebenstollen jeweils in der Modellierung zwischen Lastfall – Absenkziel und Lastfall –Stauziel unterschieden. Hierbei wird entweder die Sohle geneigt oder die Firste horizontal modelliert. Der Durchfluss durch hydraulische Maschinen erfolgt über eine Kennlinie von Durchfluss über Öffnung, die Öffnung wird mit Stützpunkten vorgegeben.

### 6.1.1 Modellierung 1D-Numerik

Abbildung 11 zeigt das 1D-System für den Kavernenspeicher Forbach. Es werden Freispiegelmodule, Verlustelemente, Rohrelemente, Q/T Elemente, Wehrüberfälle und eine A/H Bedingung für den Speicher Forbach verwendet. Hierbei wird der Speicher Forbach ideal abgebildet.

Die Simulation bedient sich hydraulischen Vereinfachungen um den Möglichkeiten und Anforderungen der 1D-numerische Berechnung gerecht zu werden.

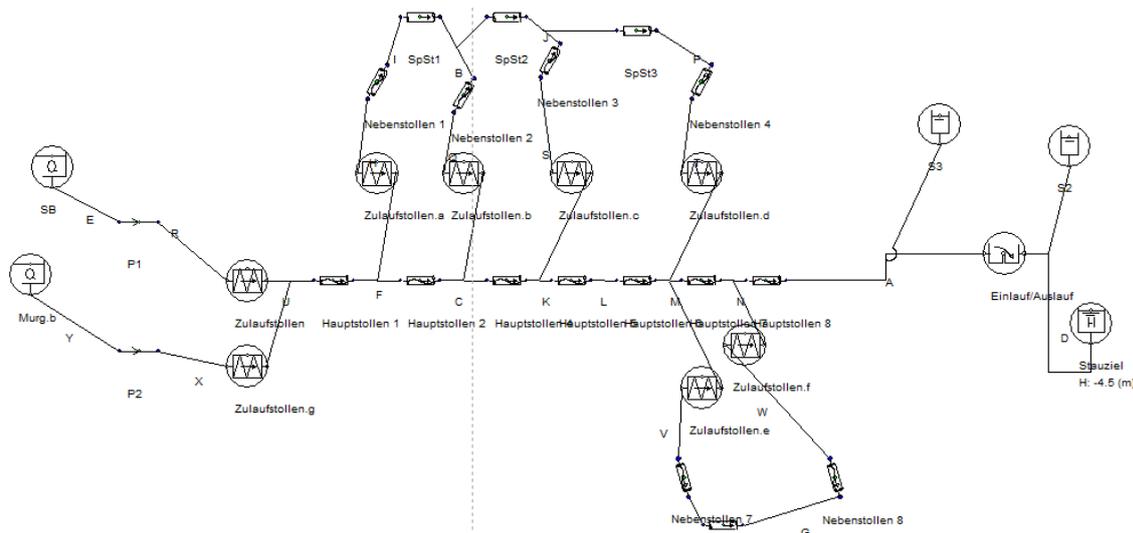


Abbildung 11: 1D-Modell des Kavernenspeichers Forbach

Abbildung 12 zeigt die Eingabe des Hauptstollenprofils in die Berechnungssoftware. Es hierbei in Bezug auf die Sohle (Höhe 0) die jeweilige Gesamtbreite bezogen auf einen Höhenkote definiert. Abbildung 13 zeigt die Eingabetabelle für die Nebenstollen.

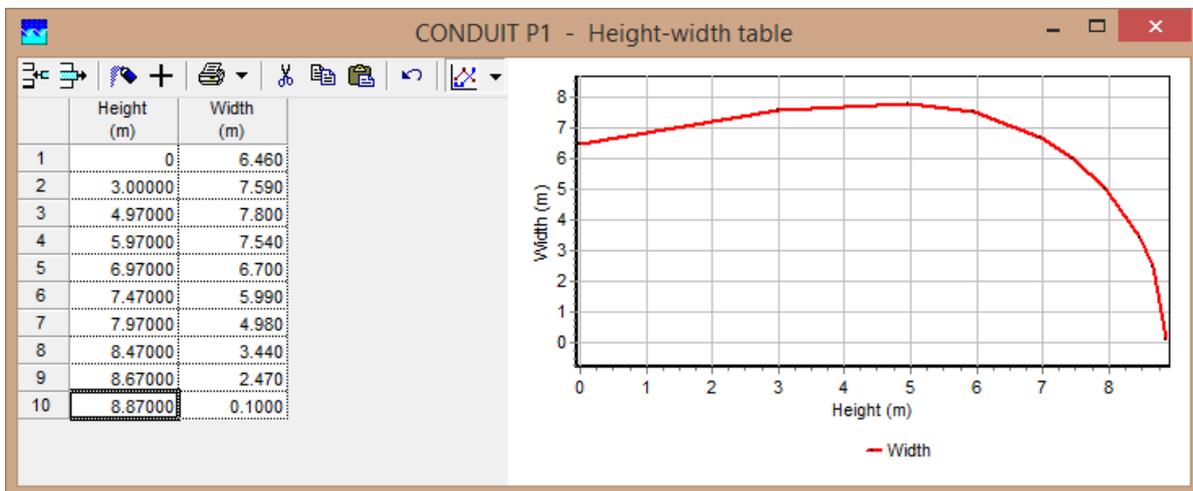


Abbildung 12: Profil Hauptstollen in 1D-Numerik

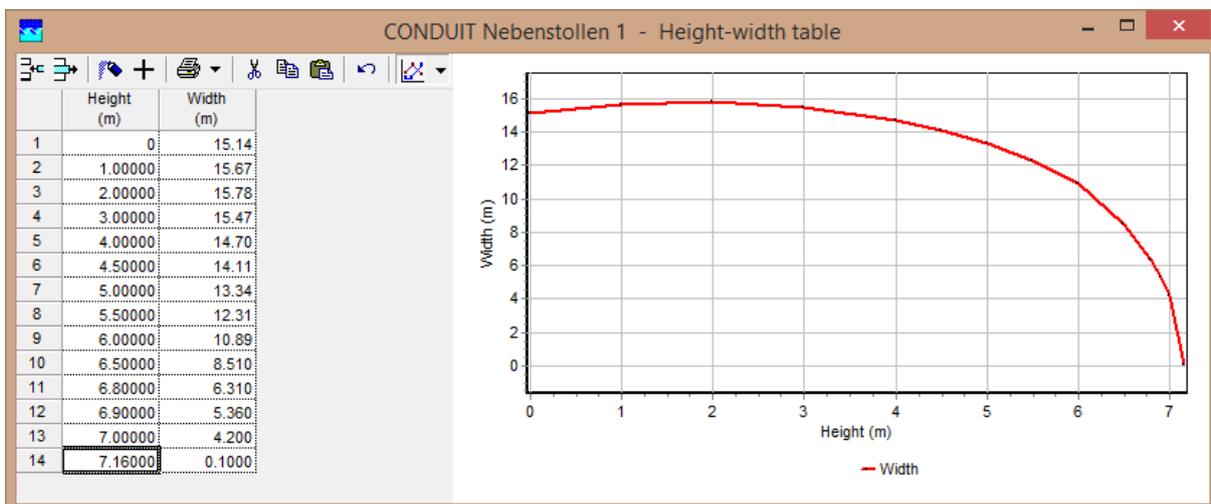


Abbildung 13: Profil Nebenstollen

Das Ausgleichsbecken Forbach wird in der 1D-Numerik als idealer Speicher berücksichtigt. Hierbei wird zufließendes oder abfließendes Wasser über den gesamten Speicher verteilt. Die Eingabe erfolgt über die Beziehung Höhenkote zu verfügbare Fläche. Abbildung 14 und Abbildung 15 zeigen den Zusammenhang und die spezifische Größe des Ausgleichsbeckens Forbach.

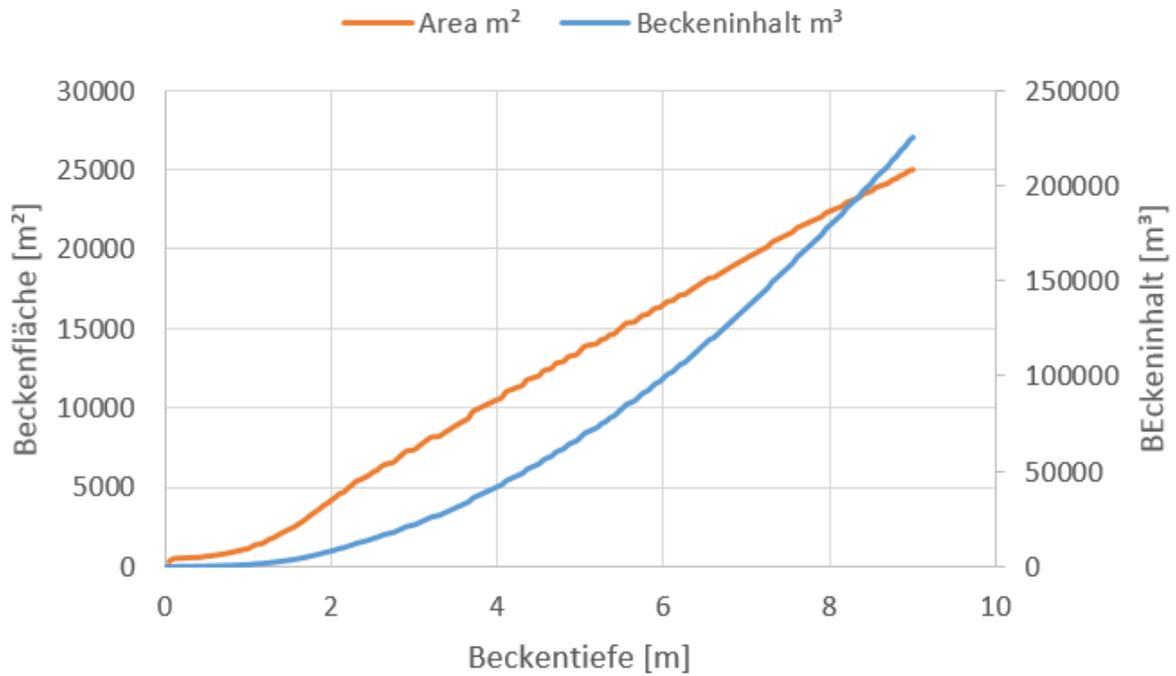


Abbildung 14: Berücksichtigung des Ausgleichsbeckens Forbach, Fläche [m²] zu Inhalt [m³] anhand der Beckentiefe [m]

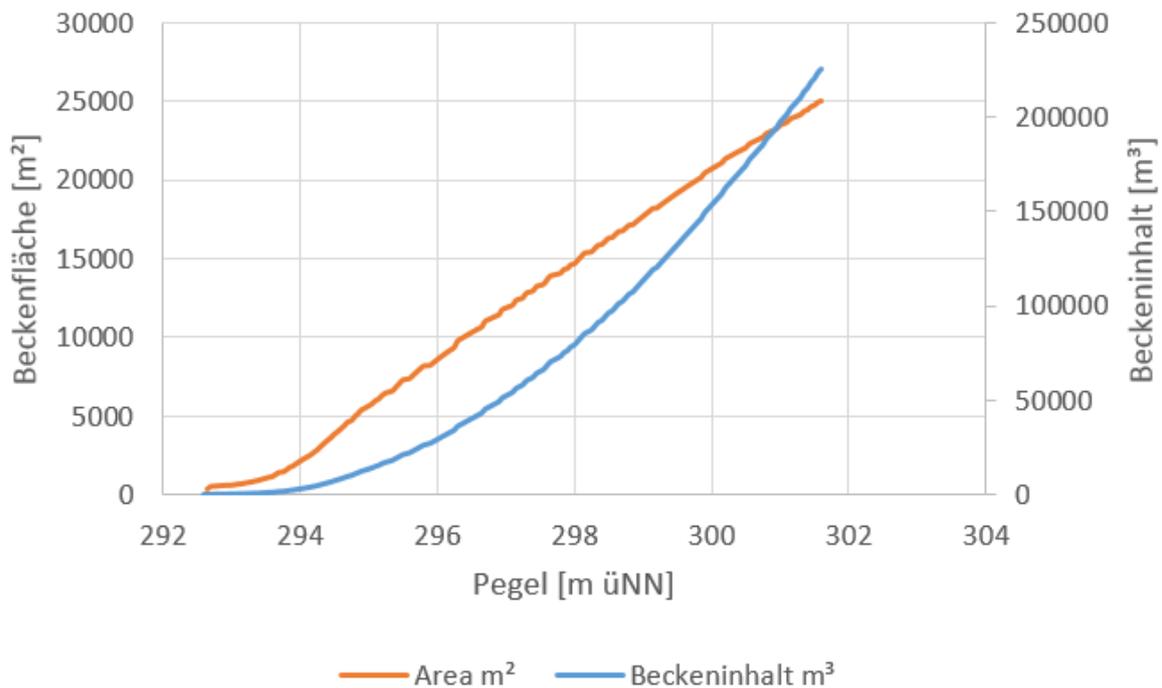


Abbildung 15: Berücksichtigung des Ausgleichsbeckens Forbach, Fläche [m²] zu Inhalt [m³] anhand des Pegels [m üNN]

## 6.1.2 Rauigkeitsansätze

Für den vorgesehenen unausgekleideten Ausbruch des Kavernensystems, welcher auch so für den hydraulischen Betrieb vorgesehen ist wird vom Planer eine Strickler Rauigkeit von 29 [ $\text{m}^{1/3}/\text{s}$ ] vorgeschlagen. Dieser Wert liegt etwas unter dem konservativ-rauen Strickler Wert nach Tabelle 6.

Tabelle 6 Richtwerte für Stollenrauigkeiten (Seeber 1999)

	<b><math>k_{ST}</math> nach Strickler</b>
roher Fels, konventioneller Ausbruch	$k_{ST} = 30$ bis 35
roher Fels, mechanischer Ausbruch	$k_{ST} = 50$ bis 70
Spritzbeton, je nach Dicke und Ausbruchsart:	
konventionell	$k_{ST} = 40$ bis 50
mechanisch	$k_{ST} = 50$ bis 65
Schalbeton (Stahlschalung)	$k_{ST} = 80$ bis 90
Panzerung mit Anstrich	$k_{ST} = 90$ bis 110

Da sich die hydraulischen Untersuchungen auf eine zukünftige Maßnahme beziehen sind die Rauheitswerte noch nicht vorhanden, und wird daher von TU Graz konservativ für die Untersuchungen angesetzt. Auch können durchaus noch reibungsmindernde Maßnahmen im Hauptstollen wirksam werden, wie z.B. eine Fahrbahnbefestigung.

Daher werden im Folgenden Überlegungen zur Rauigkeit im Stollen angestellt.

Besonders bei Mehrfachschaltfällen erweisen sich für die Massenschwingung der trägen Wassermasse in einem Stollen zwischen dem Wasserschloss und dem Reservoir geringe Reibungsverluste als ungünstig im Hinblick der maximalen Amplituden. Daher werden für die 1D-numerischen Berechnungen prinzipiell zwischen rau und glatt unterschieden.

Wobei in den Untersuchungen rau einen Stricklerbeiwert von  $K_{st} = 39$  [ $\text{m}^{1/3}/\text{s}$ ] beschreibt (Friction Factor oder Lambdawert von 0,04 [-] im Hauptstollen). Für einen glatten Stollen wird ein Stricklerbeiwert von  $K_{st} = 78$  [ $\text{m}^{1/3}/\text{s}$ ] (Friction Factor oder Lambdawert von 0,01 [-] im Hauptstollen) gewählt. Hinsichtlich des maximalen Aufschwingens ist ein glatter Wert ungünstiger – daher wird für das maximale Aufschwingen im Stollen ein Wert für den Stollen von  $K_{st} = 39$  [ $\text{m}^{1/3}/\text{s}$ ] vorgeschlagen.

Aufgrund der großen Querschnittsfläche im Hauptstollen und im gesamten Kavernensystem, welche in geringe Fließgeschwindigkeiten resultieren, reagiert das vorhandene hydraulische System nicht so sensibel auf Reibungsfaktoren wie in üblichen Druckstollensystemen. Daher sind die angesetzten Werte, welche signifikant über den vorgeschlagenen  $K_{st} = 29$  [ $\text{m}^{1/3}/\text{s}$ ], aus Sicht von TU Graz zielführend für eine konservative Untersuchung.

Abbildung 16 zeigt die Implementierung des Faktors  $f$  oder  $\lambda$  als Darcy-Weisbach Friction Factor in der 1D-numerischen Software.

Theoretical and mathematical background > [Friction models](#)

### Theoretical friction models (Darcy-Weisbach)

The steady state pressure drop over a pipe is computed with the Darcy-Weisbach equation and is a function of the pipe dimensions ( $L$  and  $D$ ), velocity  $U$  and wall friction  $f$ :

$$H_2 - H_1 = \frac{f L}{D} \frac{Q|Q|}{2gA_f^2} \quad (3.31)$$

The user has the flexibility to specify a set of local losses ( $\xi$  or  $n \cdot D$  values) and the number of fittings for each tabulated local loss. These local losses are included in the hydraulic grade line:

$$H_2 - H_1 = \left( \frac{f L}{D} + \sum_i \xi_i \right) \frac{Q|Q|}{2gA_f^2} \quad (3.32)$$

$$H_2 - H_1 = \frac{f(L + nD)}{D} \frac{Q|Q|}{2gA_f^2} \quad (3.33)$$

in which:

$Q$	=	fluid discharge	$[m^3/s]$
$A_f$	=	fluid cross-sectional area	$[m^2]$
$D$	=	internal diameter of the pipe	$[m]$
$H_1$	=	upstream head	$[m]$
$H_2$	=	downstream head	$[m]$
$f$	=	Darcy-Weisbach friction factor	$[s^2/m^5]$
$g$	=	gravitational acceleration	$[m/s^2]$
$n$	=	Equivalent length local loss specification	$[-]$
$\xi_i$	=	Local loss coefficient $i$	$[-]$

Abbildung 16: Implementierung Darcy-Friction Factor ( $\lambda$ ) in der 1D-numerischen Software

Abbildung 17 zeigt gemessene Rauigkeitswerte in äquivalenter Sandrauigkeit [m] (Rønn und Skog 1997). Abbildung 18 zeigt die dazugehörigen umgerechneten Lambda Werte [-] für eine Berechnung mit Darcy Weißbach.

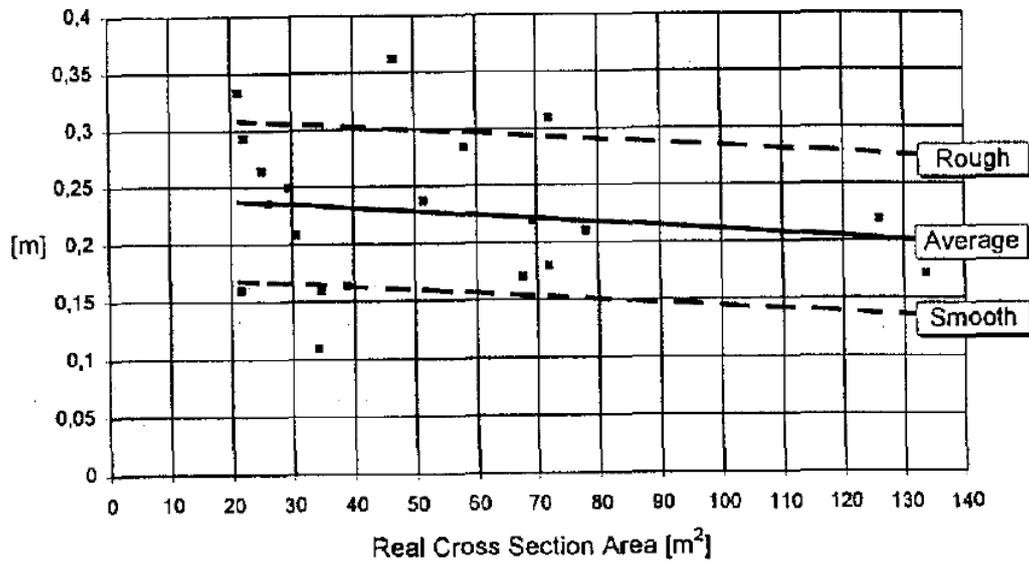


Abbildung 17: Sandrauigkeit für unausgekleidete Stollen (Rønn und Skog 1997)

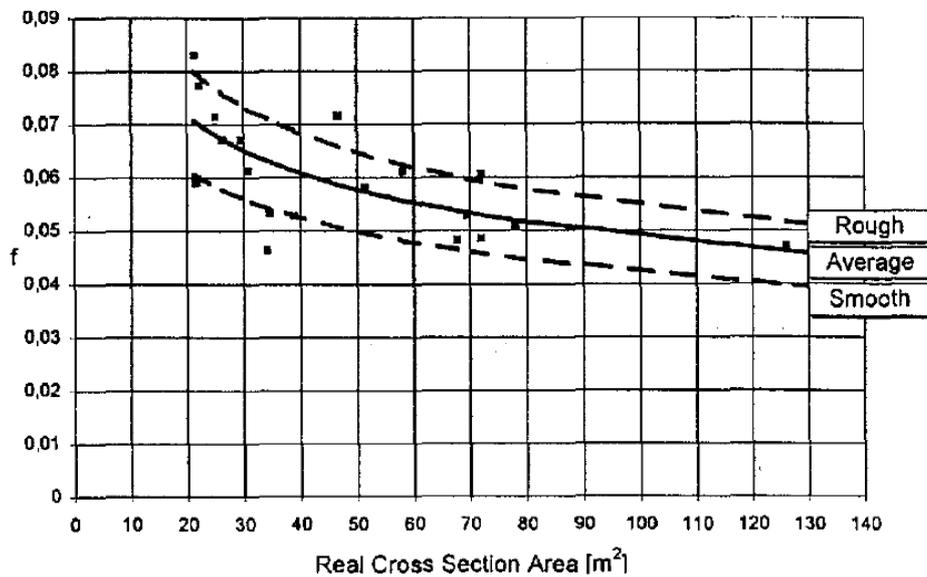


Abbildung 18: Friction Coefficient ( $\lambda$ ) für unausgekleidete Stollen (Rønn und Skog 1997)

Formel 6.1 beschreibt die Berechnung des Manningwerts bei unterschiedlichen Rauigkeiten im Stollenquerschnitt.

$$M_R = \left[ \frac{P}{\frac{P_a}{M_a^{3/2}} + \frac{P - P_a}{M_u^{3/2}}} \right]^{2/3}$$

- P** = total periphery  
**P<sub>a</sub>** = asphalt periphery  
**M<sub>a</sub>** = Manning's factor for asphalt  
**M<sub>u</sub>** = Manning's factor for unlined rock

Formel 6.1: Berechnung mittlerer Manning-Zahl für unterschiedliche Rauigkeiten im Stollenquerschnitt (Solvik und Tesaker 1997)

Für Berechnungen des Anfahrens der Pumpen bei großer Rauigkeit wird ein Friction factor ( $\lambda$ -Wert) von 0,07 [-] angesetzt – dieser ist mit einer äquivalenten Sandrauigkeit von 0,33 m gleichzusetzen. Abbildung 19 zeigt den Vergleich in der 1D-Numerik für das Anfahren der Turbinen von MUW und SBW. Die Darstellung zeigt dass für die 1D-Simulationen für  $f=0,07$  [-] und für  $ks=0,33m$  dieselben Ergebnisse erzielt werden. Hierbei wird eine Verlusthöhe von 2,15 mWs generiert. Erkennbar ist auch die Zeitverzögerung von 250 s nach dem Anfahren bis das Wasser im Becken ankommt.

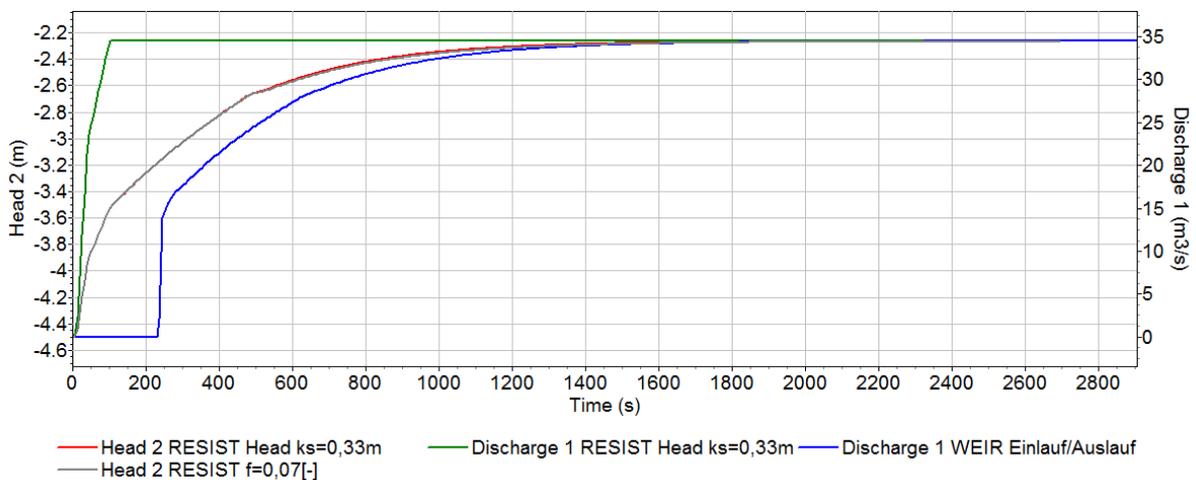


Abbildung 19: Vergleich des Friction Factors 0,07 [-] mit der äquivalenten Sandrauigkeit von 0,33 m

Umrechnungsansatz von Stricklerrauigkeit in äquivalente Sandrauigkeit (Meyer-Peter und Müller 1949)

$$k_{st} = \frac{26}{k_s^{1/6}}$$

$k_{st}$  .....Strickler-Wert ( $m^{1/3}/s$ )

$k_s$ .....äquivalente Sandrauigkeit (m)

### 6.1.3 Kalibrierung der Rauigkeit für die 1D-Numerik

In den 1D-numerischen Simulationen werden die Haupt- und Nebenstollen mittels Free-Surface-Pipe Elements berechnet. Hierbei können einerseits die Rauigkeitswerte in äquivalenter Sandrauigkeit  $k_s$  [mm], oder als Darcy-Weisbach Frictionfactor  $f$  [-] angegeben werden. Allerdings nur für den gesamten Querschnitt und nicht höhenabhängig. Für Lastfälle mit tiefem Pegel Tabelle 7 zeigt die ermittelten Rauigkeitswerte für weiteren Berechnungen. Der Frictionfactor  $f$  [-] verringert sich bei steigendem Wasserspiegel für die 1D-numerische Kalibrierung. Tabelle 7: Kalibrierung des 1D-Modells (Umrechnung des Stricklerbeiwerts [ $m^{1/3}/s$ ] in Darcy-Weisbach Friction Factor [-] und äquivalenter Sandrauigkeit [m])

Tabelle 8: Rauigkeitsvariation

	Variante 1, ASZ	Variante 1, STZ	Variante 2, ASZ	Variante 2, STZ	V3 ASZ
Ulmen	Kst =29 [ $m^{1/3}/s$ ]				
Fahrbahn	Kst =29 [ $m^{1/3}/s$ ]	Kst =29 [ $m^{1/3}/s$ ]	Kst =80 [ $m^{1/3}/s$ ]	Kst =80 [ $m^{1/3}/s$ ]	Kst =80 [ $m^{1/3}/s$ ]
Sohle	Kst =29 [ $m^{1/3}/s$ ]	Kst =29 [ $m^{1/3}/s$ ]	Kst =80 [ $m^{1/3}/s$ ]	Kst =80 [ $m^{1/3}/s$ ]	Kst =29 [ $m^{1/3}/s$ ]
<b>Kalibrierung f [-]</b>	<b>0,067 [-]</b>	<b>0,048 [-]</b>	<b>0,0147 [-]</b>	<b>0,0114 [-]</b>	<b>0,0375 [-]</b>
Kalibrierung $k_s$ [m]	0,175 [m]	0,12 [m]			

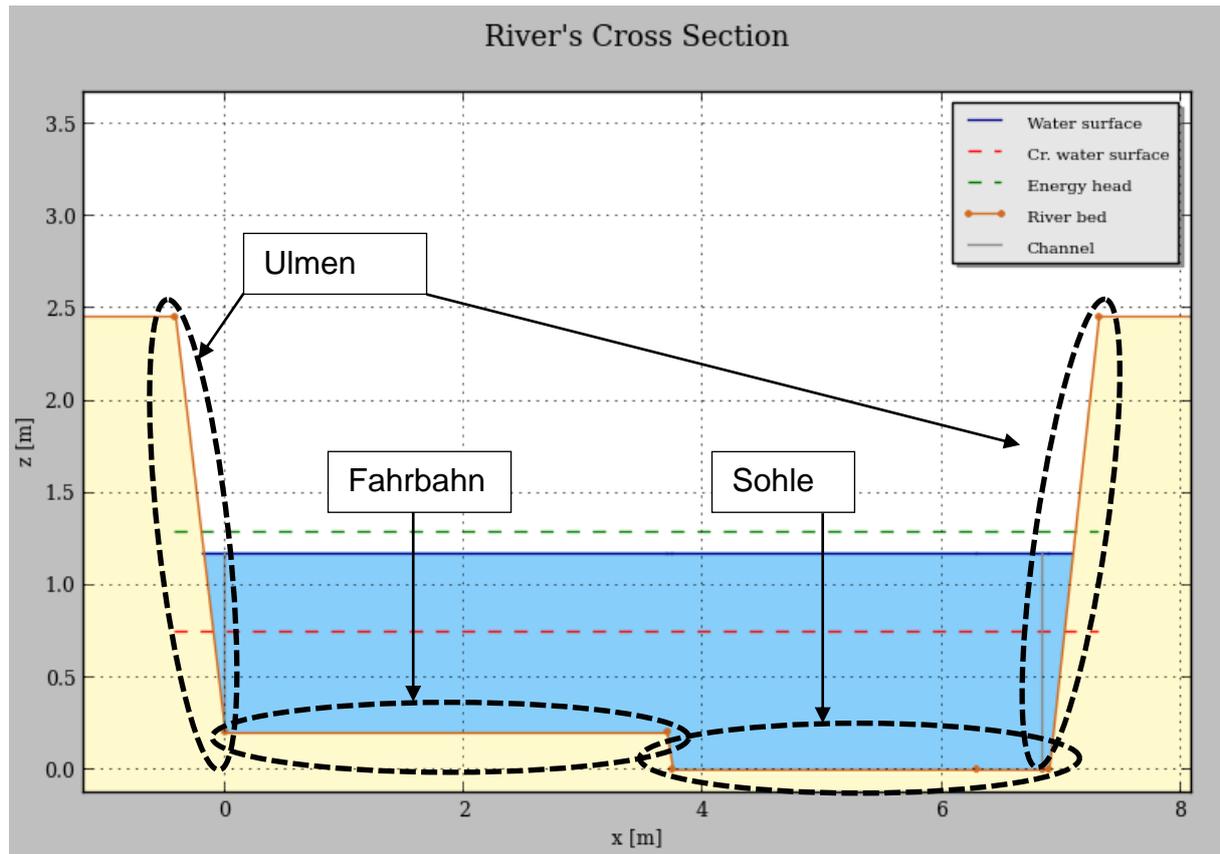


Abbildung 20: bezeichnenden Teile des Hauptstollens für die Rauigkeitsvergleiche

Die 1D-Simulationen werden vorwiegend mit Darcy-Weisbach Friction Factor durchgeführt. Die Kalibrierung wird mittels der Software *Bed Load Analyzer* durchgeführt (Fleißner 2014). Mittels diesem Programm werden unterschiedliche Rauigkeiten von Sohle und Ulme gemittelt für den jeweiligen Pegel ausgegeben.

Für die Kalibrierung wird die Normalabflusstiefe im Hauptstollenquerschnitte für  $Q=11,2 \text{ m}^3/\text{s}$  und  $Q=34,5 \text{ m}^3/\text{s}$  bei der Neigung von  $0,00149 [-]$  ermittelt. Es können dabei auch unterschiedliche Rauigkeiten von Ulmen oder Sohle berücksichtigt werden.

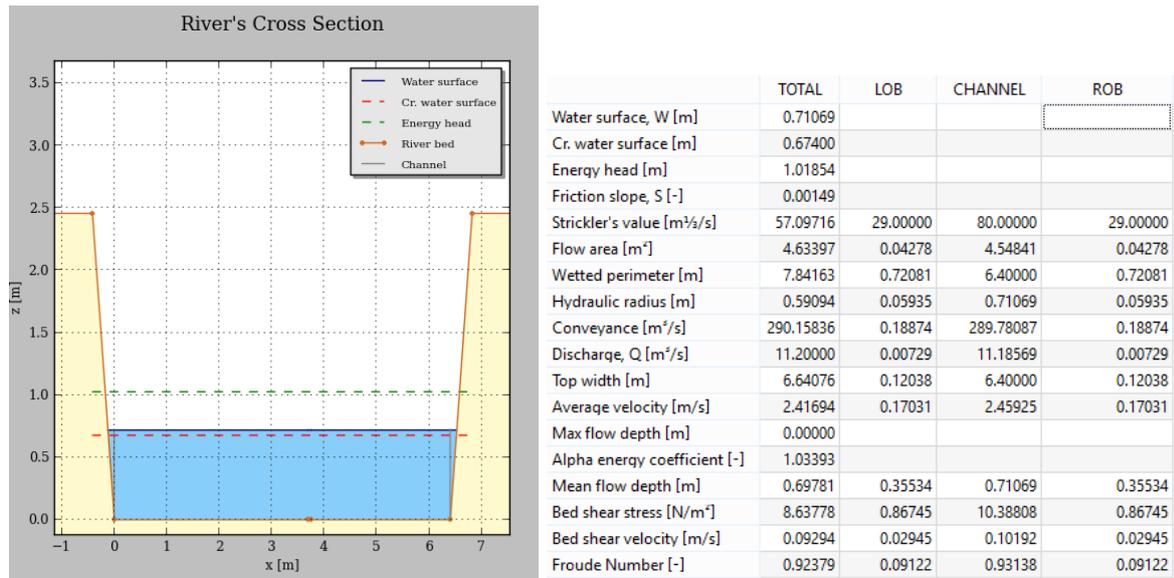


Abbildung 21: Normalabflusstiefe für 11,2 m<sup>3</sup>/s in Stollen mit 0,149 [%] Neigung und Ulmen mit Kst =29 [m<sup>1/3</sup>/s] und Sohle mit Kst =80 [m<sup>1/3</sup>/s]

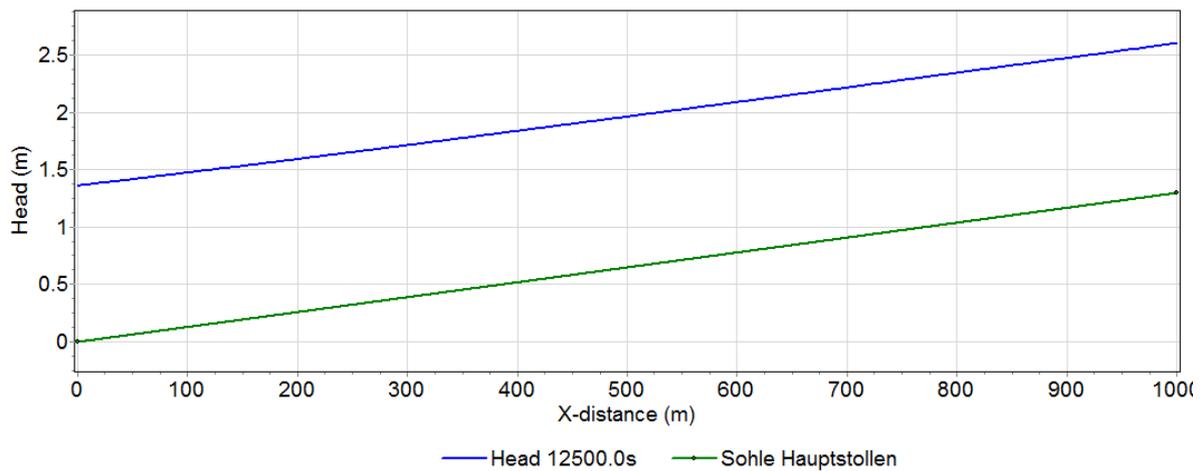


Abbildung 22: Normalabflusstiefe für 11,2 m<sup>3</sup>/s in Stollen mit 0,149 [%] Neigung und Ulmen mit Kst =29 [m<sup>1/3</sup>/s] und Sohle mit Kst =29 [m<sup>1/3</sup>/s] – äquivalent zu k<sub>s</sub> = 0,175 m

## 6.2 3D-numerische Simulationen - Vorgangsweise

Die 3D-numerischen Simulationen werden mittels der Software Ansys CFX V.15.0 durchgeführt.

### 6.2.1 Ermittlung Verlustbeiwert 3d-Numerik

Die hydraulischen Verluste in der Zulaufkaverne werden anhand eines 1:15 3D-Modells untersucht. Diese Vorgangsweise hat sich im Vergleich zwischen Modellversuchsergebnissen und 3D-Modellierung als zielführend herausgestellt. Insbesondere bei einer angestrebten Optimierung der Berechnungszeiten. Die verkleinerte numerische Berechnung bietet den Vorteil, dass weniger kleinskalige Turbulenzen aufgelöst und modelliert werden müssen. Daher sind die Simulationen schneller und zuverlässiger durchzuführen als anhand eines 1:1 Modells. Über Reynoldszahlen von  $10^5$  im Nachlauf sind lokale Verluste im Unterschied zu Reibungsverlusten unabhängig von der Reynoldszahl (Idel'cik 1994). Anhand einer Masterarbeit an der TU Graz wird diese Vorgangsweise bestätigt (Koch 2016).

Es werden durch die 3D-numerischen Berechnungen die lokalen Verluste (Stoßverluste) ermittelt. Die kontinuierlichen Verluste wie Reibungsverluste können mit 1D-Ansätzen hinzugefügt werden. Dies ist allerdings nicht Gegenstand dieser Untersuchungen. Bei den Variantenstudien der Zulaufkaverne ist eine Minimierung der lokalen Verluste das Ziel der hydraulischen Berechnungen.

#### **Annahme und Vorgangsweise für die Verlustberechnung in der Zulaufkaverne:**

Um die Berechnung zu vereinfachen werden die lokalen hydraulischen Verluste in einem Drucksystem ohne Gravitationseinfluss ermittelt. Somit wird der Freisiegelabfluss vernachlässigt. Durch die einheitliche Anwendung sind die Werte für alle Geometrien vergleichbar und aussagekräftig. Abbildung 24 zeigt das gesamte Untersuchungsgebiet mit dem Betrachtungsraum und den Gebieten mit Abfluss und Zufluss, jeweils für das System bei Stauziel (Abbildung 23) und bei Absenkziel (Abbildung 24).

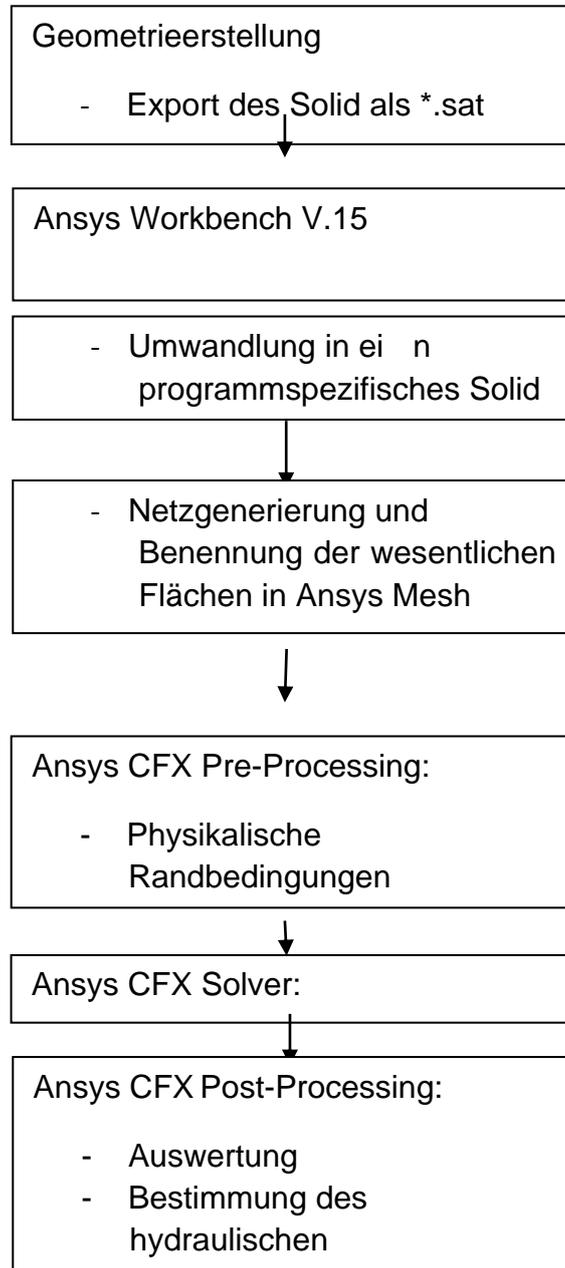
Für jede Geometrie werden beide Speicherpegel untersucht. Aufgrund unterschiedlicher Fließgeschwindigkeiten und unterschiedlicher Füllstände (Volumina) in der Zulaufkaverne ergeben sich variable hydraulische Verluste.

Abbildung 23 und Abbildung 24 zeigen die am jeweiligen Speicherpegel geschnittenen Kontrollvolumen des Einflussbereichs für die lokalen Verluste für die Zulaufkaverne. vereinfachend für die Berechnung wird die Simulation einphasig (nur Wasser) durchgeführt. Es werden die Randbedingungen für die 3d-CFD Simulationen dargestellt.



Tabelle 9 zeigt die Vorgangsweise zur Ermittlung des hydraulischen Verlustbeiwerts mittel 3D-numerischen Simulationen (Richter 2010). Am IWB Graz werden Ergebnisse der 3D-CFS Simulationen mit physikalischen Modellen verglichen (Koch 2016).

Tabelle 9: Bearbeitungsschritte für CFD-Simulation in Ansys CFX:



### 6.2.2 Ermittlung des Widerstandsbeiwertes mittels Ansys CFX Post-Processing

Die Bernoulligleichung ist eine Energiegleichung, welche die Energie zwischen zwei Messebenen (Ebene 1 als Inlet oder Zulauf und Ebene 2 als Outlet oder Ablauf) mit Einbeziehung eines Verlustterms gleichsetzt. Der Verlustterm besteht aus dem Verlustbeiwert  $\zeta$  und der kinetischen Energie im betrachteten Querschnitt.

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} + z_1 = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g} + z_2 + \zeta \cdot \frac{v_2^2}{2g}$$

Formel 6.2 Bernoulligleichung-1

G	...	Erdbeschleunigung [m/s <sup>2</sup> ]
$\rho$	...	Dichte von Wasser [kg/m <sup>3</sup> ]
$v_1$	...	Mittlere Geschwindigkeit in der Einströmebene (Ebene 1) [m/s]
$p_1$	...	Mittlerer Druck in der Einströmebene (Ebene 1) [Pa]
$z_1$	...	Geodätische Höhe des Schwerpunkts der Einströmebene (Ebene1) [m]
$v_2$	...	Mittlere Geschwindigkeit in der Ausströmebene (Ebene 2) [m/s]
$p_2$	...	Mittlerer Druck in der Ausströmebene (Ebene 2) [Pa]
$z_2$	...	Geodätische Höhe des Schwerpunkts der Ausströmebene (Ebene2) [m]
$\zeta$	...	Verlustbeiwert [-]

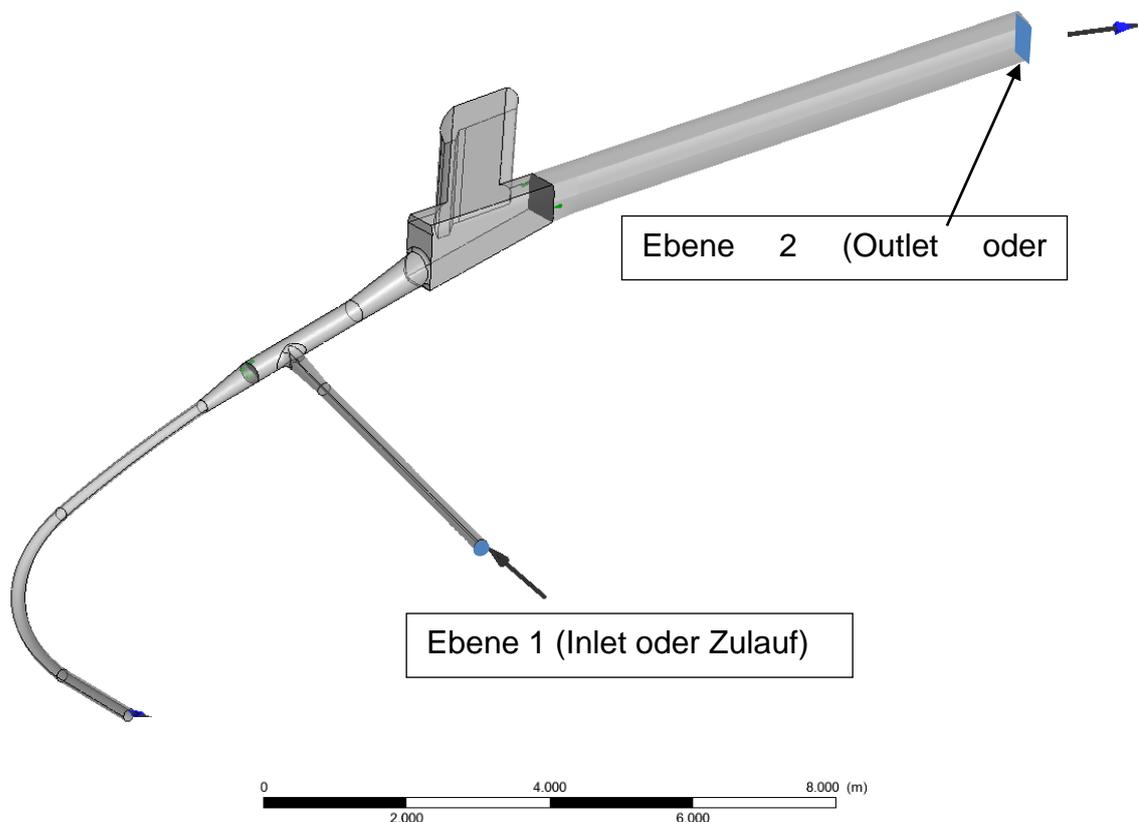


Abbildung 25: Definition Ebene 1 (Inlet) als Zufluss Turbinenbetrieb MUW und Ebene 2 (Outlet) als Abfluss im Hauptstollen (perspektivische Darstellung)

Da die Energieumwandlung der Drossel örtlich geschieht, wird der Term der geodätischen Höhe  $z$  gestrichen und die Gleichung zusammengeführt:

$$\frac{\Delta v^2}{2g} + \frac{\Delta p}{\rho g} = \zeta \cdot \frac{v_2^2}{2g}$$

Formel 6.3: Bernoulligleichung-2

$\Delta p$  .....Differenz von  $p_1$  und  $p_2$  [Pa]

$\Delta v^2$  ....Differenz von  $v_1^2$  und  $v_2^2$  [m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>]

Da bei der Herangehensweise in dieser Arbeit angenommen wird, dass hauptsächlich die Druckdifferenz für den Energieverlust verantwortlich ist, wird der Term der kinetischen Energie vernachlässigt.

Durch Umformung ergibt sich der Verlustbeiwert  $\zeta$  (Loss coefficient) zu:

$$\zeta = \frac{2 \cdot \Delta p}{v^2 \rho}$$

Formel 6.4: Verlustbeiwert  $\zeta$  [-]

Um den Verlustbeiwert  $\zeta$  zu erhalten, wird im CFX Post-Processing der simulierte Teil des Wasserschlosses als Kontrollvolumen betrachtet und die Druck- und Geschwindigkeitsverhältnisse der Einlauf- bzw. Auslaufebenen (Inlet bzw. Outlet) ausgewertet. Diese Auswertung erfolgt mittels CFX Expression Language® und kann in beliebig vielen Schritten durchgeführt werden. Um eine gewisse Übersichtlichkeit zu gewährleisten, wurde bei der Auswertung in dieser Arbeit die Ermittlung des Widerstandsbeiwerts in folgende Teilschritte untergliedert:

- Bestimmung der Druckdifferenz  $\Delta p$  [Pa] zwischen Inlet und Outlet

 DeltaP `areaAve(Pressure )@inlet-areaAve(Pressure )@outlet`

Befehl: `areaAve(Pressure )@inlet` ermittelt den über die Fläche gemittelten Druck an der definierten Ebene mit dem Namen „inlet“

`areaAve(Pressure )@outlet` ermittelt den Flächengemittelten Druck an der definierten Ebene mit dem Namen „outlet“

- Einführung des Werts für die Dichte von 997 [kg/m<sup>3</sup>]

 dens `ave(density )@inlet`

Befehl: `ave(density )@inlet` gibt die Dichte der definierten Ebene mit dem Namen „inlet“

- Bestimmung des dynamischen Terms  $p_{dyn}$  [Pa]

```

Pdyn      0.5*dens*(ave(Velocity)@inlet)^2
    
```

Befehl: *ave(Velocity)@inlet* ermittelt die mittlere Geschwindigkeit an der definierten Ebene mit dem Namen „inlet“

- Ermittlung des Verlustbeiwerts  $\zeta$  bzw. Loss coefficient [-]

```

Loss coefficient      DeltaP /Pdyn
    
```

Der Loss coefficient, welcher  $\zeta$  [-] darstellt wird durch die Division der zuvor ermittelten Werte DeltaP / Pdyn gewonnen

Die Division von DeltaP durch Pdyn ergibt:

$$\zeta = \frac{\Delta p}{\frac{\rho \cdot v^2}{2}}$$

Formel 6.5: Verlustbeiwert  $\zeta$  [-]

Abbildung 26 zeigt die Konvergenz einer Berechnung des Verlustbeiwertes und der hydraulischen Verlusthöhe über 300 Zeitschritte. Diese Konvergenz wird für jede Berechnung kontrolliert. Bei Bedarf werden die Berechnungsparameter oder verändert um die „Best Practice“ Vorgaben für die 3D-Numerik einzuhalten.

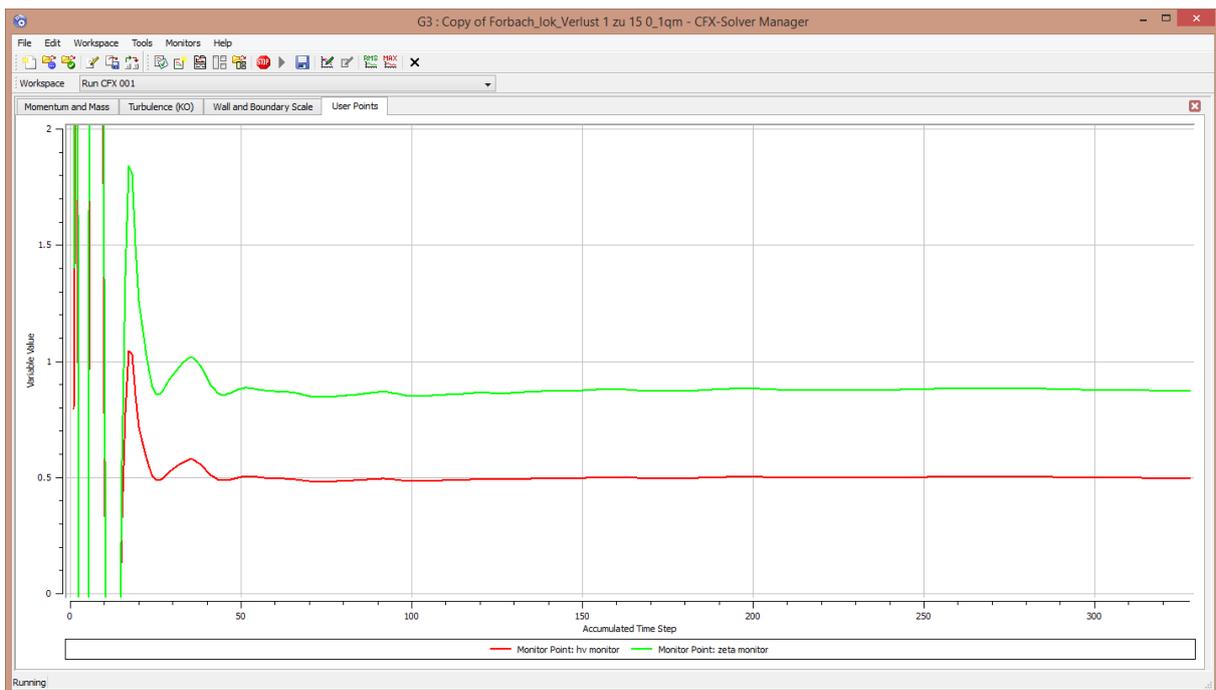


Abbildung 26:  $\zeta$ -Wert Konvergenz für Diffusor Schwarzenbachwerk,  $\zeta$ -Wert = 0,5 [-] (Bezogen auf  $d = 2,9$  m)

### 6.2.3 Pumpfalluntersuchung mit freier Wasseroberfläche

Diese Kapitel beschreibt die 3D-numerischen Untersuchungen für den Pumpfall SBW. Es wird die freie Wasseroberfläche bezüglich Wirbelbildung und eventueller Lufteinzüge untersucht. Simulationen werden an einem geometrischen Modell im Maßstab 1:1 durchgeführt. Da in diesem Fall die Wasseroberfläche mit den Eigenschaften der Oberflächenspannung untersucht wird, ist eine 1:1 Modellierung notwendig. Damit werden auch die Eigenschaften der Oberflächenspannung von Flüssigkeiten mitberücksichtigt. Gerade bei eventuell auftretenden Luftwirbeln spielt die Oberflächenspannung eine wichtige Rolle.

Für einen sicheren und effizienten Maschinenbetrieb, insbesondere Pumpbetrieb im SBW Werk sind Lufteinzüge zu verhindern.

Die Simulationen werden instationär durchgeführt um eine eventuelle Bildung von starken Wirbeln mit Lufteinzug ermitteln zu können. Hierbei kann eine sehr hohe Sicherheit gegen Lufteinzug ermittelt werden.

Abbildung 27 zeigt, dass erst 6 m unter dem Absenkziel ein Lufteinzug beim Pumpfall des SBW für die Ausgangsgeometrie erreicht wird. Da sowohl die 3D Simulation belastbare Ergebnisse bezüglich der ausreichenden Überdeckung ergibt, als auch ein Vergleich mit empirischer Formeln (Pkt. 8.2.2, S.50) eine hohe Sicherheit gegen Wirbelbildung aufweist, werden von TU Graz keine zusätzlichen Untersuchungen hierzu als notwendig erachtet

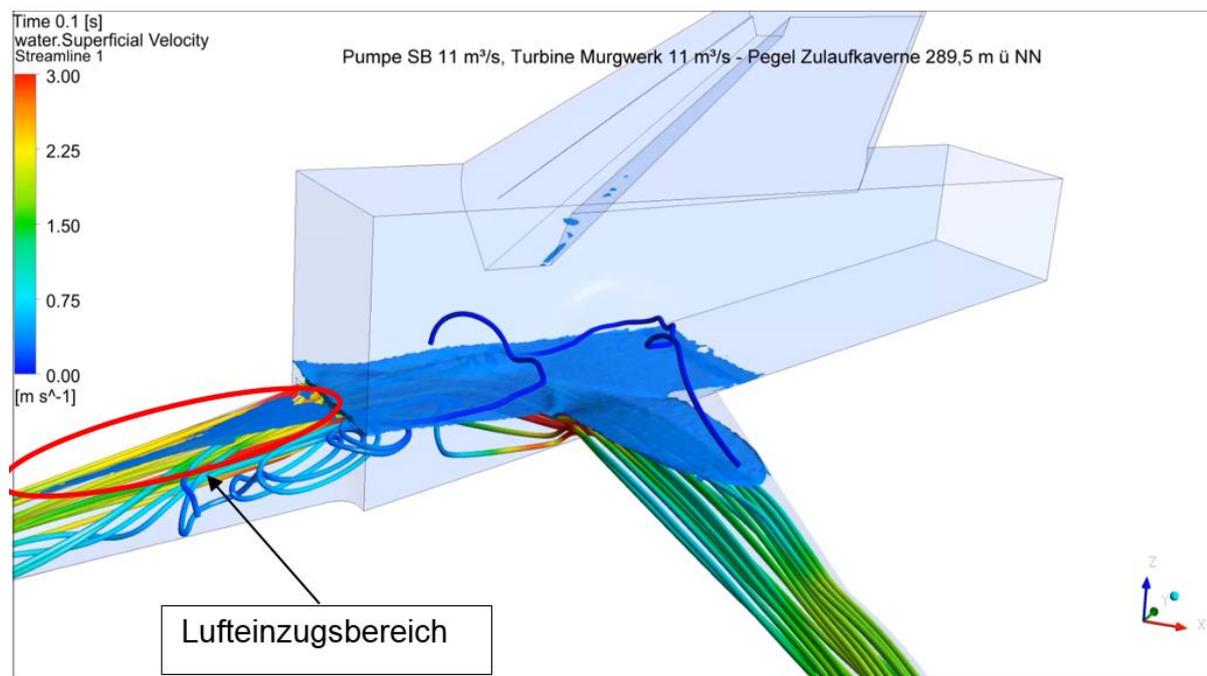


Abbildung 27: Erst 6 m unter dem Absenkziel bei hydraulischen Kurzschluss wird ein Lufteinzug beobachtet (Dieser Zustand ist kein Betriebszustand).

## 7. Ausgangsgeometrie 1D-Numerik

Dieses Kapitel beschreibt die Ergebnisse der 1D-numerischen Berechnung der Ausgangsgeometrie des Kavernenspeichers. Es werden ungünstige Mehrfachschaltfälle bei maximalem und minimalem Speicherpegel angesetzt um die Wassermassen möglichst ungünstig in Resonanz zu bringen. Hierbei wird untersucht ob die Auslegungskriterien wie das Nicht-Zuschlagen an der Firste des Hauptstollens bzw. der Nebentollen eingehalten sind.

Untersucht werden ungünstigste Schaltfälle bei Stauziel 301,6 m üNN und bei Absenkziel von 295,5 m üNN im Ausgleichsbecken Forbach. Hierbei wird eine Falluntersuchung für unterschiedliche Rauigkeiten des Kavernensystems durchgeführt um die Sensibilität dafür zu ergründen.

Unterschieden wird zwischen einem rauen und einem glatten System. Für das raue System wird die Rauheit mit 0,04 [-] als Darcy-Weisbach Friction Factor definiert. Dieser Wert entspricht in einem Strickler Beiwert von  $K_{st} 39 [m^{1/3}/s]$  für ein Kreisprofil mit Durchmesser 9,97 m, welches rechnerische in den Hauptstollenquerschnitt eingeschrieben wird und dem hydraulischen Radius des Hauptstollens entspricht. Der gewählte raue Wert ist glatter als der vom Planer mit  $K_{st} = 29 [m^{1/3}/s]$  vorgeschlagene Wert. Dieser Wert ergibt gerade für Mehrfachschaltfälle konservative (geringe) Reibungsverluste und daher Aufschwingamplituden. Daher wird dieser Werte von TU Graz für die maßgebenden Simulation für das maximale Aufschwingen vorgeschlagen und verwendet.

## 7.1 Stauziel –Rauigkeiten - Sensitivitätsuntersuchung

Abbildung 28 zeigt den Vergleich eines Mehrschaltfalles für unterschiedliche Rauigkeiten im Kavernensystem. Die Simulation zeigt, dass für ein maximales Aufschwingen durch ungünstige Schaltfolge im Bereich der Zulaufkaverne (km 1,0 + 10,07 m) für die drei untersuchten Rauigkeiten ein Pegel von maximal 302,6 m ü NN erreichen lässt. Dies wäre allerdings nur für einen sehr glatten Stollen erreichbar, welcher nicht vorgesehen ist. Für die vorgesehenen Rauigkeitsgrößen werden maximale Aufschwingpegel von bis zu 302,3 m ü NN erreicht.

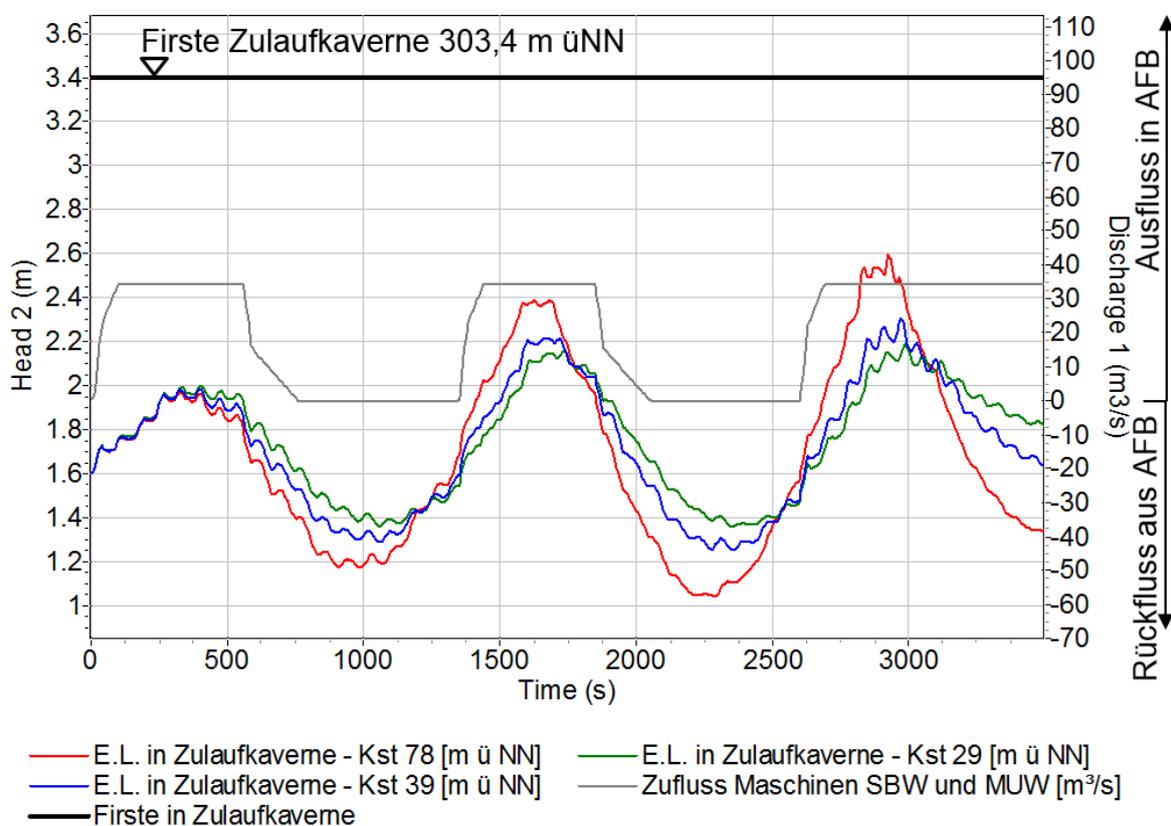


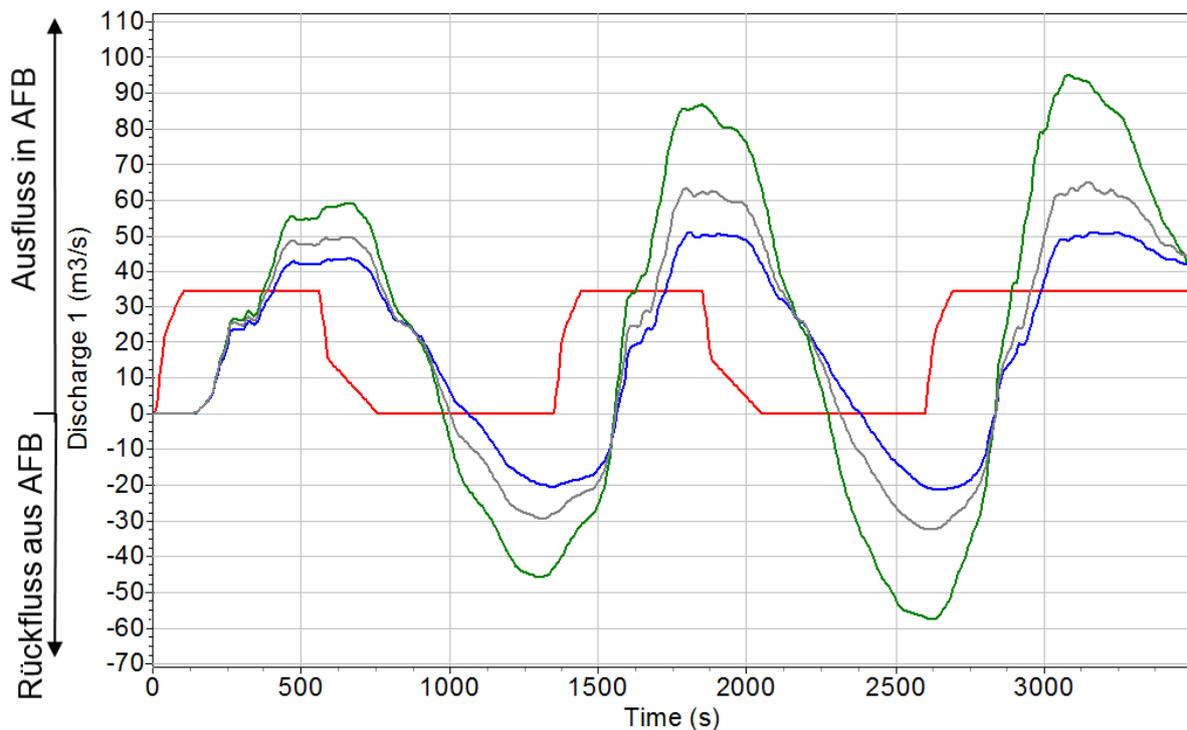
Abbildung 28: Vergleich Massenschwingung von Kst = 29, Kst = 39 und Kst = 78 (die Höhenkoten sind mit +300 m zu addieren um m ü. NN. zu erreichen), Darstellung Energiefeldhöhe in der Zulaufkaverne und Durchfluss der Maschinen SBW und MUW

Abbildung 29 zeigt die Durchflüsse am Auslaufbauwerk für die unterschiedlichen Rauigkeitsvarianten mit den Schaltzeitpunkten der Turbinen SBW und MUW. Diese werden so gewählt, dass die Massenschwingung in Resonanz gebracht wird. Die Darstellung zeigt, dass für einen sehr glatten Stollen (Kst = 78 [m<sup>1/3</sup>/s]) im Resonanzfall des Turbinenbetriebs beider KWs bei STZ ein maximaler Zufluss von 60 m<sup>3</sup>/s in den Kavernenspeicher erfolgt, und ein maximaler Ausfluss von etwa 95 m<sup>3</sup>/s in das Ausgleichsbecken Forbach (Abbildung 29). Für eine solche glatte

Auskleidung wird die Massenschwingung durch die Schaltvorgänge signifikant angefacht.

Für eine Rauigkeit von  $K_{st} = 29 \text{ [m}^{1/3}/\text{s]}$  werden durch das getaktete Schalten der Turbinen etwa  $20 \text{ m}^3/\text{s}$  maximal eingezogen und etwa  $50 \text{ m}^3/\text{s}$  maximal in das Ausgleichsbecken Forbach gefördert. Für diese sehr rauen Zustände wird keine Anfachung festgestellt.

Für eine Rauigkeit von  $K_{st} = 39 \text{ [m}^{1/3}/\text{s]}$  werden durch das getaktete Schalten der Turbinen etwa  $32 \text{ m}^3/\text{s}$  maximal eingezogen und etwa  $63 \text{ m}^3/\text{s}$  maximal in das Ausgleichsbecken Forbach gefördert. Für diese rauen Zustände wird geringe Anfachung von  $1,26 \text{ [-]}$  festgestellt.



— Maschinen SBW und MUW  $[\text{m}^3/\text{s}]$  — WEIR Einlauf/Auslauf  $K_{st} = 78 \text{ [m}^{1/3}/\text{s]}$   
 — WEIR Einlauf/Auslauf  $K_{st} = 29 \text{ [m}^{1/3}/\text{s]}$  — WEIR Einlauf/Auslauf  $K_{st} = 39 \text{ [m}^{1/3}/\text{s]}$

Abbildung 29: Vergleich Massenschwingung von  $K_{st} = 29 \text{ [m}^{1/3}/\text{s]}$ ,  $K_{st} = 39 \text{ [m}^{1/3}/\text{s]}$  und  $K_{st} = 78 \text{ [m}^{1/3}/\text{s]}$  Darstellung Durchflussmengen im Auslaufbauwerk und Durchfluss der Maschinen SBW und MUW

## 7.2 Absenkziel - Reibungsverluste und Rauigkeiten

Aufgrund der höheren spezifischen Fließgeschwindigkeiten hat die Rauigkeit des Kavernensystems bei Absenkziel einen größeren Einfluss auf den Betrieb der Anlage als bei Stauziel. Das Absenkziel beträgt 295,5 m üNN. Der Hauptstollen ist mit einer Sohlneigung von 0.145 % vorgesehen. Die Sohlkote beim Einlauf hat den Wert von 294,5 m üNN und in der Zulaufkaverne von 293,05 m üNN. Die minimale Wassertiefe ohne Betrieb beträgt somit zwischen Einlauf des Hauptstollens und der Zulaufkaverne 1,0 m bis 2,45 m. Daraus ergibt sich eine mittlere Wassertiefe von 1,725 m.

Abbildung 30 zeigt den hydraulischen Verlust im Hauptstollen für den Betrieb beider Turbinen mit QA ausgehend vom ASZ bis zum STZ. Bei geringen Wasserpegeln im Bereich des ASZ sind hydraulische Verluste im Bereich von 0,5 m WS zu erwarten. Ab einem Pegel von etwa 297 m ü NN sinkt der hydraulische Reibungsverlust ab und geht bis auf etwa 0,1 m WS zurück bei Wasser Pegel im Bereich des Stauziels.

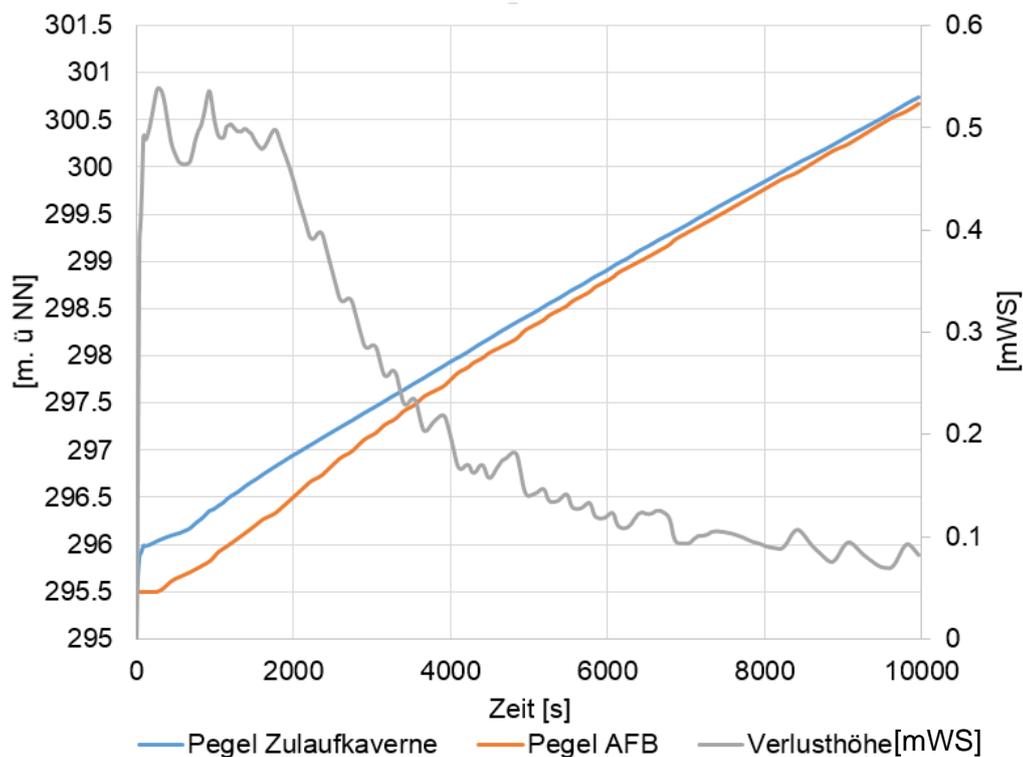


Abbildung 30: Transiente Verlusthöhe für Turbinenbetrieb ab ASZ bis STZ im Ausgleichsbecken Forbach für die Ausgangsgeometrie – Pegel Zulaufkaverne (Station km 1,0 + 10,07 m) bis Pegel AFB (Station km 0,0 + 0,00 m)

### 7.3 Resonanz STZ –UW System rau

Dieses Kapitel beschreibt die Massenschwingung im Kavernenspeichersystem für rau angenommene Ulmen und Sohle. Abbildung 31 zeigt den Lastfall für den beide Kraftwerke (SBW und MUW) ungünstig im Turbinenbetrieb geschaltet werden um die Wassermasse im Stollensystem maximal aufzuschwingen. Durch das Anfahren von SBW und MUW wird der Wasserpegel in der Zulaufkaverne um etwa 40 cm vom Pegel 301,6 m üNN auf 302,0 m üNN angehoben. Bei einem ungünstig darauffolgenden Schaltzyklus wo in die rückschwingende Wassermasse gefahren wird, erreicht der Wasserpegel die Marke von 302,2 m üNN (60 cm über dem Ausgangspegel). Wenn darauf noch ein dritter ungünstiger Schaltzyklus folgt wird ein maximaler Pegel von etwa 302,35 m üNN erreicht. Dieser Pegel liegt noch etwa 1 m unter der Stollenfirste.

Firste Zulaufkaverne und Profil Kavernenkopf beschreiben den Querschnitt an Station km 1.0 + 10.07 m.

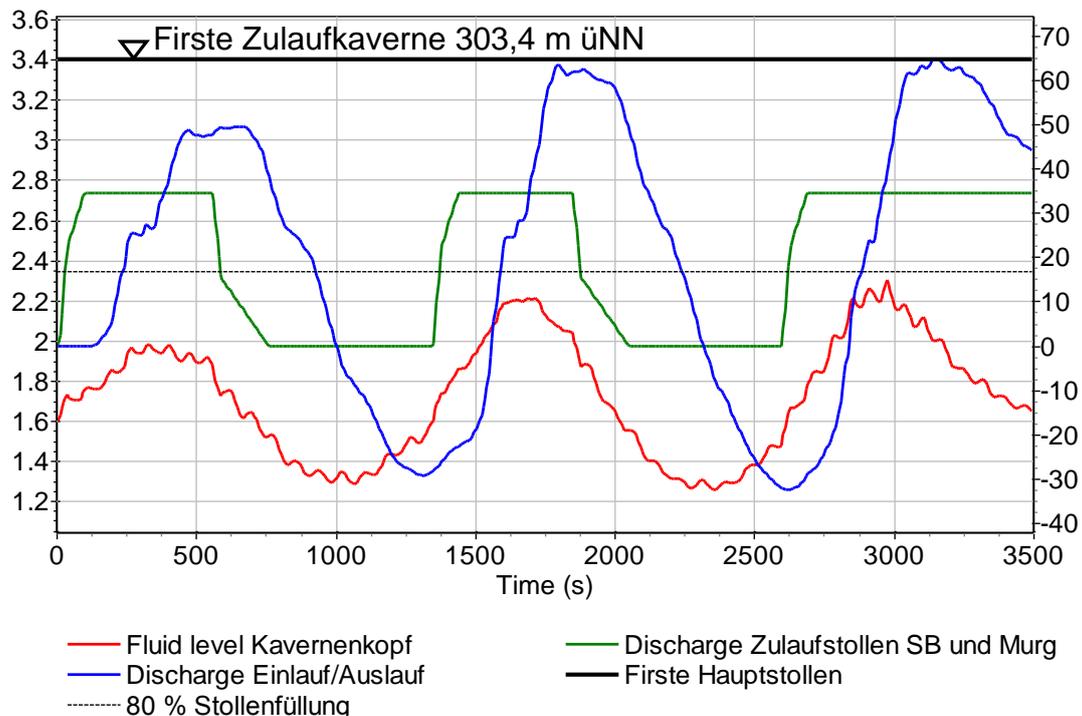


Abbildung 31: Massenschwingung im Kavernenspeichersystem, Schwarzbachwerk und Murgwerk – (die Höhenkoten sind mit +300 m zu addieren um m ü. NN. zu erreichen) – Reibungskoeffizient 0,04 [-] – zu erwarten in einem Spritzbetonstollen – Durchfluss der Maschinen (Discharge 1), Durchfluss am Auslaufbauwerk (Discharge Einlauf / Auslauf), Wasserspiegelschwankung in der Zulaufkaverne

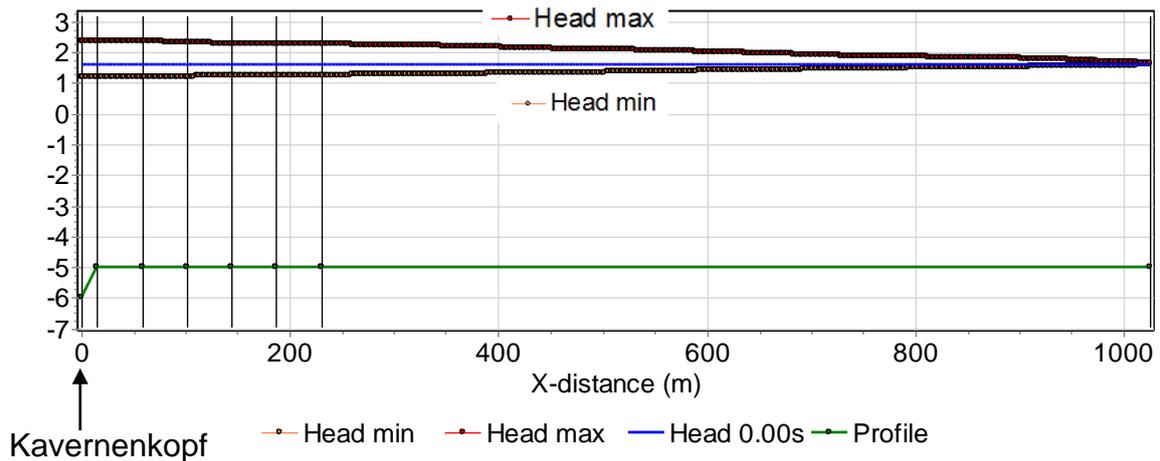


Abbildung 32: Extremwerte der Massenschwingung (*Head min* und *Head max*) im Kavernenspeichersystem, Schwarzbachwerk und Murgwerk – (die Höhenkoten sind mit +300 m zu addieren um m ü. NN. zu erreichen) – Reibungskoeffizient 0,04 [-] – zu erwarten in einem unausgekleideten Stollen mit glatter Fahrbahn – Längenschnitt durch Hauptstollen – Untersuchung Firste 0% geneigt

### 7.4 Resonanz STZ – UW System ungünstig glatt

Dieses Kapitel beschreibt die Massenschwingung im Kavernenspeichersystem für einen ungünstig glatt angenommenen Hauptstollen. Speicherpegel bei Stauziel 301,6 m ü.NN.

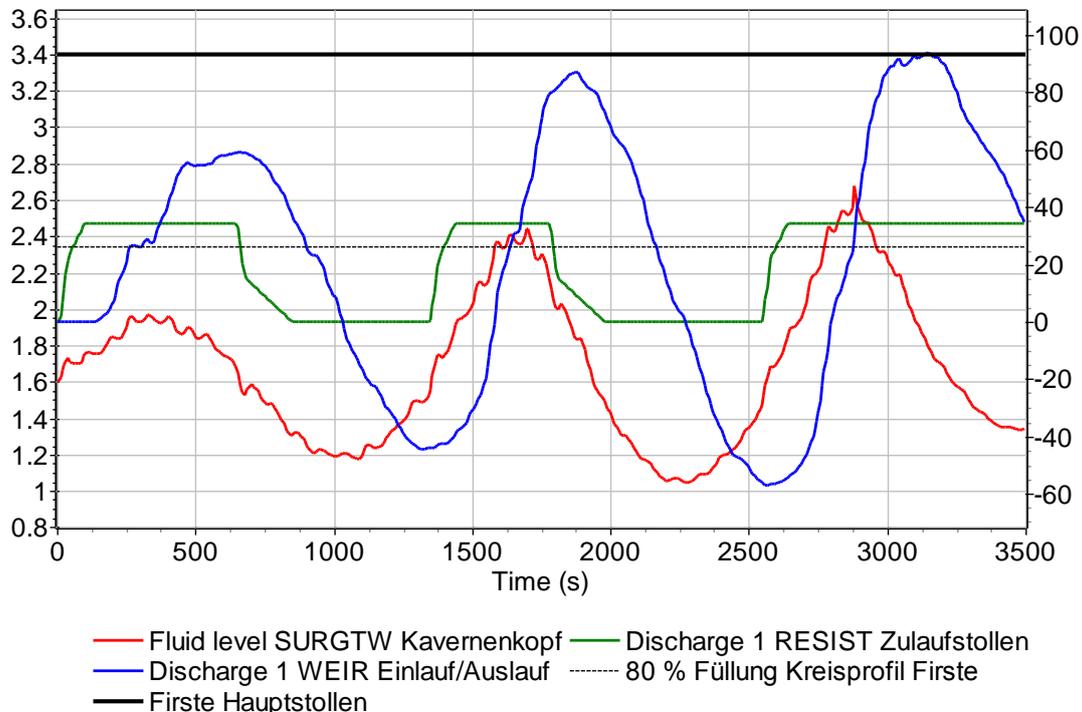
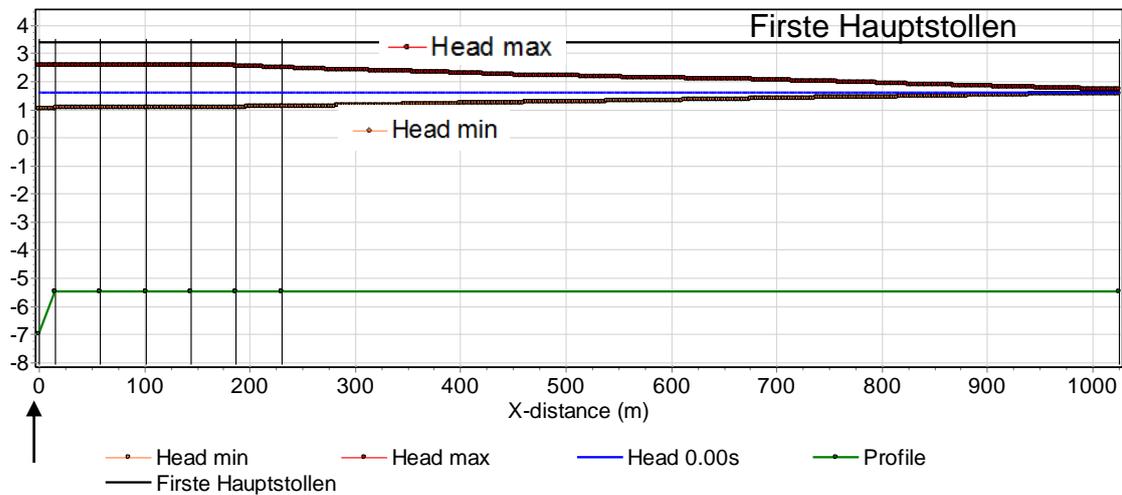


Abbildung 33: Massenschwingung im Kavernenspeichersystem, Schwarzbachwerk und Murgwerk – (die Höhenkoten sind mit +300 m zu addieren um m ü. NN. zu erreichen) – Reibungskoeffizient 0,01 [-] – zu erwarten in einem glatt ausgekleidetem Stollen – Durchfluss der Maschinen (Discharge 1),

Durchfluss am Auslaufbauwerk (Discharge Einlauf / Auslauf),  
Wasserspiegelschwankung in der Zulaufkaverne



**Kavernenkopf**

Abbildung 34: Extremwerte der Massenschwingung im Kavernenspeichersystem, Schwarzbachwerk und Murgwerk – (die Höhenkoten sind mit +300 m zu addieren um m ü. NN. zu erreichen) – Reibungskoeffizient 0,01 [-] – zu erwarten in einem Spritzbetonstollen – Längenschnitt durch Hauptstollen – Untersuchung Firste 0% geneigt

**7.5 Anfahren der Turbinen bei ASZ**

Abbildung 35 zeigt das Anfahren beider Turbinen MUW und SBW bei konstantem ASZ. Nach etwa 8000 Sekunden rd. 2,2 h wird am Auslauf / Einlaufbauwerk des AFB der Ausbaudurchfluss gefördert. Die Berechnungen werden am Kst 39 [m<sup>1/3</sup>/s] System durchgeführt.

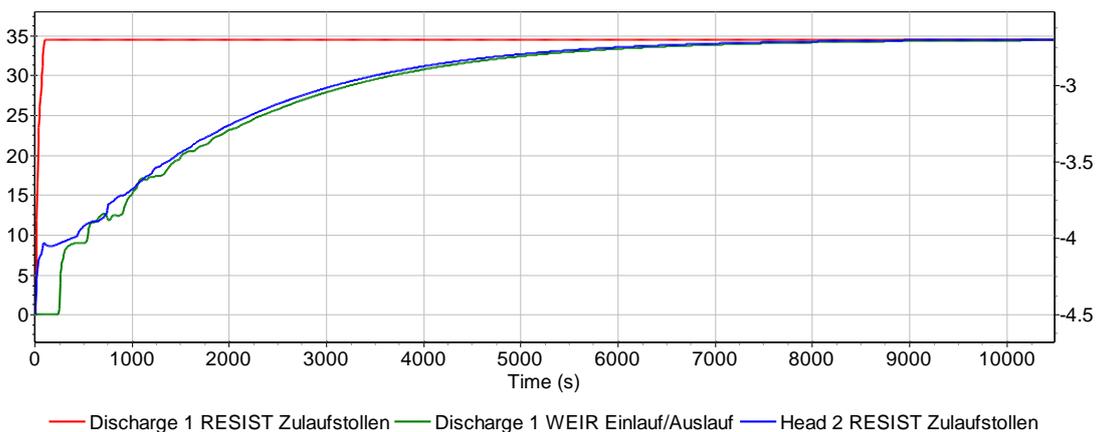


Abbildung 35: Anfahren der Turbinen im Kavernenspeichersystem, Schwarzbachwerk und Murgwerk – Reibungskoeffizient 0,04 [-] – Kst 39 [m<sup>1/3</sup>/s].

### 7.6 Anfahren der Pumpen bei ASZ

Für einen rauen Stollen mit Friction Factor 0,07 [-] und einem stationären Betrieb bei ASZ zeigt sich, dass nach etwa 1068 s die Wassersäule abreißt. Das restliche Volumen kann aufgrund der geringen Neigung des Hauptstollens nicht gepumpt werden. Durch eine glattere Ausführung der Sohle kann hier eine Verbesserung erzielt werden. Es zeigt sich, dass bei konstantem ASZ und rauem Stollen die Förderfähigkeit für Ausbauwassermenge der Pumpe nicht aufrechterhalten werden kann.

Abbildung 36 zeigt den Pumpbetrieb von SBW mit Anfahren der Pumpe in 300 s auf 11,2 m<sup>3</sup>/s und darauf folgendem konstantem Pumpbetrieb bei konstantem ASZ. Abbildung 37 zeigt den Längenschnitt des Hauptstollens mit Pegel zum Zeitpunkt 1068 s. Dieser Wert wird für diesen Fall als mögliches Limit definiert.

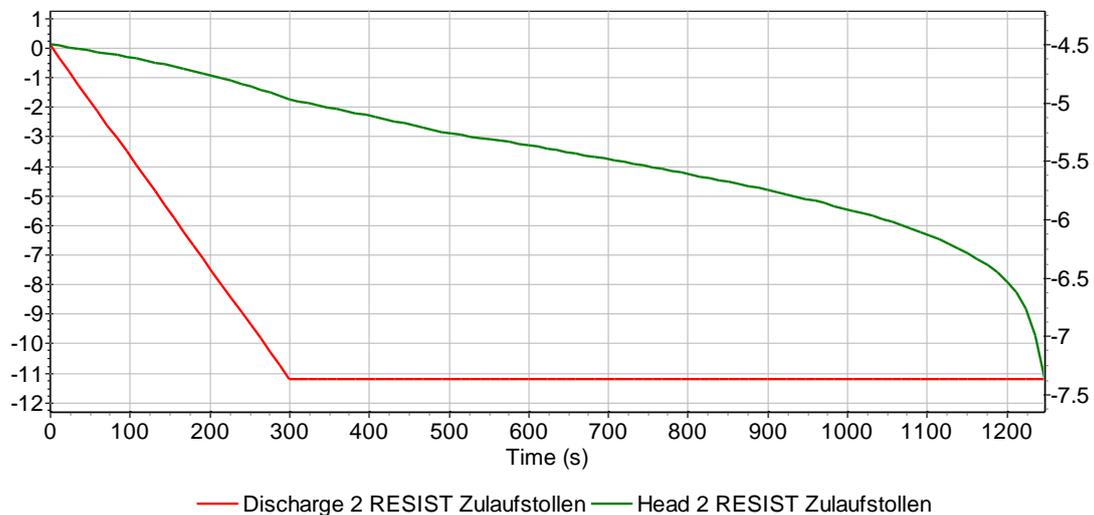


Abbildung 36: Betrieb der Pumpe SBW für Stollen mit Friction factor 0,07 [-] bei ASZ, es kommt etwa zum Zeitpunkt 1068 Sekunden zum Abreißen der Wassersäule in der Zulaufkaverne

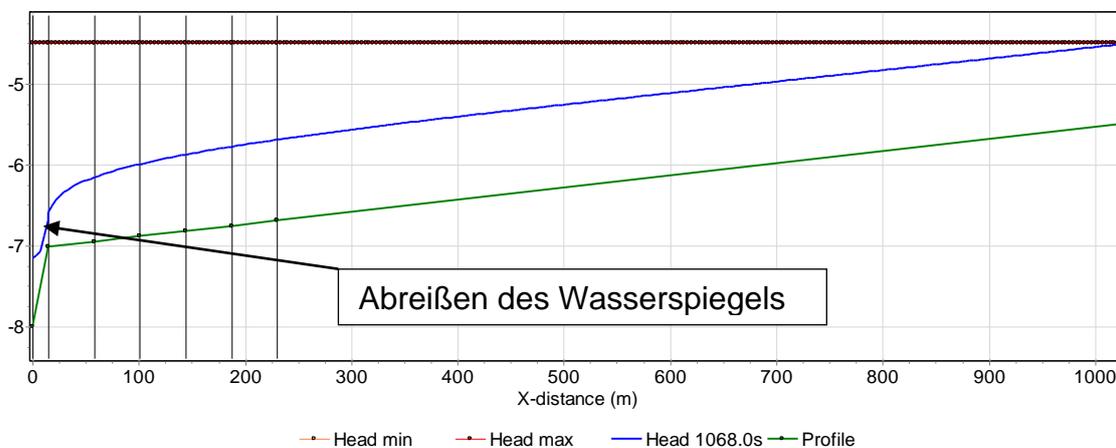


Abbildung 37: Anfahren der Pumpe SBW für Stollen mit Friction factor 0,07 [-], Längenschnitt E.L. nach 1068 s, ASZ

## 7.7 Pumpen SBW Aus

Folgende Abbildungen zeigen den Lastfall – Pumpen-Aus in 5 Sekunden bei Betrieb STZ. Es wird kein Zuschlagen erreicht.

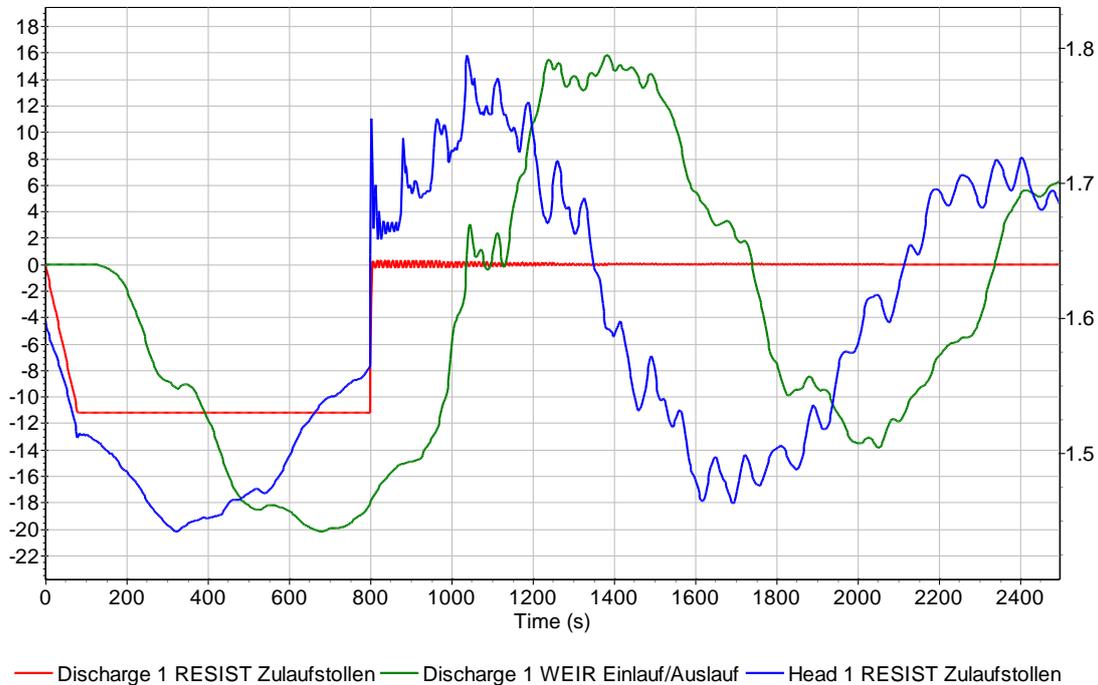


Abbildung 38: Massenschwingung im Kavernenspeichersystem – Pumpen Schwarzbachwerk – Aus in 5 Sekunden, – (die Höhenkoten sind mit +300 m zu addieren um m ü. NN. zu erreichen) – Reibungskoeffizient 0,04 [-] – zu erwarten in einem Spritzbetonstollen – Durchfluss der Pumpe (Discharge 1), Durchfluss am Auslaufbauwerk (Discharge Einlauf / Auslauf), Wasserspiegelschwankung in der Zulaufkaverne (Head 1), Maximales Aufschwingen

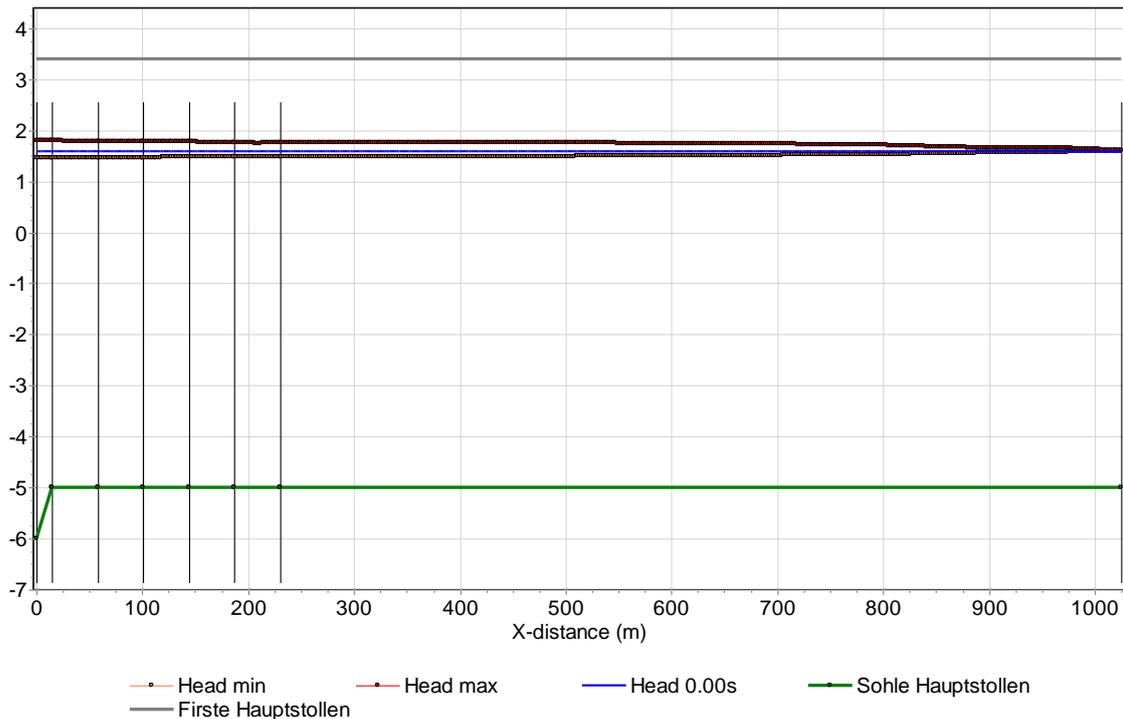


Abbildung 39: Extremwerte der Massenschwingung im Kavernenspeichersystem – Pumpen Schwarzbachwerk – Aus in 5 Sekunden, – (die Höhenkoten sind mit +300 m zu addieren um m ü. NN. zu erreichen) – Reibungskoeffizient 0.4 [-] – zu erwarten in einem Spritzbetonstollen, Längenschnitt Maximales Aufschwingen 1,83 m üNN.

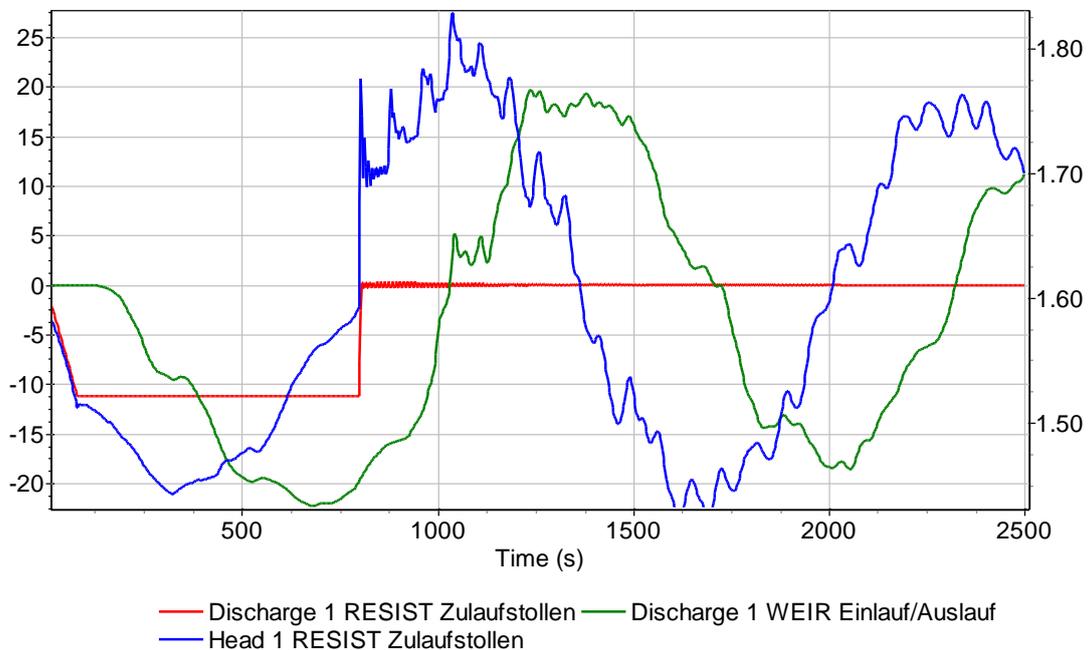


Abbildung 40: Massenschwingung im Kavernenspeichersystem – Pumpen Schwarzbachwerk – Aus in 5 Sekunden, – (die Höhenkoten sind mit +300 m zu addieren um m ü. NN. zu erreichen) – Reibungskoeffizient 0,01 [-] – zu erwarten in einem Spritzbetonstollen – Durchfluss der Pumpe (Discharge 1), Durchfluss am Auslaufbauwerk (Discharge Einlauf / Auslauf), Wasserspiegelschwankung am Kavernenkopf (Head 1), Maximales Aufschwingen 1,83 m üNN.

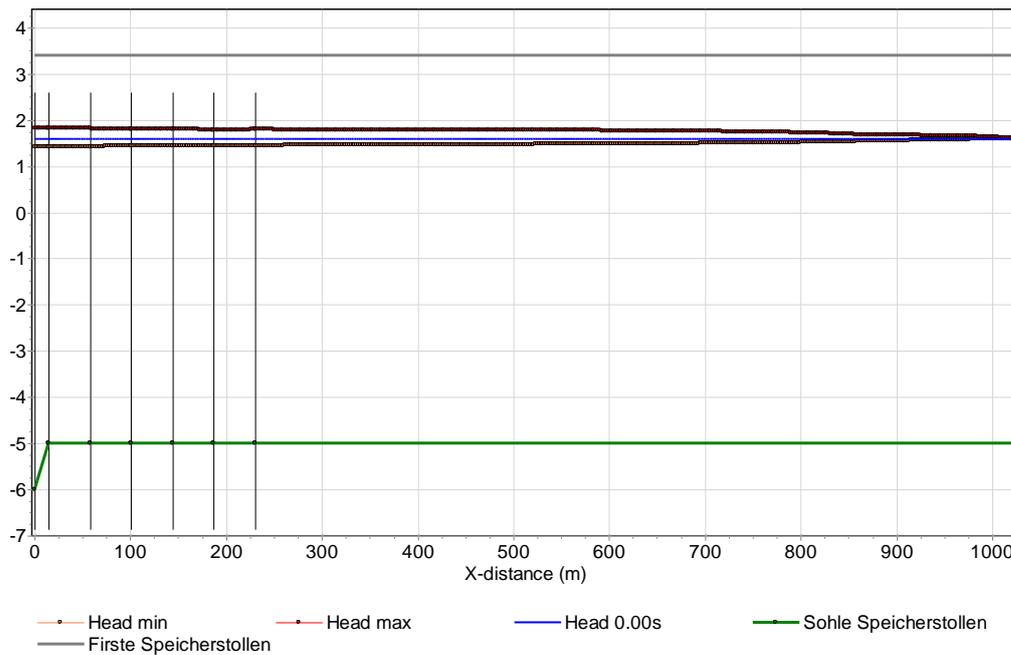


Abbildung 41: Extremwerte der Massenschwingung im Kavernenspeichersystem – Pumpen Schwarzbachwerk – Aus in 5 Sekunden, – (die Höhenkoten sind mit +300 m zu addieren um m ü. NN. zu erreichen) – Reibungskoeffizient 0,01 [-] – zu erwarten in einem Spritzbetonstollen, Längenschnitt Maximales Aufschwingen 1,83 m üNN.

## 7.8 Max. Q am Rechen Ausgleichsbecken Forbach

Aus den 1D-numerischen Simulationen ergibt sich bei Anfahren der Pumpen bei ASZ ein maximales Q von 13 m<sup>3</sup>/s. Dieser Durchfluss wirkt auf den Einlaufrechen als entsprechende Fließgeschwindigkeit zu den Maschinen. Bei einer Fließhöhe von 1,2 m und einer Breite von 7,7 m bei Absenkziel ergibt dies eine brutto Rechenfließgeschwindigkeit von 1,4 m/s.

## 7.9 Zusammenfassung Ausgangssituation

Die 1D-numerischen Berechnungen des gesamten Kavernenspeichers bestätigen die zu untersuchende Funktionsfähigkeit. Auch für ungünstige Resonanzschaltfälle bei STZ wird kein Zuschlagen an der Firste generiert. Es wird für einen ungünstigen Resonanzlastfall des Turbinenbetriebs ein maximaler Pegel von 302,7 m ü NN errechnet. Für den Betrieb bei ASZ wird die Funktionsfähigkeit insofern bestätigt, als dass bis zum Absenkziel im Ausgleichsbecken Forbach mit 11,2 m<sup>3</sup>/s gepumpt werden kann. Allerdings ist für einen unausgekleideten rauen Kavernenspeicher kein konstantes Pumpen bei ASZ 295,5 m ü NN möglich. Daher ist dies der maßgebende Fall für den minimalen Pegel und ist strenger zu beurteilen als das Pumpen in Resonanz. Es wird gezeigt, dass ein Pumpenabwurf bei STZ ein wesentlich geringeres maximales Aufschwingen in der Kaverne ergibt als das Turbinieren in Resonanz. Durch Pumpen in Resonanz ist keine höhere Aufschwingkote zu erwarten. Aufgrund der beschränkten Einsatzzeit für so einen Fall scheint dies aus Sicht des Planers auch nicht notwendig.

## 8. 3D-Numerische Untersuchungen

### 8.1 Gesamte Kaverne Ausgangsgeometrie

Abbildung 42 bis Abbildung 48 zeigen die Herangehensweise und die Ergebnisse der 3D-Simulationen des gesamten Kavernenspeichers. Das Modell wurde als 3D Geometrie erstellt, vernetzt und mit den Randbedingungen für den Vollturbinenbetrieb von MUW und SBW beaufschlagt. Diese Herangehensweise mit Berücksichtigung der instationären Lastfälle wird für die weiteren Berechnungen im Arbeitspaket 2 vorgeschlagen um die Bemessungslastfälle für den Ausführungsvorschlag damit testen zu können. Für Ausgangsgeometrie kann bereits erfolgreich durch die 1D-numerische Berechnung die Funktionsfähigkeit bestätigt werden. Das Ergebnis der 3D Simulation unterstützt ebenfalls diese Erkenntnis.

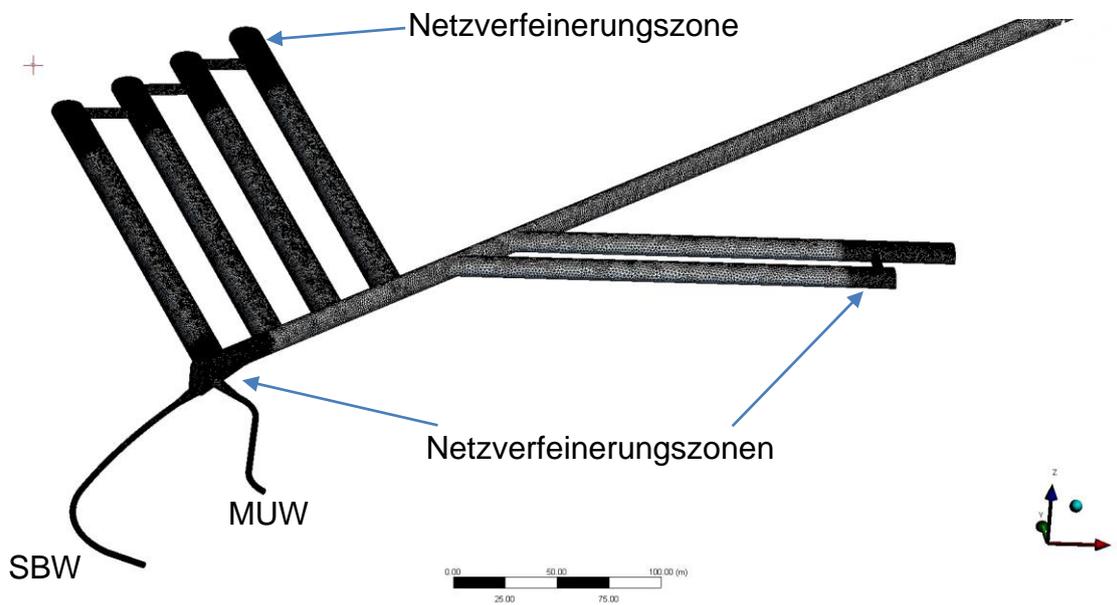


Abbildung 42: Geometrie Kavernenspeicher gesamt, Vernetzung, Netzverfeinerungszonen im Bereich der Zulaufkaverne, Druckstollen und Nebenstollenden

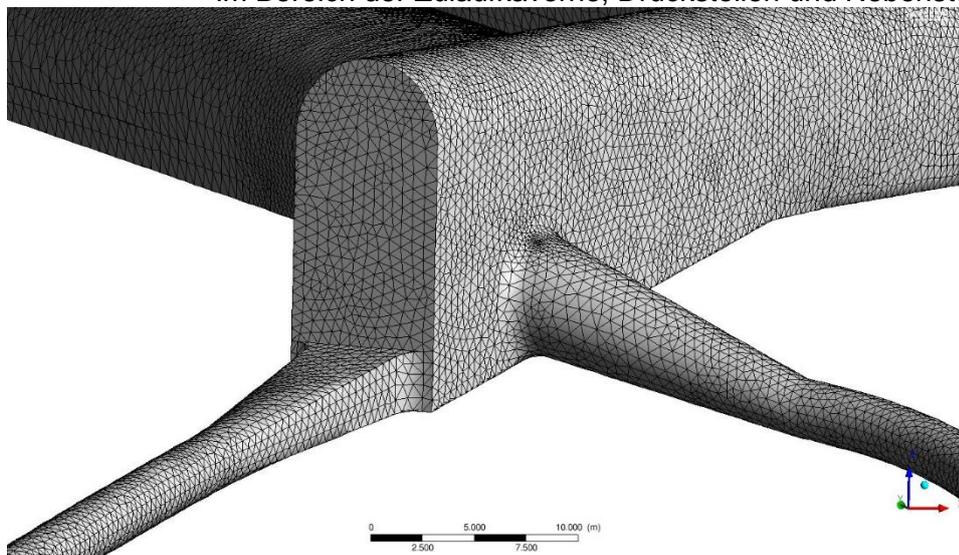


Abbildung 43: Geometrievermaschung, Detail im Zulaufkavernenbereich

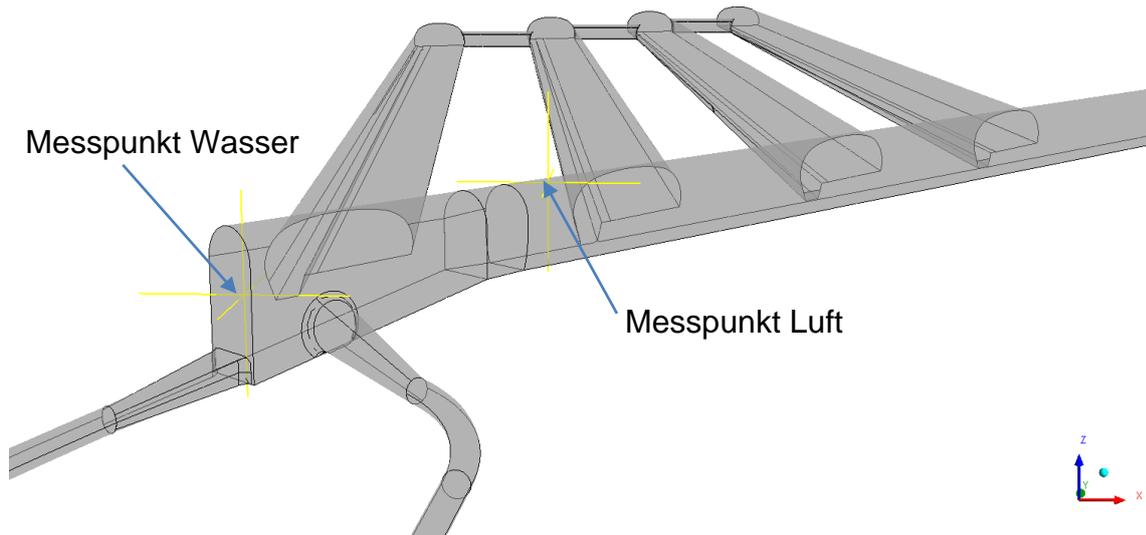


Abbildung 44: Geometrie Kavernenspeicher gesamt, Messpunkte Luftdruck und Wasserdruck

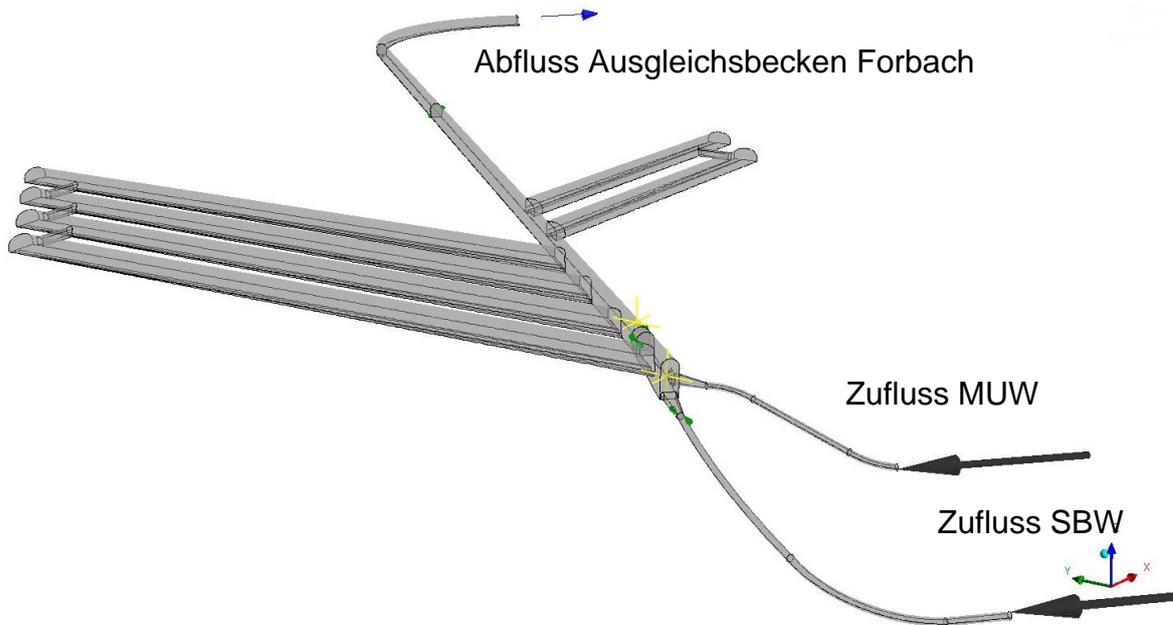


Abbildung 45: Geometrie Kavernenspeicher gesamt, Randbedingungen für den stationären Turbinenbetrieb

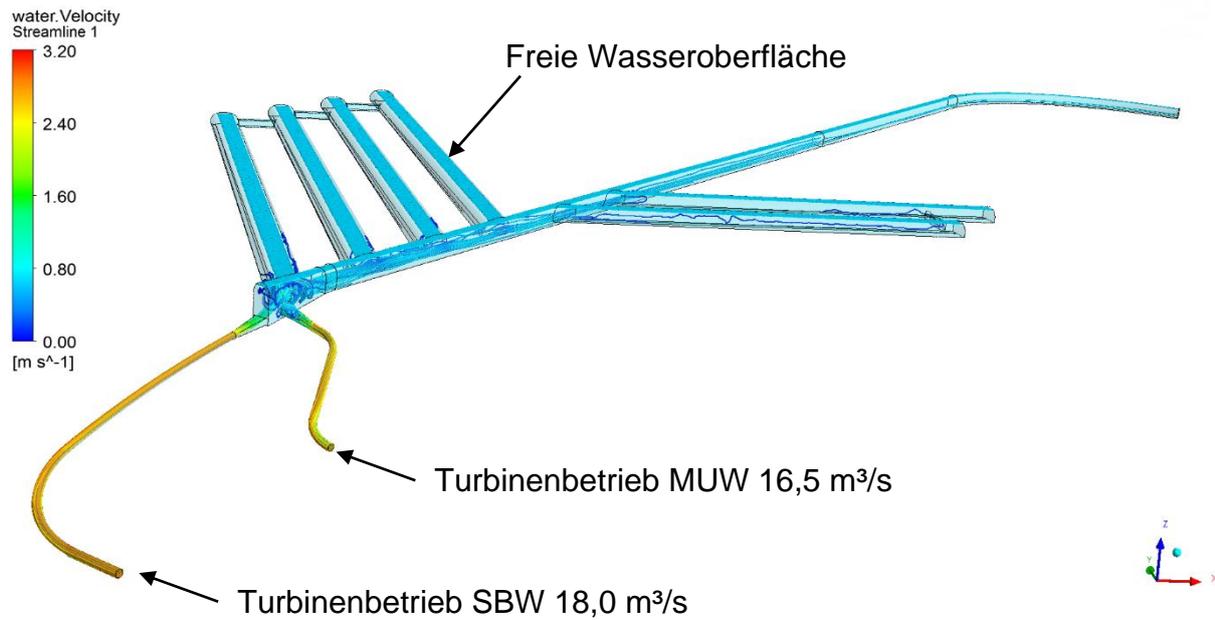


Abbildung 46: 3D-Strömungssituation Murgwerk und SB im Turbinenbetrieb QA, STZ 301,6 m üNN., stationäre Berechnung in Prototypgröße, Stromlinien mit Fließgeschwindigkeit, freie Wasseroberfläche, Gesamtansicht

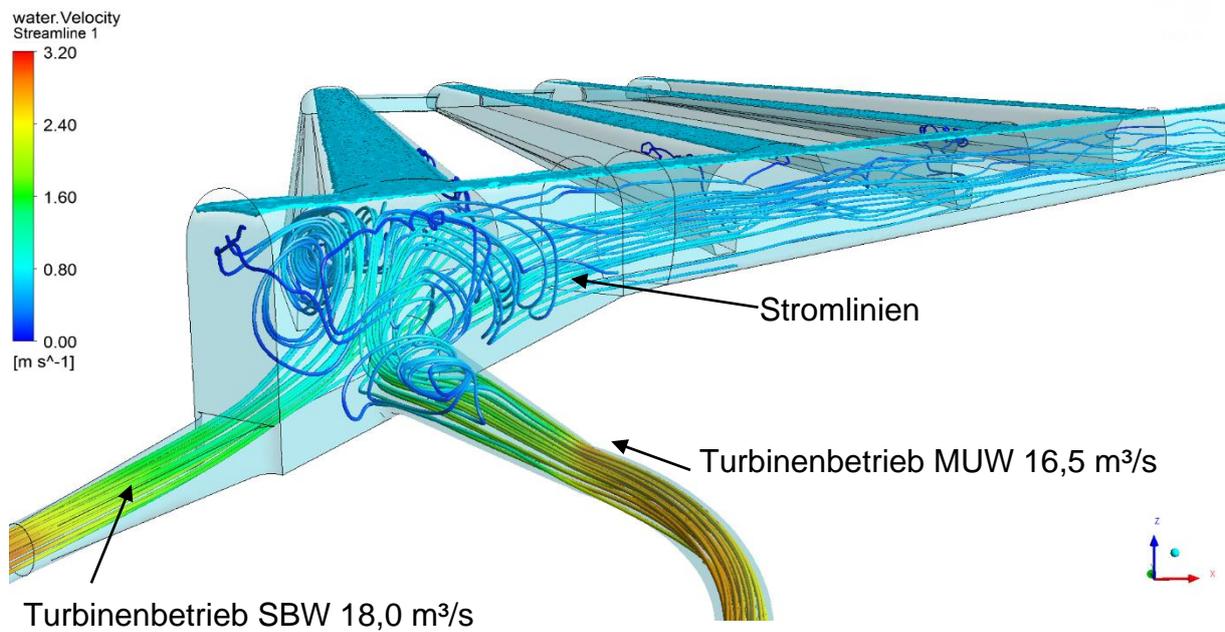


Abbildung 47: 3D-Strömungssituation MUW und SBW im Turbinenbetrieb QA, STZ 301,6 m üNN., stationäre Berechnung in Prototypgröße, Stromlinien mit Fließgeschwindigkeit, freie Wasseroberfläche, Detail

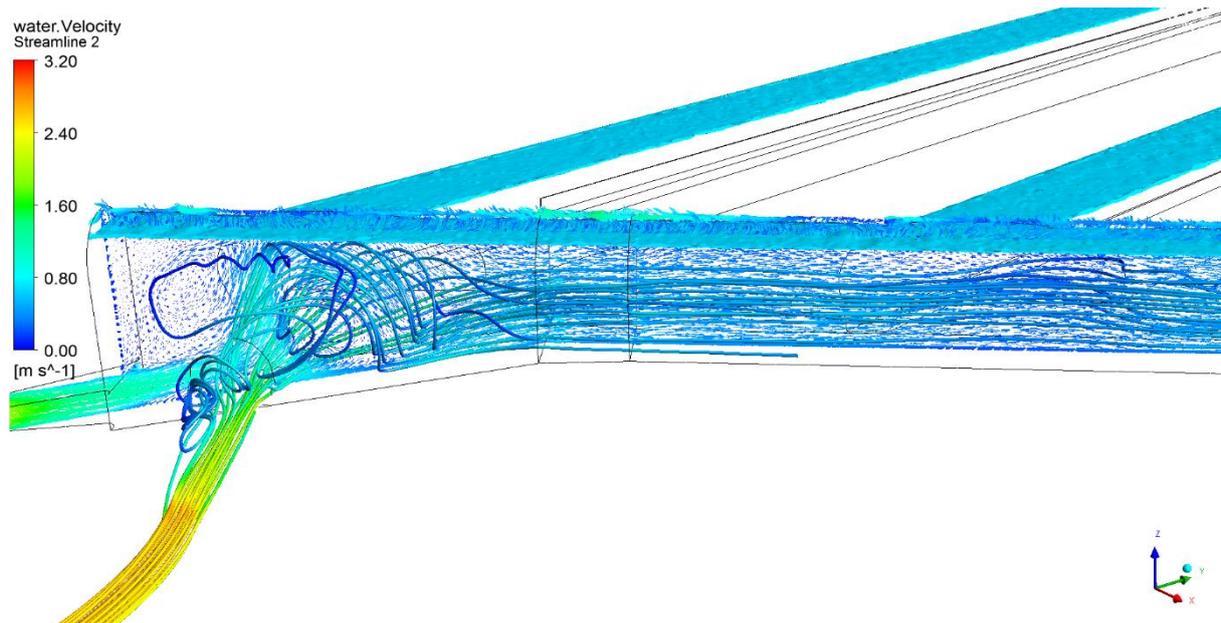


Abbildung 48: 3D-Strömungssituation MUW und SBW im Turbinenbetrieb QA, STZ 301,6 m üNN., stationäre Berechnung in Prototypgröße, Stromlinien mit Fließgeschwindigkeit, Geschwindigkeitsvektoren in Mittelebene, freie Wasseroberfläche, Detail

## 8.2 Pumpenlastfall bei ASZ Ausgangsgeometrie

### 8.2.1 Hydraulischer Kurzschluss - Ausgangsgeometrie

Um die Strömungsverhältnisse im Zulaufbereich zu den Maschinen zu untersuchen, werden 3D-numerische Simulationen durchgeführt. Es soll einerseits gezeigt werden, dass es zu keinen Lufteinzügen kommt und andererseits werden die allgemeinen Strömungsverhältnisse für diesen Fall untersucht. Dazu werden stationäre und instationäre Simulationen durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass sich das Einlaufbauwerk des SBW sehr unkritisch hinsichtlich Lufteinzug verhält.

Die transiente Strömungsberechnung mit einer Dauer von 15 Sekunden am 1:1 Modell zeigt keine Sensitivität hinsichtlich eines Einzugwirbels am Einlaufbauwerk des Schwarzenbach Werkes (Abbildung 49 und Abbildung 50). Abbildung 50 zeigt die Strömungsvektoren an der freien Wasseroberfläche. Hier treten leichte Rotationsströmungen im Einlaufbereich auf, allerdings mit geringen Fließgeschwindigkeiten welche nicht zu luftgefüllten Einlaufwirbeln tendieren. Daher wird diese Strömungssituation als sehr sicher gegen Lufteinzug gesehen.

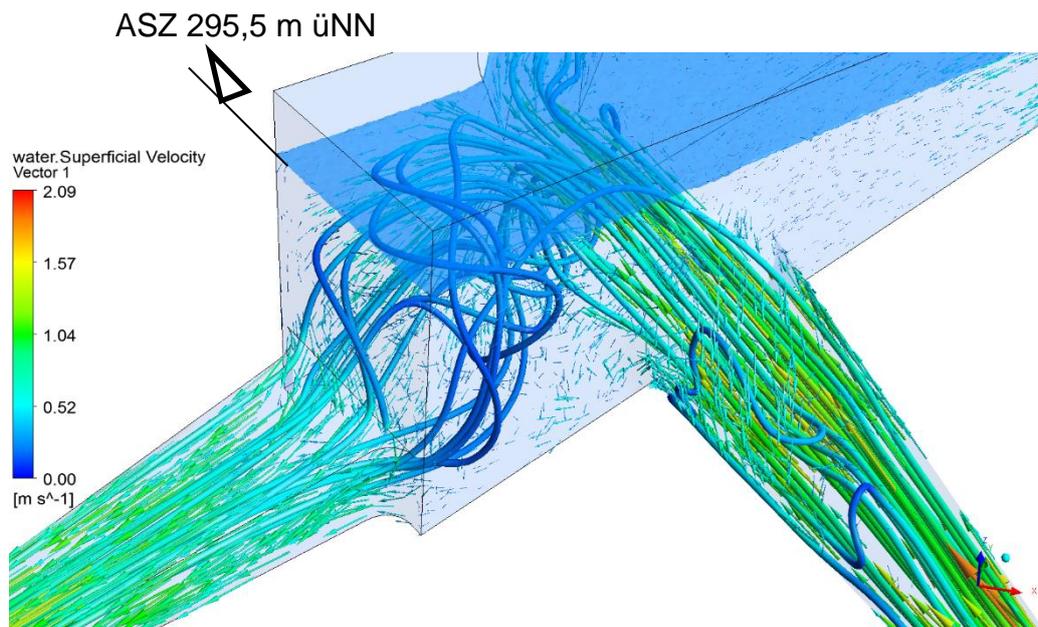


Abbildung 49: Pumpenlastfall SB Werk 11,2 m<sup>3</sup>/s und Turbinenbetrieb des Murgwerks mit 11,2 m<sup>3</sup>/s, Darstellung der Stromlinien, Vektoren und der Wasseroberfläche

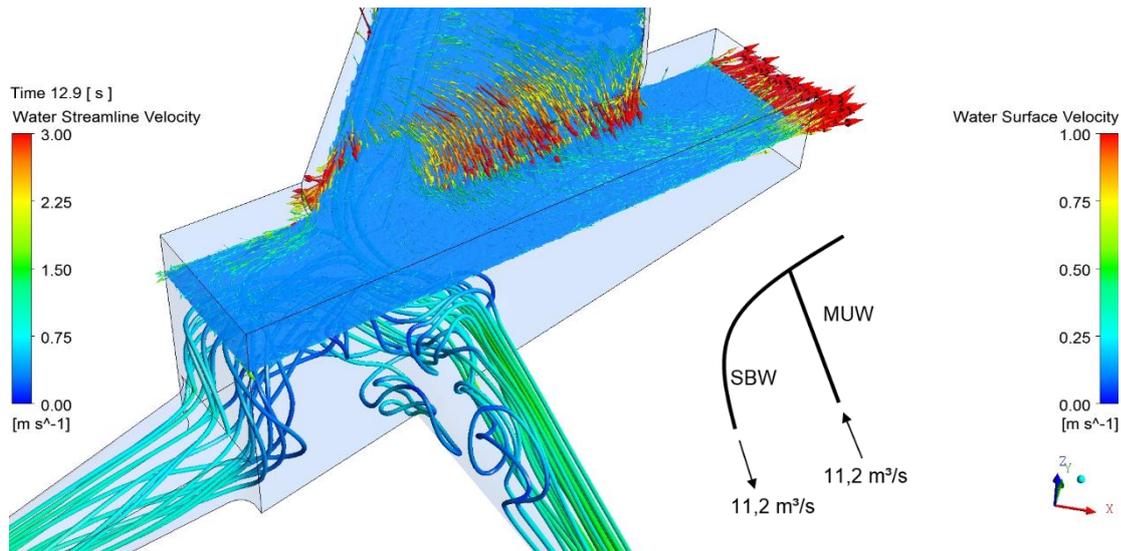


Abbildung 50: Pumpenlastfall SB Werk 11,2 m<sup>3</sup>/s und Turbinenbetrieb des Murgwerks mit 11,2 m<sup>3</sup>/s, Darstellung der Stromlinien, Vektoren an der Wasseroberfläche

Abbildung 51 zeigt den Pumpenlastfall im SB Werk und die Fließgeschwindigkeitsfelder anhand zweier Schnittebenen. Insbesondere im SB Einlauf ist eine vertikale Einschnürung ersichtlic. Diese generiert ungünstige Strömungsverluste. Eine Ausrundung des Einlaufs wird daher empfohlen.

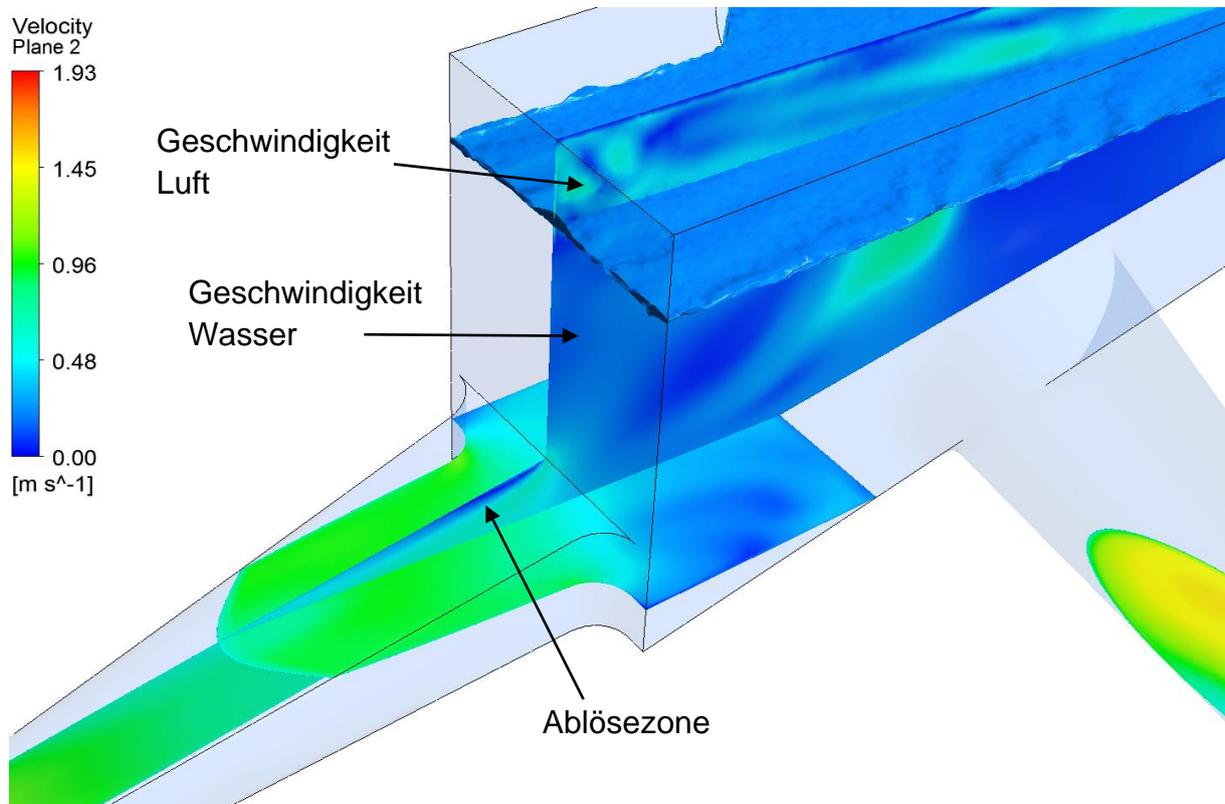


Abbildung 51: Horizontales und vertikales Geschwindigkeitsfeld und Darstellung der Wasseroberfläche.

## 8.2.2 Pumpenlastfall – Ausführungsvorschlag

Die Berechnungen werden bei ASZ – 1m = 294,5 m ü NN durchgeführt – welches dem tiefsten zu erwartenden Wasserspiegel in der Zulaufkaverne entspricht. Die Simulationen ergeben, dass sich keine Einlaufwirbel bilden und somit auch kein Lufteinzug. Die Situation wird mit großen Sicherheitsreserven gesehen.

Das Kriterium nach Gordon ergibt einen Sicherheitsfaktor von 4,3 [-] beim Absenkenziel zwischen erforderlicher und vorhandener Überdeckungshöhe. Dieses Kriterium gilt für den Zustand in der Zulaufkaverne nur eingeschränkt wegen dem möglichen Zulauf vom Murgwerk und des sich ergebenden Dralles. Dieser Wert dient daher nur als Vergleich.

Abbildung 52 bis Abbildung 54 zeigen Ergebnisse der transienten 3D-numerischen Simulation anhand eines 1:1 Systems, wobei der Pumpenlastfall SBW simuliert wird.

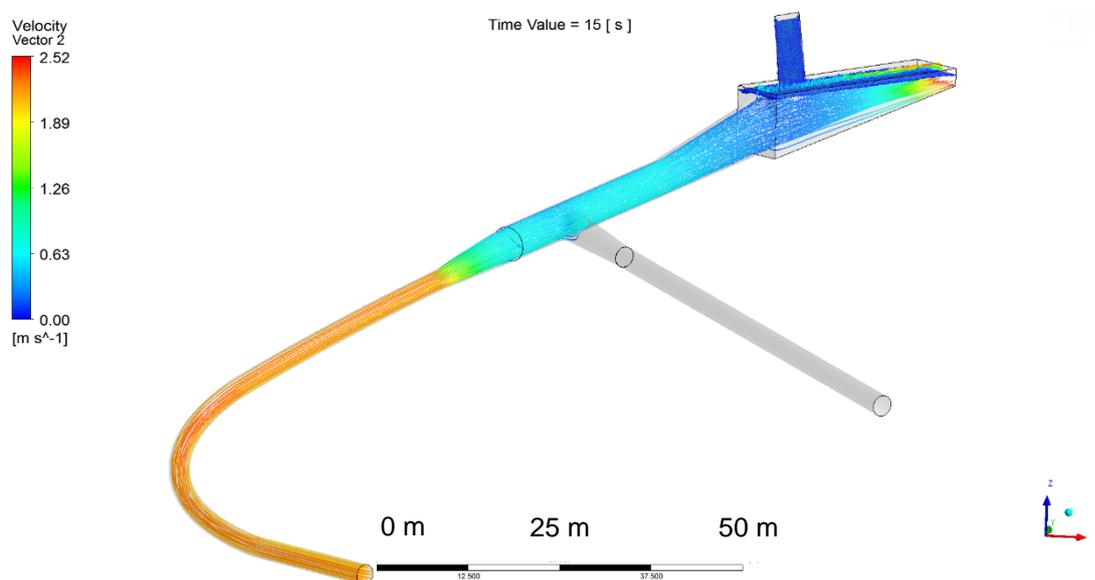


Abbildung 52: Pumpenlastfall V9 - Ausführungsvariante freie Wasseroberfläche, 1:1 Simulation (perspektivische Darstellung)

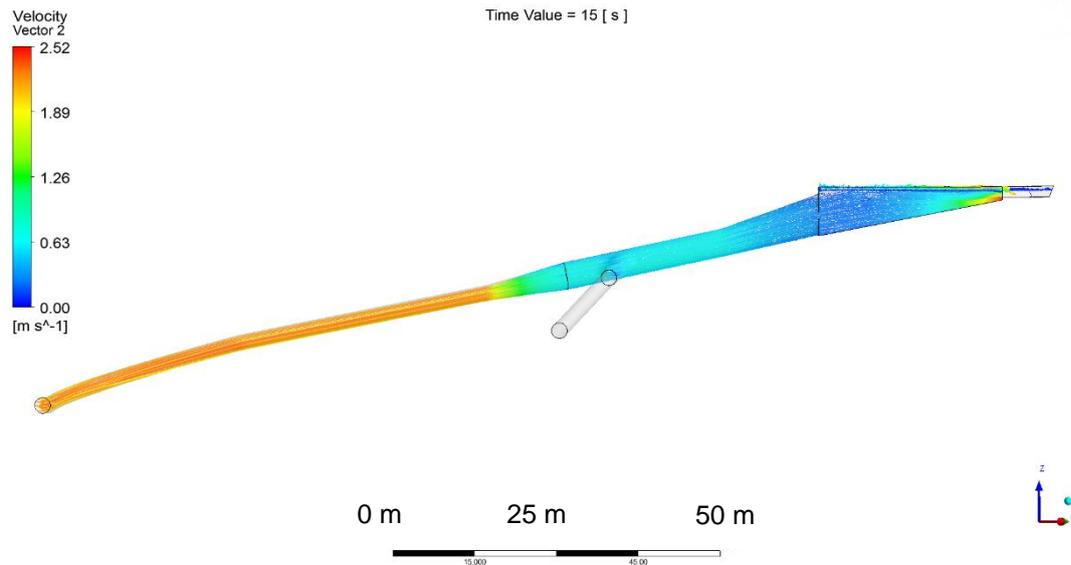


Abbildung 53: Pumpenlastfall V9 - Ausführungsvariante freie Wasseroberfläche, 1:1 Simulation, Seitenansicht – Strömungslinien (perspektivische Darstellung)

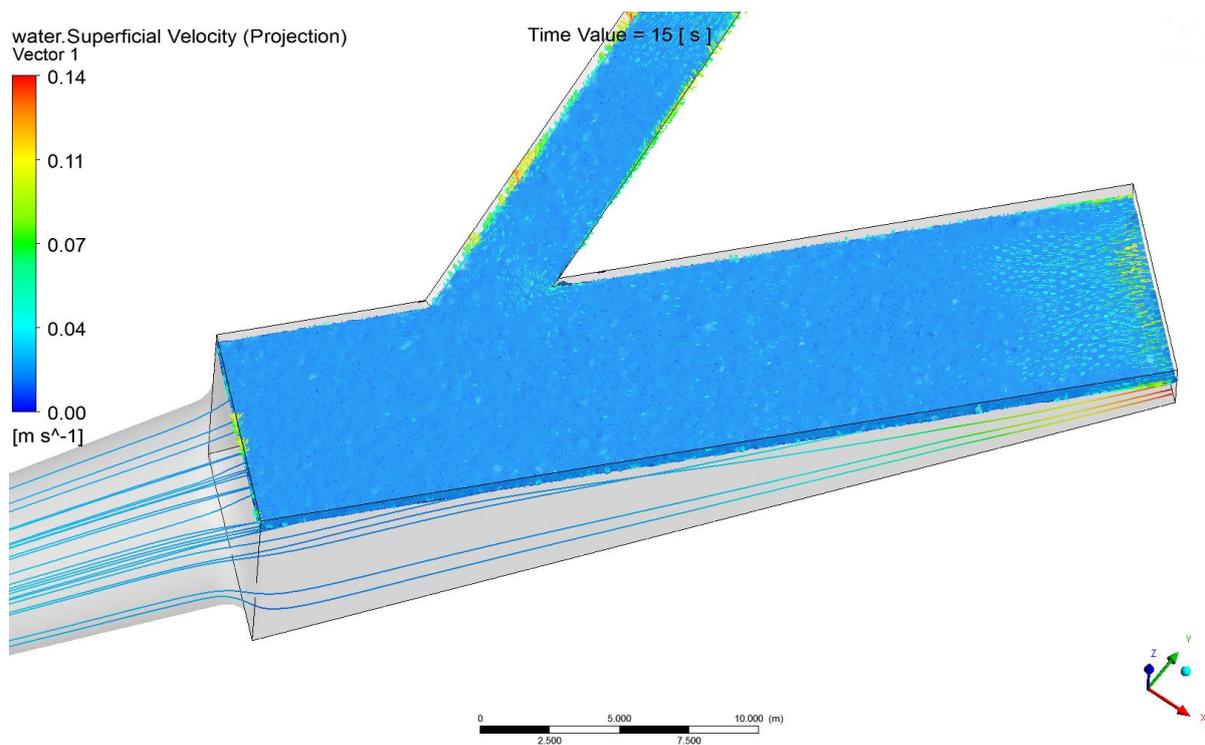


Abbildung 54: Pumpenlastfall V9 - Ausführungsvariante, 1:1 Simulation, Draufsicht – Strömungslinien und freie Wasseroberfläche

### 8.3 Zulaufkaverne hydraulische Verluste Ausgangsgeometrie

In diesem Kapitel werden die hydraulischen Untersuchungen der Zulaufkaverne der Ausgangsgeometrie dargestellt. Es wird auch untersucht welchen hydraulischen Einfluss die Zulaufstrecke bzw. die Nachlaufstrecke für die Simulationen haben. Die Berechnungen zeigen, dass vor allem der erste Nebenstollen, die Zulaufkaverne und der Hauptstollen für die Stoßverluste maßgeblich sind. Somit werden für die Untersuchungen die weiteren Nebenstollen und der hintere Teil des Hauptstollens weggelassen.

Wie unter Punkt 6.2.1 beschrieben werden lediglich die lokalen hydraulischen Verluste in der Zulaufkaverne ermittelt.

Die Berechnungen der lokalen Verluste der Diffusoren des Schwarzenbachwerks und des Murgwerks werden anhand 3D-numerischer Strömungssimulationen ermittelt. Das Berechnungsmodell wird im Maßstab 1:15 erstellt. Die Verkleinerung bringt eine schnellere Konvergenz der 3D Simulation, somit können auch umfangreichere Varianten untersucht werden. Es werden die  $\zeta$ -Werte für unterschiedliche Strömungssituationen ermittelt. Die dargestellten  $\zeta$ -Werte in den folgenden Diagrammen beziehen sich auf die Durchmesserdimension von 2,9 m (geplanter Innendurchmesser des UW-Stollens MUW und SBW).

Die Vorgangsweise für die Berechnung wird unter Pkt. 6.2.1 und 6.2.2 beschrieben. Tabelle 10 zeigt die Verlustanteile der einzelnen Strömungsrichtungen. Da die Verlusthöhen mit sich selbst in Bezug stehen ergeben die Vergleiche stets 100 % mit der Ausgangsvariante 0. Auf die Verlustbeiwerte in dieser Tabelle werden die entsprechenden Verlusthöhen in der Variantenstudie bezogen und gegenseitig in Relation gebracht.

Tabelle 10: Ermittelte Verlustbeiwerte für die Variante 0 - Ausgangsvariante

Berechnungen an Modellgröße 1:15 - VARIANTE 0								
	Absenzziel				Stauziel			
	Turb SBW	Turb MUW	Pump SBW-MUW Turb	Pump SBW	Turb SBW	Turb MUW	Pump SBW-MUW Turb	Pump SBW
$\zeta$ -Wert [-] bezogen auf Stollen $D_i=2.9$ [m]	1.43	1.33	1.75	2.35	0.88	0.86	2.31	2.74
$Q_A$ m <sup>3</sup> /s	18	16.5	11.2	11.20	18	16.5	11.2	11.20
A Stollen [m <sup>2</sup> ]	6.61	6.61	6.61	6.61	6.61	6.61	6.61	6.61
$v_A$ [m/s]	2.73	2.50	1.70	1.70	2.73	2.50	1.70	1.70
h <sub>v</sub> Prototyp [mVWS]	<b>0.54</b>	<b>0.42</b>	<b>0.26</b>	<b>0.34</b>	<b>0.33</b>	<b>0.27</b>	<b>0.34</b>	<b>0.40</b>
Vergleich mit Ausgangsvariante 0	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>

### Turbinenbetrieb SBW bei STZ

Abbildung 55 zeigt die Strömungssituation für den Turbinenbetrieb des SBW.

Angaben:

Maßstab	1:15
Reynolds Zahl im Hauptstollen	$1,55 \cdot 10^5$

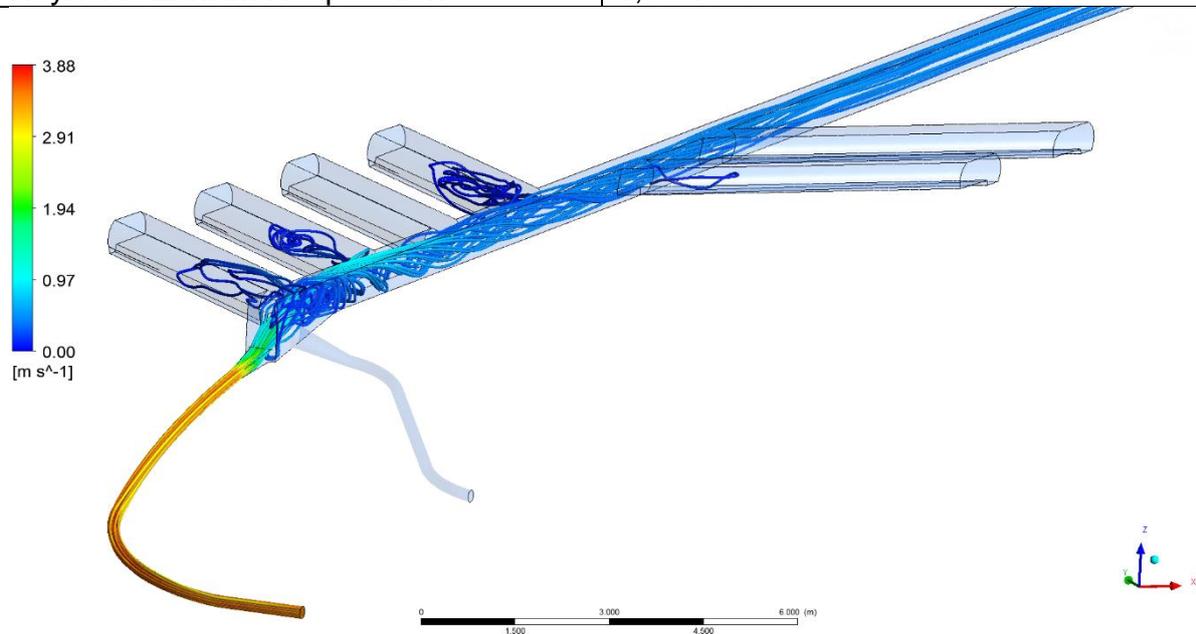


Abbildung 55: Strömungssituation Turbinenbetrieb für Diffusor Schwarzenbachwerk, Maßstab 1:15,  $Q = 100 \text{ l/s}$ , qualitative Beurteilung der Strömung für den Kavernenspeicher

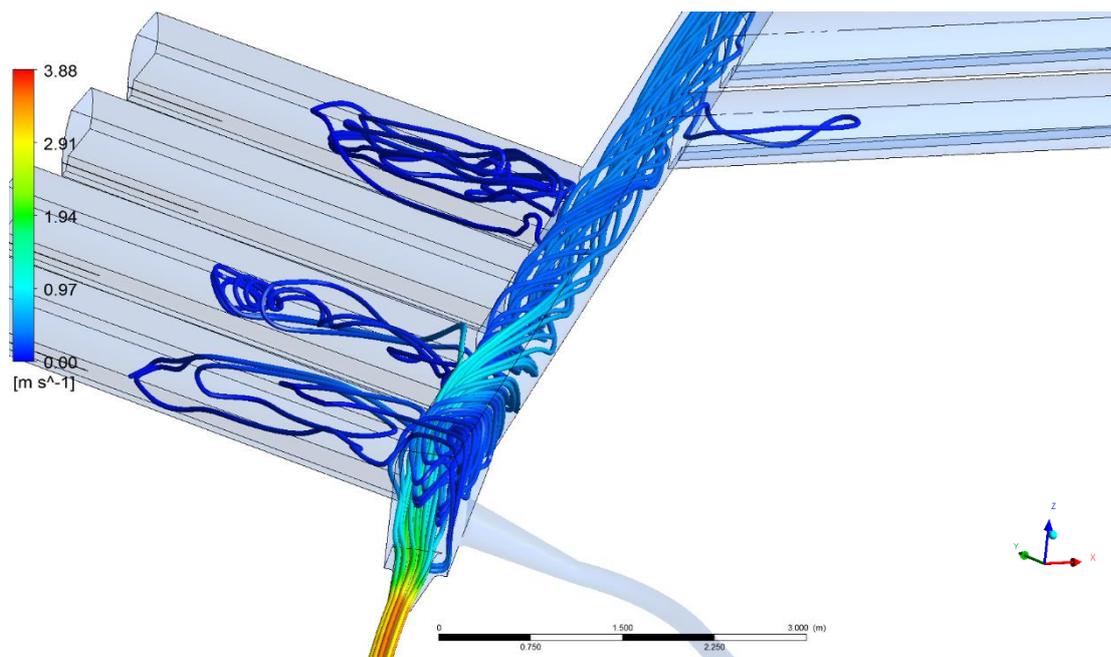


Abbildung 56: Strömungssituation Turbinenbetrieb für Diffusor Schwarzenbachwerk, Maßstab 1:15, qualitative Beurteilung der Strömung für den Kavernenspeicher, Detail

**Diffusor Schwarzenbachwerk Turbinenbetrieb AZ**

Angaben:

Maßstab	1:15
Reynolds Zahl im Hauptstollen	$1,20 \cdot 10^5$

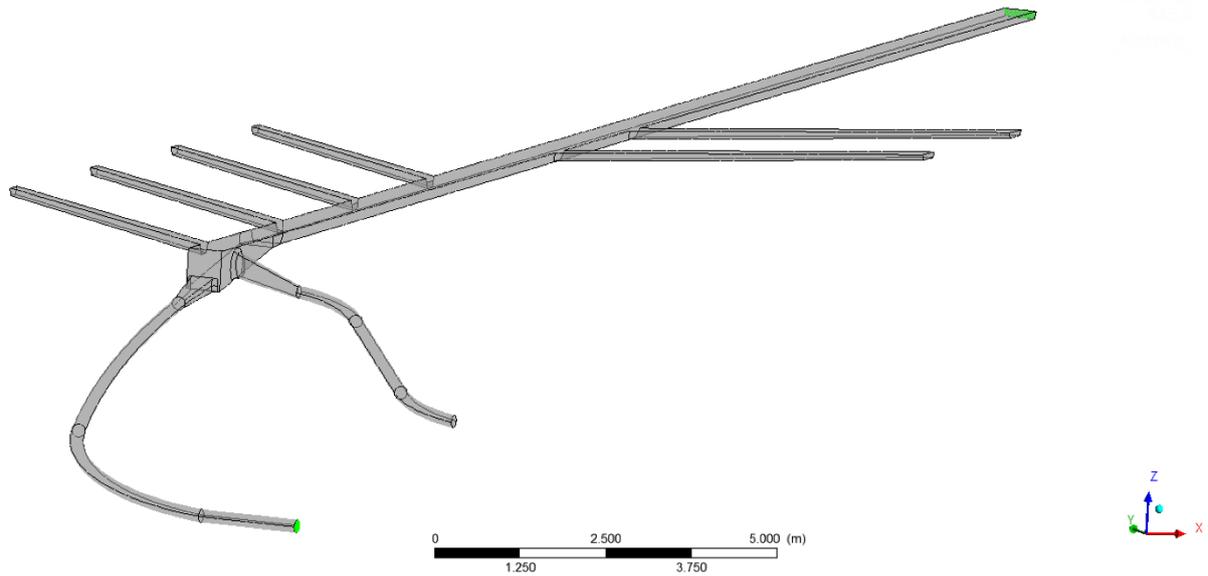


Abbildung 57: Geometrie Kavernenspeicher bei Absenkziel, Inlet SB Stollen, Outlet Hauptstollen für Berechnung des lok. Verlustes des Konfusers SB

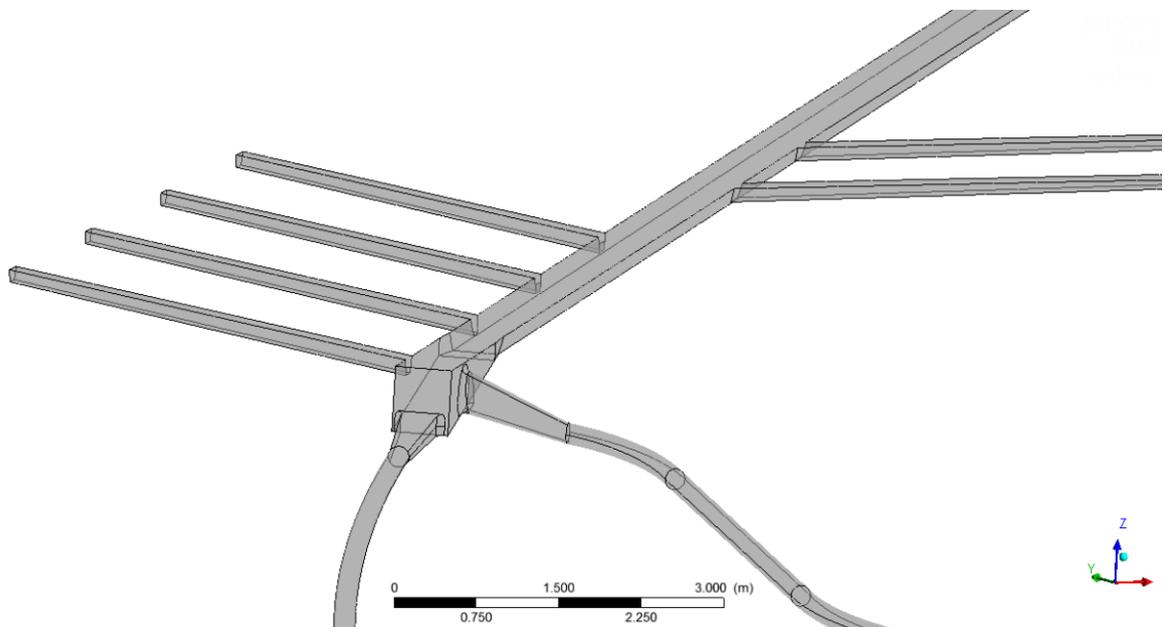


Abbildung 58: Geometrie Kavernenspeicher bei Absenkziel, Zufluss SBW Stollen, Ausfluss Hauptstollen für Berechnung des lokalen Verlustes des Konfusers SBW

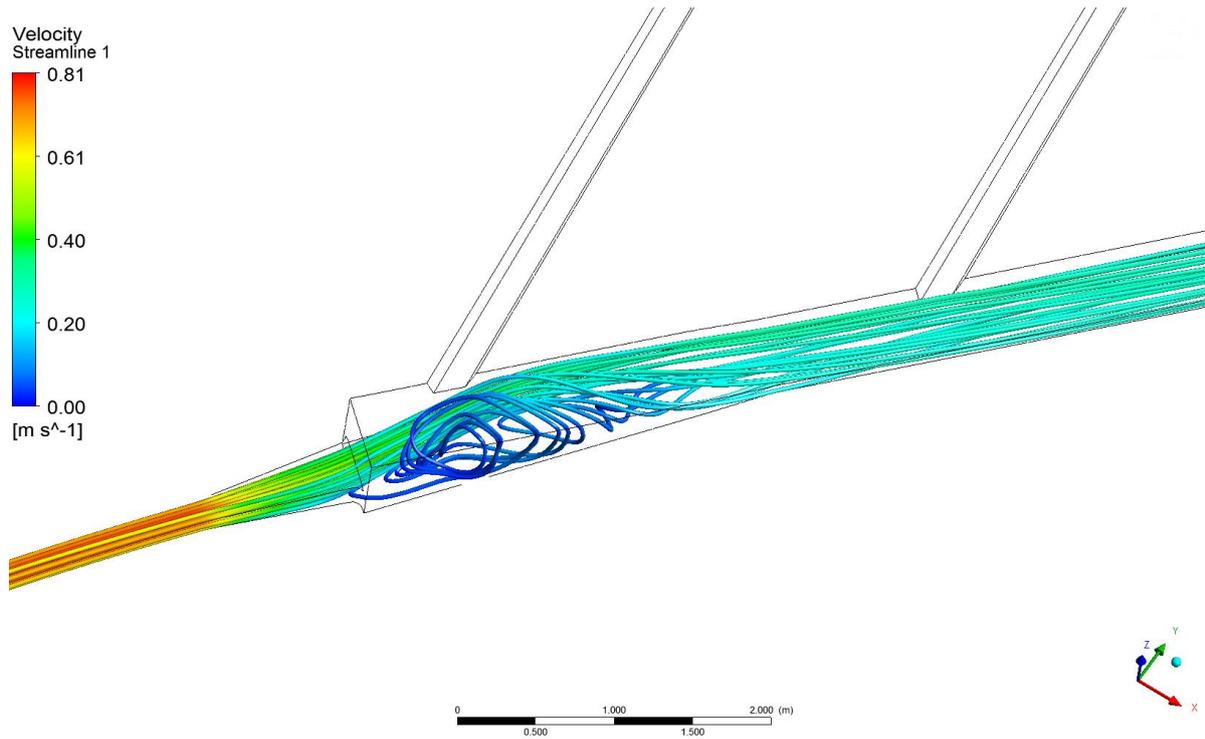


Abbildung 59: Turbinenbetrieb SBW bei ASZ zur Bestimmung des  $\zeta$ -Werts bei ASZ

### Diffusor Murgwerk Turbinenbetrieb STZ

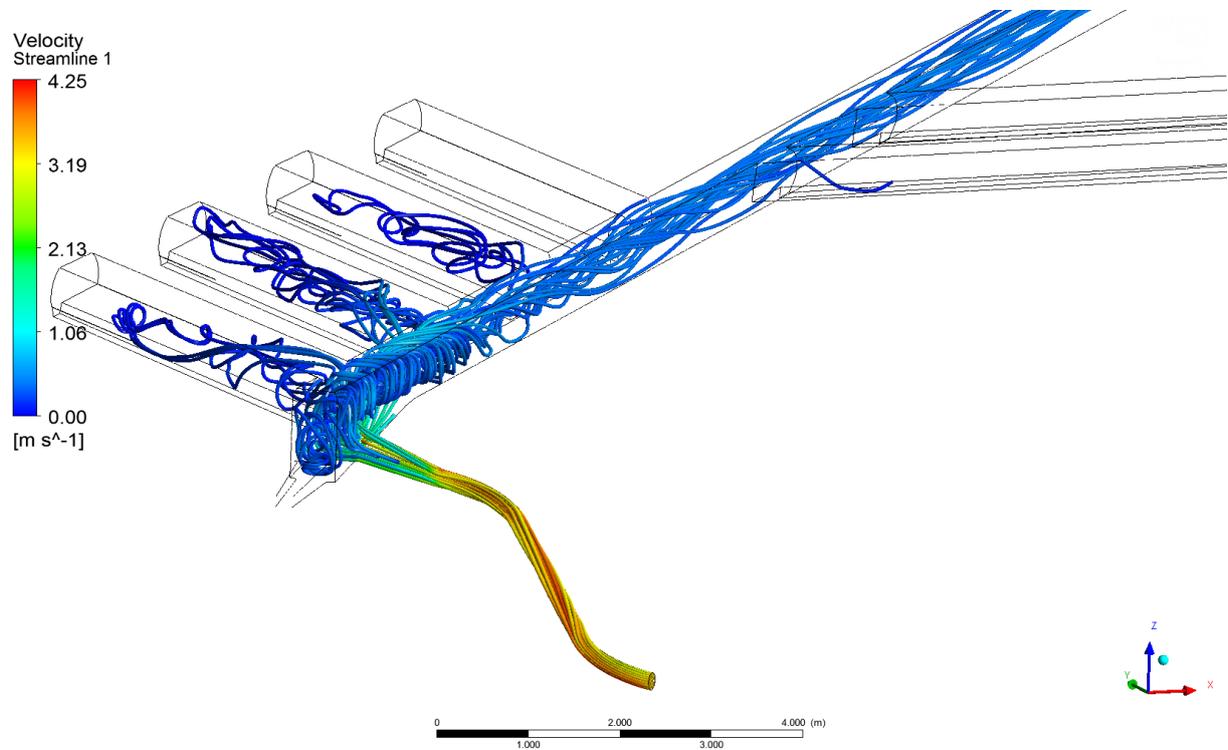


Abbildung 60: Strömungssituation Turbinenbetrieb MUW bei STZ im Kavernenspeicher im Maßstab 1:15

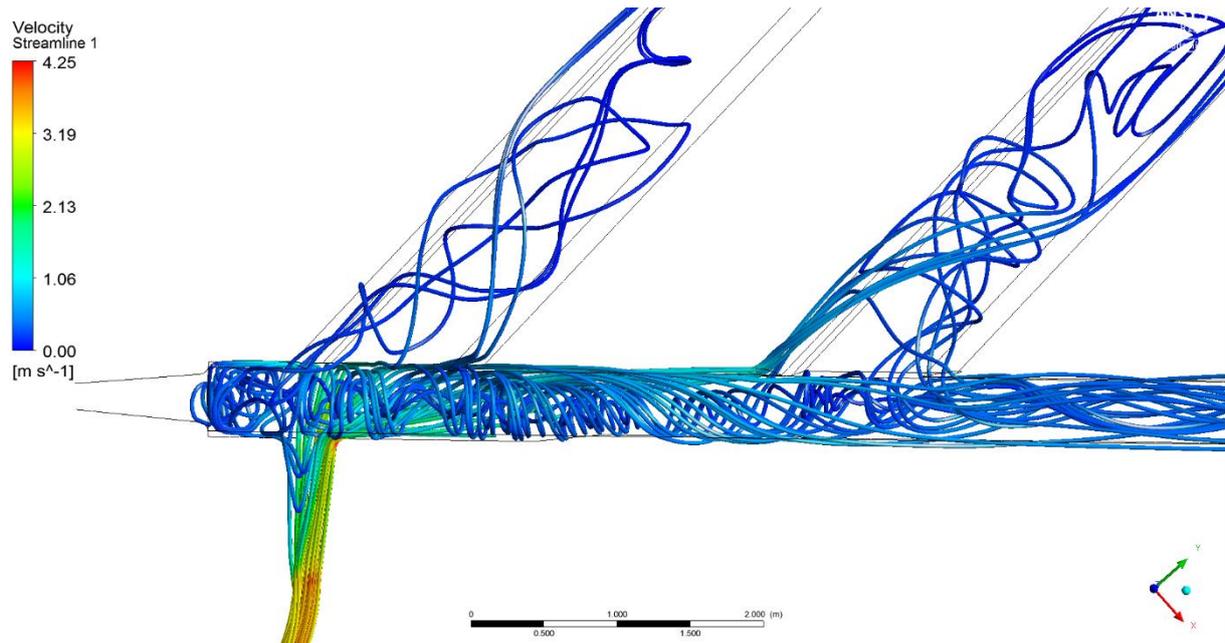


Abbildung 61: Strömungssituation Murgwerk bei STZ im Kavernenspeicher im Maßstab 1:15, Detail

**Diffusor Murgwerk Turbinenbetrieb AZ**

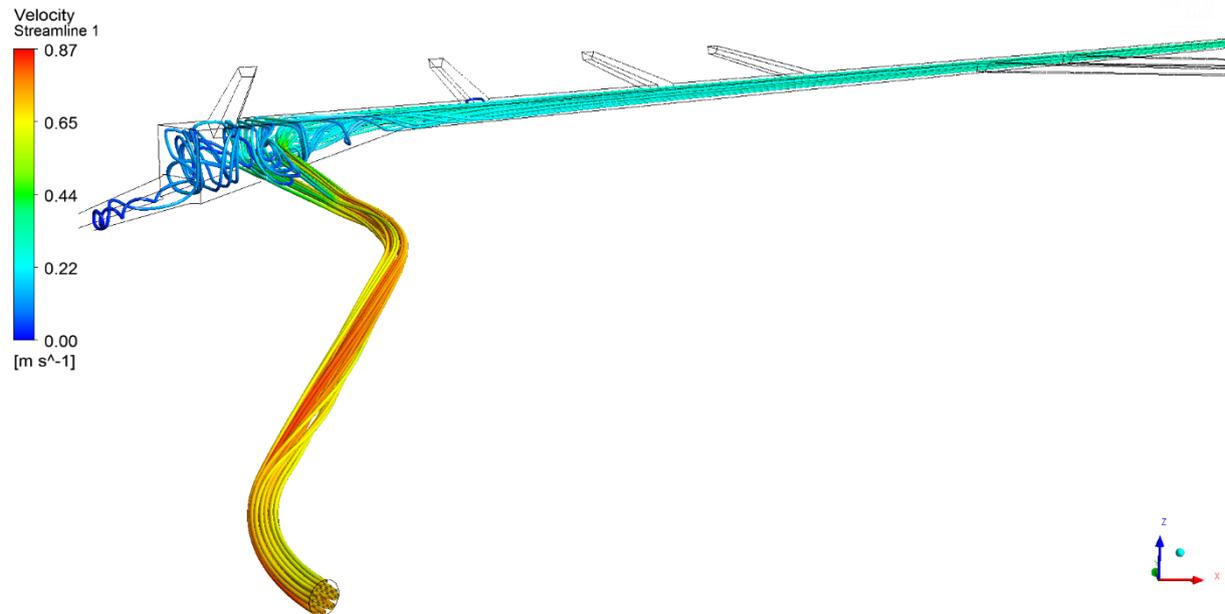


Abbildung 62: Strömungssituation Turbinenbetrieb MUW bei ASZ im Kavernenspeicher im Maßstab 1:15

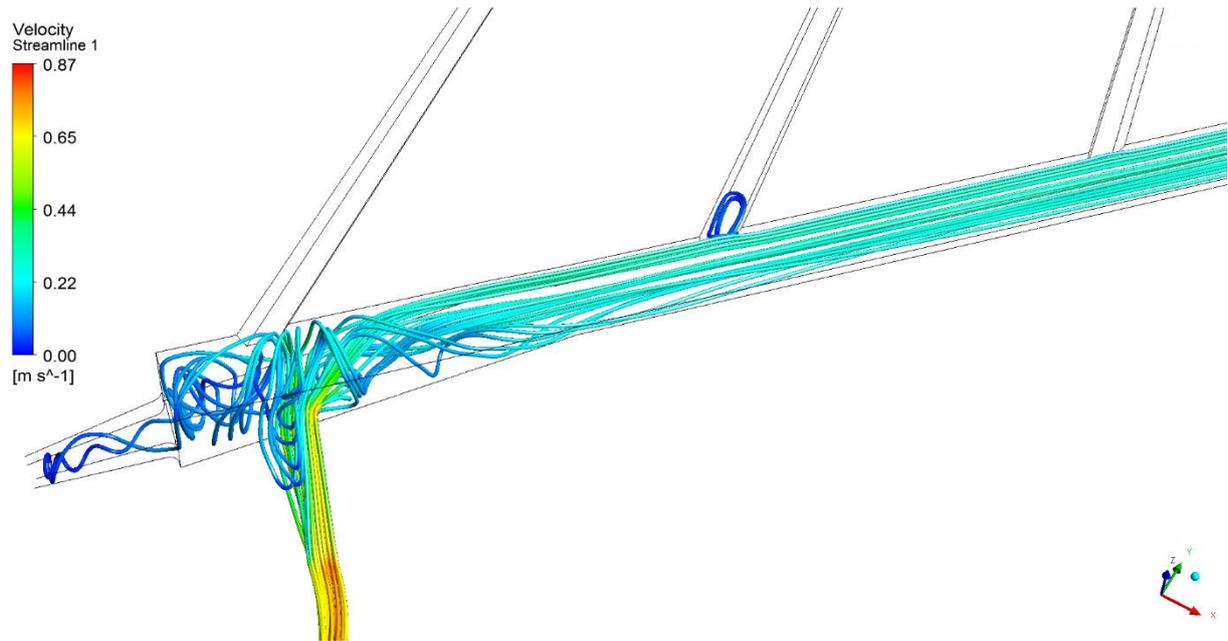


Abbildung 63: Strömungssituation Turbinenbetrieb MUW bei ASZ im Kavernenspeicher im Maßstab 1:15, Detail

**Diffusor Schwarzenbachwerk und Murgwerk Turbinenbetrieb STZ**

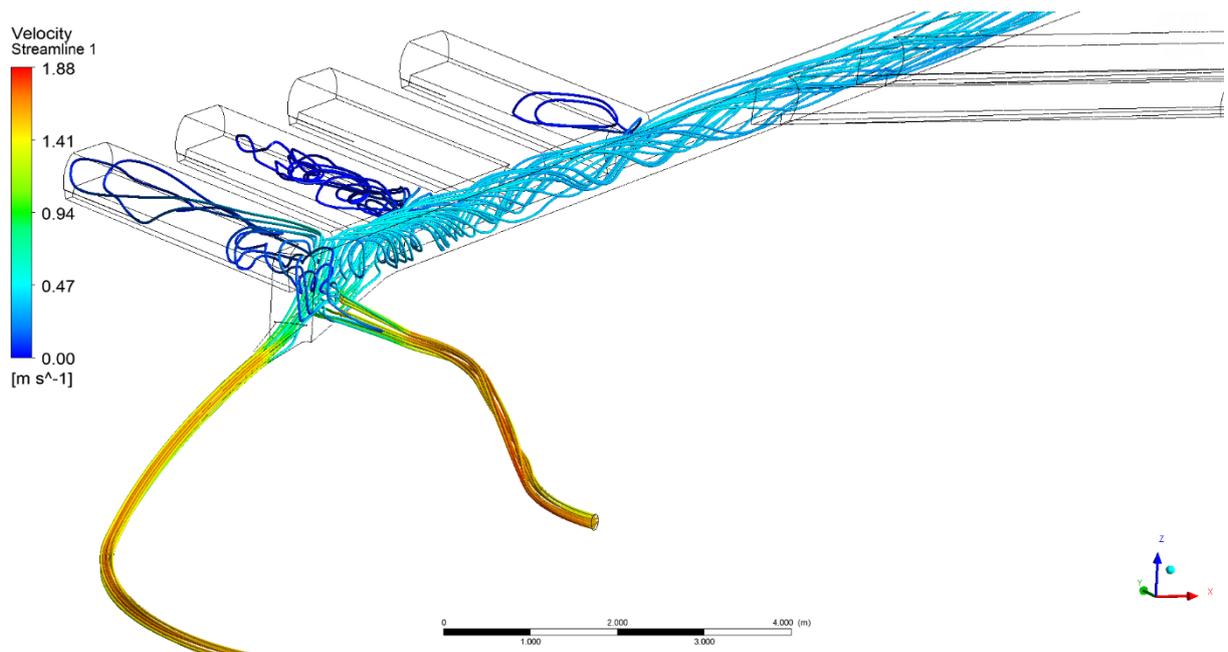


Abbildung 64: Strömungssituation MUW und SBW im Turbinenbetrieb mit demselben Q, STZ 301,6 m üNN., Berechnung im Maßstab 1:15, Stromliniendarstellung

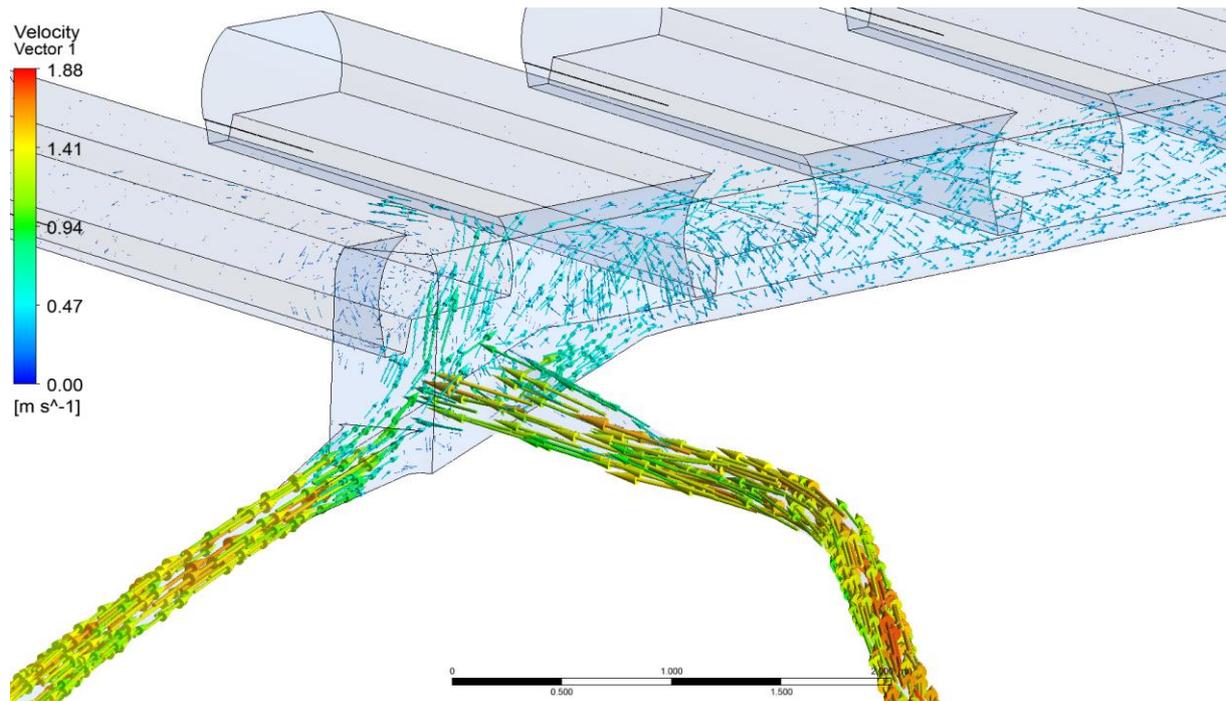


Abbildung 65: Strömungssituation Murgwerk und SB im Turbinenbetrieb mit demselben  $Q$ , STZ 301,6 m üNN., Berechnung im Maßstab 1:15, Geschwindigkeitsvektoren, Detail

## 8.4 Zulaufkaverne Variantenstudie - hydraulische Verluste

Dieses Kapitel beschreibt die Variantenstudie zur hydraulischen Optimierung der Zulaufkaverne.

Die Vorgangsweise der 3D-numerischen Simulation wird in Kapitel 6.2 beschrieben.

Folgende Lastfallsituationen werden untersucht:

- Turbinen-LF SBW bei Stauziel
- Turbinen-LF SBW bei Absenkziel
- Turbinen-LF MUW bei Stauziel
- Turbinen-LF MUW bei Absenkziel
- Pump-LF SBW bei Stauziel
- Pump-LF SBW bei Absenkziel
- Turbinen MUW – Pumpen SBW – LF bei Stauziel
- Turbinen MUW – Pumpen SBW – LF bei Absenkziel

Da der Stoßverlust in der Zulaufkaverne querschnittsabhängig ist, wird bei den Berechnungen zwischen Stauziel und Absenkziel unterschieden.

Abbildung 66 bis Abbildung 69 zeigen die Untersuchten Geometrie-Varianten für die Zulaufkaverne. Abbildung 68 und Abbildung 69 zeigen jene Variante, mit den signifikant geringsten hydraulischen Verlusten in den Untersuchungen und ist daher aus Sicht von TU Graz der Ausführungsvorschlag.

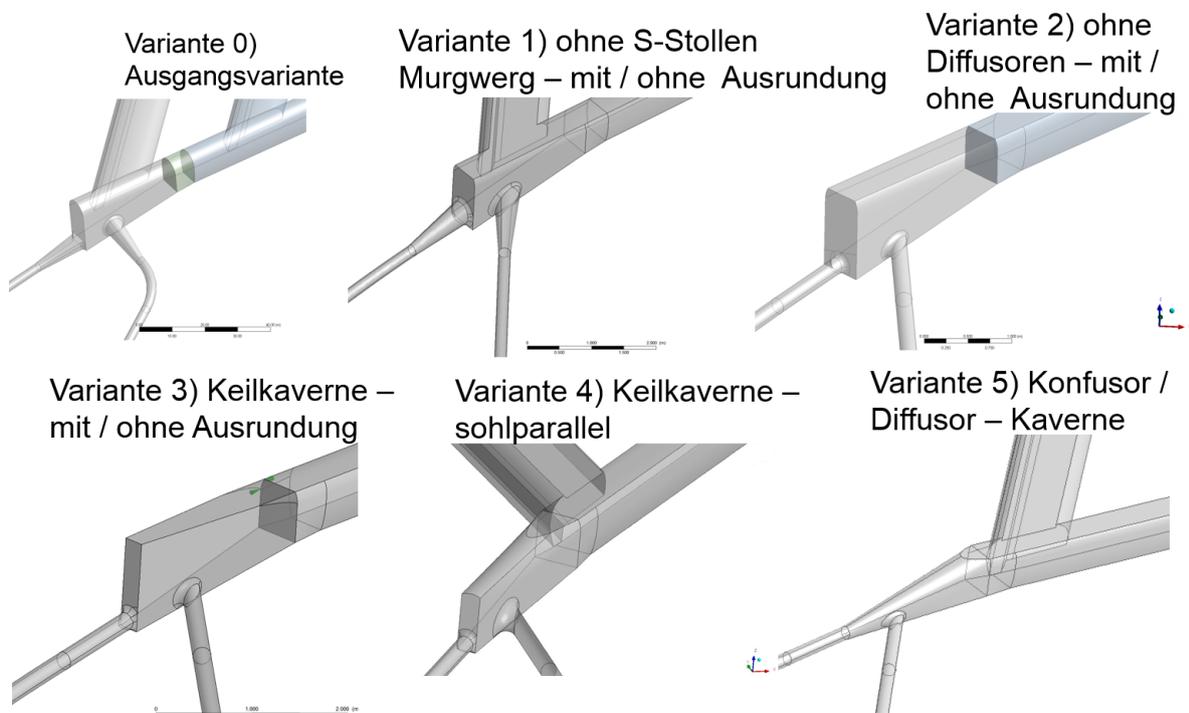
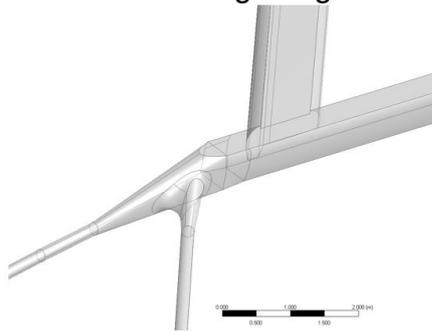
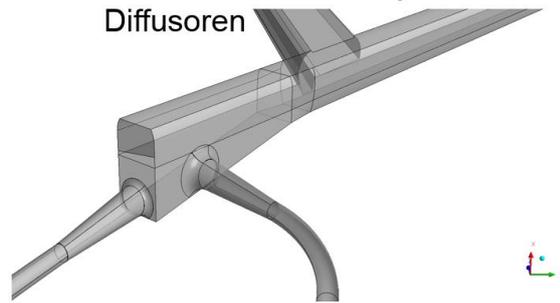


Abbildung 66: Darstellung der untersuchten Zulaufkavernengeometrien, Variante 0 (Ausgangsvariante), Variante 1 bis Variante 5

Variante 6) Konfusor / Diffusor – Kaverne  
– 4 m Ausrundung Murgstollen



Variante 7) Stollenanbindung wie Variante 0 – achsensymmetrische Diffusoren



Variante 8) Verbindung Murg und SB als T-Stück im Stollen



Abbildung 67: Darstellung der untersuchten Zulaufkavernengeometrien, Variante 6 bis Variante 8

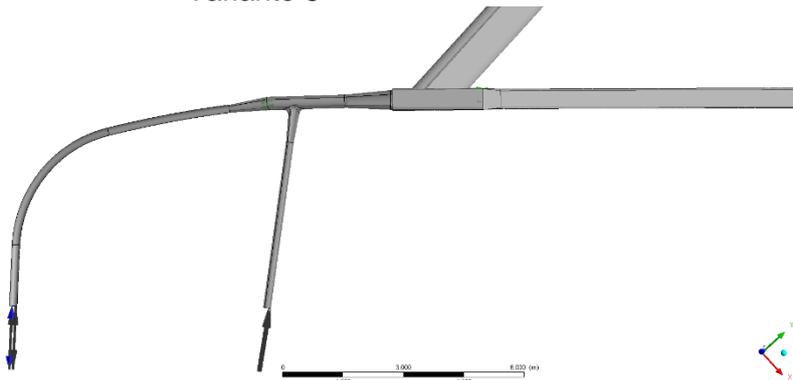


Abbildung 68: Darstellung der vorgeschlagenen Ausführungsgeometrie des Zulaufkavernenbereichs, Variante 9, Grundriss

In Variante 8 werden in der Aufweitung des SBW Stollens vor dem Zusammenschluss mit dem MUW Stollen Leitwände vorgesehen um die Strömung zu richten (Abbildung 82). Die Simulationen haben aber gezeigt, dass diese nicht notwendig sind. Auch sind die Nebenstollen in Variante 8 in Richtung des Ausgleichsbecken Forbach verschoben. Auch diese Maßnahme ist nicht notwendig. Daraus wird die Variante 9 als Ausführungsvorschlag generiert.

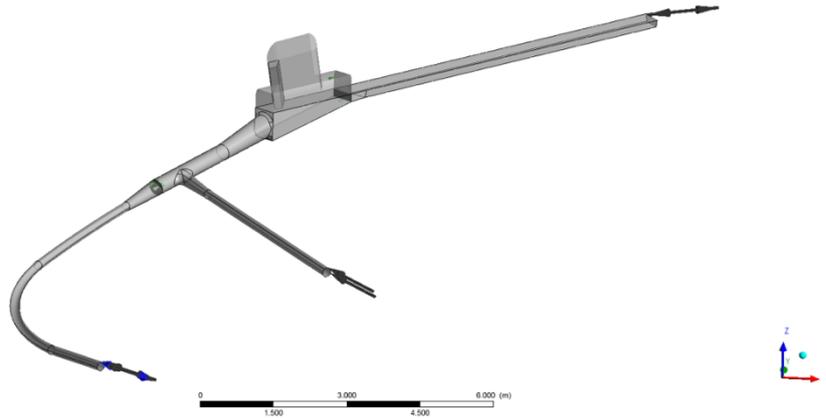


Abbildung 69: Darstellung der vorgeschlagenen Ausführungsgeometrie des Zulaufkavernenbereichs, Variante 9 ohne Leitbauwerke, Schrägansicht

In der Variantenstudie zeigt sich, dass eine Ausrundung bzw. eine Bellmouthausführung am Anschluss der Diffusoren an die Zulaufkaverne zielführend ist. In den 3D-numerischen Untersuchungen werden konstante Ausrundungen mit 1,0 m bis 4,0 m Radius angesetzt.

#### 8.4.1 Variante 1 – MUW Stollen direkt

Variante 1 beschreibt eine Geometrievariation des Druckstollens MUW. Dieser wird in dieser Untersuchung direkt von den Maschinen in die Zulaufkaverne geführt (Abbildung 70). Bei dieser Variante sind die Diffusoren für MUW und SBW mit identer Geometrie vorgesehen.

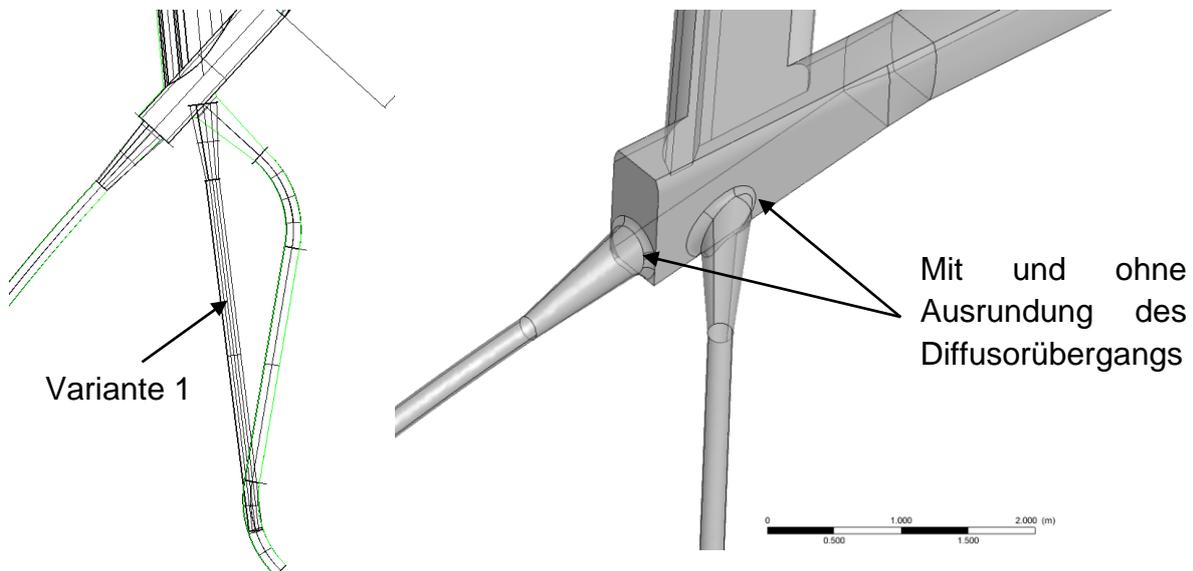


Abbildung 70: Variante 1 – Geometrieänderung des Zulaufstollens MUW

Tabelle 11 zeigt die Ergebnisse der hydraulischen Verlustbeiwertberechnung, und vergleicht diese auch mit der Ausgangsvariante 0.

Tabelle 11: Ermittelte Verlustbeiwerte mit Vergleich Variante 1 zur Ausgangsvariante 0, mit Ausrundung von 1 m Radius am Übergang der Diffusoren in die Zulaufkaverne

Berechnungen an Modellgröße 1:15 - Winkel MUW Zulauf - mit Ausrundung - VARIANTE 1 - 2 Diffusoren								
	Absenziel				Stauziel			
	mit Ausrundung				mit Ausrundung			
	Turb SBW	Turb MUW	Pump SBW- MUW Turb	Pump SBW	Turb SBW	Turb MUW	Pump SBW- MUW Turb	Pump SBW
$\zeta$ -Wert [-] bezogen auf Stollen $D_i=2.9$ [m]	1.17	1.06	2.10	2.44	1.04	0.85	2.17	2.78
$Q_A$ m <sup>3</sup> /s	18	16.5	11.2	11.20	18	16.5	11.2	11.20
A Stollen [m <sup>2</sup> ]	6.61	6.61	6.61	6.61	6.61	6.61	6.61	6.61
$v_A$ [m/s]	2.73	2.50	1.70	1.70	2.73	2.50	1.70	1.70
h <sub>v</sub> Prototyp [mWS]	<b>0.44</b>	<b>0.34</b>	<b>0.31</b>	<b>0.36</b>	<b>0.39</b>	<b>0.27</b>	<b>0.32</b>	<b>0.41</b>
Vergleich mit Ausgangsvariante 0	<b>82%</b>	<b>80%</b>	<b>120%</b>	<b>104%</b>	<b>118%</b>	<b>99%</b>	<b>94%</b>	<b>101%</b>

Tabelle 12 zeigt die gemittelten Ergebnisse der hydraulischen Simulation. Es zeigt sich, dass die Gesamtverluste mit 97% gegenüber der Ausgangsvariante leicht verbessert werden. Die Strömungsumlenkung für den Turbinenbetrieb MUW und Pumpbetrieb SBW generiert aufgrund des spitzeren Winkels mit 104% gegenüber der Ausgangsvariante höhere Verluste.

Tabelle 12: Ermittelte Verlustbeiwerte mit Vergleich Variante 1 zur Ausgangsvariante 0, gemittelte Werte in den selben Strömungsrichtungen

gemittelte Verluste VARIANTE 1 rund		
Verluste gesamt gemittelt	Verlust Turbinen MUW und SBW gemittelt	Verlust Pumpe SBW Werk gemittelt
rund	rund	rund
[m]	[m]	[m]
0.35	0.36	0.35
Abweichung Variante 0	Abweichung Variante 0	Abweichung Variante 0
97%	92%	104%

Tabelle 13 zeigt die Ergebnisse der hydraulischen Simulation für die Variante 1 ohne Ausrundung der Übergänge der Diffusoren in die Zulaufkaverne. Die Werte weichen nur leicht von den Verlusten mit Ausrundung ab.

Tabelle 13: Ermittelte Verlustbeiwerte mit Vergleich Variante 1 zur Ausgangsvariante 0, gemittelte Werte in den selben Strömungsrichtungen – ohne Ausrundung

<b>Berechnungen an Modellgröße 1:15 - Winkel MUW Zulauf - ohne Ausrundung - VARIANTE 1 - 2 Diffusoren</b>								
Absenkziel				Stauziel				
ohne Ausrundung				ohne Ausrundung				
Turb SBW	Turb MUW	Pump SBW-MUW Turb	Pump SBW	Turb SBW	Turb MUW	Pump SBW-MUW Turb	Pump SBW	
1.15	0.95	2.18	2.45	1.03	0.88	2.11	2.80	z-Wert [-] bezogen auf Stollen $D_i=2.9$ [m]
18	16.5	11.2	11.20	18.00	16.50	11.20	11.20	$Q_A$ [m <sup>3</sup> /s]
6.61	6.61	6.61	6.61	6.61	6.61	6.61	6.61	A Stollen [m <sup>2</sup> ]
2.73	2.50	1.70	1.70	2.73	2.50	1.70	1.70	$v_A$ [m/s]
0.44	0.30	0.32	0.36	0.39	0.28	0.31	0.41	h <sub>v</sub> Prototyp [mWS]
<b>80%</b>	<b>71%</b>	<b>125%</b>	<b>104%</b>	<b>117%</b>	<b>102%</b>	<b>91%</b>	<b>102%</b>	Vergleich mit Ausgangsvariante 0

### 8.4.2 Variante 2 – MUW Stollen direkt ohne Diffusoren

Variante 2 beschreibt eine Geometrievariation des Druckstollens MUW und des Druckstollens SBW. Der Stollen MUW wird in dieser Untersuchung wie in Variante 1 direkt von den Maschinen in die Zulaufkaverne geführt (Abbildung 71 und Abbildung 72). Bei dieser Variante sind keine Diffusoren für die Übergänge der MUW und SBW Druckstollen vorgesehen.

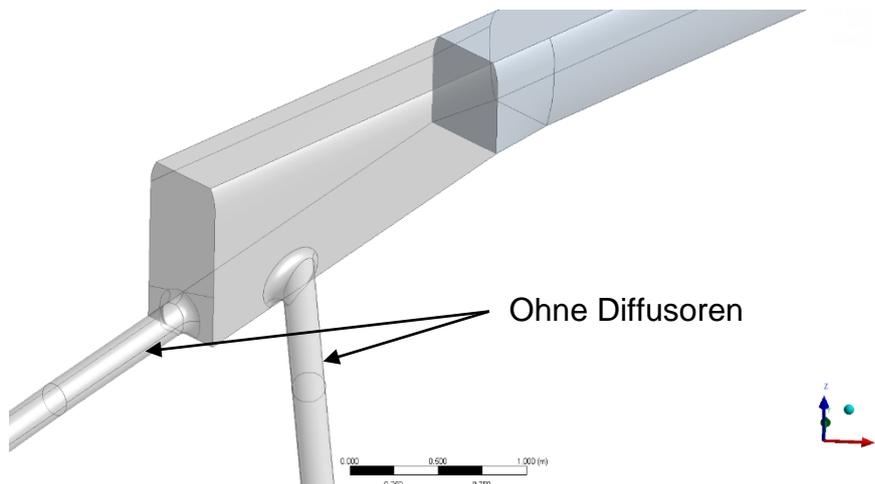


Abbildung 71: Variante 2 – Geometrieänderung des Zulaufstollens MUW, ohne Diffusoren, mit ausgerundetem (Radius 1 m) Übergang zur Zulaufkaverne, Schrägansicht

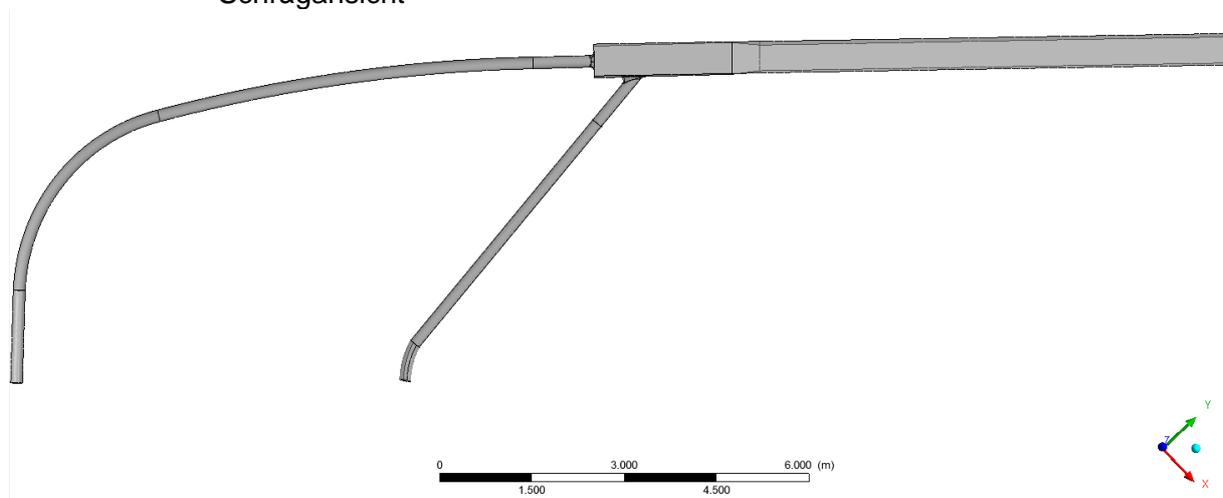


Abbildung 72: Variante 2 – Geometrieänderung des Zulaufstollens MUW, ohne Diffusoren, mit ausgerundetem (Radius 1 m) Übergang zur Zulaufkaverne, Draufsicht

Tabelle 14 zeigt die Ergebnisse der hydraulischen Verlustbeiwertberechnung, und vergleicht diese auch mit der Ausgangsvariante 0.

Tabelle 14: Ermittelte Verlustbeiwerte mit Vergleich Variante 2 zur Ausgangsvariante 0, mit Ausrundung von 1,0 m Radius

Berechnungen an Modellgröße 1:15 - Winkel MUW Zulauf - mit Ausrundung - VARIANTE 2 - ohne Diffusor								
	Absenzziel				Stauziel			
	mit Ausrundung				mit Ausrundung			
	Turb SBW	Turb MUW	Pump SBW- MUW Turb	Pump SBW	Turb SBW	Turb MUW	Pump SBW- MUW Turb	Pump SBW
$\zeta$ -Wert [-] bezogen auf Stollen $D_i=2.9$ [m]	1.26	1.06	1.95	2.74	1.25	1.06	2.00	2.74
$Q_A$ m <sup>3</sup> /s	18	16.5	11.2	11.20	18	16.5	11.2	11.20
A Stollen [m <sup>2</sup> ]	6.61	6.61	6.61	6.61	6.61	6.61	6.61	6.61
$v_A$ [m/s]	2.73	2.50	1.70	1.70	2.73	2.50	1.70	1.70
h <sub>v</sub> Prototyp [mWS]	<b>0.48</b>	<b>0.34</b>	<b>0.29</b>	<b>0.40</b>	<b>0.47</b>	<b>0.34</b>	<b>0.29</b>	<b>0.40</b>
Vergleich mit Ausgangsvariante 0	<b>88%</b>	<b>80%</b>	<b>111%</b>	<b>117%</b>	<b>142%</b>	<b>123%</b>	<b>87%</b>	<b>100%</b>

Tabelle 15 zeigt die Ergebnisse der 3D-numerische Simulation ohne ausgerundeten Anschluss der Druckstollen an die Zulaufkaverne der Variantenuntersuchung 2– Es zeigt sich auch hier, dass eine Ausrundung des Übergangs hydraulisch zielführend ist.

Tabelle 15: Ermittelte Verlustbeiwerte mit Vergleich Variante 2 zur Ausgangsvariante 0, gemittelte Werte in den selben Strömungsrichtungen

gemittelte Verluste VARIANTE 2 - ohne Diffusoren		
Verluste gesamt gemittelt	Verlust Turbinen MUW und SBW gemittelt	Verlust Pumpe SBW-Werk gemittelt
rund	rund	rund
[m]	[m]	[m]
0.38	0.41	0.35
Abweichung	Abweichung	Abweichung
Variante 0	Variante 0	Variante 0
103%	103%	103%

Tabelle 16 zeigt die Ergebnisse der hydraulischen Simulation für die Variante 2 ohne Ausrundung der Übergänge der Diffusoren in die Zulaufkaverne. Die Werte liegen durchwegs über 100 % bzw. weisen dadurch höhere hydraulische Verluste gegenüber der Ausgangsvariante auf.

Tabelle 16: Ermittelte Verlustbeiwerte mit Vergleich Variante 2 zur Ausgangsvariante 0, gemittelte Werte in den selben Strömungsrichtungen – ohne Ausrundung

<b>Berechnungen an Modellgröße 1:15 - Winkel MUW Zulauf - ohne Ausrundung - VARIANTE 2 - ohne Diffusor</b>								
Absenkziel				Stauziel				
ohne Ausrundung				ohne Ausrundung				
Turb SBW	Turb MUW	Pump SBW-MUW Turb	Pump SBW	Turb SBW	Turb MUW	Pump SBW-MUW Turb	Pump SBW	
1.58	1.39	2.58	2.86	1.23	1.044	2.5	2.52	z-Wert [-] bezogen auf Stollen Di=2.9 [m]
18.00	16.50	11.20	11.20	18	16.5	11.2	11.20	Q <sub>A</sub> [m³/s]
6.61	6.61	6.61	6.61	6.61	6.61	6.61	6.61	A Stollen [m²]
2.73	2.50	1.70	1.70	2.73	2.50	1.70	1.70	v <sub>A</sub> [m/s]
0.60	0.44	0.38	0.42	0.47	0.33	0.37	0.37	h <sub>v</sub> Prototyp [mWS]
<b>110%</b>	<b>105%</b>	<b>147%</b>	<b>122%</b>	<b>140%</b>	<b>121%</b>	<b>108%</b>	<b>92%</b>	Vergleich mit Ausgangsvariante 0

### 8.4.3 Variante 3 – Keilkaverne Ulmen ohne Diffusoren

Variante 3 beschreibt eine Geometrievariation des Druckstollens MUW und des Druckstollens SBW. Der Stollen MUW wird in dieser Untersuchung wie in Variante 1 direkt von den Maschinen in die Zulaufkaverne geführt (Abbildung 71 und Abbildung 72). Bei dieser Variante werden keine Diffusoren für MUW und SBW vorgesehen, auch ist zusätzlich eine konisch zusammenlaufende Zulaufkaverne vorgesehen. Tabelle 17 zeigt die Ergebnisse der hydraulischen Verlustbeiwertberechnung, und vergleicht diese auch mit der Ausgangsvariante 0. Tabelle 18 zeigt die gemittelten Werte welche für den Gesamtvergleich der Varianten herangezogen wird. Für die Turbinenlastfälle ist diese Variante im Mittel günstiger – der hydraulische Kurschluss zwischen MUW Turbinenbetrieb und SBW Pumpbetrieb ist mit 1% Abweichung leicht günstiger. Diese Variante bietet aus hydraulischen Aspekten der Ausgangsvariante leichte Vorteile, wird aber nicht als Ausbauvariante empfohlen.

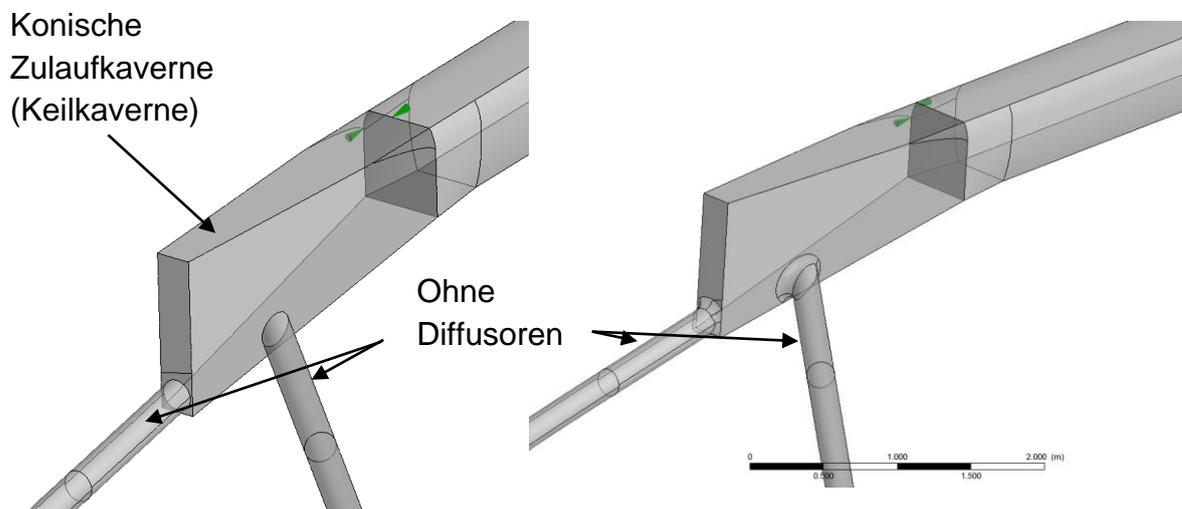


Abbildung 73: Variante 3 – Geometrieänderung des Zulaufstollens MUW, ohne Diffusoren, Keilkaverne mit konischer Kaverne ohne und mit abgerundetem Übergang zur Zulaufkaverne (Radius 1 m), Schrägansicht

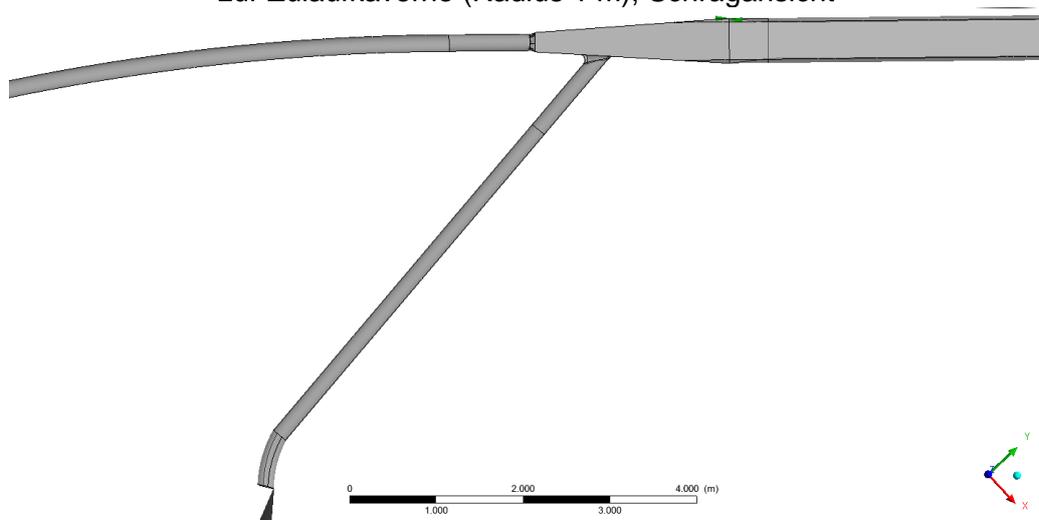


Abbildung 74: Variante 3 – Geometrieänderung des Zulaufstollens MUW, ohne Diffusoren, Keilkaverne mit konischen Ulmen mit abgerundetem Übergang zur Zulaufkaverne (Radius 1 m), Draufsicht

Tabelle 17: Ermittelte Verlustbeiwerte mit Vergleich Variante 2 zur Ausgangsvariante 0, mit Ausrundung von 1,0 m Radius

Berechnungen an Modellgröße 1:15 - Winkel MUW Zulauf - mit Ausrundung - VARIANTE 3- ohne Diffusor - Keilkaverne - Verschiebung der Nebenstollen								
	Absenziel mit Ausrundung				Stauziel mit Ausrundung			
	Turb SBW	Turb MUW	Pump SBW- MUW Turb	Pump SBW	Turb SBW	Turb MUW	Pump SBW- MUW Turb	Pump SBW
	$\zeta$ -Wert [-] bezogen auf Stollen $D_i=2.9$ [m]	0.89	0.75	1.90	2.34	1.22	1.03	2.34
$Q_A$ m <sup>3</sup> /s	18	16.5	11.2	11.20	18	16.5	11.2	11.20
A Stollen [m <sup>2</sup> ]	6.61	6.61	6.61	6.61	6.61	6.61	6.61	6.61
$v_A$ [m/s]	2.73	2.50	1.70	1.70	2.73	2.50	1.70	1.70
$h_v$ Prototyp [mWS]	<b>0.34</b>	<b>0.24</b>	<b>0.28</b>	<b>0.34</b>	<b>0.46</b>	<b>0.33</b>	<b>0.34</b>	<b>0.37</b>
Vergleich mit Ausgangsvariante 0	<b>62%</b>	<b>56%</b>	<b>109%</b>	<b>100%</b>	<b>139%</b>	<b>120%</b>	<b>101%</b>	<b>91%</b>

Tabelle 18: Ermittelte Verlustbeiwerte mit Vergleich Variante 3 zur Ausgangsvariante 0, gemittelte Werte in den selben Strömungsrichtungen

gemittelte Verluste VARIANTE 3- ohne Diffusor - Keilkaverne - Verschiebung der Nebenstollen		
Verluste gesamt gemittelt	Verlust Turbinen MUW und SBW gemittelt	Verlust Pumpe SBW Werk gemittelt
rund	rund	rund
[m]	[m]	[m]
<b>0.337</b>	0.341	<b>0.333</b>
Abweichung	Abweichung	Abweichung
Variante 0	Variante 0	Variante 0
93%	87%	99%

Tabelle 19 zeigt die Ergebnisse der hydraulischen Simulation für die Variante 3 ohne Ausrundung der Übergänge der Diffusoren in die Zulaufkaverne. Die Werte liegen zum Teil signifikant über 100 % bzw. weisen dadurch höhere hydraulische Verluste gegenüber der Ausgangsvariante auf.

Tabelle 19: Ermittelte Verlustbeiwerte mit Vergleich Variante 2 zur Ausgangsvariante 0, gemittelte Werte in den selben Strömungsrichtungen – ohne Ausrundung

<b>Berechnungen an Modellgröße 1:15 - Winkel MUW Zulauf - ohne Ausrundung - VARIANTE 3- ohne Diffusor - Keilkaverne - Verschiebung der Nebenstollen</b>								
Absenziel				Stauziel				
ohne Ausrundung				ohne Ausrundung				
Turb SBW	Turb MUW	Pump SBW- MUW Turb	Pump SBW	Turb SBW	Turb MUW	Pump SBW- MUW Turb	Pump SBW	
1.12	1.06	3.04	2.42	1.49	1.39	2.97	2.79	z-Wert [-] bezogen auf Stollen Di=2.9 [m]
18	16.5	11.2	11.20	18.00	16.50	11.20	11.20	Q <sub>A</sub> [m <sup>3</sup> /s]
6.61	6.61	6.61	6.61	6.61	6.61	6.61	6.61	A Stollen [m <sup>2</sup> ]
2.73	2.50	1.70	1.70	2.73	2.50	1.70	1.70	v <sub>A</sub> [m/s]
0.42	0.34	0.45	0.35	0.56	0.44	0.44	0.41	h <sub>v</sub> Prototyp [mWS]
<b>78%</b>	<b>80%</b>	<b>174%</b>	<b>103%</b>	<b>169%</b>	<b>162%</b>	<b>129%</b>	<b>102%</b>	Vergleich mit Ausgangsvariante 0

#### 8.4.4 Variante 4 – Keilkaverne Ulmen und Firste ohne Diffusoren

Variante 4 beschreibt eine Geometrievariation des Druckstollens MUW und des Druckstollens SBW. Der Stollen MUW wird in dieser Untersuchung wie in Variante 1 direkt von den Maschinen in die Zulaufkaverne geführt (Abbildung 75) Bei dieser Variante werden keine Diffusoren für MUW und SBW vorgesehen, auch sind zusätzlich konischen Ulmen sowie eine sich konisch verjüngende Firste vorgesehen. Die Anbindung des Druckstollens MUW wird mit 4 m Radius ausgerundet. Tabelle 20 zeigt die Ergebnisse der hydraulischen Verlustbeiwertberechnung, und vergleicht diese auch mit der Ausgangsvariante 0. Tabelle 21 zeigt die gemittelten Werte welche für den Gesamtvergleich der Varianten herangezogen wird. Für die Turbinenlastfälle ist diese Variante im Mittel ungünstiger. Für den hydraulischen Kurzschluss werden dieselben hydraulischen Verluste wie für die Ausgangsvariante ermittelt. Daher ist dies Variante aus hydraulischen Aspekten nicht zu empfehlen.

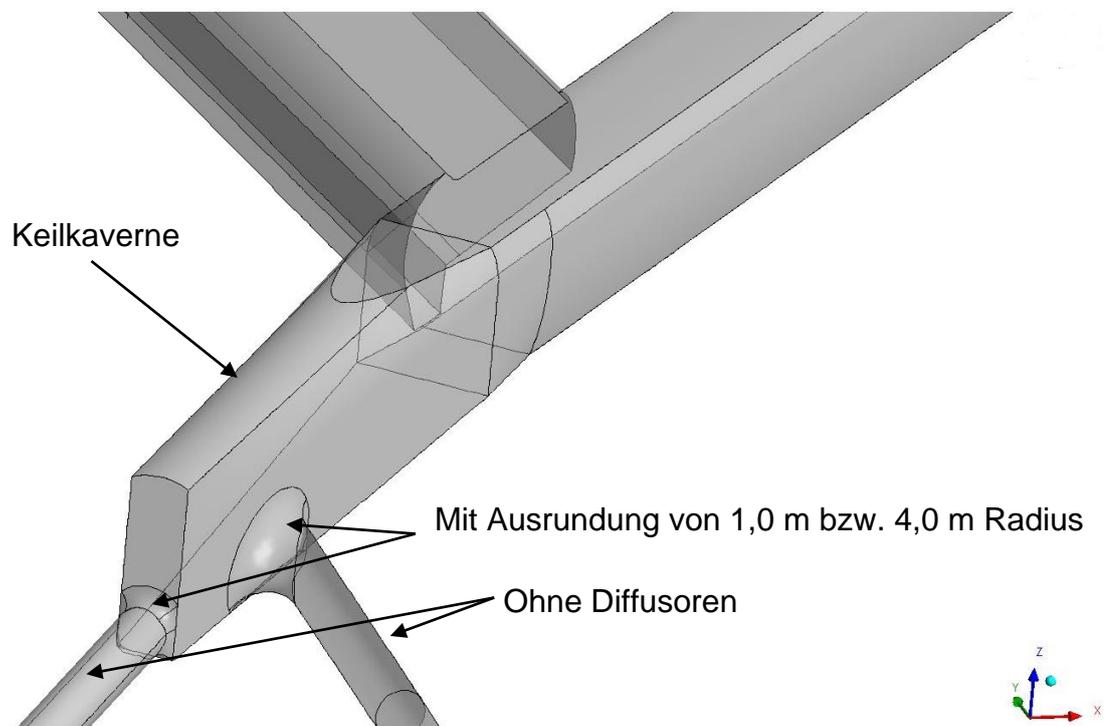


Abbildung 75: Variante 4 – Geometrieänderung des Zulaufstollens MUW, ohne Diffusoren, Keilkaverne mit konischen Ulmen und konischer Firste, sowie zurückverschobenem 1. Nebenstollen mit ausgerundetem Übergang zur Zulaufkaverne (Radius 1 m – SBW und Radius 4 m MUW), Schrägansicht

Tabelle 20: Ermittelte Verlustbeiwerte mit Vergleich Variante 2 zur Ausgangsvariante 0, mit Ausrundung

Berechnungen an Modellgröße 1:15 - Winkel MUW Zulauf - mit Ausrundung - VARIANTE 4- ohne Diffusor - Keilkaverne schräg -Verschiebung der Nebentollen								
	Absenziel				Stauziel			
	mit Ausrundung				mit Ausrundung			
	Turb SBW	Turb MUW	Pump SBW- MUW Turb	Pump SBW	Turb SBW	Turb MUW	Pump SBW- MUW Turb	Pump SBW
$\zeta$ -Wert [-] bezogen auf Stollen $D_i=2.9$ [m]	1.33	1.17	1.80	2.53	1.24	1.03	1.93	2.85
$Q_A$ m <sup>3</sup> /s	18	16.5	11.2	11.20	18	16.5	11.2	11.20
A Stollen [m <sup>2</sup> ]	6.61	6.61	6.61	6.61	6.61	6.61	6.61	6.61
$v_A$ [m/s]	2.73	2.50	1.70	1.70	2.73	2.50	1.70	1.70
hv Prototyp [mWS]	<b>0.50</b>	<b>0.37</b>	<b>0.26</b>	<b>0.37</b>	<b>0.47</b>	<b>0.33</b>	<b>0.28</b>	<b>0.42</b>
Vergleich mit Ausgangsvariante 0	<b>93%</b>	<b>88%</b>	<b>103%</b>	<b>108%</b>	<b>141%</b>	<b>120%</b>	<b>84%</b>	<b>104%</b>

Tabelle 21 Ermittelte Verlustbeiwerte mit Vergleich Variante 4 zur Ausgangsvariante 0, gemittelte Werte in den selben Strömungsrichtungen

gemittelte Verluste VARIANTE 4- ohne Diffusor - Keilkaverne schräg - Verschiebung Nebentollen		
Verluste gesamt gemittelt	Verlust Turbinen MUW und SBW gemittelt	Verlust Pumpe SBW-Werk gemittelt
rund	rund	rund
[m]	[m]	[m]
<b>0.38</b>	<b>0.42</b>	<b>0.33</b>
Abweichung	Abweichung	Abweichung
Variante 0	Variante 0	Variante 0
<b>103%</b>	<b>106%</b>	<b>100%</b>

### 8.4.5 Variante 5 – Diffusorkaverne

Variante 5 beschreibt eine Geometrievariation des Druckstollens MUW und des Druckstollens SBW. Der Stollen MUW wird in dieser Untersuchung wie in Variante 1 direkt von den Maschinen in die Zulaufkaverne geführt (Abbildung 78) Bei dieser Variante wird die gesamte Kaverne als Diffusor vorgesehen. Die Anbindung des Druckstollens MUW wird mit 2 m Radius ausgerundet.

Tabelle 22 zeigt die Ergebnisse der hydraulischen Verlustbeiwertberechnung, und vergleicht diese auch mit der Ausgangsvariante 0. Tabelle 23 zeigt die gemittelten Werte welche für den Gesamtvergleich der Varianten herangezogen wird. Lediglich für die Turbinenfälle, insbesondere für den Turbinenfall SBW zeigt diese Variante günstige Strömungseigenschaften auf. Für den hydraulischen Kurzschluss werden signifikant höhere Verluste als für die Ausgangsvariante generiert. Daher ist dies Variante aus hydraulischen Aspekten nicht zu empfehlen.

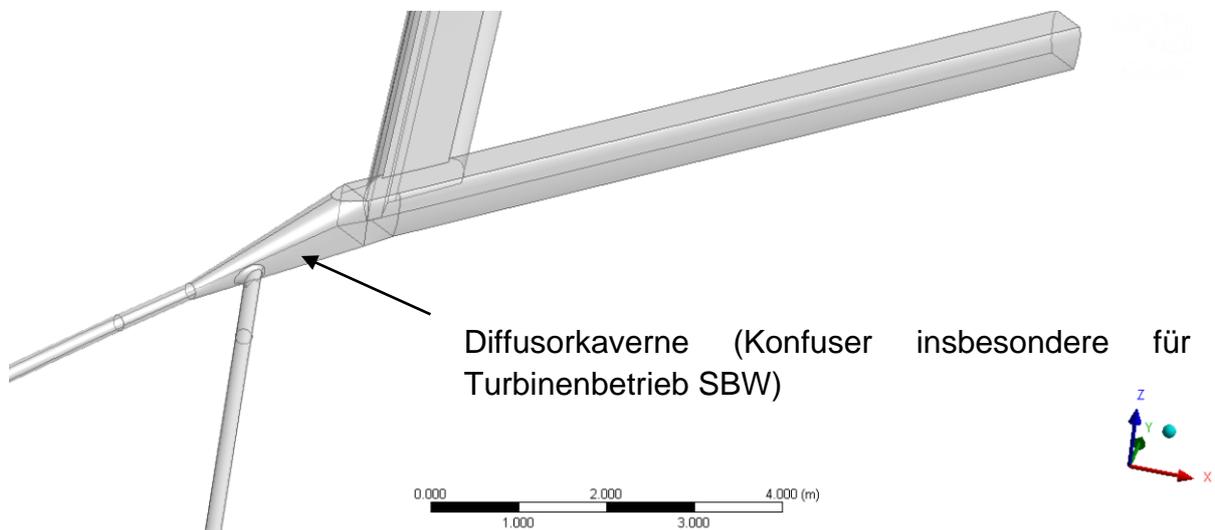


Abbildung 76: Variante 5 – Geometrieänderung des Zulaufstollens MUW, ohne Diffusoren, Diffusorkaverne, sowie zurückverschobenem 1. Nebentollen mit ausgerundetem Übergang zur Zulaufkaverne (Radius 2 m MUW), STZ, Schrägansicht

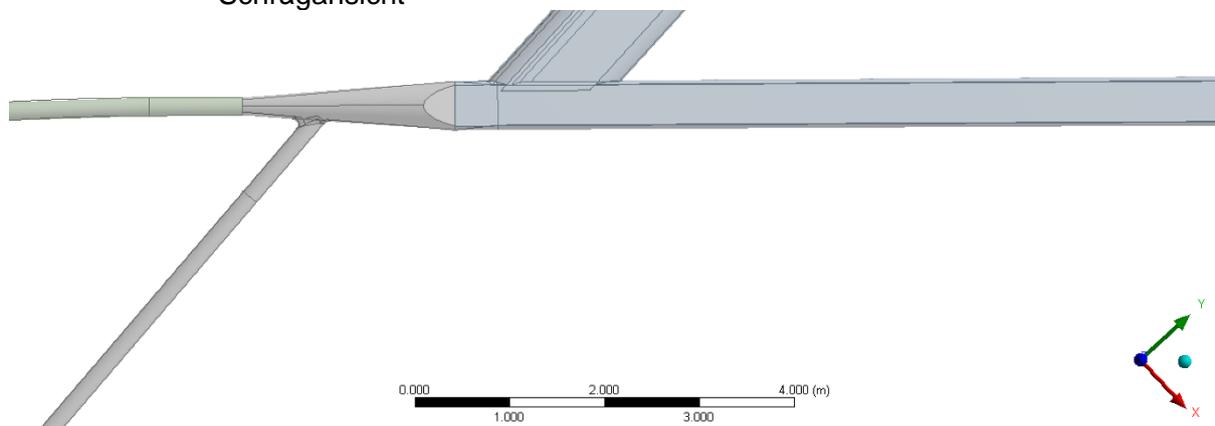


Abbildung 77: Variante 5 – Geometrieänderung des Zulaufstollens MUW, ohne Diffusoren, Diffusorkaverne, sowie zurückverschobenem 1. Nebentollen mit ausgerundetem Übergang zur Zulaufkaverne (Radius 2 m MUW), STZ, Draufsicht

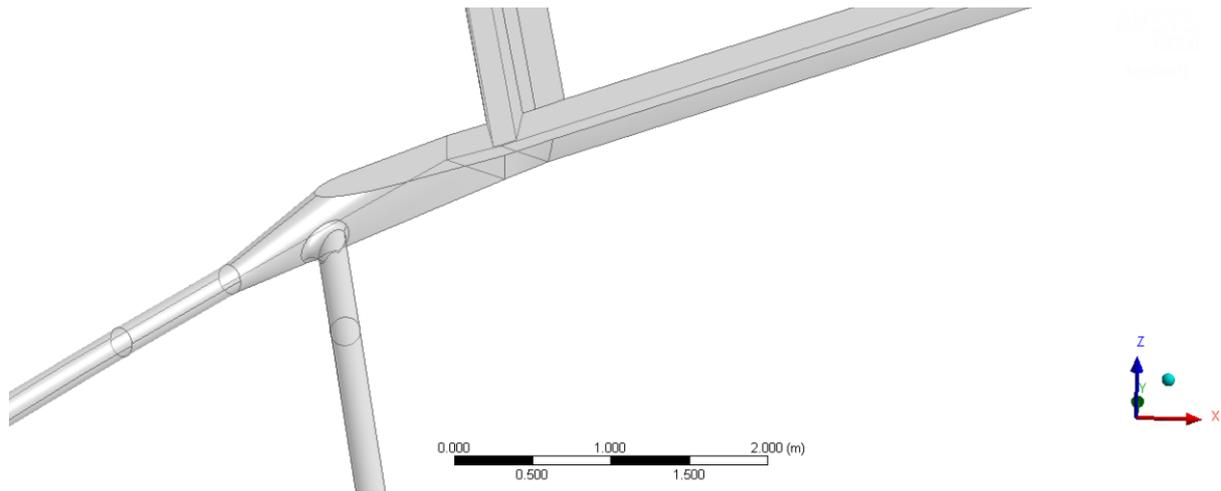


Abbildung 78: Variante 5 – Geometrieänderung des Zulaufstollens MUW, ohne Diffusoren, Diffusorkaverne, sowie zurückverschobenem 1. Nebentollen mit ausgerundetem Übergang zur Zulaufkaverne (Radius 2 m MUW), ASZ, Schrägsicht

Tabelle 22: Ermittelte Verlustbeiwerte mit Vergleich Variante 5 zur Ausgangsvariante 0, mit Ausrundung des Übergangs

Berechnungen an Modellgröße 1:15 - Winkel MUW Zulauf - mit Ausrundung - VARIANTE 5- ohne Diffusor - Diffusorkaverne - Verschiebung der Nebentollen								
	Absenziel mit Ausrundung				Stauziel mit Ausrundung			
	Turb SBW	Turb MUW	Pump SBW- MUW Turb	Pump SBW	Turb SBW	Turb MUW	Pump SBW- MUW Turb	Pump SBW
	$\zeta$ -Wert [-] bezogen auf Stollen $D_i=2.9$ [m]	0.79	0.78	3.32	2.27	1.08	1.00	3.00
$Q_A$ m <sup>3</sup> /s	18	16.5	11.2	11.20	18	16.5	11.2	11.20
A Stollen [m <sup>2</sup> ]	6.61	6.61	6.61	6.61	6.61	6.61	6.61	6.61
$v_A$ [m/s]	2.73	2.50	1.70	1.70	2.73	2.50	1.70	1.70
h <sub>v</sub> Prototyp [mWS]	<b>0.30</b>	<b>0.25</b>	<b>0.49</b>	<b>0.33</b>	<b>0.41</b>	<b>0.32</b>	<b>0.44</b>	<b>0.41</b>
Vergleich mit Ausgangsvariante 0	<b>55%</b>	<b>59%</b>	<b>190%</b>	<b>97%</b>	<b>123%</b>	<b>116%</b>	<b>130%</b>	<b>103%</b>

Tabelle 23: Ermittelte Verlustbeiwerte mit Vergleich Variante 5 zur Ausgangsvariante 0, gemittelte Werte in den selben Strömungsrichtungen

gemittelte Verluste VARIANTE 5 - Diffusorkaverne - Verschiebung NST		
Verluste gesamt gemittelt	Verlust Turbinen MUW und SBW gemittelt	Verlust Pumpe SBW-Werk gemittelt
	rund	rund
[m]	[m]	[m]
0.37	0.32	0.42
Abweichung	Abweichung	Abweichung
Variante 0	Variante 0	Variante 0
101%	81%	125%

### 8.4.6 Variante 5b – Diffusorkaverne mit MUW Radius 4 m

Variante 5b beschreibt eine Geometrievariante entsprechend Variante 5 mit ausgeprägtere Ausrundung des MUW Stollens Anschlusses von Radius mit 4 m (Abbildung 79).

Tabelle 23 zeigt die Ergebnisse der hydraulischen Verlustbeiwertberechnung, und vergleicht diese auch mit der Ausgangsvariante 0. Tabelle 24 zeigt die gemittelten Werte welche für den Gesamtvergleich der Varianten herangezogen wird. Lediglich für die Turbinenfälle, insbesondere für den Turbinenfall SBW zeigt diese Variante günstige Strömungseigenschaften auf. Für den hydraulischen Kurzschluss werden höhere Verluste generiert. Daher ist dies Variante aus hydraulischen Aspekten nicht zu empfehlen.

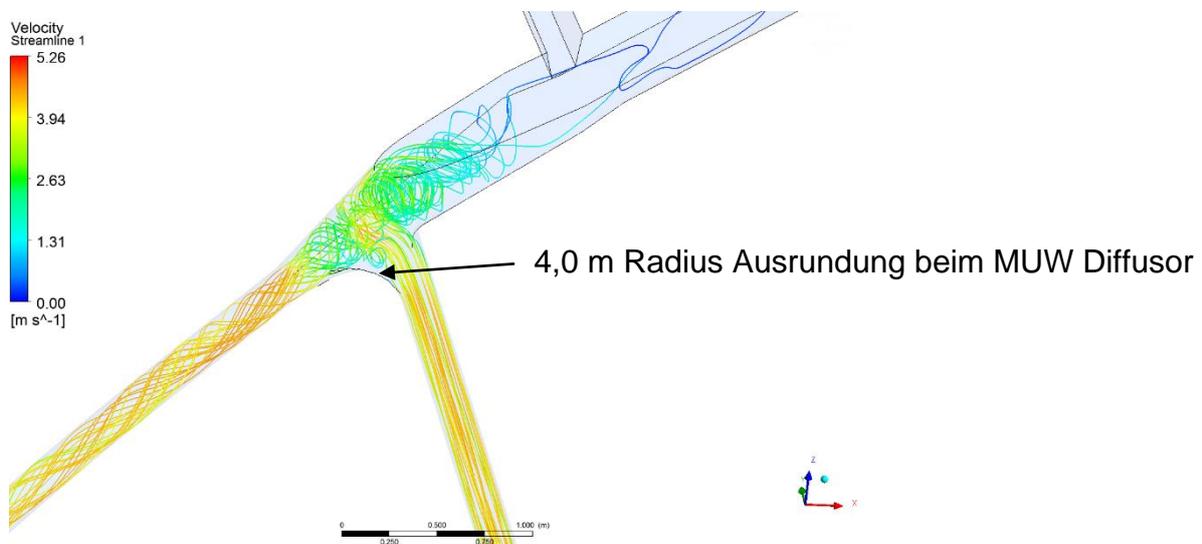


Abbildung 79: Variante 5b –Geometrievariante wie 5 mit 4 m Radius Anschluss des MUW Stollens, LF Pumpe SB und MUW Turbinenbetrieb ASZ Variante 5b

Tabelle 24: Ermittelte Verlustbeiwerte mit Vergleich Variante 5b zur Ausgangsvariante 0, mit 4,0 m Radius Ausrundung des MUW Diffusors an die Zulaufkaverne

<b>Berechnungen an Modellgröße 1:15 - Winkel MUW Zulauf - mit Ausrundung - VARIANTE 5b- Diffusorkaverne - Verschiebung der Nebentollen - 4 m Ausrundung MUW</b>								
	Absenziel				Stauziel			
	mit Ausrundung				mit Ausrundung			
	Turb SBW	Turb MUW	Pump SBW- MUW Turb	Pump SBW	Turb SBW	Turb MUW	Pump SBW- MUW Turb	Pump SBW
$\zeta$ -Wert [-] bezogen auf Stollen $D_i=2.9$ [m]	0.85	0.78	2.62	2.26	1.17	1.00	2.59	2.84
$Q_A$ m <sup>3</sup> /s	18	16.5	11.2	11.20	18	16.5	11.2	11.20
A Stollen [m <sup>2</sup> ]	6.61	6.61	6.61	6.61	6.61	6.61	6.61	6.61
$v_A$ [m/s]	2.73	2.50	1.70	1.70	2.73	2.50	1.70	1.70
h <sub>v</sub> Prototyp [mWS]	<b>0.32</b>	<b>0.25</b>	<b>0.38</b>	<b>0.33</b>	<b>0.44</b>	<b>0.32</b>	<b>0.38</b>	<b>0.42</b>
Vergleich mit Ausgangsvariante 0	<b>59%</b>	<b>59%</b>	<b>150%</b>	<b>96%</b>	<b>133%</b>	<b>116%</b>	<b>112%</b>	<b>104%</b>

Tabelle 25: Ermittelte Verlustbeiwerte mit Vergleich Variante 5b zur Ausgangsvariante 0, gemittelte Werte in den selben Strömungsrichtungen

<b>gemittelte Verluste VARIANTE 5b- Diffusorkaverne - Verschiebung NST - 4 m Ausrundung</b>		
Verluste gesamt gemittelt	Verlust Turbinen MUW und SBW gemittelt	Verlust Pumpe SBW-Werk gemittelt
	rund	rund
[m]	[m]	[m]
0.36	0.33	0.38
Abweichung	Abweichung	Abweichung
Variante 0	Variante 0	Variante 0
98%	85%	113%

### 8.4.7 Variante 6 – Diffusorkaverne mit MUW Stollen Anpassung

Variante 6 beschreibt wie Variante 5 eine Diffusorkaverne, allerdings mit verschobenem MUW Druckstollen in Richtung Ausgleichsbecken Forbach und größerer Ausrundung des Übergangs in die Diffusorkaverne mit einem Radius von 4 m (Abbildung 80). Tabelle 26 zeigt die Ergebnisse der hydraulischen Verlustbeiwertberechnung, und vergleicht diese auch mit der Ausgangsvariante 0.

Tabelle 27 zeigt die gemittelten Werte welche für den Gesamtvergleich der Varianten herangezogen wird. Die gemittelten Verluste sind etwas günstiger als in der Ausgangsvariante 0. Da aber die Variante 9 als Ausführungsvariante empfohlen wird ist diese Variante 7 nur als Vergleich angeführt und wird nicht für die Weiterverfolgung empfohlen.

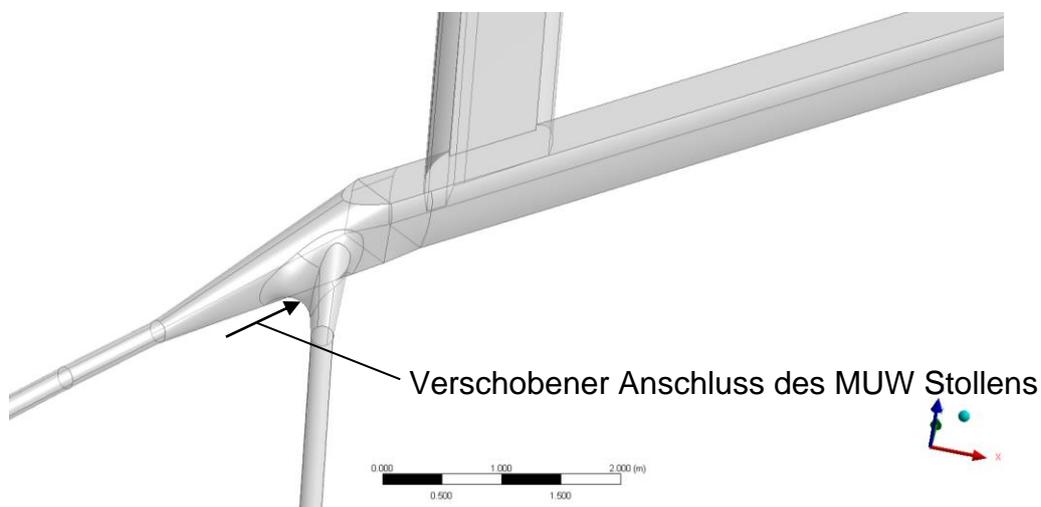


Abbildung 80: Variante 6 – Diffusorkaverne mit verschobenen MUW Stollen und Anschlussradius von 4 m für den MUW Stollen, STZ, Schrägsicht

Tabelle 26: Ermittelte Verlustbeiwerte mit Vergleich Variante 6 zur Ausgangsvariante 0

Berechnungen an Modellgröße 1:15 - Winkel MUW Zulauf - mit Ausrundung - VARIANTE 6- mit Diffusor MUW - Diffusorkaverne - Verschiebung der Nebestollen - 4m Ausrundung MUW								
	Absenzziel				Stauziel			
	mit Ausrundung				mit Ausrundung			
	Turb SBW	Turb MUW	Pump SBW- MUW Turb	Pump SBW	Turb SBW	Turb MUW	Pump SBW- MUW Turb	Pump SBW
$\zeta$ -Wert [-] bezogen auf Stollen $D_i=2.9$ [m]	1.14	1.01	1.70	2.47	1.02	0.80	1.73	2.85
$Q_A$ m <sup>3</sup> /s	18	16.5	11.2	11.20	18	16.5	11.2	11.20
A Stollen [m <sup>2</sup> ]	6.61	6.61	6.61	6.61	6.61	6.61	6.61	6.61
$v_A$ [m/s]	2.73	2.50	1.70	1.70	2.73	2.50	1.70	1.70
h <sub>v</sub> Prototyp [mWS]	0.43	0.32	0.25	0.36	0.39	0.25	0.25	0.42
Vergleich mit Ausgangsvariante 0	80%	76%	97%	105%	116%	93%	75%	104%

Tabelle 27: Ermittelte Verlustbeiwerte mit Vergleich Variante 6 zur Ausgangsvariante 0, gemittelte Werte in den selben Strömungsrichtungen

gemittelte Verluste VARIANTE 6- mit Diffusor MUW - Diffusorkaverne - Verschiebung NST - 4 m Ausrundung		
Verluste gesamt gemittelt	Verlust Turbinen MUW und SBW gemittelt	Verlust Pumpe SBW-Werk gemittelt
rund	rund	rund
[m]	[m]	[m]
0.33	0.35	0.32
Abweichung	Abweichung	Abweichung
Variante 0	Variante 0	Variante 0
92%	89%	96%

### 8.4.8 Variante 7 – Achsensymmetrische Diffusoren

Variante 7 beschreibt eine Geometrie wie die Ausgangsvariante 0 mit dem Unterschied, dass die Diffusoren achsensymmetrisch angeordnet sind und für die Stollen MUW und SBW ident sind, mit dem Unterschied dass die Ausrundung des SBW Anschlusses mit 1 m Radius und die des MUW Anschlusses mit 2 m Radius ausgeführt ist (Abbildung 81). Auch wird im Unterschied zu Variante 0 der 1. Nebenstollen nach hinten verschoben. Tabelle 28 zeigt die Ergebnisse der hydraulischen Verlustbeiwertberechnung, und vergleicht diese auch mit der Ausgangsvariante 0.

Tabelle 29 zeigt die gemittelten Werte welche für den Gesamtvergleich der Varianten herangezogen wird. Lediglich für die Turbinenfälle, insbesondere für den Turbinenfall SBW zeigt diese Variante günstige Strömungseigenschaften auf. Für den hydraulischen Kurzschluss werden höhere Verluste generiert. Daher ist dies Variante aus hydraulischen Aspekten nicht zu empfehlen.

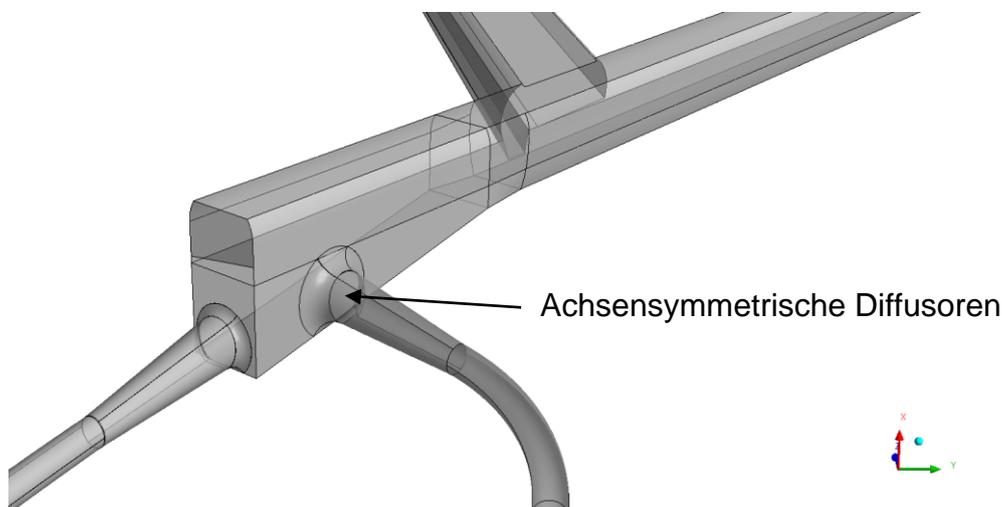


Abbildung 81: Variante 7 – achsensymmetrische Diffusoren mit Anschlussradius von 1,0 m für den SBW Stollen und 2,0 m für den MUW Stollen, STZ, Schrägsicht

Tabelle 28: Ermittelte Verlustbeiwerte mit Vergleich Variante 7 zur Ausgangsvariante 0

<b>Berechnungen an Modellgröße 1:15 - Winkel MUW Zulauf - mit Ausrundung - VARIANTE 7- mit Diffusor MUW - Diffusorkaverne - Verschiebung der Nebenstollen - 2m Ausrundung MUW</b>								
	Absenziel				Stauziel			
	mit Ausrundung				mit Ausrundung			
	Turb SBW	Turb MUW	Pump SBW- MUW Turb	Pump SBW	Turb SBW	Turb MUW	Pump SBW- MUW Turb	Pump SBW
$\zeta$ -Wert [-] bezogen auf Stollen $D_i=2.9$ [m]	1.09	1.03	1.68	2.46	0.95	0.92	1.82	2.78
$Q_A$ m <sup>3</sup> /s	18	16.5	11.2	11.20	18	16.5	11.2	11.20
A Stollen [m <sup>2</sup> ]	6.61	6.61	6.61	6.61	6.61	6.61	6.61	6.61
$v_A$ [m/s]	2.73	2.50	1.70	1.70	2.73	2.50	1.70	1.70
h <sub>v</sub> Prototyp [mWS]	<b>0.41</b>	<b>0.33</b>	<b>0.25</b>	<b>0.36</b>	<b>0.36</b>	<b>0.29</b>	<b>0.27</b>	<b>0.41</b>
Vergleich mit Ausgangsvariante 0	<b>76%</b>	<b>77%</b>	<b>96%</b>	<b>105%</b>	<b>108%</b>	<b>107%</b>	<b>79%</b>	<b>101%</b>

Tabelle 29: Ermittelte Verlustbeiwerte mit Vergleich Variante 7 zur Ausgangsvariante 0, gemittelte Werte in den selben Strömungsrichtungen

<b>gemittelte Verluste VARIANTE 7- mit Diffusor MUW - Diffusorkaverne - Verschiebung NST - 2m Ausrundung MUW</b>		
<b>Verluste gesamt gemittelt</b>	<b>Verlust Turbinen MUW und SBW gemittelt</b>	<b>Verlust Pumpe SBW-Werk gemittelt</b>
rund	rund	rund
[m]	[m]	[m]
0.33	0.35	0.32
Abweichung	Abweichung	Abweichung
Variante 0	Variante 0	Variante 0
92%	89%	96%

### 8.4.9 Variante 8 – Stollenanbindung MUW und SBW

Variante 8 beschreibt den Geometrievorschlagn einer direkten Stollenverbindung des MUW Stollens mit dem SBW Stollen (Abbildung 82). Der MUW Stollen wird geradlinig und ohne S-Kurve noch vor der Zulaufkaverne mit dem SBW Stollen mittels eines T-Stücks zusammengeführt. Dabei wird sowohl die Länge des MUW Stollens kürzer, als auch dessen Neigung vermindert gegenüber der Variante 0. Beide Druckstollen werden mittels baugleichem Diffusor auf einen Stollen mit Innendurchmesser von 5 m aufgeweitet. Dieser Stollenabschnitt ist insgesamt etwa 29 m lang und wird mittels eines etwa 17 m langen Diffusors von 5 m auf 7,5 m aufgeweitet. Die Ausrundung des Übergangs des MUW Diffusors auf den Verbindungsstollen beträgt 2 m. In dieser Variante 8 ist der 1. Nebenstollen wie in den vorhergehenden Varianten nach hinten verschoben worden. Hierbei wird der erste Nebenstollen erst dort angesetzt wo der ursprünglich der zweite vorgesehen war (Abbildung 83). Zusätzlich werden mit SBW Diffusor zwei Leitwände vorgesehen zur Strömungsberuhigung. Tabelle 30 zeigt die Ergebnisse der hydraulischen Verlustbeiwertberechnung, und vergleicht diese auch mit der Ausgangsvariante 0.

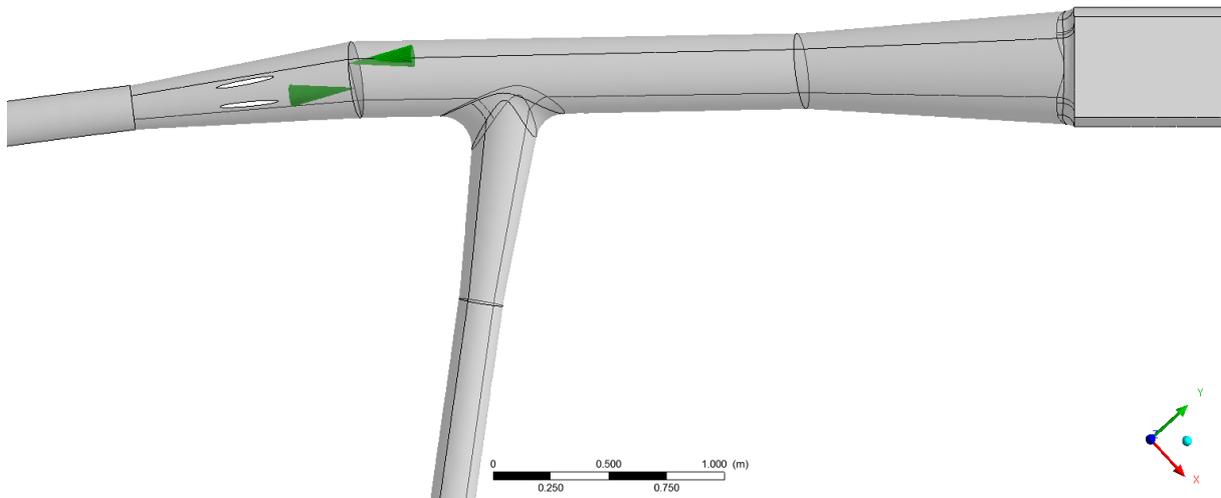


Abbildung 82: Variante 8 – T-Stückanbindung des SBW Stollens mit dem MUW Stollen mit Leitbauwerken im Diffusor und Übergangsstollen in den Diffusor vor der Zulaufkaverne

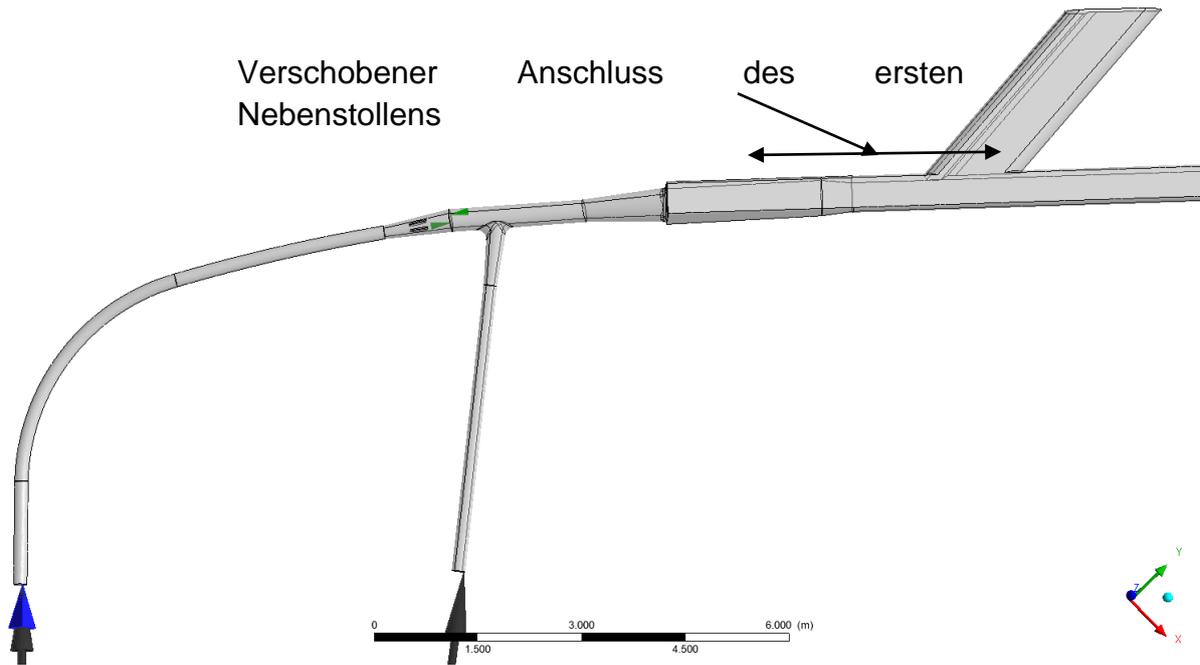


Abbildung 83: Variante 8 – T-Stückerbindung des SBW Stollens mit dem MUW Stollen mit Leitbauwerken im Diffusor und Übergangsstollen in den Diffusor vor der Zulaufkaverne

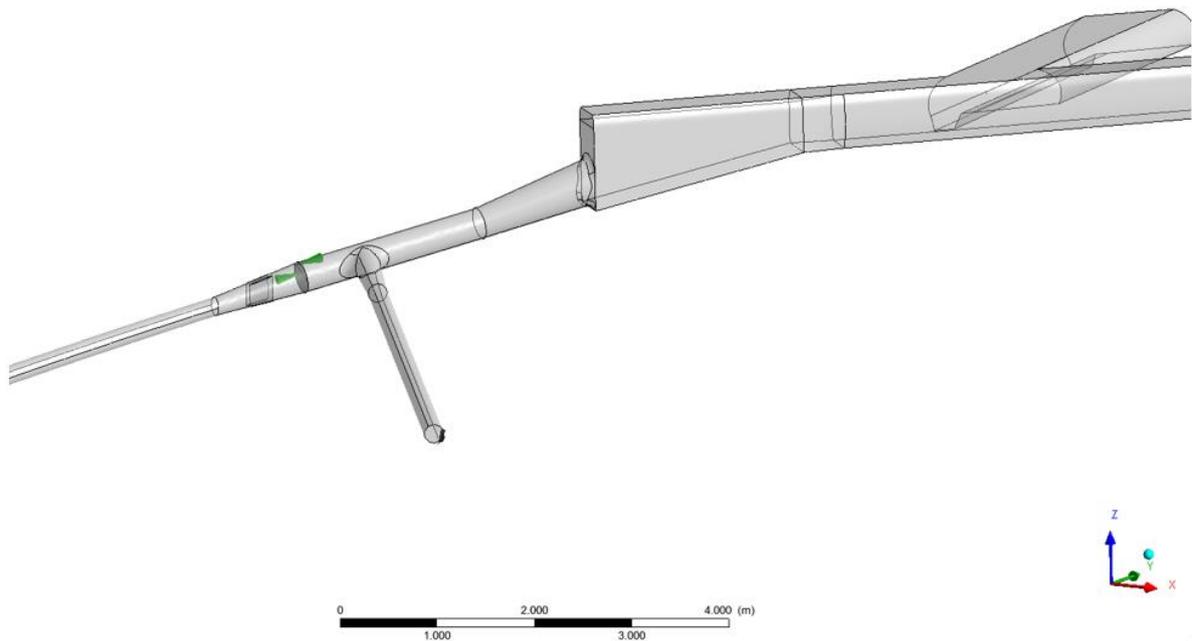


Abbildung 84: Variante 8 – T-Stückerbindung des SBW Stollens mit dem MUW Stollen mit Leitbauwerken im Diffusor und Übergangsstollen in den Diffusor vor der Zulaufkaverne

Tabelle 30: Ermittelte Verlustbeiwerte mit Vergleich Variante 8 zur Ausgangsvariante 0

Berechnungen an Modellgröße 1:15 - Winkel MUW Zulauf - mit Ausrundung - VARIANTE 8- mit T-Stück im Stollen SBW								
	Absenzziel				Stauziel			
	mit Ausrundung				mit Ausrundung			
	Turb SBW	Turb MUW	Pump SBW- MUW Turb	Pump SBW	Turb SBW	Turb MUW	Pump SBW- MUW Turb	Pump SBW
$\zeta$ -Wert [-] bezogen auf Stollen $D_i=2.9$ [m]	0.9	0.65	1.17	2.24	0.83	0.52	1.89	2.88
$Q_A$ m <sup>3</sup> /s	18	16.5	11.2	11.20	18	16.5	11.2	11.20
A Stollen [m <sup>2</sup> ]	6.61	6.61	6.61	6.61	6.61	6.61	6.61	6.61
$v_A$ [m/s]	2.73	2.50	1.70	1.70	2.73	2.50	1.70	1.70
h <sub>v</sub> Prototyp [mWS]	<b>0.34</b>	<b>0.21</b>	<b>0.17</b>	<b>0.33</b>	<b>0.31</b>	<b>0.17</b>	<b>0.28</b>	<b>0.42</b>
Vergleich mit Ausgangsvariante 0	<b>63%</b>	<b>49%</b>	<b>67%</b>	<b>95%</b>	<b>94%</b>	<b>60%</b>	<b>82%</b>	<b>105%</b>

Tabelle 31: Ermittelte Verlustbeiwerte mit Vergleich Variante 8 zur Ausgangsvariante 0, gemittelte Werte in den selben Strömungsrichtungen

gemittelte Verluste VARIANTE 8- mit T-Stück im Stollen SBW		
Verluste gesamt gemittelt	Verlust Turbinen MUW und	Verlust Pumpe SBW-Werk
rund	rund	rund
[m]	[m]	[m]
0.28	0.26	0.30
Abweichung	Abweichung	Abweichung
Variante 0	Variante 0	Variante 0
76%	65%	89%

### 8.4.9.1 Variante 9 – Ausführungsvorschlag Zulaufkaverne Druckstollen

Variante 9 beschreibt den Geometrievorschlagn einer direkten Stollenverbindung des MUW Stollens mit dem SBW Stollen (Abbildung 85). Der MUW Stollen wird geradlinig und ohne S-Kurve noch vor der Zulaufkaverne mit dem SBW Stollen mittels eines T-Stücks zusammengeführt. Dabei wird sowohl die Länge des MUW Stollens kürzer als auch dessen Neigung vermindert gegenüber der Variante 0. Beide Druckstollen werden mittels baugleichem Diffusor auf einen Stollen mit Innendurchmesser von 5 m aufgeweitet. Dieser Stollenabschnitt ist insgesamt etwa 29 m lang und wird mittels eines etwa 17 langen Diffusors von 5,0 m auf 7,5 m aufgeweitet. Die Ausrundung des Übergangs des MUW Diffusors auf den Verbindungsstollen beträgt 2 m. In dieser Variante 9 wird der 1. Nebenstollen wie in der Ausgangsgeometrie angeordnet.

Tabelle 32 zeigt die gemittelten Werte welche für den Gesamtvergleich der Varianten herangezogen wird. Aufgrund der wesentlich günstigeren hydraulischen Verlustbeiwerte im Vergleich zur Ausgangsvariante wird dieser Geometrievorschlagn der Variante 9 als Ausführungsvorschlag empfohlen.

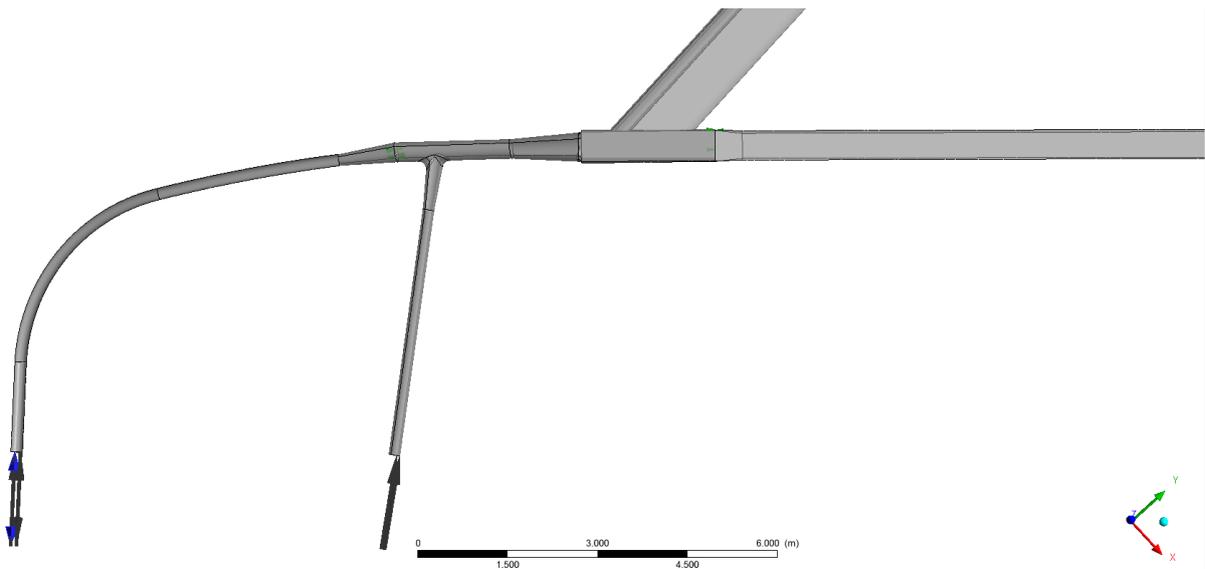


Abbildung 85: Variante 9 - Ausführungsvorschlag – T-Stückanbindung des SBW Stollens mit dem MUW Stollens mit Leitbauwerken im Diffusor und Übergangsstollen in den Diffusor vor der Zulaufkaverne,

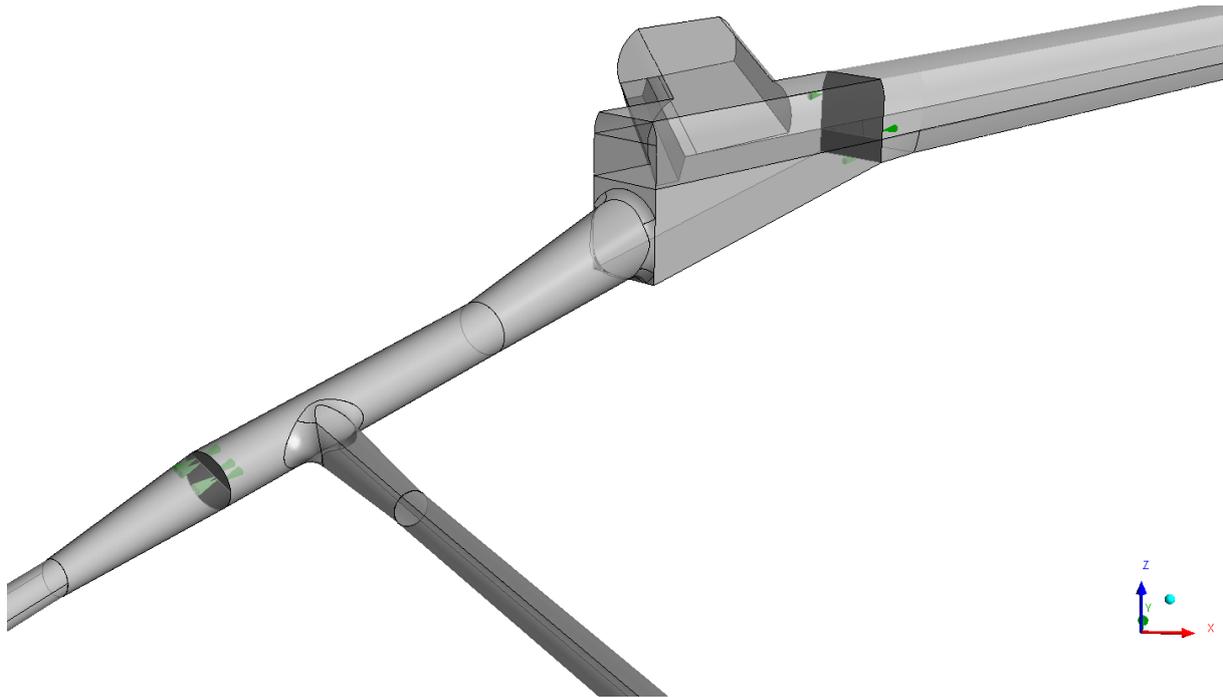


Abbildung 86: Variante 9 - Ausführungsvorschlag – Stückenbindung des SBW Stollens mit dem MUW Stollen und Übergangsstollen in den Diffusor vor der Zulaufkaverne

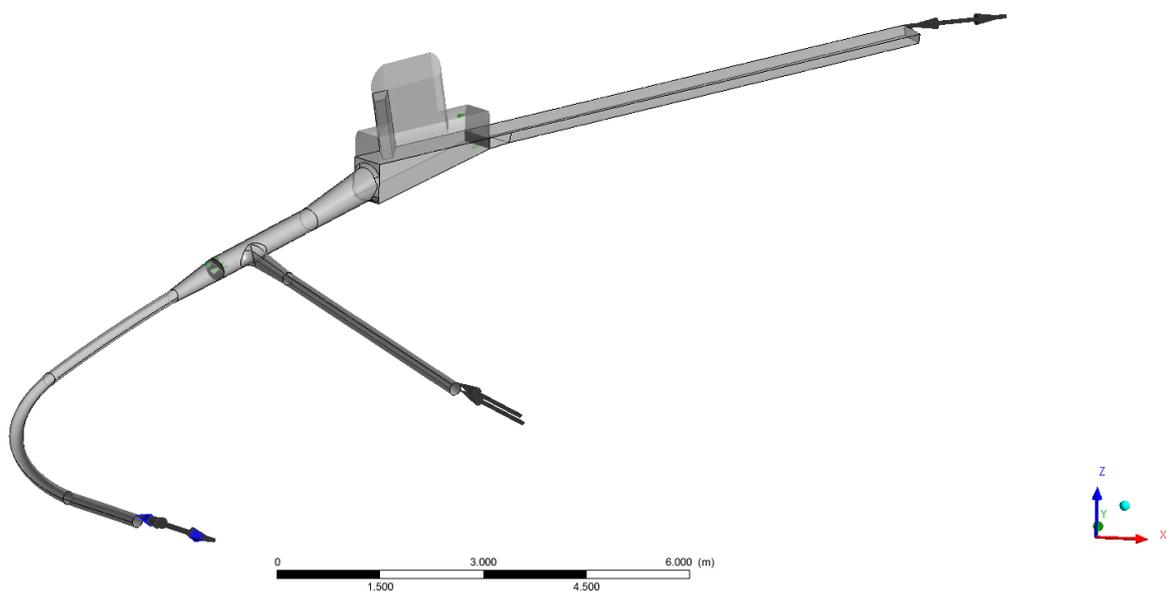


Abbildung 87: Variante 9 – Ausführungsvorschlag - T-Stückenbindung des SBW Stollens mit dem MUW Stollen und Übergangsstollen in den Diffusor vor der Zulaufkaverne

Abbildung 88 zeigt die Abmessungen der Ausführungsvariante Variante 9 welche sich durch die angegebenen Maße von der Ausgangsgeometrie unterscheiden. Die Stollenführung des SBW Druckstollens ist entsprechend der Ausgangsgeometrie vorgesehen.

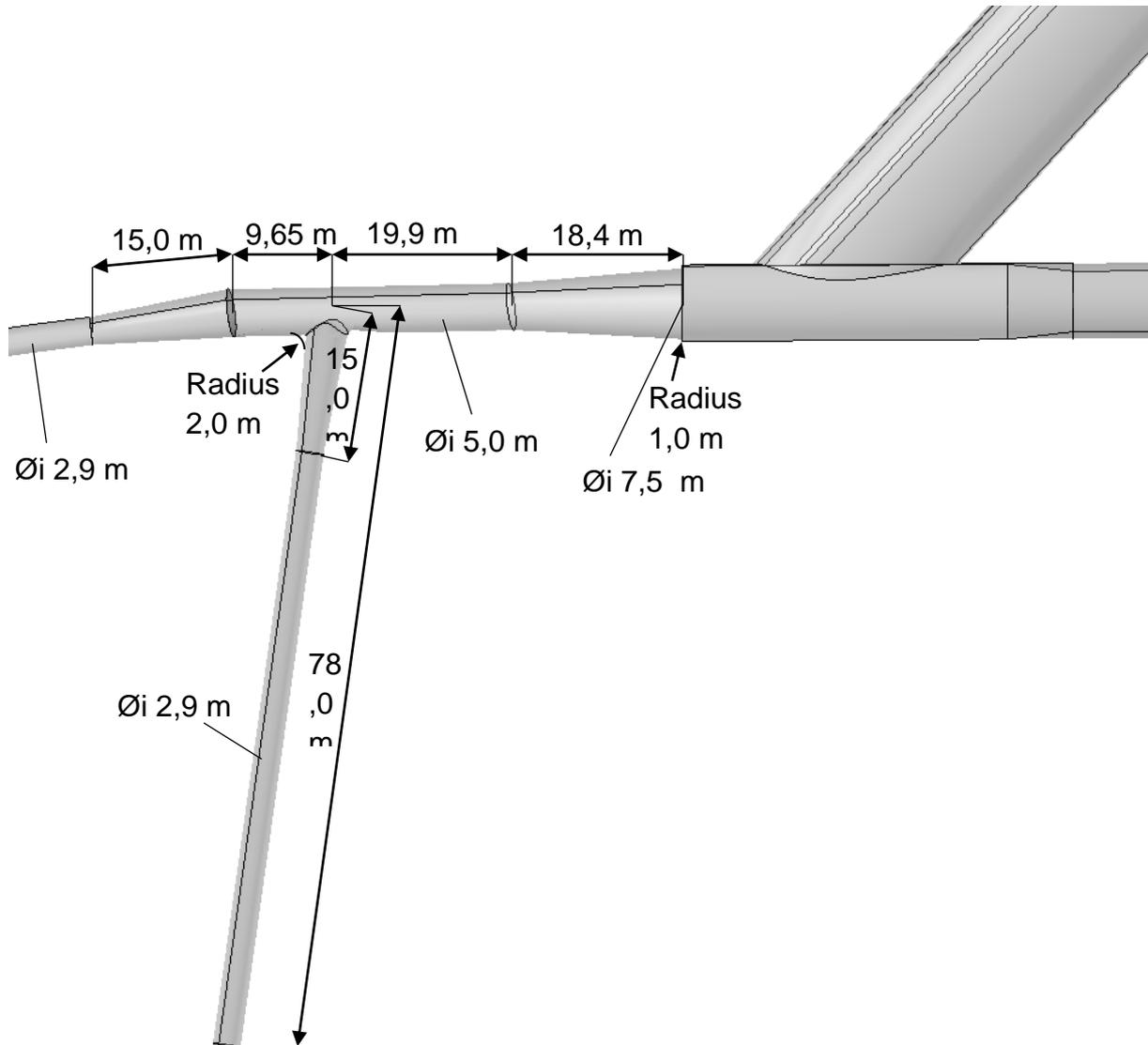


Abbildung 88: Variante 9 – Ausführungsvorschlag T-Stückerbindung des SBW Stollens mit dem MUW Stollen und Übergangsstollen in den Diffusor vor der Zulaufkaverne, Draufsicht bemaßt

Tabelle 32: Ermittelte Verlustbeiwerte mit Vergleich Variante 9 Ausführungsvorschlag zur Ausgangsvariante 0

Berechnungen an Modellgröße 1:15 - Winkel MUW Zulauf - mit Ausrundung - VARIANTE 9- mit T-Stück im Stollen SBW - ohne Leitbauwerke								
	Absenziel				Stauziel			
	mit Ausrundung				mit Ausrundung			
	Turb SBW	Turb MUW	Pump SBW- MUW Turb	Pump SBW	Turb SBW	Turb MUW	Pump SBW- MUW Turb	Pump SBW
$\zeta$ -Wert [-] bezogen auf Stollen $D_i=2.9$ [m]	0.53	0.9	1.23	2.00	0.80	0.52	1.80	2.86
$Q_A$ m <sup>3</sup> /s	18	16.5	11.2	11.20	18	16.5	11.2	11.20
A Stollen [m <sup>2</sup> ]	6.61	6.61	6.61	6.61	6.61	6.61	6.61	6.61
$v_A$ [m/s]	2.73	2.50	1.70	1.70	2.73	2.50	1.70	1.70
h <sub>v</sub> Prototyp [mWS]	<b>0.20</b>	<b>0.29</b>	<b>0.18</b>	<b>0.29</b>	<b>0.30</b>	<b>0.17</b>	<b>0.26</b>	<b>0.42</b>
Vergleich mit Ausgangsvariante 0	<b>37%</b>	<b>68%</b>	<b>70%</b>	<b>85%</b>	<b>91%</b>	<b>60%</b>	<b>78%</b>	<b>104%</b>

Tabelle 33: Ermittelte Verlustbeiwerte mit Vergleich Variante 9 Ausführungsvorschlag zur Ausgangsvariante 0, gemittelte Werte in den selben Strömungsrichtungen

gemittelte Verluste VARIANTE 9- ohne Leitbauwerk mit T-Stück im Stollen SBW		
Verluste gesamt gemittelt	Verlust Turbinen MUW und SBW gemittelt	Verlust Pumpe SBW-Werk gemittelt
rund	rund	rund
[m]	[m]	[m]
0.26	0.24	0.29
Abweichung	Abweichung	Abweichung
Variante 0	Variante 0	Variante 0
73%	61%	86%

Anmerkung: Die kontinuierlichen Verluste (Reibungsverluste) sind nicht berücksichtigt. Aufgrund der kürzeren Druckstollenlänge und der Aufweitungen, welche insbesondere bei Teilbetrieb zu geringeren Reibungsverlusten führen, ist die Variante 9 auch diesbezüglich als hydraulisch günstiger als die Ausgangsgeometrie.

Folgend wird die Variante 9 Ausführungsvorschlag stichwortartig zusammengefasst:

- Länge Druckstollen MUW V9: 77 m (20 m weniger wie Variante 0)
- Neigung Druckstollen MUW V9: 14,7 % (Variante 0: 21,2%)
- Lokale hydraulische Verluste 27% (gesamt gemittelt) geringer als Ausgangsvariante
- Pumpenzulauf – hohe Sicherheit gegen Lufteinzug
- Sehr geringe Oberflächen-Fließgeschwindigkeiten beim Pumpenfall bei ASZ – sehr unkritisch bezüglich Wirbelbildung
- Druckstollen nach Vereinigung von MUW und SBW  $\varnothing_i = 5,0$  m, Länge ca. 30,0 m
- Einlauf Konfuser /Diffusor der Zulaufkaverne mit ein Länge von ca. 17 m und einer Aufweitung von  $\varnothing_i = 5,0$  m auf  $\varnothing_i = 7,5$  m und zusätzlicher Ausrundung des Übergangs mit einem Ausrundungsradius von 1,0 m
- Radius Ausrundung von MUW-Stollenanbindung Druckstollen (T-Stück) = 2,0 m

In Kapitel 13.7 werden untersuchten Strömungssituationen am 1:15 numerischen Modell dargestellt. Die Fließzustände können qualitativ auf den Prototypen übertragen werden.

### 8.4.10 Zusammenfassung – Vergleich der Varianten

In diesem Unterkapitel werden die lokalen hydraulischen Verluste der untersuchten Varianten der Zulaufkavernengeometrien verglichen.

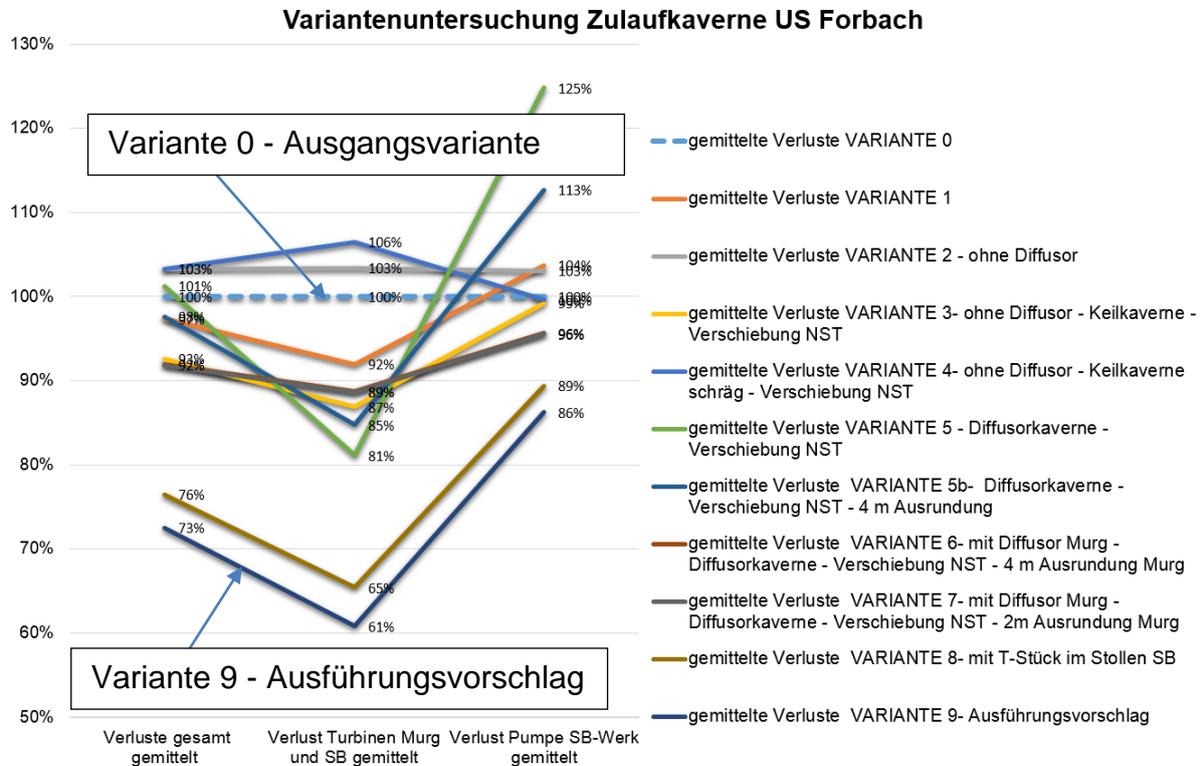


Abbildung 89: Vergleich Energieverluste der untersuchten Varianten in Bezug auf die Ausgangsvariante 0

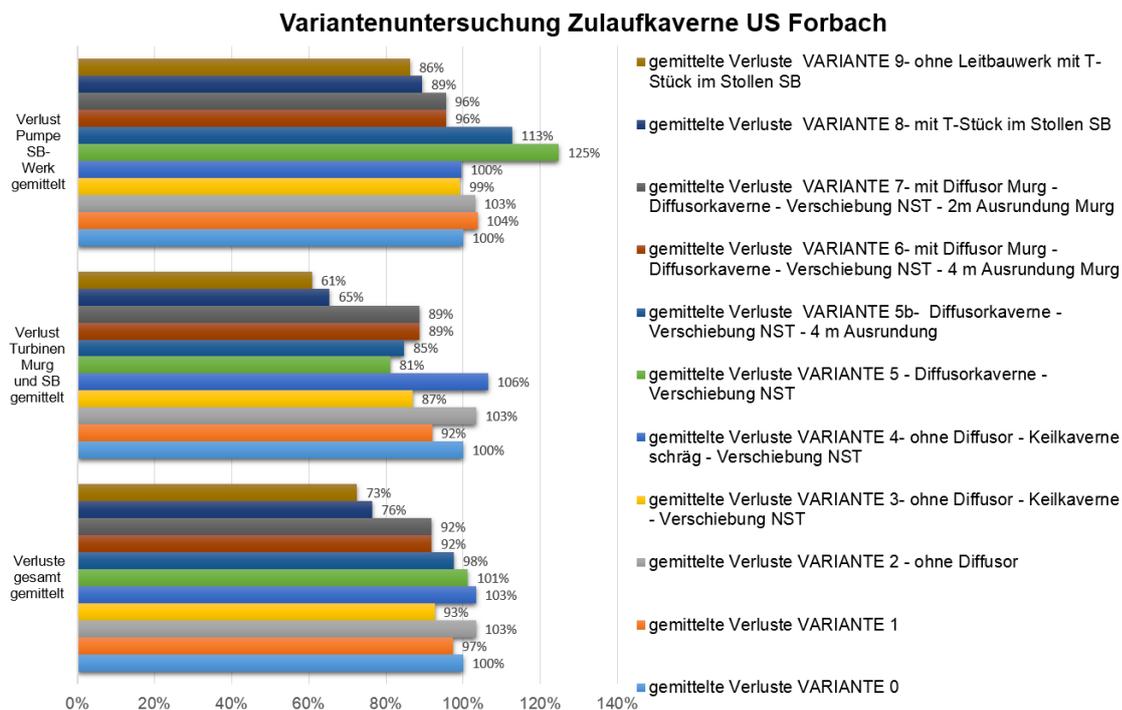


Abbildung 90: Vergleich Energieverluste der untersuchten Varianten in Bezug auf die Ausgangsvariante 0

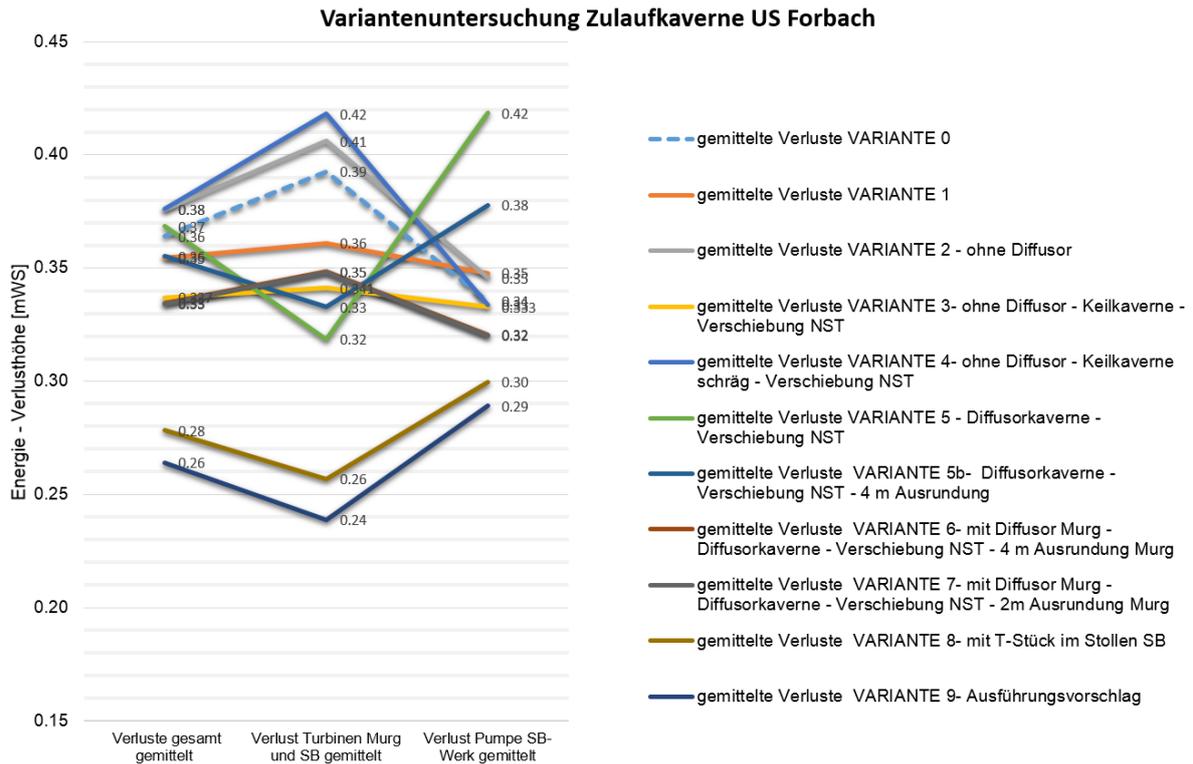


Abbildung 91: Vergleich Energieverluste der untersuchten Varianten im [mWS]

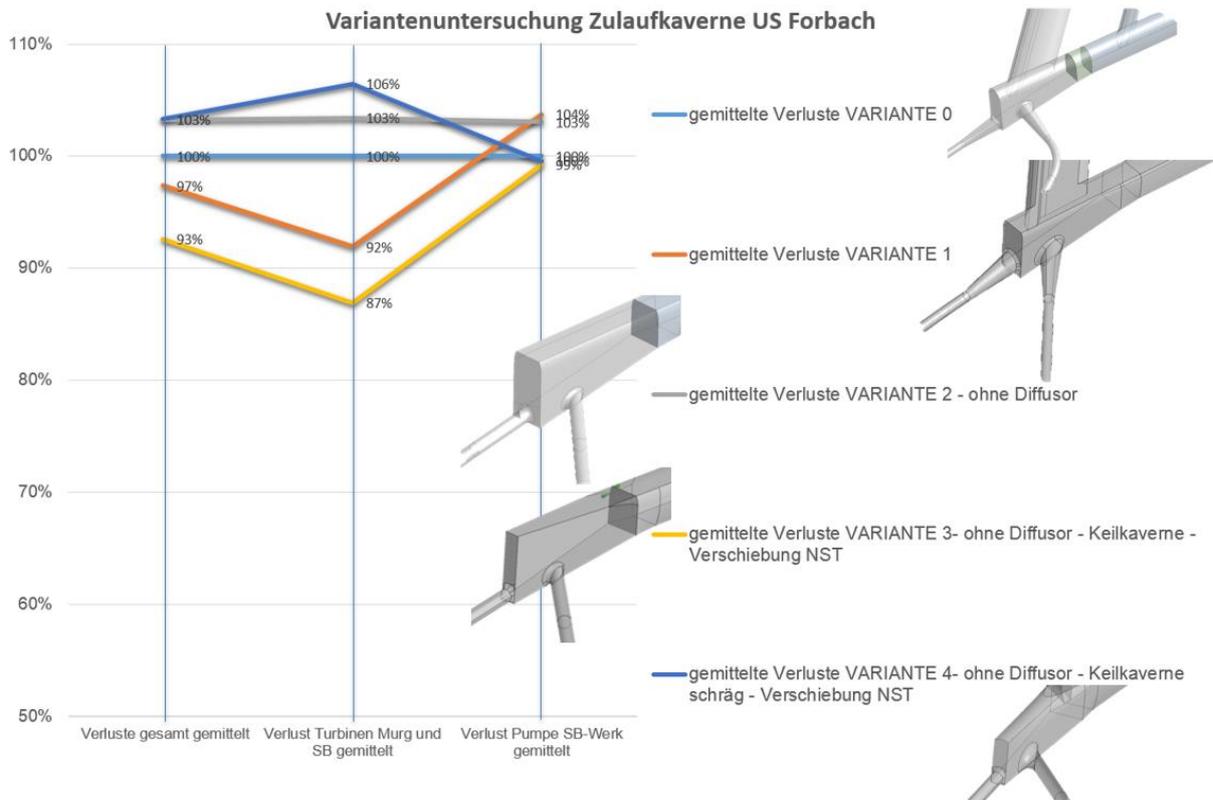


Abbildung 92: Vergleich Energieverluste der untersuchten Varianten 0 - 4 zur Ausgangsvariante a)

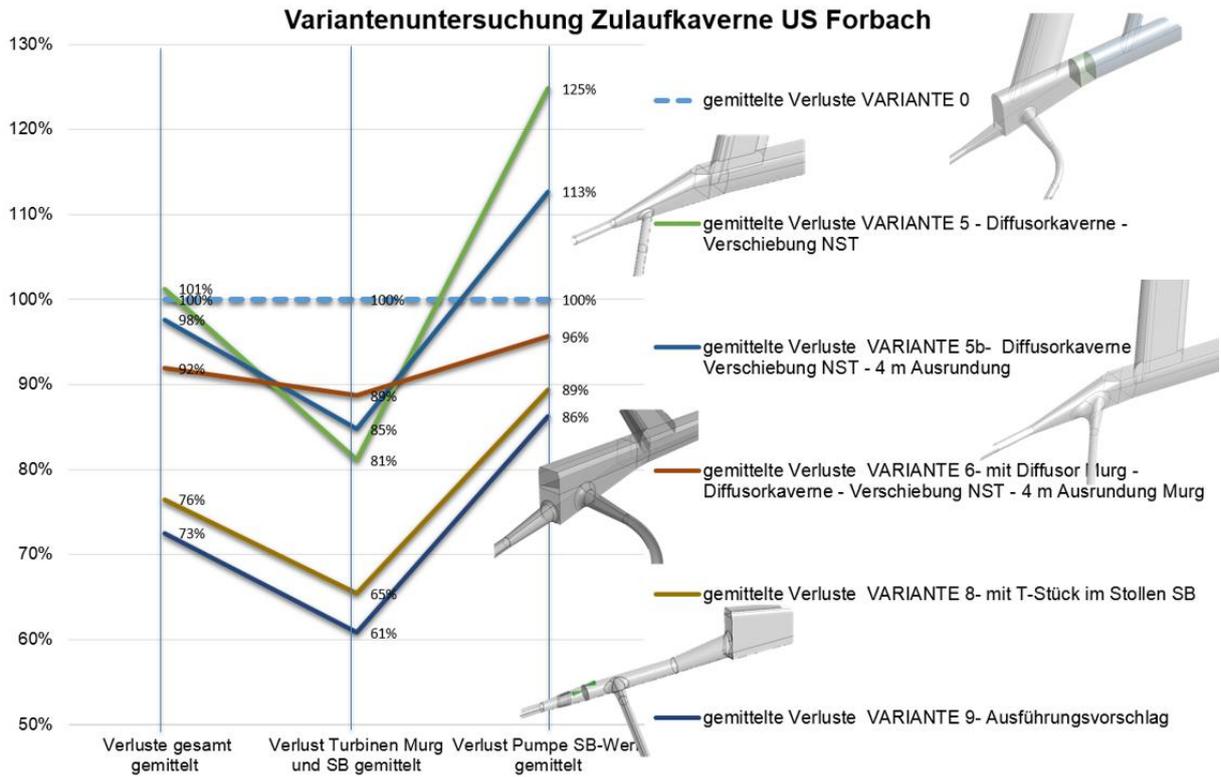


Abbildung 93: Vergleich Energieverluste der untersuchten Varianten 0, 5, 5b, 6, 8, 9 zur Ausgangsvariante b)

## 9. Untersuchungen zur Volumenoptimierung

Dieses Kapitel beschreibt die Untersuchungen zur Optimierung des Speichervolumens in der Kaverne. Ziele sind die Minimierung des Ausbruchsvolumens bei maximalem Nutzvolumen. Diese Untersuchungen sind eine Vorstudie zum Arbeitspaket 2 worin der Ausführungsvorschlag der Geometrie dann mittels 3D-Simulationen für die maßgebenden Lastfälle überprüft wird.

Dazu wird im Gegensatz zur ursprünglichen hydraulischen Auslegung ein Zuschlagen im Firstbereich des Speichers und insbesondere des Hauptstollens zugelassen. Zudem wird die Sohle des Hauptstollens um etwa 1m höher gelegt. Abbildung 94 zeigt schematisch die vorgeschlagene Querschnittsadaptierung des Hauptstollens. Damit wird gezeigt, dass in einem späteren Planungsschritt das gesamte Ausbruchsvolumen verkleinert werden kann, indem man den Freibord reduziert.

Es ist anzumerken, dass die Totraumverringerung zwar Verbesserungen des Ausbruchsvolumens erbringt, aber bei tieferen Wasserständen (von ASZ bis etwa 297,5 müNN) zu höheren Fließverlusten. Die Luftraumoptimierung hat keinen Einfluss auf die zu erwartenden Reibungsverluste.

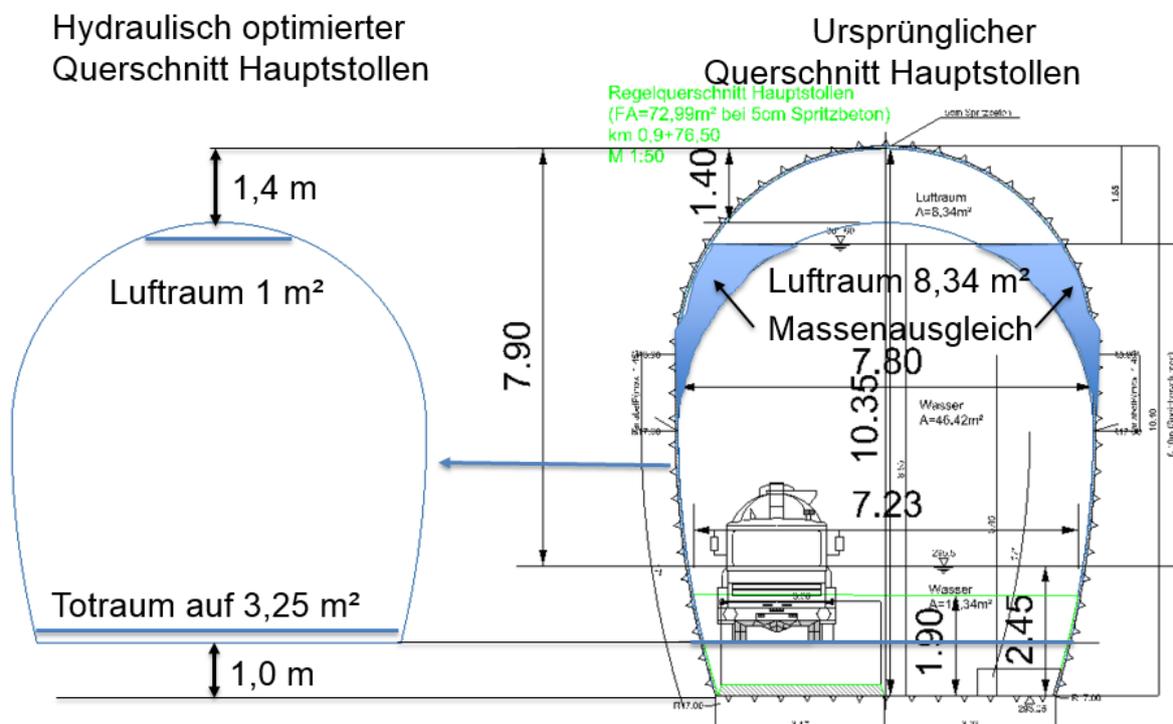


Abbildung 94: Darstellung Hauptstollenquerschnitt Adaptionsvorschlag TU Graz (links), ursprünglicher Vorschlag (rechts)

Folgende Überlegungen und Randbedingungen werden für die Volumenoptimierung von TU Graz in Betracht gezogen, untersucht und für die weitere Optimierung empfohlen:

- In den Untersuchungen von Ingenieurarbeitsgemeinschaft Forbach ist die Pumpenachse auf den minimalen Pumpenvordruck des SBW mit etwa dem Pegel von 294,5 m üNN in der Zulaufkaverne ausgelegt. Dieser Pegel soll nicht unterschritten werden bevor nicht genaue Maschinenzahlen vorliegen.
- Das Zuschlagen des Hauptstollens wird im Unterschied zur Ausgangsgeometrie zugelassen. Dies kann bei höheren Speicherpegeln und Schaltvorgängen stattfinden. Die Auslegung eines Wasserschlosses im Bereich der Zulaufkaverne wird dadurch notwendig. Das Zuschlagen muss so erfolgen, dass keine großen Druckschwankungen konstruktive Teile des Stollens oder der Auskleidung in Mitleidenschaft ziehen können.
- Ausgleichend zum Zuschlagen wird ein Wasserschlossschacht in der Zulaufkaverne dimensioniert (Abbildung 102). Dieses Wasserschloss ermöglicht für jeden Betriebszustand eine ausreichende Druckstoßreflektion und Regelbarkeit der Maschinen. Ein spezieller Übergang an der Hauptstollenfirste in den Wasserschlossschacht kann zu Verbesserungen führen. Entweder durch Ausrundung des Übergangs oder durch einen bewussten Einstand in die Hauptstollenfirste. Durch so einen Einstand kann Luft zurückgehalten werden, welche dämpfend auf Druckschwankungen wirkt und somit den Stollen schützen kann.
- Die Sohlkote des Hauptstollens wird erhöht um das Totvolumen zu verringern. Die Sohle wird in den Untersuchungen mit konstant 1m im Bereich der Nebentollen und von dort bis zum Einlaufbauwerk um 0,5 m erhöht (Tabelle 34). Dadurch wird Totvolumen im Sohlbereich des Hauptstollens gespart.
- Die Nebentollen werden direkt Sohle-Sohle an den Hauptstollen angeschlossen. Dies ermöglicht eine Verringerung des Schwerpunktes und eine besserer hydraulische Nutzung des Ausbruchs (Abbildung 95 und Abbildung 96).
- Ein nicht-ausgekleideter oder nur Spritzbeton-ausgekleidetes Kavernenspeichersystem wird als günstig erachtet, da im Fall des Zuschlagens Luftpakete im Firstbereich eingeschlossen werden. Diese haben eine positiv dämpfende Wirkung.
- Für ein schadloses Entlüften beim Auslaufbauwerk ist zu sorgen. Hierbei kann ein Entlüftungschacht vor dem Rechen die nötige Funktionalität aufweisen.

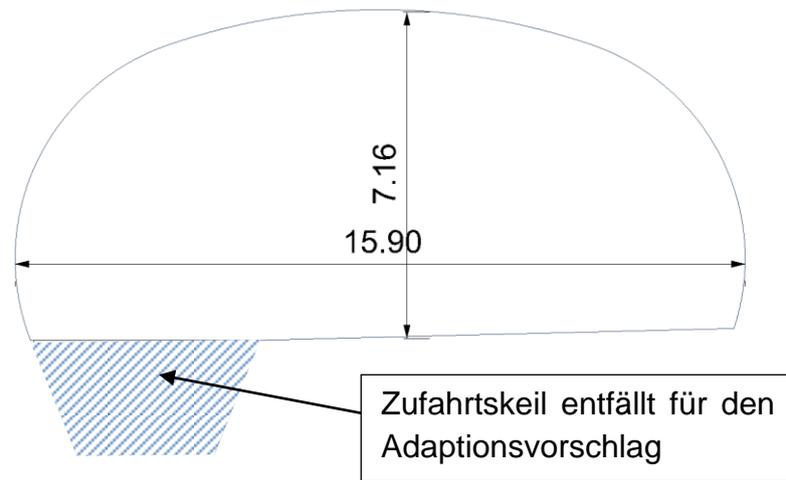


Abbildung 95: Nebenstollenquerschnitt, Ausgangsgeometrie und vorgeschlagene Adaption für eine optimierte Geometrie (Die Querneigungen werden aus der Ausgangsgeometrie übernommen und müssen für die Ausführung angepasst werden)

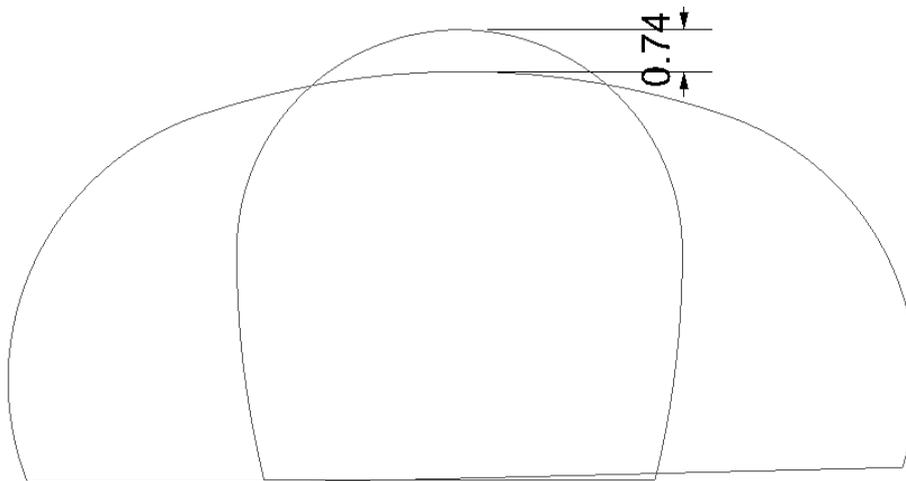


Abbildung 96: Nebenstollenquerschnitt und Hauptstollenquerschnitt, höhenmäßige Positionierung (Die Querneigungen werden aus der Ausgangsgeometrie übernommen und müssen für die Ausführung angepasst werden)

Die Tabelle 34 zeigt die vorgeschlagene Sohlerhöhung in Bezug zur Stationierung. Beim Einlaufbauwerk wird diese um 0,5 m angehoben und ab der Station 795 m konstant 1,0 m über der Sohle der Ausgangsgeometrie.

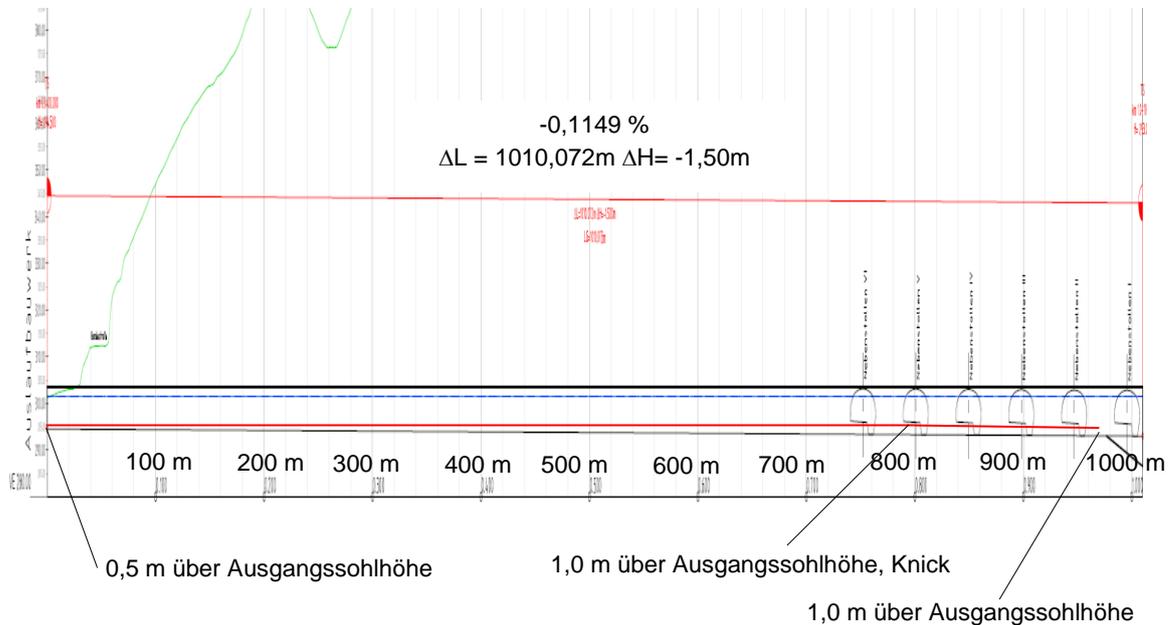


Abbildung 97: Längenschnitt (schematisch) mit der vorgeschlagenen Sohlerhöhung

Tabelle 34: Sohlanpassungsvorschlag für die Geometrieoptimierung

Stationierung	Sohlhöhe neu	Sohlhöhe Ausgangsgeometrie	Differenz Sohle	Firste neu	Firste Ausgangsgeometrie	Differenz Firste	HS Höhe neu
[m]	[m ü. NN]	[m ü. NN]	[m]	[m ü. NN]	[m ü. NN]	[m]	[m]
<b>Zulaufkaverne</b>							
976.50	294.05	293.05	1.00	302.0	303.40	-1.40	7.95
967.00	294.05	293.05	1.00	302.0	303.40	-1.40	7.95
924.00	294.11	293.11	1.00	302.0	303.40	-1.40	7.89
924.00	294.11	293.11	1.00	302.0	303.40	-1.40	7.89
881.00	294.18	293.18	1.00	302.0	303.40	-1.40	7.82
881.00	294.18	293.18	1.00	302.0	303.40	-1.40	7.82
838.00	294.24	293.24	1.00	302.0	303.40	-1.40	7.76
838.00	294.24	293.24	1.00	302.0	303.40	-1.40	7.76
795.00	294.31	293.31	1.00	302.0	303.40	-1.40	7.69
795.00	294.31	293.31	1.00	302.0	303.40	-1.40	7.69
0.00	295.00	294.50	0.50	302.0	303.40	-1.40	7.00

Auslaufbauwerk

Aus Tabelle 34 lässt sich berechnen, dass die mittlere Hauptstollenhöhe 7,15 m beträgt.

## 9.1 Transiente Verlusthöhe Hauptstollen optimierte Geometrie

Aufgrund des veränderlichen Fließquerschnitts stellt sich ein Staupegelabhängiger Verlust der des Kavernensystems ein. Bei STZ sind die Fließverluste aufgrund des großen Fließquerschnitts sehr gering. Bei tiefen Pegel im Bereich ASZ erhöhen sich durch die sich ergebende Querschnittsverringering dementsprechend die Fließverluste.

Abbildung 98 zeigt den transienten Verlauf der Verlusthöhe ab ASZ und Start beider Turbinen mit insgesamt  $Q = 34,5 \text{ m}^3/\text{s}$  dieser Durchfluss wird konstant gehalten bis der Pegel von 301,6 m ü NN im AFB erreicht wird. Abbildung 100 zeigt den Vergleich zwischen der Ausgangsvarianten und dem Variantenvorschlag mit höherer Sohlausführung, hier zeigt sich, dass aufgrund der höheren Fließgeschwindigkeit bei tieferen Spiegeln zwischen 295,5 m üNN (ASZ) und dem Pegel 298 m üNN im AFB ein erhöhter Reibungsverlust zu erwarten ist. Bei Betriebszuständen über 298 m ü NN bis zum Stauziel 301,6 m ü NN sind nur mehr sehr geringe Reibungsverlustunterschiede zu erwarten.

Abbildung 101 zeigt den Vergleich der Ausgangsvariante mit der vorgeschlagenen Hauptstollenvariante mit der erhöhten Sohle um 1m und durchgehender Rauigkeit von  $K_{st} = 29 \text{ [m}^{1/3}/\text{s]}$  und einer Variante wobei die Fahrbahn mit  $K_{st} = 80 \text{ [m}^{1/3}/\text{s]}$  glatt ausgeführt ist. Es zeigt sich, dass dadurch die Reibungsverluste ab dem Pegel 297 m üNN sich mit jenem der Ausgangsvariante schneiden. Daher ist für diese Variante lediglich der Betrieb zwischen den Staupegel von 295,5 m ü NN und 297 m üNN ungünstiger als für die Ausgangsvariante.

Es wird somit empfohlen die Sohle möglichst glatt auszuführen. Möglicherweise könnte eine Asphaltsohle auf der Fahrbahn aus Ausbruchsmaterial als zielführend erweisen um einerseits das Ausräumen und säubern der Sohle sich zu ersparen und andererseits die glatten Eigenschaften nutzen zu können (Solvik und Tesaker 1997). Diese Technik wird in Norwegen in einigen Kraftwerksanlagen erfolgreich angewendet. Wichtig ist eine hydraulische Durchlässigkeit der Asphaltsohle. Abbildung 101 zeigt, dass mit einer Asphaltsohle die erhöhten Verluste bei tiefem Pegel vermindert werden können.

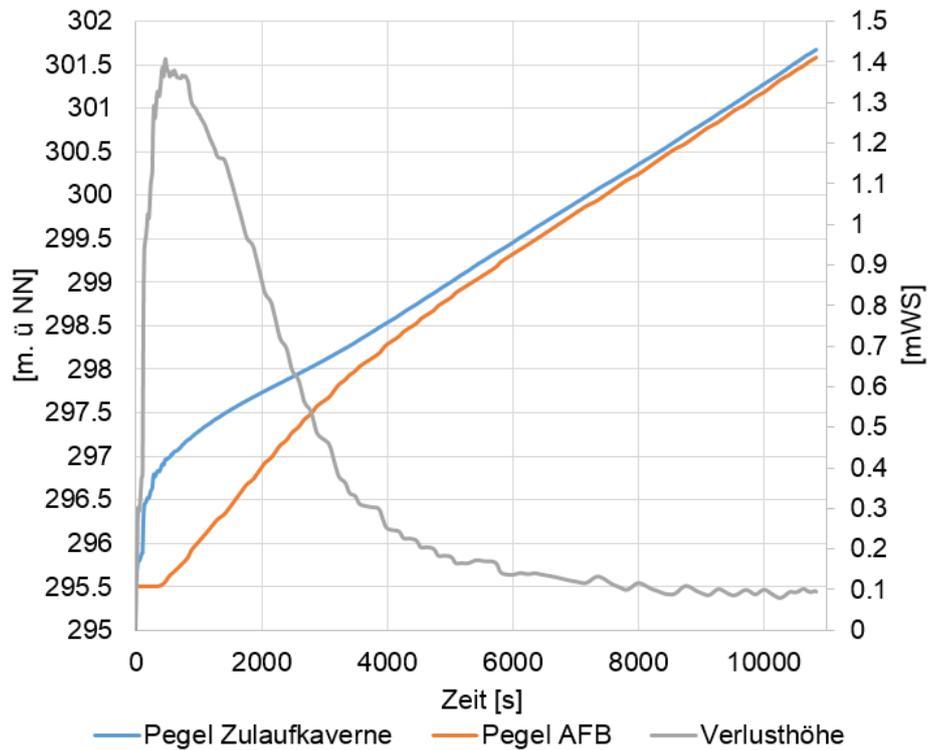


Abbildung 98: Transiente Verlusthöhe für Turbinenbetrieb ab ASZ bis STZ im Ausgleichsbecken Forbach für die Variantenuntersuchung mit höherer Sohle im Hauptstollen

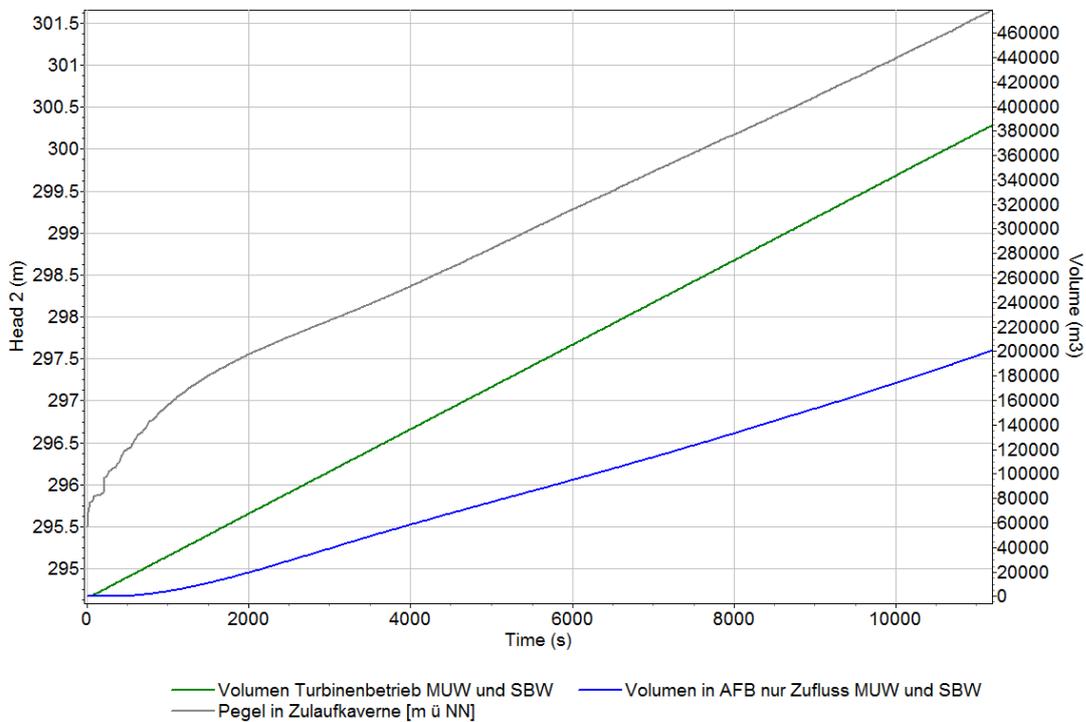


Abbildung 99: Turbinenbetrieb MUW und SBW von ASZ bis STZ, Pegelveränderung und Volumenänderung

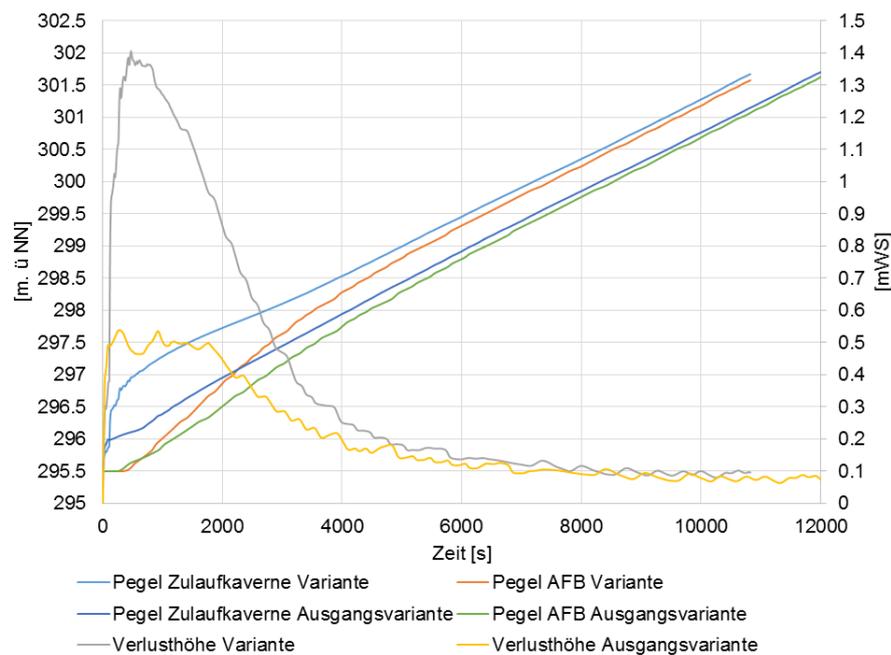


Abbildung 100: Vergleich transiente Verlusthöhe für Turbinenbetrieb ab ASZ bis STZ im Ausgleichsbecken Forbach für die Variantenuntersuchung mit höherer Sohle im Hauptstollen (Variante) und der Ausgangsvariante mit größerem Fließquerschnitt bei tiefen Wasserspiegeln

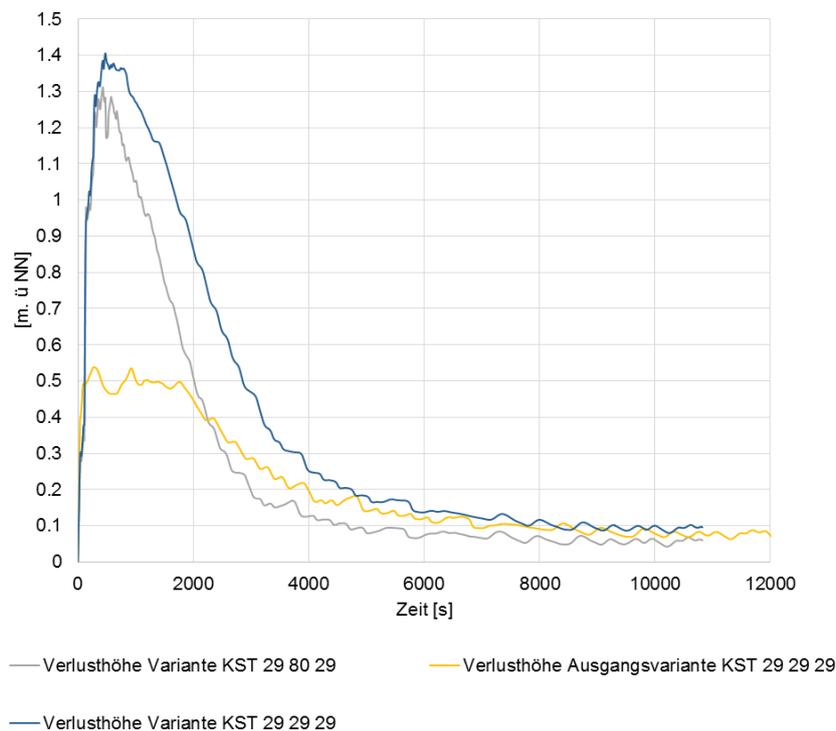


Abbildung 101: Vergleich transiente Verlusthöhe für Turbinenbetrieb ab ASZ bis STZ im Ausgleichsbecken Forbach für die Variantenuntersuchung zwischen Ausgangsvariante (Rauigkeit KST 29 Ulmen KST 29 Fahrbahn und KST 29 Sohle), der vorgeschlagenen Variante mit erhöhter Sohle (Rauigkeit KST 29 Ulmen KST 29 Fahrbahn und KST 29 Sohle) und der vorgeschlagenen Variante mit glatter Fahrbahn (Rauigkeit KST 29 Ulmen KST 80 Fahrbahn und KST 29 Sohle)

## 9.2 Ermittlung des minimal erforderlichen Wasserschlossquerschnitts

Für eine zielführende konservative Auslegung des Kavernenspeichers, welcher bei Schaltfällen bei Stauziel zuschlagen kann, wird ein Wasserschlossschacht in der Zulaufkaverne empfohlen.

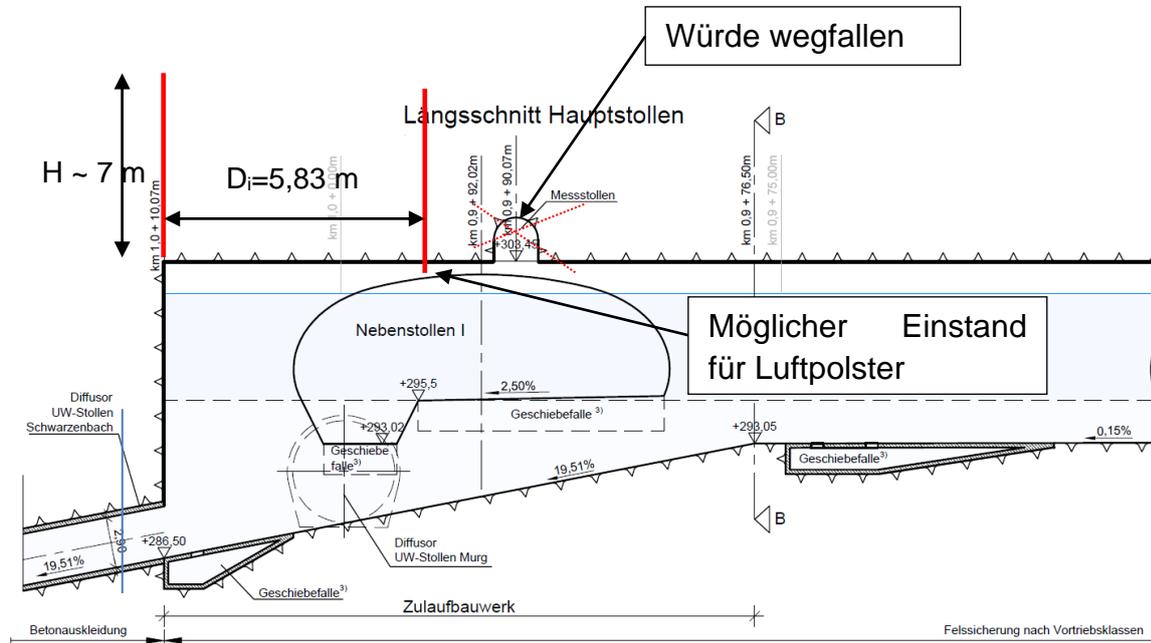


Abbildung 102: Mögliche Position eines Wasserschlosses im Bereich Zulaufkaverne, Messstollen fällt dadurch weg.

Für die Berechnung des minimal erforderlichen Stabilitätsquerschnittes wird die analytische Formel nach Svee (Svee 1970) herangezogen:

$$F_{kr} = \frac{L \cdot f}{2g \left( \alpha + \frac{1}{2g} \right) (H_0 - z_0)} \quad [m]$$

Formel 9.1 Svee-Fläche UW Wasserschloss

<u>NOMENCLATURE</u>	
A	Dimensionless factor ( $= 1 + n \frac{p_{z,0}}{\gamma^a_0}$ )
$a_0$ (m)	Distance between the surge chamber roof and the water level in a surge chamber with vertical walls and a horizontal roof ( $= \frac{V_{z,0}}{F}$ )
$a$ ( $\frac{s^2}{m}$ )	Friction coefficient ( $a = \frac{h_f^0}{v_0^2}$ )
$\beta$ (rad)	Slope angle of headrace tunnel
$\gamma$ ( $\frac{N}{m^3}$ )	Specific weight of water
E	Dimensionless factor depending on the marginal turbine efficiency ( $= 1 + \frac{q_0 \Delta \eta}{\eta_0 \Delta q}$ )
$\eta$	Turbine efficiency factor
$F$ (m <sup>2</sup> )	Horizontal area of enclosed surge chamber
$F^{open}$	Horizontal area of an open surge chamber
$F^* (m^2)$	Critical (horizontal) area of an open surge chamber
$F_{cr}^{air} (m^2)$	Critical (horizontal) area of a surge chamber with an enclosed air-cushion
$f$ (m <sup>2</sup> )	Tunnel cross-sectional area
$g$ ( $\frac{m}{s^2}$ )	Acceleration due to gravity
$H_0$ (m)	Gross head of power plant
$h_f^0$ (m)	Head loss due to friction (steady state conditions)
L (m)	Length of tunnel

Abbildung 103: Nomenklatur zur Berechnung des Svee-Querschnittes für ein UW-Wasserschloss

Tabelle 35 zeigt die angesetzten Reibungsverluste für die Stabilitätsbetrachtung. Je geringer die Verluste desto größer der erforderliche Querschnitt. Andererseits wird das höchste Aufschwingen durch ein größeres Wasserschloss geringer. Für die Berechnung werden zwei Varianten berechnet, einmal mit  $K_{ST} = 40 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ , und einmal mit  $K_{ST} = 29 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ . Letzterer ist der erwartete Rauheitswert für den unausgekleideten Ausbruch. Der glattere Wert von  $K_{ST} = 40 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  wird als konservativer Wert verwendet und ergibt den empfohlenen minimalen Wasserschlossquerschnitt.

Es ergeben sich  $26,7 \text{ m}^2$  ( $\varnothing$  5,83 m) als minimaler Wasserschlossquerschnitt nach der Berechnung nach Svee.

Zum Vergleich werden die erforderlichen Querschnitte auch nach Thoma berechnet, diese weisen beim Faktor 1,0 leicht höhere Werte auf. Die übliche Herangehensweise bei oberwasserseitigen Wasserschlässern mit Thoma-Querschnitt \*1,5 [-] ist nicht nötig, da dieser Faktor den ungünstig wirkenden

Druckschacht berücksichtigt. Im Unterwasserstollen wirkt dieser aber stabilisierend. Daher wird der Berechnungsansatz von Svee empfohlen. Der übliche Faktor 1,5 [-] ist ein empirischer Wert welcher von Jaeger empfohlen wird. Dieser ist aber nur bei oberwasserseitigen Wasserschlossern notwendig.

Tabelle 35: Reibungsverluste Hauptstollen

Umrechnung: $K_{ST} - k_s$ <b>40</b> [ $m^{1/3}/s$ ]															
Q [ $m^3/s$ ]	L [m]	$D_i$ [m]	A [ $m^2$ ]	k [mm]	T [ $^{\circ}C$ ]	v [ $m/s$ ]	E kin	n [ $m^2/s$ ]	Re [-]	C-W-1	C-W-1	$\lambda$	$h_{vr}$ [mWS]	alpha	hv [mWS]
34.5	1010	8.3	54.1	<b>86.678</b>	20	0.64	0.02	1.00E-06	5 281 818	5.101	5.101	0.038	<b>0.097</b>	0	<b>0.097</b>

Umrechnung: $K_{ST} - k_s$ <b>29</b> [ $m^{1/3}/s$ ]															
Q [ $m^3/s$ ]	L [m]	$D_i$ [m]	A [ $m^2$ ]	k [mm]	T [ $^{\circ}C$ ]	v [ $m/s$ ]	E kin	n [ $m^2/s$ ]	Re [-]	C-W-1	C-W-1	$\lambda$	$h_{vr}$ [mWS]	alpha	hv [mWS]
34.5	1010	8.3	54.1	<b>436.405</b>	20	0.64	0.02	1.00E-06	5 281 818	3.697	3.697	0.073	<b>0.184</b>	0	<b>0.184</b>

Tabelle 36: Erforderlicher minimaler Querschnitt mit  $K_{ST} = 29 m^{1/3}/s$ , nach Svee

L	Druckstollenlänge	1010	m
D	Druckstollen Durchmesser	8.3	m
f	Druckstollenquerschnittsfläche	54.11	$m^2$
Ho	Rohfallhöhe OW - UW	352	m
z0	Verlusthöhe UW Stollen	0.18	m
$\alpha$	Reibungskoeffizient (Totalverluste/ $v^2$ )	0.4427	$s^2/m$
Q	Ausbaudurchfluss	34.5	$m^3/s$
v0		0.64	$m/s$

$F_{KR} =$	16.04 $m^2$
Durchmesser:	4.52 m

Tabelle 37: Erforderlicher minimaler Querschnitt mit  $K_{ST} = 29 m^{1/3}/s$ , nach Thoma

Q =	34.5 $m^3/s$
ls =	1025 m
hv,s0 =	0.18 m
hf,0 =	352 m
Ds =	8.3 m
As =	54.11 $m^2$
Ath =	18.14 $m^2$
D =	4.81 m
A =	18.14 $m^2$
1.50 x Ath =	27.2 $m^2$
D erf:	<b>5.89 m</b>
A erf:	<b>27.2 <math>m^2</math></b>

Aus Tabelle 38 ergibt sich der maßgebende und vorgeschlagene Querschnitt eines Wasserschlosses in der Zulaufkaverne mit 26,65 m<sup>2</sup> im Schacht. Vergleichend dazu ergibt die Berechnung nach Thoma 32,65 m<sup>2</sup> bei Faktor 1,0 [-] und 49 m<sup>2</sup> mit Faktor 1,5 [-].

Tabelle 38: Erforderlicher minimaler Querschnitt mit  $K_{ST} = 40 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ , empfohlene Querschnittsgröße, nach Svee

L	Druckstollenlänge	1010	m
D	Druckstollen Durchmesser	8.3	m
f	Druckstollenquerschnittsfläche	54.11	m <sup>2</sup>
Ho	Rohfallhöhe OW - UW	352	m
z0	Verlusthöhe UW Stollen	0.1	m
$\alpha$	Reibungskoeffizient (Totalverluste/v <sup>2</sup> )	0.2460	s <sup>2</sup> /m
Q	Ausbaudurchfluss	34.5	m <sup>3</sup> /s
v0		0.64	m/s

$F_{KR} =$	26.65 m <sup>2</sup>
Durchmesser:	5.83 m

Maßgebender minimaler Wasserschlossquerschnitt

Tabelle 39: Erforderlicher minimaler Querschnitt mit  $K_{ST} = 40 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ , empfohlene Querschnittsgröße, nach Thoma. Von TU Graz wird die Berechnung nach Svee empfohlen

Q =	34.5 m <sup>3</sup> /s
ls =	1025 m
h <sub>v,s0</sub> =	0.1 m
h <sub>f,0</sub> =	352 m
D <sub>s</sub> =	8.3 m
A <sub>s</sub> =	54.11 m <sup>2</sup>
A <sub>th</sub> =	32.65 m <sup>2</sup>
D =	6.45 m
A =	32.65 m <sup>2</sup>
1.50 x A <sub>th</sub> =	49.0 m <sup>2</sup>
D erf:	<b>7.90 m</b>
A erf:	<b>49.0 m<sup>2</sup></b>

### 9.3 Sicherheitsreserve des Wasserschlossschachtes

Da für diesen Aspekt auf keine uns bekannte Norm zurückzugreifen ist, wird aus unserer Erfahrung die Sicherheitsreserve eines Wasserschlosses zwischen den Projektpartner aufgrund von Erfahrungswerten definiert. Für Kammerwasserschlösser werden üblicherweise Reservevolumina in Bezug auf den maßgebenden Lastfall vorgehalten. Für das Kavernenspeicher-Wasserschloss, welches als Schachtwasserschloss für die vorliegenden Kraftwerksanlage vorgeschlagen wird, wird von TU Graz ein Sicherheitsfaktor in Bezug auf die aufzufangende kinetische Energie im Hauptstollen vorgeschlagen.

$$E_{kin}[J] = \frac{mv^2}{2}$$

Formel 9.2 Kinetische Energie

$$E_{kin}[J] = mgH$$

Formel 9.3 Potentielle Energie

Randbedingungen für die zugrunde liegende Berechnung:

- Hauptstollen 54 m<sup>2</sup> Fließprofil – in der Simulation ein äquivalentes Kreisprofil mit 8,30 m Durchmesser (um 11% größerer Querschnitt als die vorgeschlagenen Volumenoptimierung im Hauptstollen)
- Reibung glatt mit  $f = 0,01$  [-]
- Lastfall:
  - Maschinen MUW und SBW hochfahren auf gesamt 34,5 m<sup>3</sup>/s – Abstellen bei maximalem Durchfluss im Hauptstollen und wiederanfahren bei etwa 50 Sekunden vor max. Rückfluss aus dem Ausgleichsbecken Forbach
  - Stauziel 301,6 m ü NN
  - Wasserschloss 26,7 m<sup>2</sup> (AW)

Abbildung 104 zeigt den untersuchten Lastfall mit dem maximalen Aufschwingen für das 26,7 m<sup>2</sup> Wasserschloss in der Zulaufkaverne. Das Wasserschloss schwingt etwa 4,5 m über die Firste der Zulaufkaverne bis Kote 306,5 m ü NN auf. Die Schaltzeitpunkte werden variiert um den ungünstigsten Zeitpunkt zu erhalten.

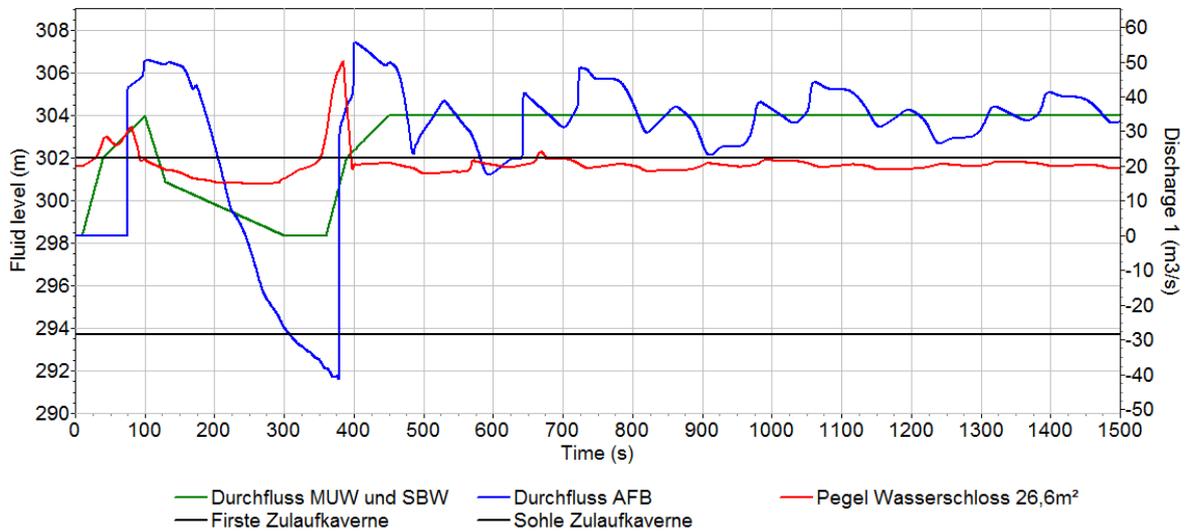


Abbildung 104: Maximales Aufschwingen bei STZ, Anfahren auf 34,5 m<sup>3</sup>/s – Abschalten auf 0 m<sup>3</sup>/s und wiederholtes Anfahren von MUW und SBW, Durchflüsse, Pegel Wasserschloss

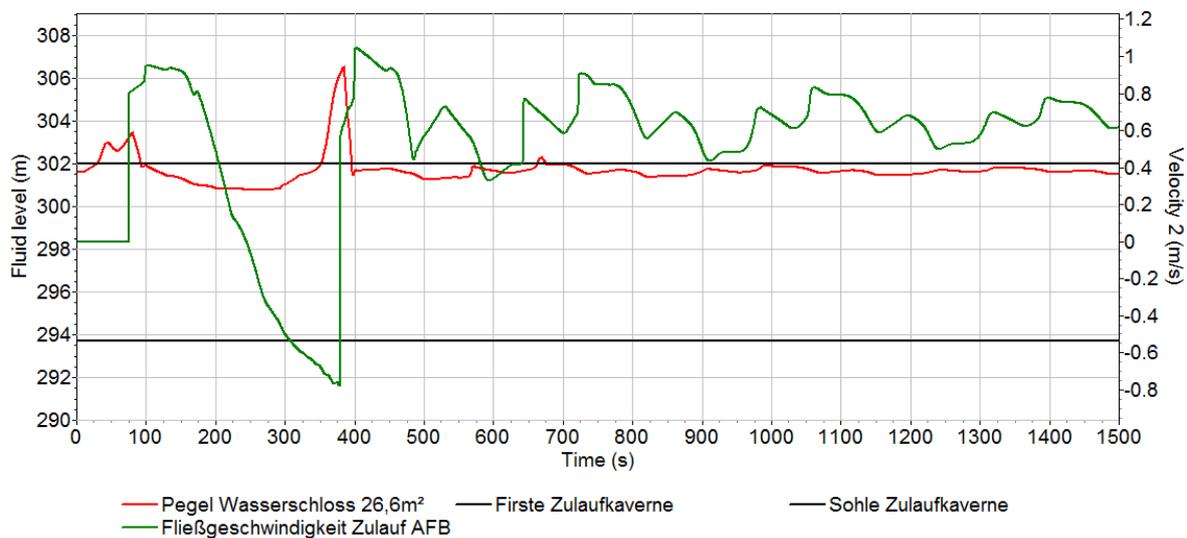


Abbildung 105: Maximales Aufschwingen bei STZ, Anfahren auf 34,5 m<sup>3</sup>/s – Abschalten auf 0 m<sup>3</sup>/s und wiederholtes Anfahren von MUW und SBW für einen konstanten 54,0 m<sup>2</sup> Stollen, Fließgeschwindigkeit Zulauf AFB, Pegel Wasserschloss

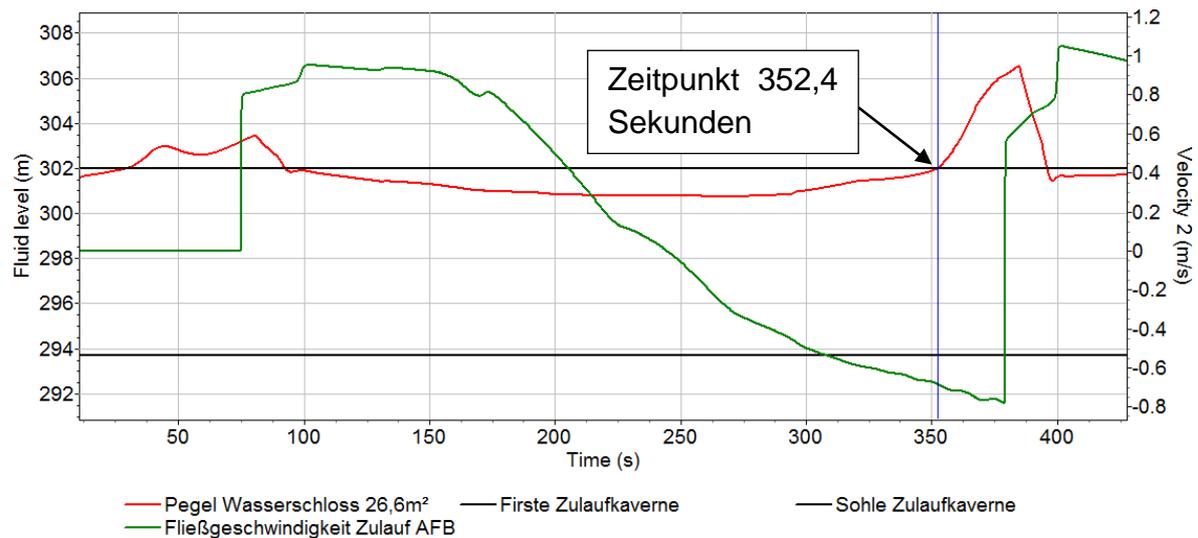


Abbildung 106: Maximales Aufschwingen bei STZ, Anfahren auf  $34,5 \text{ m}^3/\text{s}$  – Abschalten auf  $0 \text{ m}^3/\text{s}$  und wiederholtes Anfahren von MUW und SBW, Fließgeschwindigkeit Zulauf AFB, Pegel Wasserschloss, Detail – Zeitpunkt Sekunde 352,4 – Beginn des Aufschwingens

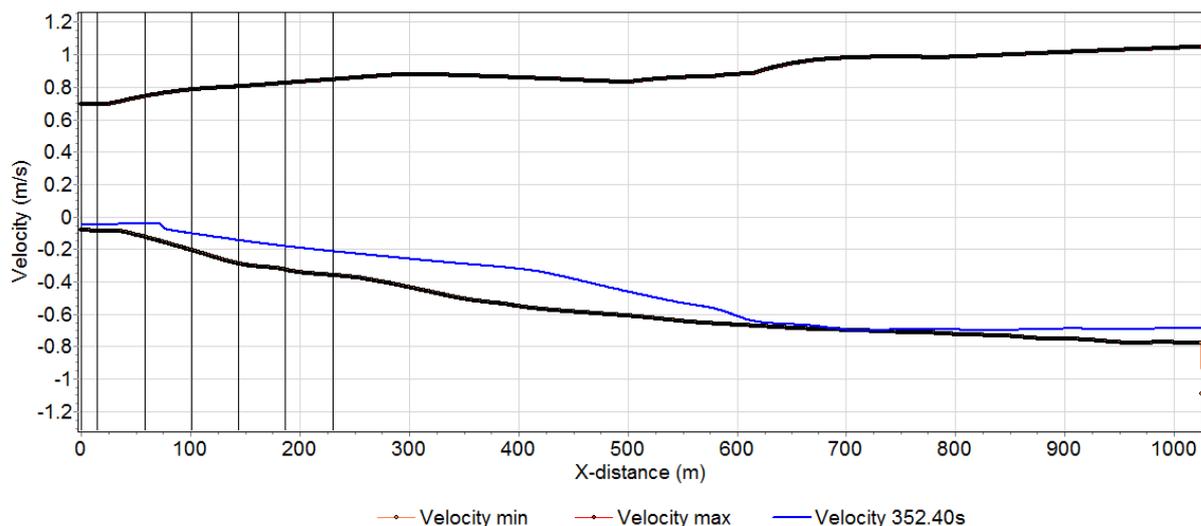


Abbildung 107: Maximales Aufschwingen bei STZ, Anfahren auf  $34,5 \text{ m}^3/\text{s}$  – Abschalten auf  $0 \text{ m}^3/\text{s}$  und wiederholtes Anfahren von MUW und SBW, Fließgeschwindigkeit über die Gesamtlänge des Hauptstollens zum Zeitpunkt 352,4 Sekunden

Abbildung 106 zeigt das Aufschwingen des Wasserschlosses und die Fließgeschwindigkeit am Zulauf aus dem AFB. Abbildung 107 zeigt die Fließgeschwindigkeit über den gesamten Hauptstollen für den Wasserschlosslastfall – maximales Aufschwingen für den volumenoptimierten Querschnitt.

Es ergibt sich eine mittlere Fließgeschwindigkeit im Hauptstollen zum Zeitpunkt 352,4 Sekunden von  $0,442 \text{ m/s}$ . Zu diesem Zeitpunkt beginnt sich gerade das Wasserschloss zu füllen.

Aus den 0,44,2 m/s ergibt sich für den gefüllten Hauptstollen (Nebenstollen sind gefüllt und wirken nicht mehr) eine kinetische Energie von  $54 \text{ m}^2 * 1025 \text{ m} * 1000 * 0,44^2 / 2 = 5\,357\,880 \text{ J} \underline{\underline{= 1,49 \text{ kWh}}}$

Diese Energiemenge muss in potentielle Energie im Wasserschloss umgelegt werden. Das Wasserschloss weist folgende Beziehung für die potentielle Energie auf:

$$26,6 (Aw) * H * 1000 * 9,81 * H/2 = E_{\text{pot}} [\text{J}]$$

Die 5 357 880 J umgelegt auf das Wasserschloss ergibt eine Aufschwinghöhe von 6,39 mWS. In dieser Betrachtung wird der Reibungsverlust vernachlässigt, daher ergibt sich mit  $302 + 6,39 = 308,4 \text{ m} \ddot{\text{u}} \text{ NN}$  ein höherer Pegel als in der 1D-numerischen Berechnung.

#### Vorschlag TU Graz für die Sicherheitsreserve des Schachtwasserschlosses:

Maßgebliche Parameter für die kinetische Energie sind demnach einerseits die vorhandene Wassermasse im Hauptstollen wie andererseits die mittlere Fließgeschwindigkeit im Hauptstollen zum Zeitpunkt des ungünstigsten Schaltfalles bei Stauziel. Insbesondere die tatsächlich vorhandene Masse aufgrund des Volumens kann aufgrund des geplanten unausgekleideten Stollens variieren! Vor allem kann dieses Volumen aufgrund von Überprofilen größer und somit ungünstiger sein!

Aufgrund der Unsicherheiten wird ein Faktor von 1,5 [-] bezüglich der kinetischen Energie vorgeschlagen beim Rückfließen vorgeschlagen.

Faktor 1,5 [-] für die kinetische Energie:  $5\,357\,880 * 1,5 = 8\,036\,820 \text{ [J]}$ . Daraus ergibt sich ein maximales Aufschwingen von 7,8 m WS über die Firste. Somit ergibt sich für diesen Fall im Vergleich zur 1D-Berechnung (306,5 m üNN) eine Reservehöhe von 3,3 m. Der Wasserschlossüberlauf ergibt sich dadurch zu **309,8 m ü NN**.

## 9.4 1D-Numerik zur Minimierung der Kavernengeometrie

Dieses Kapitel behandelt die 1D-numerischen Untersuchungen zur Optimierung des Nutzvolumens der Kaverne. Es werden Berechnungen durchgeführt um die Luftvolumina an den Firsten und die Toträume an den Stollensohlen zu minimieren.

Diese Untersuchungen werden als Vorstudie und Grundlage für das Arbeitspaket 2 durchgeführt. Für die Ausführungsvariante sind im Arbeitspaket 2 3D-numerische Simulationen für die maßgebenden hydraulischen Zustände bei Stauziel und Absenkziel vorgesehen.

Die maximalen Aufschwinghöhen in der Zulaufkaverne werden für Dreifach- und Fünffachschaltfälle errechnet. Abfolge der synchronen Schaltungen von SBW und MUW werden gezählt (Öffnen der Turbinen (1) – Schließen der Turbinen (2) – Öffnen der Turbinen (3) – Schließen der Turbinen (4) – Öffnen der Turbinen (5)). Diese Schaltvorgänge sind ungünstig angesetzt um die Wassermassen im System möglichst in stark anzuregen.

Die Berechnungen werden mittels der Rauigkeitswerte als Frictionfactor  $f$  [-] nach Tabelle 7 verwendet. Die Hauptstollenfirste ist aufgrund der Planung horizontal angeordnet. Für die Berechnungen wird der Hauptstollen aufgrund besserer numerischer Stabilität beim Zuschlagen mittels eines konstanten Durchmessers von 8,77m implementiert.

Abbildung 108 zeigt das hydraulische Schema für die 1D-numerische Simulation des Kavernenspeichers mit der Möglichkeit des Zuschlagens und der Untersuchung eines Wasserschlosses in der Zulaufkaverne. Die Nebentollen werden als Wasserschlossmodule mit einer Beziehung von horizontaler Querschnittsfläche zu Höhe implementiert (Abbildung 109). Die Firste der Nebentollen ist dabei um 0,73 m unterhalb des Stauziels von 301,6 m angeordnet. Die Berechnung nützt Vereinfachungen um in erster Linie die Wirkung des Wasserschlosses auf die Massenschwingung zu untersuchen. Eingeschlossene Luftpakete an der Firste im Hauptstollen können nicht modelliert werden. Dessen Wirkung wird aber sowohl auf die Massenschwingung als auch auf Druckstöße als positiv bewertet. Für die Massenschwingung wirkt eingeschlossene Luft positiv da der Wasserspiegel im Wasserschloss früher als ideal errechnet zu steigen beginnt und so auch früher die Massenschwingung abbremst. Für Druckstöße oder auch Druckimpulse durch das Zuschlagen wird aufgrund der Komprimierbarkeit der Luft eine positiv wirkende Dämpfung erwartet.

Lastfall 1 bis Lastfall 3 zeigen Mehrfachschaltfälle bei Stauziel von 301,6 m ü NN und variieren in der Stollenrauigkeit. Der Hauptstollenquerschnitt wird als Kreisquerschnitt mit 8,77 m Durchmessern angenähert. Dadurch ist das Hauptstollenvolumen größer als für die von TU Graz vorgeschlagenen Geometrieoptimierung des Hauptstollens. Die Simulationen zeigen dass der vorgeschlagenen maximale Überlauf des

Wasserschlosses 308,4 m ü NN sowohl für einen glatten wie rauen Hauptstollen nicht erreicht wird.

Lastfall 4 bis Lastfall 5 zeigen hydraulische Simulationen wobei der Pegel im Ausgleichsbecken Forbach bei ASZ 295,5 m ü NN liegt.

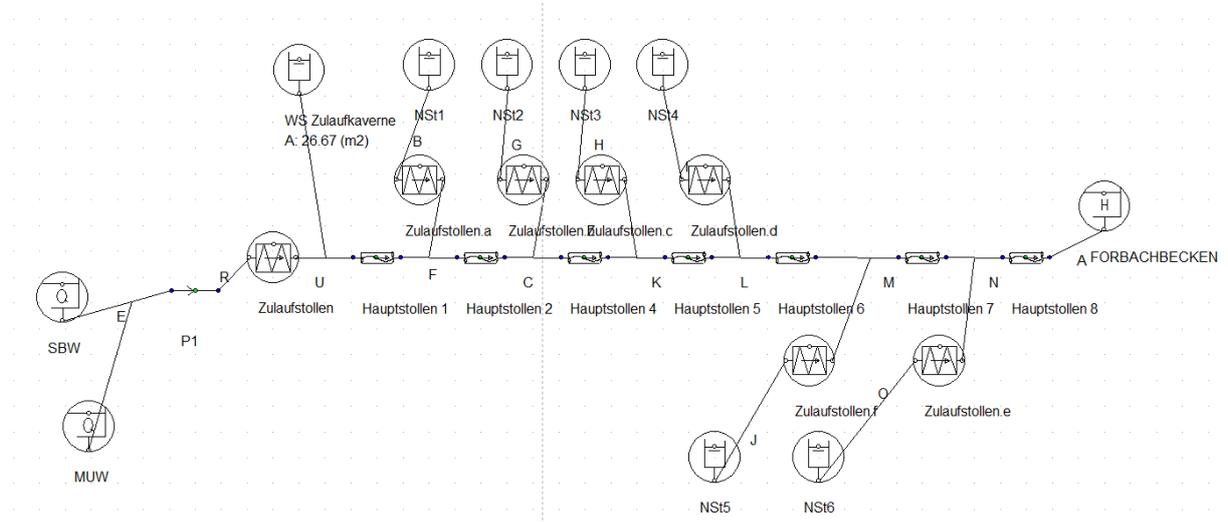


Abbildung 108: Hydraulisches Schema für die 1D-numerischen Untersuchungen für das Zuschlagen an der Firste mit implementierten Wasserschloss

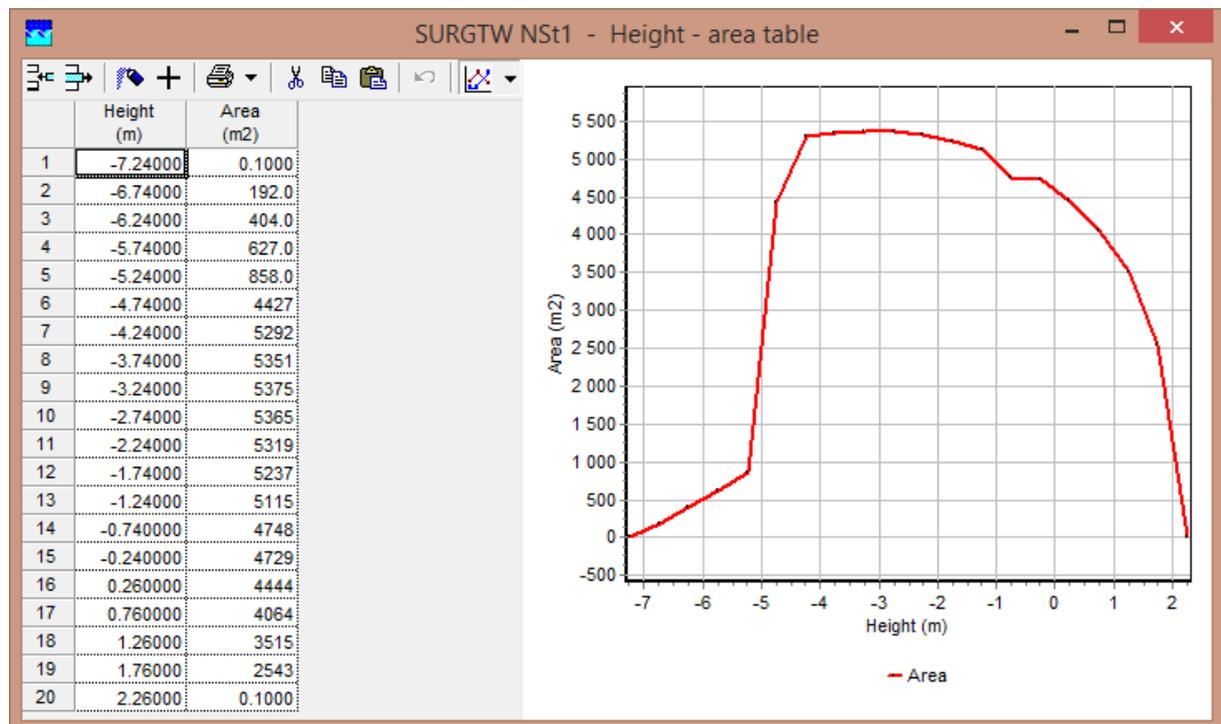


Abbildung 109: Implementierung der Nebenstollen als Wasserschlossmodul mit Fläche zu Höhe Beziehung.

9.4.1 LF 1- Firste 0,4 m über STZ – Hauptstollen glatt – WS 26,7 m<sup>2</sup>

Abbildung 110 zeigt die Massenschwingung bei glatten Stollenreibungsverhältnissen und ungünstigen Schaltzyklen der Turbinen MUW und SBW. Für den minimalen Wasserschlossquerschnitt bei glatten Verhältnissen ergibt sich eine zu erwartende Aufschwinghöhe von etwa 5,7 m (ohne Sicherheiten).

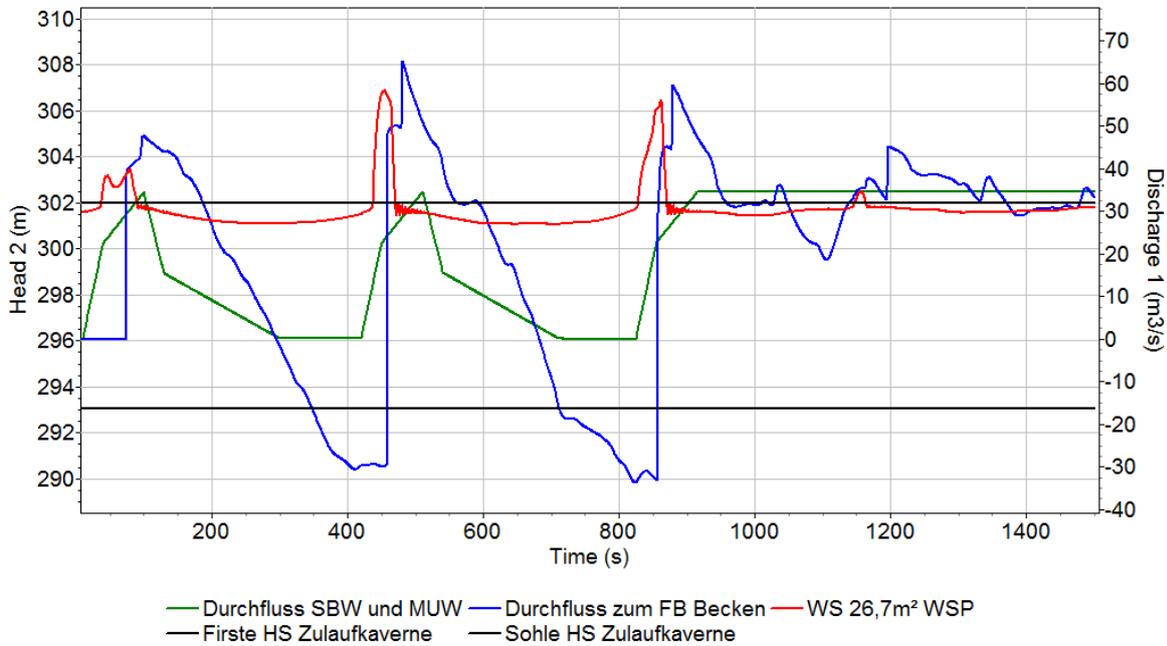


Abbildung 110: Massenschwingung im Kavernenspeichersystem mit 26,7 m<sup>2</sup> Wasserschloss in Zulaufkaverne (minimal erforderliches Wasserschloss für  $K_{ST} = 40$ ) Firste des Hauptstollen 0,4 m über dem Stauziel

9.4.2 LF 2- Firste 0,4 m über STZ – Hauptstollen KST 29 – WS 26,7 m<sup>2</sup>

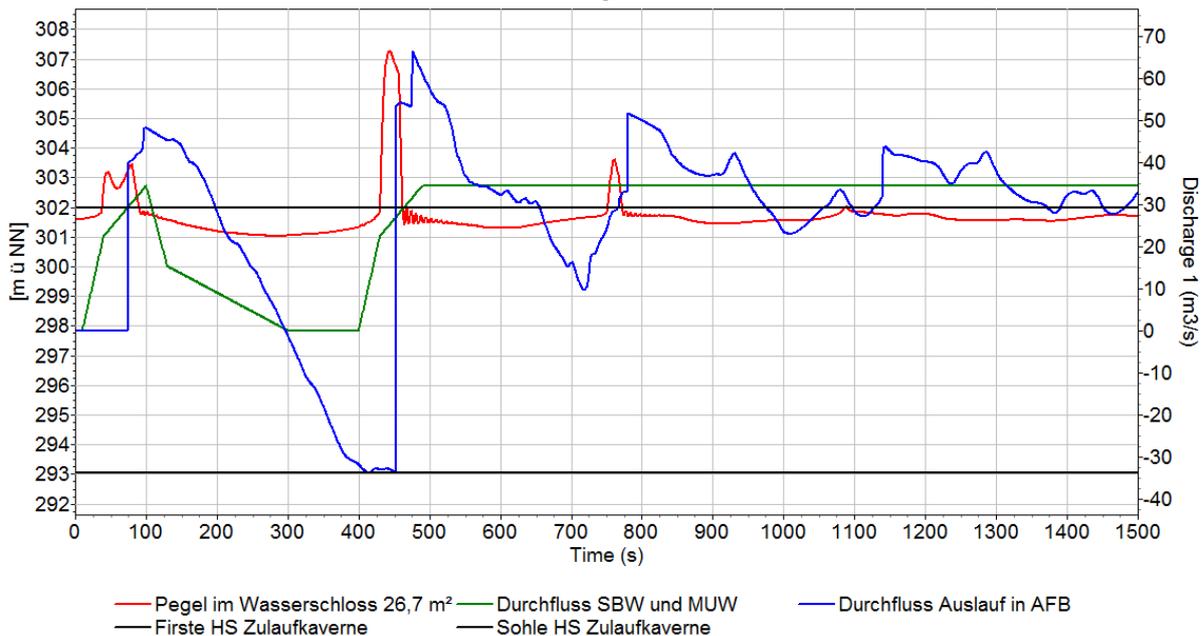


Abbildung 111: Massenschwingung im Kavernenspeichersystem mit 26,7 m<sup>2</sup> Wasserschloss in Zulaufkaverne (minimal erforderliches Wasserschloss für  $K_{ST} = 29$ ) Firste des Hauptstollen 0,4 m über dem Stauziel

9.4.3 LF 3- Firste 0,4 m über STZ – Hauptstollen KST 29 – 80 - 29 – WS 26,7 m<sup>2</sup>

Abbildung 112 zeigt den maßgebenden Fall mit angenommener glatter Sohle mit  $K_{ST} = 80$  [m<sup>1/3</sup>/s] und rauhen Ulmen mit  $K_{ST} = 29$  [m<sup>1/3</sup>/s]. Hierbei schwingt ein Wasserschloss mit 26,7 m<sup>2</sup> auf 307,7 m ü NN auf.

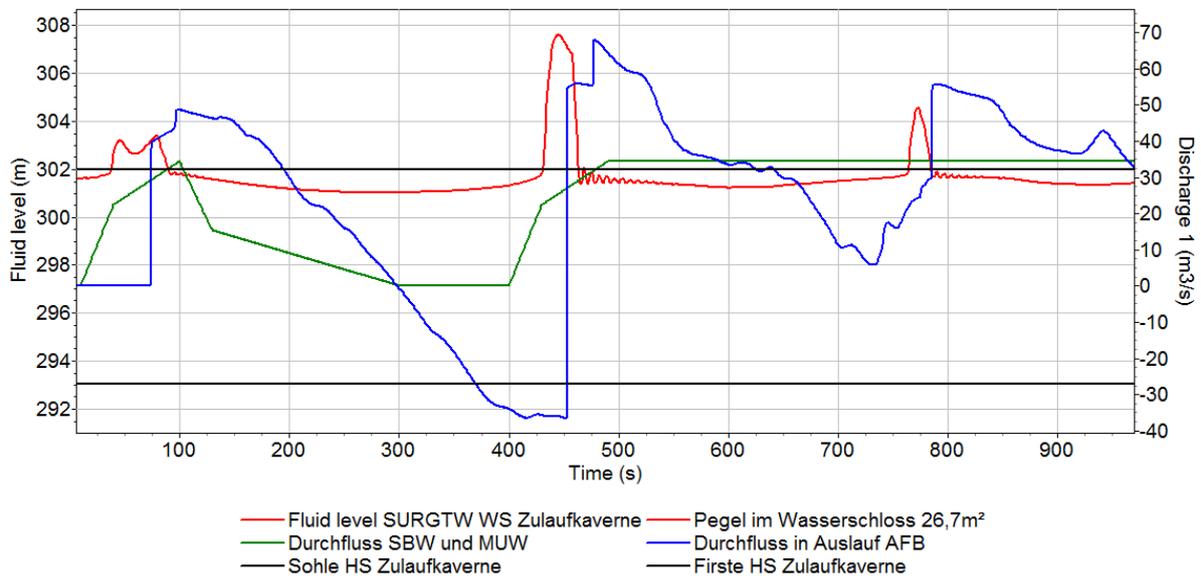


Abbildung 112: Massenschwingung im Kavernenspeichersystem mit 26,7 m<sup>2</sup> Wasserschloss in Zulaufkaverne (minimal erforderliches Wasserschloss für  $K_{ST} = 29$  an den Ulmen und  $K_{ST} = 80$   $K_{ST}$  an der Sohle) Firste des Hauptstollen 0,4 m über dem Stauziel

### 9.4.4 Firste 0,4 m über STZ Hauptstollen rau - Variantenstudie WS-Querschnitte

Abbildung 113 zeigt eine Variantenstudie von drei Wasserschlossquerschnitten (100 m<sup>2</sup>, 200 m<sup>2</sup> und 300 m<sup>2</sup> im Bereich der Zulaufkaverne). Abbildung 114 zeigt zusätzlich ein Wasserschloss mit der Querschnittsfläche von 1000 m<sup>2</sup>.

Es werden Fünffachschaltfälle angesetzt für den Vergleich von zu erwartenden Wasserschloss-Schachtgrößen. Es zeigt sich, dass es nicht sinnvoll ist größere Wasserschlossquerschnitte als den minimal erforderlichen (26,6 m<sup>2</sup>) nach dem Stabilitätskriterium nach Svee zu verwenden da kein besser dämpfender Effekt der Massenschwingung sich einstellt.

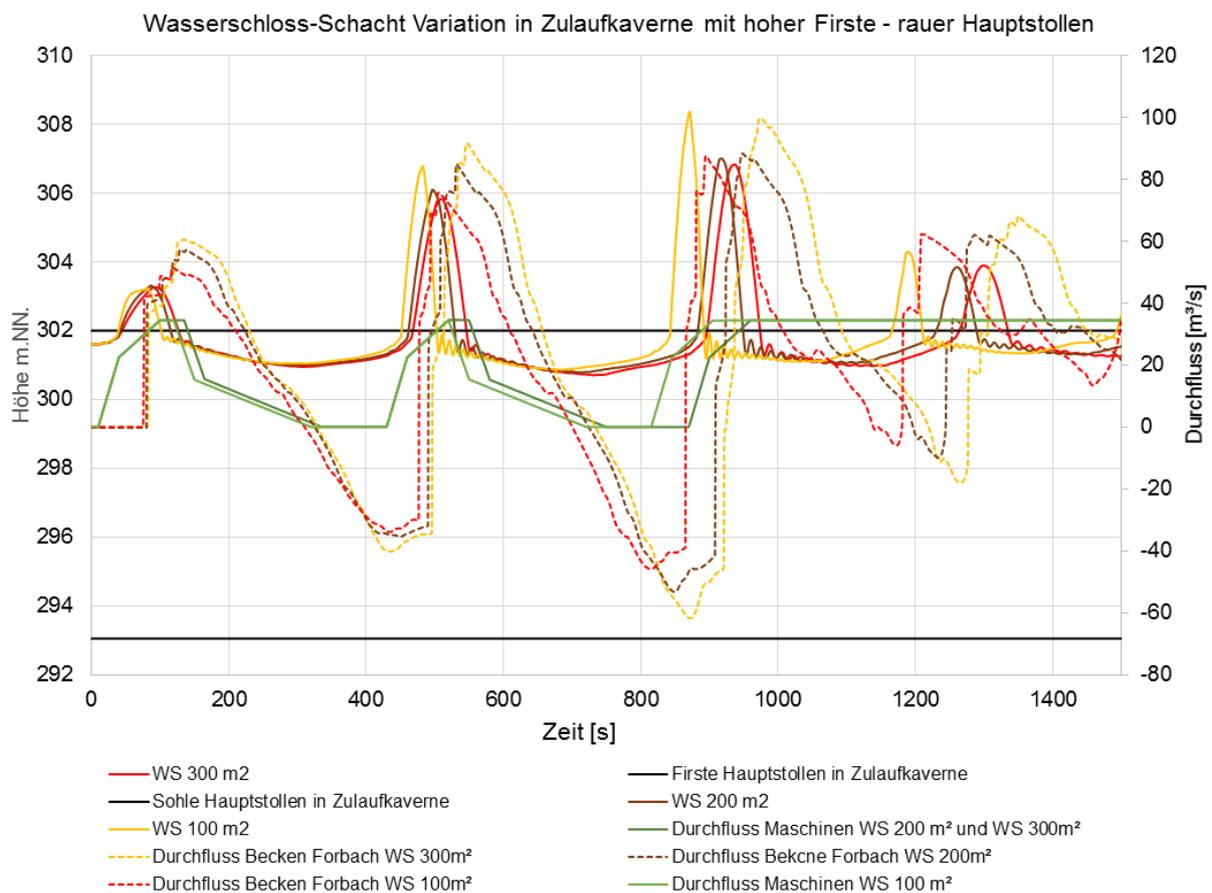


Abbildung 113: Massenschwingung im Kavernenspeichersystem - Variantenstudie Wasserschloss in Zulaufkaverne – Reibungskoeffizient 200 [mm] (zu erwartende Rauigkeit)

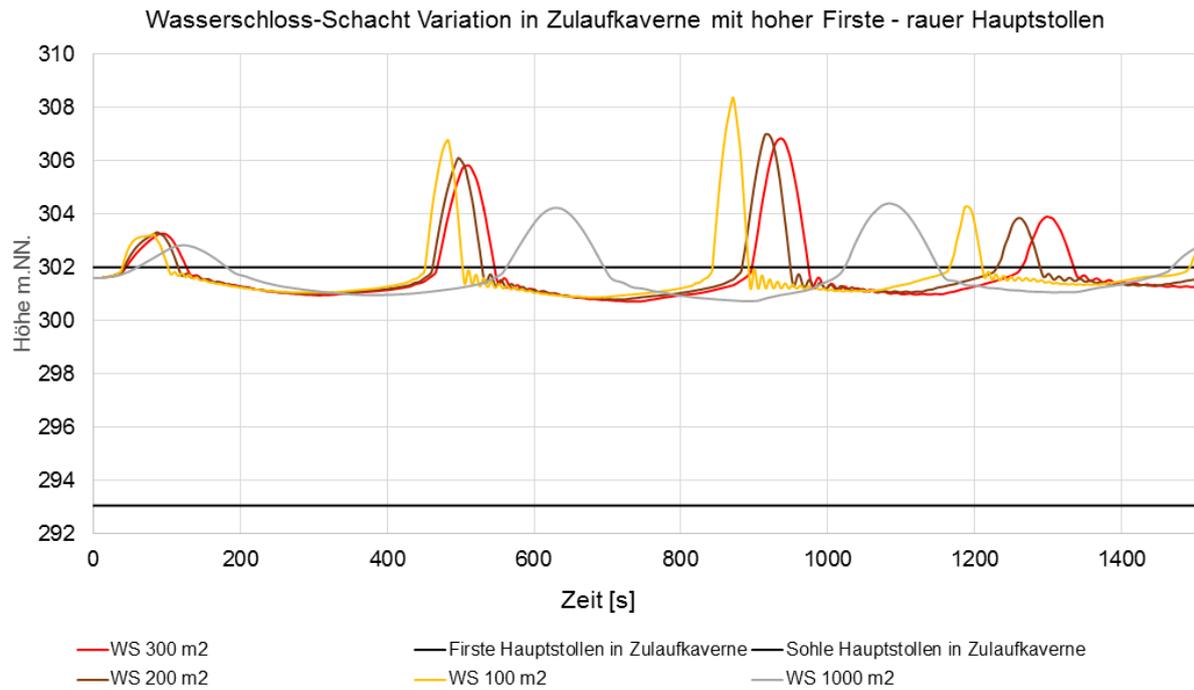


Abbildung 114: Massenschwingung im Kavernenspeichersystem - Variantenstudie Wasserschloss in Zulaufkaverne – Reibungskoeffizient 200 [mm] (zu erwartende Rauigkeit)

### 9.4.5 LF 4- ASZ – Verschluss am Zulauf FB-Becken

Zur Ermöglichung eines optimierten Abflusses und der verbesserten Nutzung des Totvolumens im Sohlbereich könnte ein Verschlussorgan am Übergang zum FB-Becken dies ermöglichen. Das Verschlussorgan wird ab dem Erreichen des ASZ im FB-Becken geschlossen. Hierbei könnte im Stollen ein tieferer Pegel als das ASZ im FB-Becken erreicht werden. Allerdings mit Berücksichtigung von geringerem Pumpendurchfluss um kein Abreißen zu erreichen.

Um diesen Effekt zu erreichen müssen allerdings mindestens die beiden ersten Nebentollen Sohlparallel angeschlossen werden (Abbildung 115), dadurch kann ein Wasserschloss-Effekt erzielt werden. Hierbei wird der Speicher-Schwerpunkt im Bereich der Zulaufkaverne abgesenkt. Dadurch wird Zeit gewonnen in welcher das Wasser im Hauptstollen bei Betrieb um das ASZ nachfließen kann.

Abbildung 116 zeigt den Längenschnitt des Hauptstollens ab Erreichen des minimalen Pegels (-4.5 m entspricht ASZ 295,5 müNN) d.h. hierbei wird ein Pegel von 294 müNN in der Zulaufkaverne erreicht, welcher 1,5 m unter dem ASZ ist. Bei weiterem Wassereinzug bildet sich ein Wechselsprung in der Zulaufkaverne.

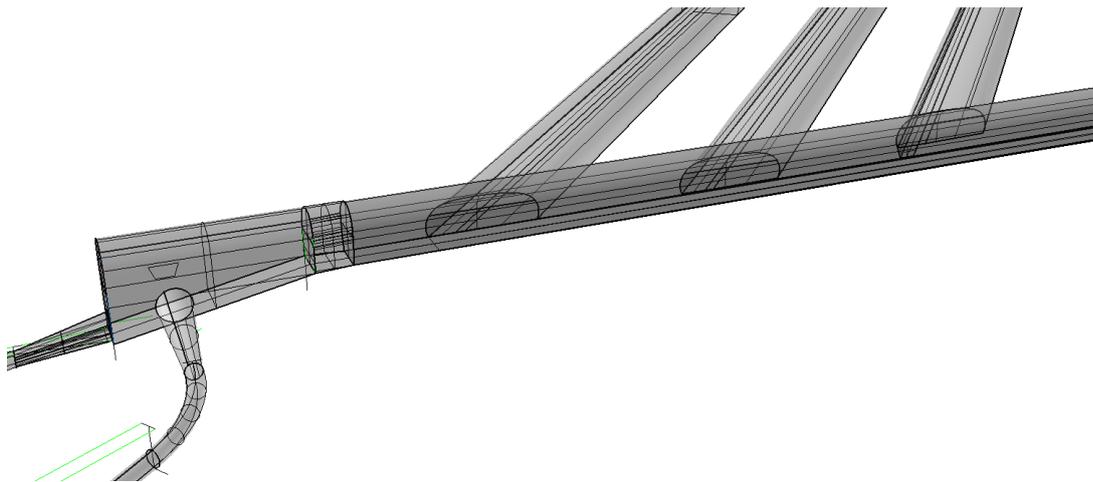


Abbildung 115: Anschluss der ersten beiden Nebentollen sohlparallel

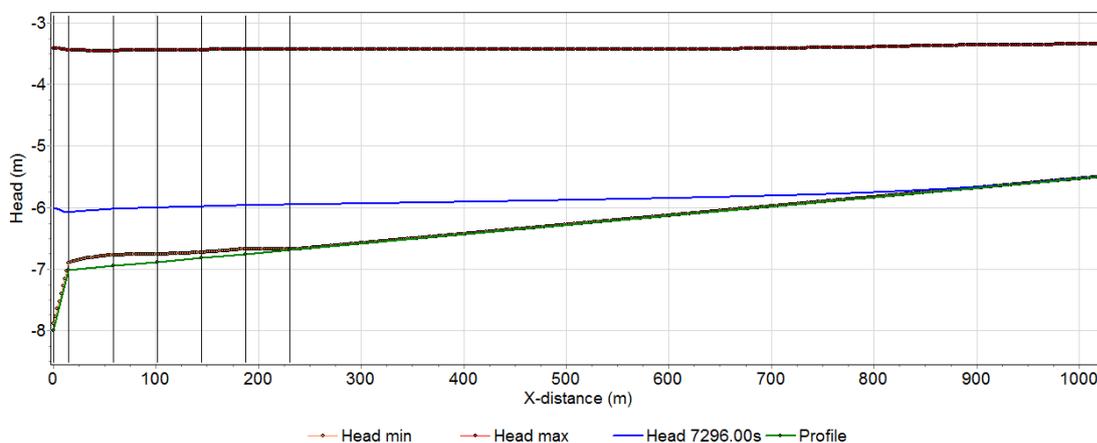


Abbildung 116: Längenschnitt Hauptstollen min. Pegel in Zulaufkaverne

Abbildung 117 zeigt die Durchflüsse der Maschinen SBW und MUW für das Anfahren und das Abstellen, bzw. dem Anfahren des Pumpbetriebs des SBW. Die grüne Linie zeigt den Ausfluss bzw. den Zufluss aus dem ABF. Ab dem Zeitpunkt 4300 Sekunden wird der Zufluss aus dem FB-Becken gestoppt – es wird das Verschlussorgan geschlossen. Abbildung 118 zeigt diesen Zeitbereich im Detail. Kurz vor dem Erreichen des ASZ werden noch etwa 1,0 m<sup>3</sup>/s in den Hauptstollen gefördert. Bei einer noch vorhandenen Tiefe von 1m ergibt dies eine mittlere Fließgeschwindigkeit von etwa 0,15 m<sup>3</sup>/s.

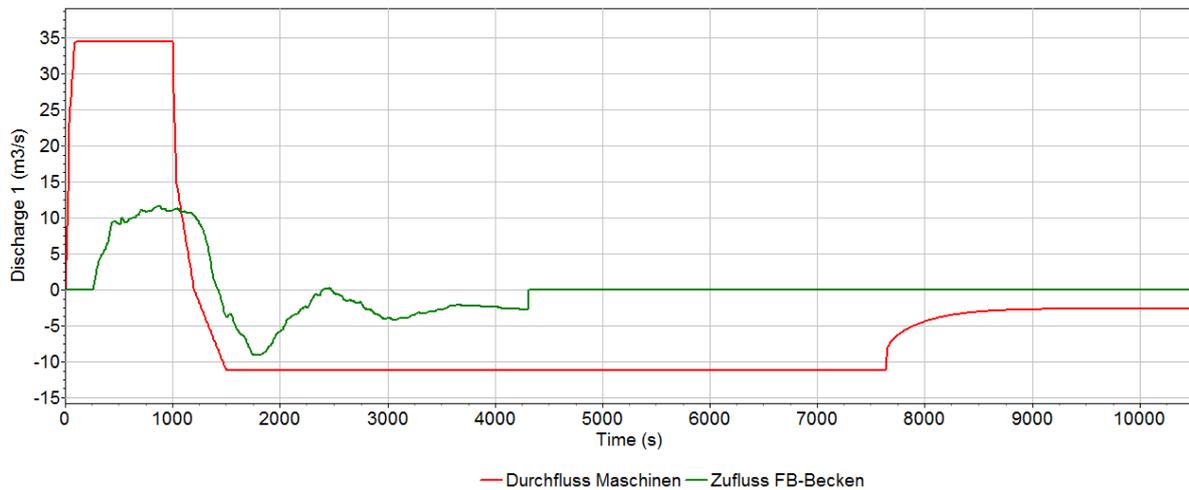


Abbildung 117: Durchfluss Maschinen und Zufluss AFB

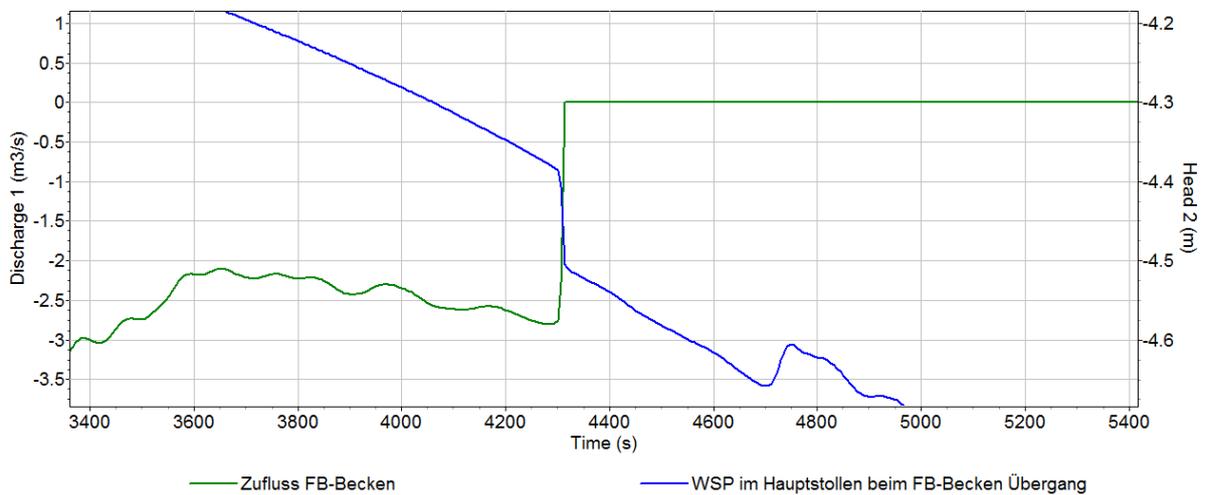


Abbildung 118: Zufluss AFB (grün) und Wasserspiegel im Hauptstollen beim Übergang, Detail

### 9.4.6 LF 5- ASZ – Sohle Hauptstollen um 1 m angehoben – glatte Ausführung

Als Optimierungsvorschlag wird die Sohle des Hauptstollens im Vergleich zur Ausgangsvariante um 1m über die gesamte Länge angehoben. Hierbei würde ein Verschlussorgan am Übergang in das Ausgleichsbecken Forbach entfallen.

Dadurch kann auch das Totraumvolumen im Sohlbereich des Hauptstollens weitgehend entleert werden.

Ein sohlparalleler Anschluss aller Nebenstollen (wie in Abbildung 115 für zwei Nebenstollen dargestellt) und Abbildung 119 wird vorgeschlagen. Hierbei entfallen auch die Totraumgräben der Nebenstollen. Im Unterschied dazu wird die gesamte Nebenstollensohle mit der ursprünglich für den Totraumgraben vorgesehene Sohlneigung von etwa 0,685 % geneigt.

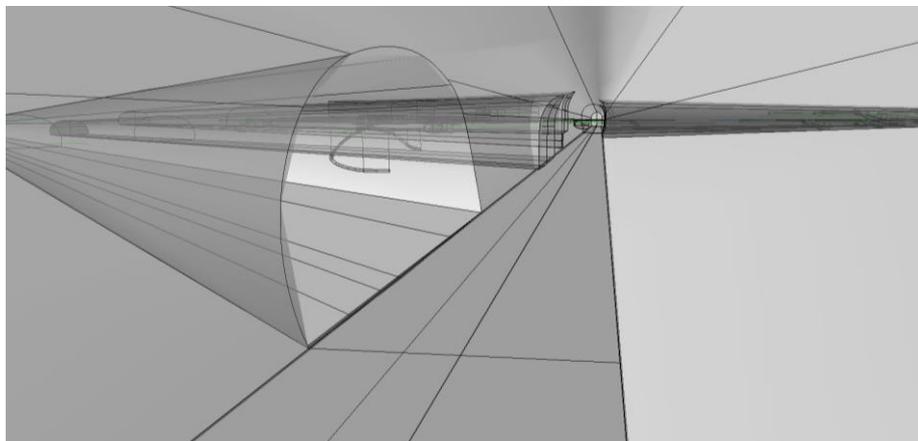


Abbildung 119: Sohlparalleler Anschluss der Nebenstollen und Entfall der Totraumgräben

Abbildung 120 zeigt die E.L. im Hauptstollen kurz vor dem Abreißen in der Zulaufkaverne (Zeitpunkt 5369,6 Sekunden für den untersuchten Lastfall)

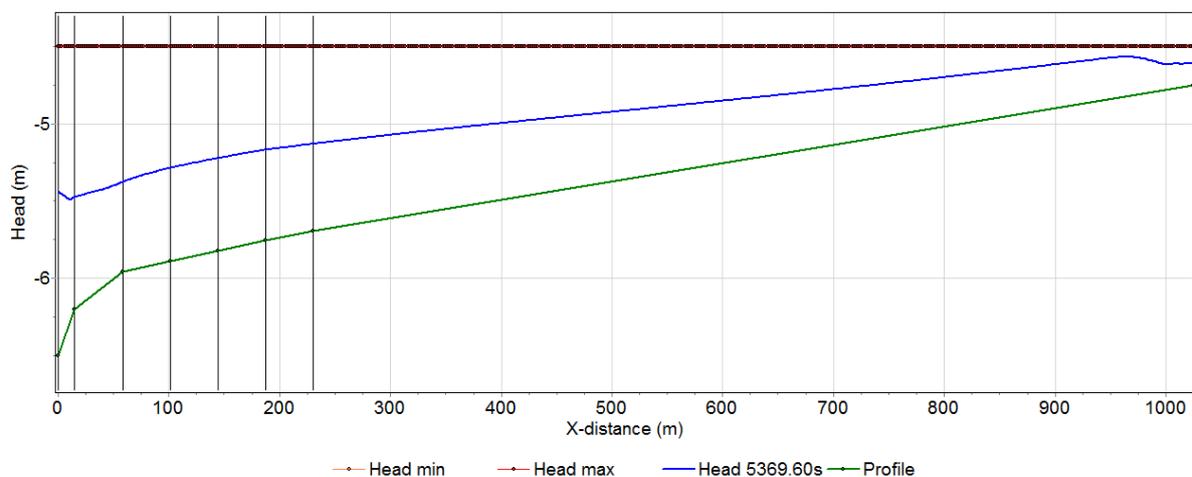


Abbildung 120: Längenschnitt des Hauptstollens mit E.L. für den minimalen Wasserstand im Hauptstollen vor dem Abreißen (+300 m ü NN, d.h -4,5 m entspricht dem ASZ 295,5 m ü NN)

Abbildung 121 zeigt, dass bei Erreichen des ASZ im Ausgleichsbecken Forbach noch etwa 1 m<sup>3</sup>/s in den Hauptstollen eingezogen wird.

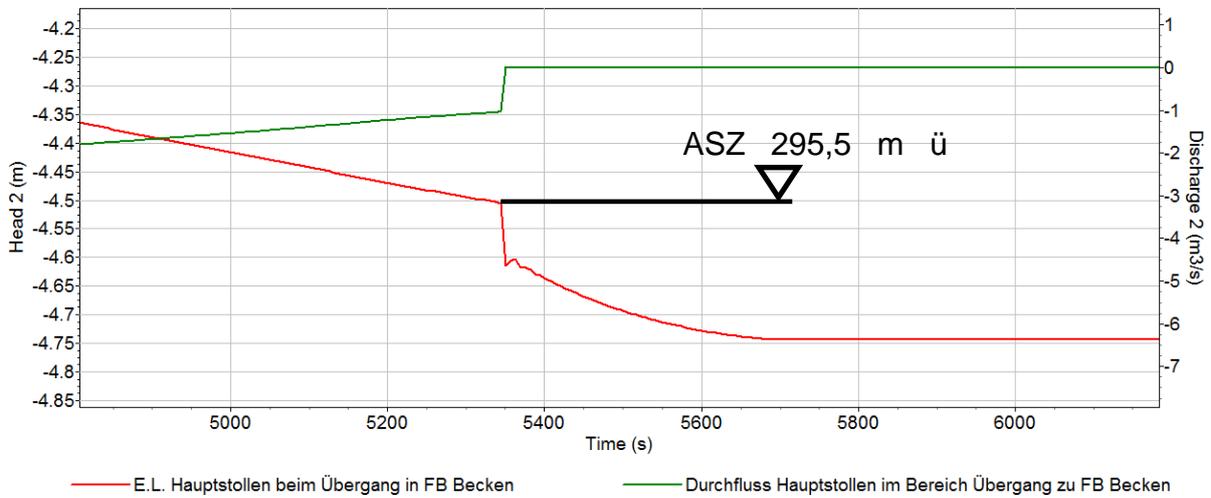


Abbildung 121: Energielinie und Durchfluss im Hauptstollen beim Übergang in das Ausgleichsbecken Forbach zum Zeitpunkt der Kapazitätsgrenze des Einlaufs in den Hauptstollen

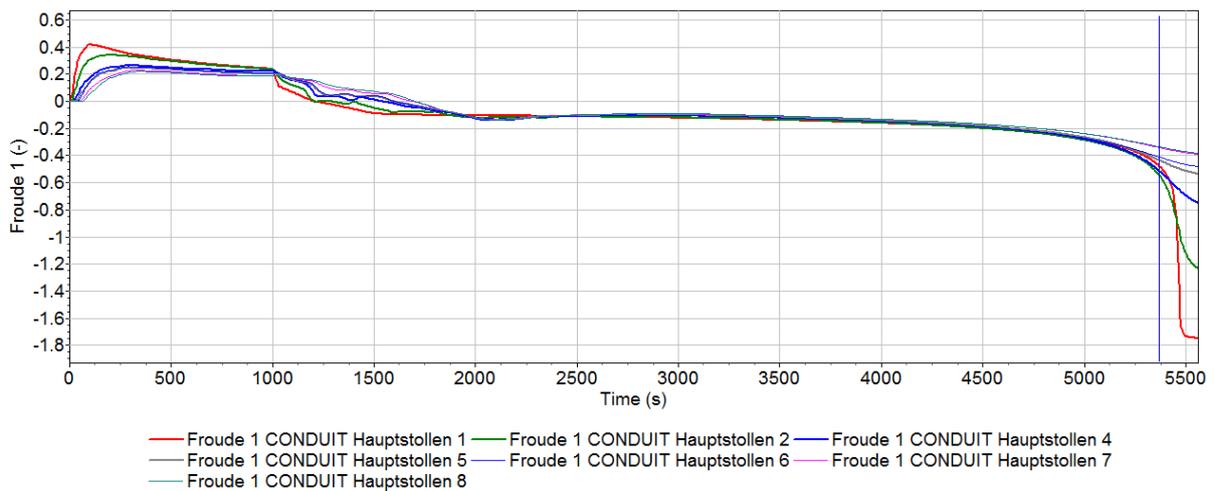


Abbildung 122: Froudezahlen für die Rohrelemente des Hauptstollens für den untersuchten Entleerlastfall – nach dem Zeitpunkt 5369 Sekunden bildet sich ein Wechselsprung in der Zulaufkaverne

### 9.4.7 LF 6- ASZ – Sohle Hauptstollen um 1 m angehoben – raue Ausführung

Diese Berechnungen zeigen die vorgeschlagene Optimierungsvariante für die weiteren Untersuchungen und aus derzeitiger Sicht als **Variante für die Ausführung**.

Es wird die Sohle ab km 09 + 76,5 m (Sohlknick in Zulaufkaverne) angehoben und berechnet.

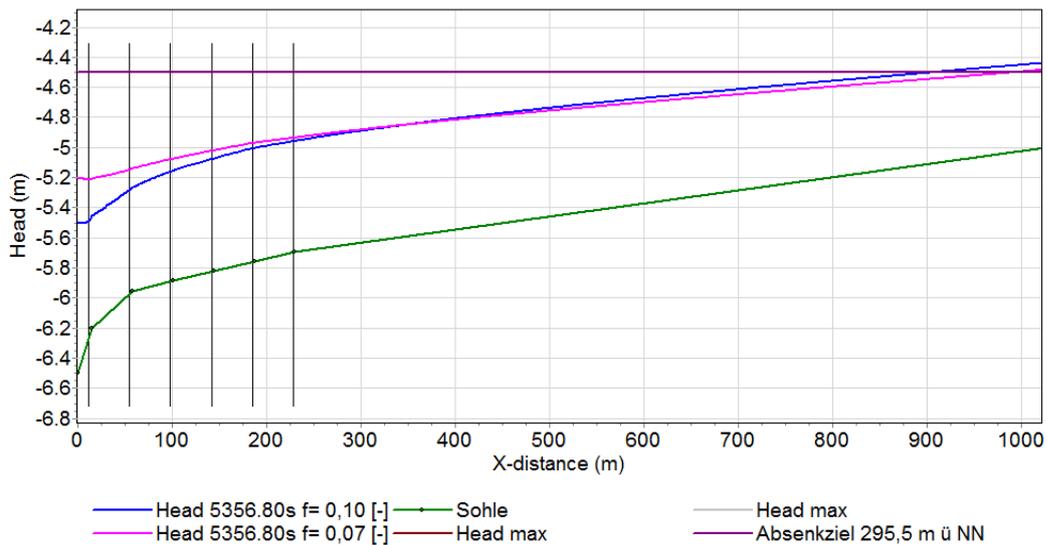


Abbildung 123: Längenschnitt des Hauptstollens, Vergleich Abstau bis ASZ im AFB für  $f = 0,07 [-]$  und  $f = 0,10 [-]$ , angehobene Sohle

Abbildung 124 zeigt den maßgebenden Fall für die Auslegung der Sohle im Hauptstollen. Hierbei wird bis auf ASZ im AFB im SBW Werk mit  $11,2 \text{ m}^3/\text{s}$  gepumpt. Der minimale Pegel in der Zulaufkaverne wird mit  $294,5 \text{ m ü NN}$  erreicht. Dieser Wert ist  $1 \text{ m}$  unter dem ASZ und somit lt. Planer zulässig für die Pumpenauslegung.

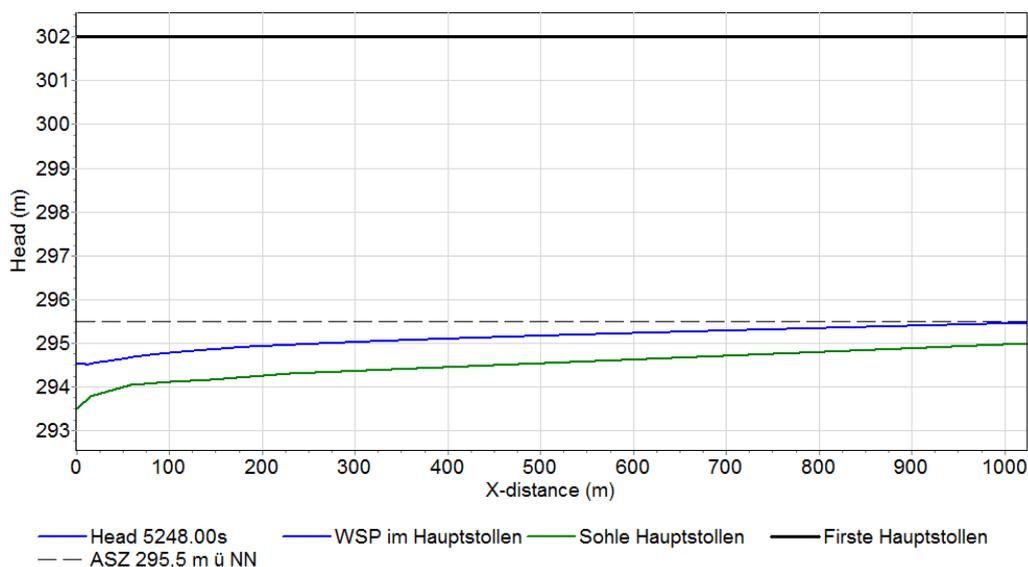


Abbildung 124: Längenschnitt des Hauptstollens, Abstau bis ASZ im AFB für  $f = 0,067 [-]$ , angehobene Sohle, Zeitpunkt 5248,0 Sekunden in der Simulation

Abbildung 124 und Abbildung 125 zeigen die Entleerung des Kavernensystems und des Ausgleichsbeckens Forbach mit insgesamt 400 000 m<sup>3</sup> über 9,97 Stunden mittels Pumpbetrieb im SBW Werk mit QA von 11,2 m<sup>3</sup>/s.

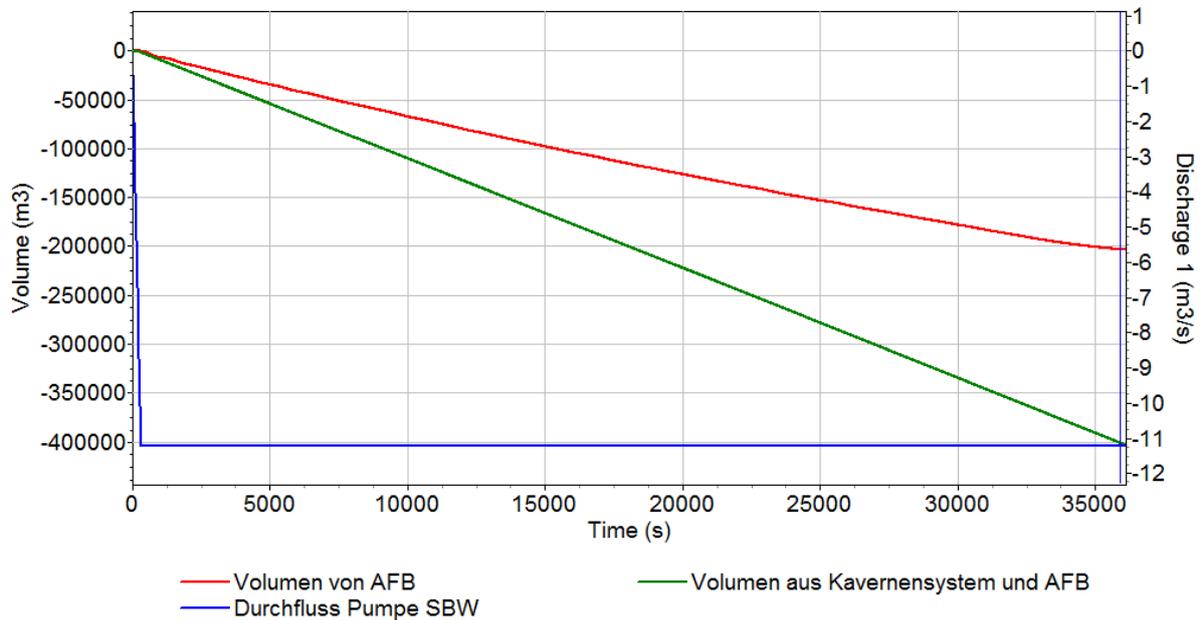


Abbildung 125: Pumpbetrieb SBW mit Anfahren in 300 Sekunden und konstantem Pumpbetrieb über 35900 Sekunden (9,97 h), bei STZ 301,6 m ü. NN, komplettes Entleeren der Kavernen und des AFB, Volumen Gesamt, Volumen AFB, Pumpdurchfluss

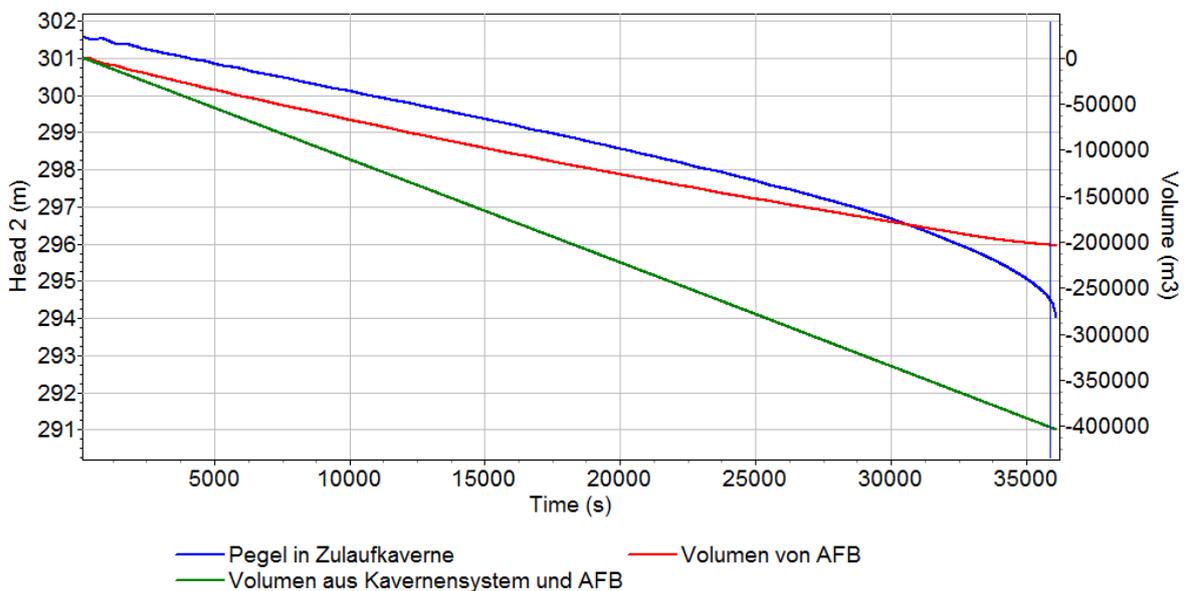


Abbildung 126: Pumpbetrieb SBW mit Anfahren in 300 Sekunden und konstantem Pumpbetrieb über 35900 Sekunden (9,97 h), bei STZ 301,6 m ü. NN, komplettes Entleeren der Kavernen und des AFB, Volumen Gesamt, Volumen AFB, Wasserpegel in der Zulaufkaverne

## 10. Zusammenfassung der Untersuchungen

Dieses Kapitel beschreibt zusammenfassend die Ergebnisse und Aussagen der hydraulischen Untersuchungen für den Kavernenspeicher PSW Forbach von TU Graz im Rahmen des 1. Arbeitspaketes.

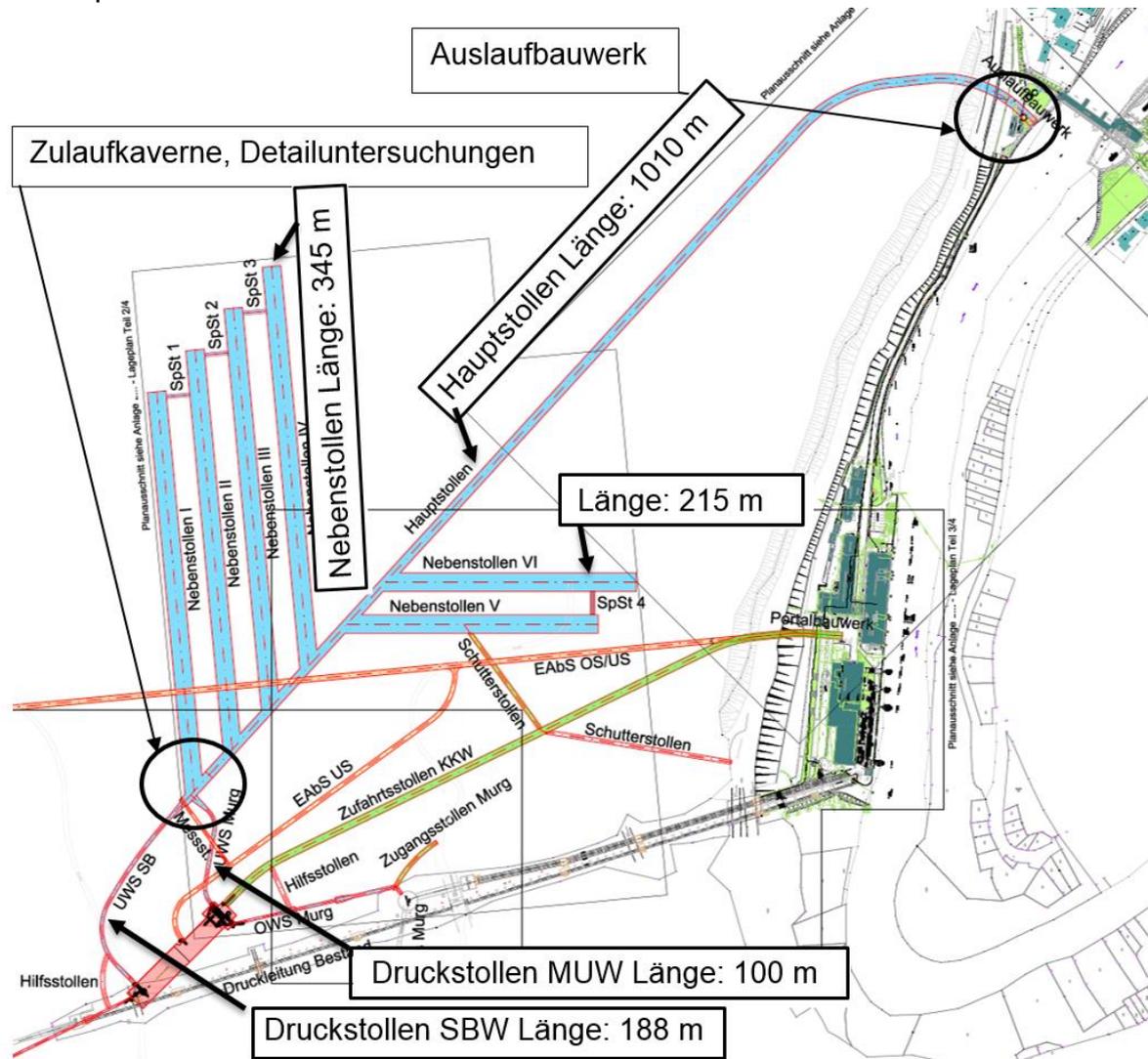


Abbildung 127 zeigt den Gesamtbereich der UW-Speicherkaverne.

- 1D- Numerik der Ausgangsvariante
- 3D- Numerik zur Optimierung der Zulaufkaverne
- 3D- Numerik der Gesamtkaverne
- 1D- Numerik zur Optimierung der Gesamtkavernengeometrie

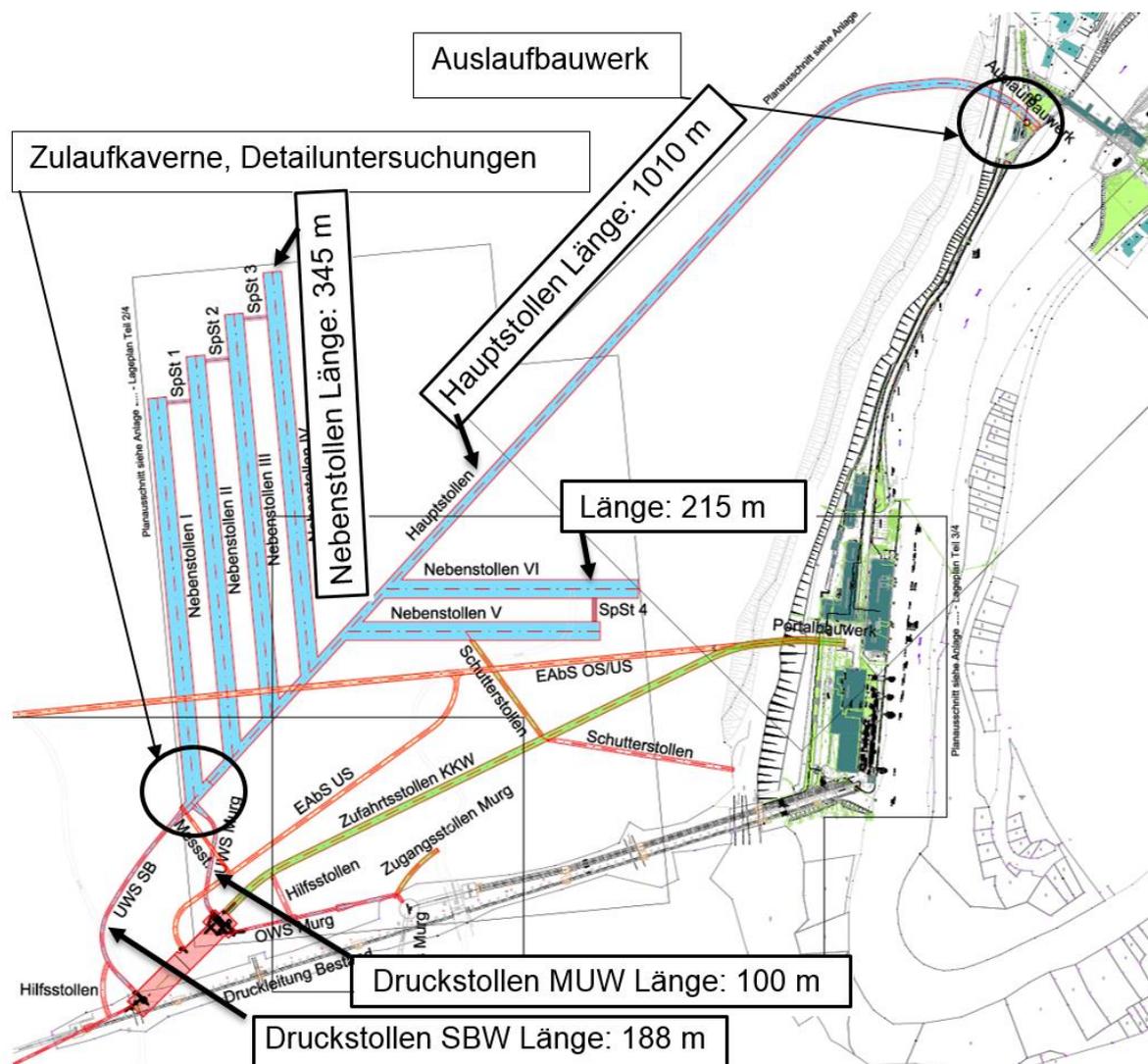


Abbildung 127: Übersichtslageplan Unterwasserspeicher (US) des PSW Forbach, Ausgangsvariante

### 10.1 Ausgangsvariante gesamter Kavernenspeicher - 1D-Numerik

Die 1D-numerischen Berechnungen des gesamten Kavernenspeichers bestätigen die zu untersuchende Funktionsfähigkeit. Auch für ungünstige Resonanzschaltfälle bei STZ wird kein Zuschlagen an der Firste generiert. Es wird für einen ungünstigen Resonanzlastfall ein maximaler Pegel von 302,7 m ü NN errechnet. Für den Betrieb bei ASZ wird die Funktionsfähigkeit insofern bestätigt, als dass bis zum Absenkziel im Ausgleichsbecken Forbach mit 11,2 m<sup>3</sup>/s gepumpt werden kann. Allerdings ist für einen unausgekleideten rauen Kavernenspeicher kein konstantes Pumpen mit QA bei ASZ 295,5 m ü NN möglich. Für diesen Fall muss dann mit vermindertem Pumpendurchfluss gefördert werden.

## 10.2 Ausgangsvariante Zulaufkaverne 3D-Numerik

Die Ausgangsvariante der Zulaufkaverne wird intensiv untersucht. Für den Pumpenfall des SBW wird eine sehr hohe Sicherheit gegen Lufteinzug durch Einlaufwirbel ermittelt und bestätigt. Die hydraulischen Verluste der Zu- und Ablaufbauwerke der Druckstollen werden untersucht – hierbei werden Optimierungspotenziale gesehen und weitere Varianten evaluiert. Für die Untersuchung und Optimierung der Zulaufkaverne werden insgesamt 9 Varianten hydraulisch simuliert. Hierbei ist das wesentliche Augenmerk eine Verminderung der lokalen Verluste. Als signifikant beste Variante wird ein Zusammenschluss von MUW- und SBW Stollen als T-Stück, welches sich vor der Zulaufkaverne befindet, ermittelt. Diese ist als Variante 9 (Abbildung 128) unter Pkt: 8.4.9.1 dargestellt. Zusätzlich wird hierbei die Stollenlänge und die Neigung des MUW Stollens vermindert.

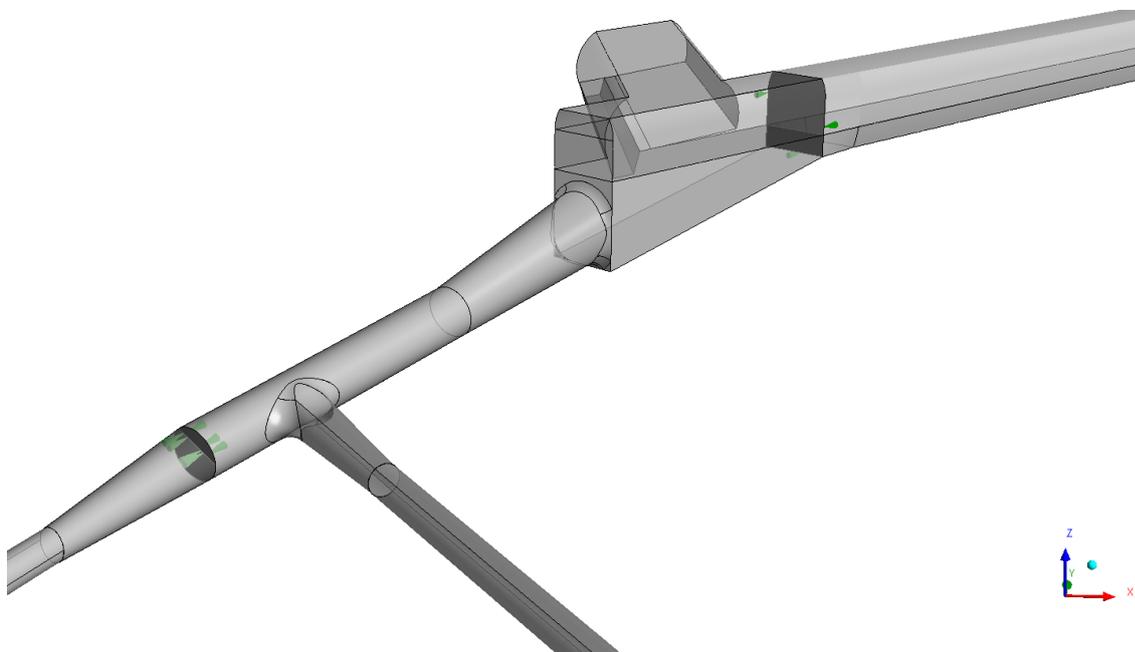


Abbildung 128: Variante 9 - Ausführungsvorschlag – Anbindung des SBW Stollens mit dem MUW Stollen und Übergangstollen in den Diffusor vor der Zulaufkaverne

## 10.3 Ausgangsvariante gesamter Kavernenspeicher 3D-Numerik

Die 3D-numerische Untersuchung des gesamten Kavernenspeichers wird vorerst für den stationären Fall des Turbinenbetriebs von MUW und SBW bei Stauziel durchgeführt. Dieses Ergebnis bestätigt die hydraulische Funktionsfähigkeit der Anlagen für diesen Betriebsfall. Die weiteren – in der Ausschreibung für das Anbot der TU-Graz - vorgesehenen instationären Lastfälle werden für das Arbeitspaket 2 zur Untersuchung des definitiven Ausführungsvorschlages berechnet.

## 10.4 Optimierungsvorschläge des Kavernenspeichers

Die Untersuchungen zeigen hohe Luftvolumina im Firstbereich und große Toträume

im Sohlbereich des Hauptstollens und der Nebenstollen. In Summe ergeben sich etwa 46 000 m<sup>3</sup> als nicht direkt hydraulisch genutztes Ausbruchsvolumen. Im Verhältnis zum Nutzvolumen sind dies etwa 23 %. Aus Sicht von TU Graz kann dieses Verhältnis verbessert werden. Es ist hier allerdings wichtig zwischen dem luftgefüllten Firstbereich und dem Totraum im Sohlbereich zu unterscheiden. Der Totraum im Sohlbereich wirkt aufgrund des Fließquerschnitts insbesondere bei tiefen Wasserpegeln reibungsverlustmindernd. Dieser Effekt wird untersucht und in Kapitel 9.1 dargestellt.

Die Optimierung wird erstens durch ein Absenken der Firste um 1,4 m auf 302,0 m ü NN und zweitens durch ein Anheben der Sohle des Hauptstollens um etwa 1 m (0,5 m höher im Überlaufbereich zum Ausgleichsbecken Forbach) ermöglicht (Tabelle 34 auf Seite 93). Damit ist der Wasserpegel bei Stauziel von 301,6 m ü NN nur mehr 0,4 m unterhalb der Hauptstollenfirste. Die Nebenstollen werden mit 0,74 m Firstversatz tiefer angeordnet. Auch ist es zu empfehlen die Nebenstollen sohlparallel anzuschließen. Die Sohlrampe in der Zulaufkaverne wird wie in der Ausgangsvariante belassen. Auch werden keine Änderungen der Lage der Nebenstollen und der Lage der Zulaufkaverne wie der Länge des Hauptstollens vorgesehen. Dadurch wird ein tieferer Schwerpunkt generiert und die Toträume der Nebenstollen fallen weg. Die Sohle der Nebenstollen wird für die gesamte Nebenstollenlänge als geneigt vorgeschlagen. Durch diese Maßnahmen kann das Verhältnis von Ausbruchsvolumen zu Nutzvolumen signifikant verbessert werden. Zu beachten ist, dass durch die geringere Fließtiefe gerade bei Lastfällen im Bereich des Absenkziels höhere Fließverluste als in der Ausgangsvariante zu erwarten sind. Abbildung 100 zeigt den Vergleich der Verlusthöhe in Bezug auf die Füllhöhe im Kavernenspeicher. Im Bereich von ASZ bis etwa 297 m ü NN werden statt 0,4 mWS Verlusthöhe etwa um 0,9 mWS höhere Verlusthöhen bis kurzzeitig 1,4 mWS Verlusthöhe erreicht. Allerdings werden ab der Füllhöhe von 297 m ü NN bis zum STZ von 301,6 m ü NN keine erhöhten Verluste erwartet. Eventuelle Überprofile der Sohle oder glattere Sohlausführungen verringern je nach Ausmaß die hydraulischen Reibungsverluste im Arbeitsbereich des Absenkziels.

Einer starken Druckerhöhung zufolge Zuschlagen wird durch einen zusätzlichen Wasserschlossquerschnitt im Zulaufkavernenbereich entgegen gewirkt. Dadurch kann jederzeit der Druckstoß in der Zulaufkaverne sicher reflektiert werden. Dies gewährleistet auch die Regelbarkeit der Turbine für ungünstige Schalfälle. Im Auslaufbereich (Rechenquerschnitt) wird eine kleine Entlüftungsvorrichtung empfohlen (Dieser Punkt wird im Arbeitspaket 2 untersucht werden). Diese Vorrichtung soll den Einlaufrechen vor eventuellen ungünstigen Druckimpulsen schützen, welche sich bei plötzlichem Entweichen von Luftblasen bilden können.

Ein Wasserschloss mit einer Stabilitätsquerschnittsfläche von 26,7 m<sup>2</sup> wird vorgeschlagen. Dies soll direkt am Beginn der Zulaufkaverne errichtet werden. Dadurch kann das kurzzeitige Zuschlagen an der Hauptstollenfirste bei geringer Druckerhöhung erlaubt werden. Ein maximales Aufschwingen für den untersuchten

Lastfall wird mit der Kote von 306,55 m ü NN errechnet, bei einer Firstoberkante von 302,00üNN. Als Sicherheitskonzept gegen das Überlaufen des Wasserschlosses wird ein Sicherheitsfaktor von 1,5 [-] bezüglich der kinetischen Energie im Hauptstollen zum errechneten Zeitpunkt des Zuschlagens vorgeschlagen (Vernachlässigung der Reibung). Eine Be- und Entlüftung des Wasserschlosses ist vorzusehen. Daraus ergibt sich die Überlaufkante des Wasserschlosses auf 309,8 m ü NN. Ein Überprofil im Hauptstollen kann dabei ungünstig wirken (höhere kinetische Energie). Eingeschlossene Luftpakete an der Stollenfirste wirken allerdings günstig auf diese definierte Sicherheit, da im Prototyp zu einem früheren Zeitpunkt das Wasserschloss aufschwingt und sich dadurch ein Gegendruck im Stollensystem aufbaut, welcher die Massenschwingung dämpft. Auch ist anzumerken, dass die Verbindungsquerschläge zwischen den Nebentollen aus hydraulischer Sicht nicht unbedingt notwendig sind. Es wird aber festgestellt, dass aufgrund der Strömungsumleitung und Verteilung bei tieferen Pegeln eine geringe Verbesserung der Fließverluste im Gesamtsystem erreicht wird.

## 11. Vorschläge für weitere Bearbeitungen im Arbeitspaket 2 (AP2)

Zwischen EnBW und TU Graz wurde vereinbart, die Untersuchungen für den Kavernenspeicher Forbach zu teilen. In diesen vorliegenden Teil (Arbeitspaket 1) und in weitere Untersuchungen, welche nach Abstimmung im Arbeitspakete 2 noch erfolgen werden. Im Arbeitspaket 2 werden dann die vorliegenden Untersuchungen nach den noch offenen Punkten bzw. nach Absprache erweitert werden. Folgende Untersuchungen werden von der TU Graz noch als zielführend und erforderlich erachtet:

- Detailuntersuchungen des Wasserschlosses in der Zulaufkaverne – Variantenstudie zur Optimierung und hydraulischen Ausbildung. Insbesondere im Hinblick auf das Zuschlagen im Hauptstollen. (3D-Simulation des Einströmverhaltens).
- Festlegung des Entlüftungsbauwerk vor dem FB-Einlauf. Hierbei soll ein adäquater Querschnitt an der Firste beim Zuschlagen das Entweichen von Luft ermöglichen. Dieses Bauwerk hat die Aufgabe, das Entweichen der Luft durch den Rechenquerschnitt zu verhindern.
- 3D-Simulation der Ausführungsgeometrie – bei Stauziel und bei Absenkziel für die maßgebenden Lastfälle. Hierbei wird das Gesamtsystem (inklusive des Wasserschlossdetails) für die zwei maßgebenden Lastfällen untersucht.
- Bewertung des Zuschlagens im System. Hierbei werden Überlegungen und Berechnungen angestellt, welche ein Zuschlagen an der Firste des Hauptstollens schadensfrei ermöglichen sollen. Die Rolle von eingeschlossener Luft an der Firste wird beurteilt.

Es ist anzumerken, dass Stollensspeichersysteme selten gebaut wurden und daher wenige Erfahrungswerte zur Verfügung stehen. Hinsichtlich der Luftthematik und der Optimierung des Ausbruchsvolumen wird von TU Graz ein physikalischer Modellversuch (Froude'sche Modellskalierung) sehr empfohlen. Modellmaßstäbe können dann entsprechend festgelegt werden. Prinzipiell ist eine hybride Modellierung mit 3D CFD und physikalischer Untersuchung zu empfehlen, um weiterführende Details ermitteln und optimieren zu können. Der Betrieb eines Modells muss instationär möglich sein. Mindestens ein Nebenstollen (vorderster in der Zulaufkaverne) sollte dabei komplett physikalisch modelliert werden.

## 12. Literatur

- Bråtveit, K., L. Lia, und N.R.B. Olsen. 2012. „An efficient method to describe the geometry and the roughness of an existing unlined hydro power tunnel.“ *Energy Procedia* 20 ( 2012 ) 200 – 206.
- Chow, V.T. 1973. *Open-Channel Hydraulics*. McGraw-Hill.
- EnBW. Stand 22.04.2015. „Projekt Forbach, Ausschreibungsunterlagen.“
- Fleißner, R. 2014. „BED LOAD ANALYZER - Benutzerhandbuch.“ *TU Graz BED LOAD ANALYZER*.
- Idel'cik, I. E. 1994. *Handbook of hydraulic resistance*. Boca Raton, Fla. [u.a.]: CRC Press.
- Ing. ARGE PSW Forbach, \_\_. Juli 2015. „Entwurfsplanung.“ 150825\_FOR\_Bericht\_Entwurf\_US-MW\_Vorabzug\_Rev1.docx.
- Koch, M. 2016. *3D-Numerische Simulationen der hydraulischen Verlustbeiwerte der asymmetrischen Drossel im Wasserschloss Krespa*. Masterarbeit TU Graz.
- Meyer-Peter, E., und R. Müller. 1949. „Eine Formel zur Berechnung des Geschiebetriebes.“ *Schweizerische Bauzeitung* Nr. 3 S. 29-32.
- Nicolet, C., F. Avellan, P. Allenbach, A. Sapin, und J.-J. Simond. 2002. *NEW TOOL FOR THE SIMULATION OF TRANSIENT PHENOMENA IN FRANCIS TURBINE POWER PLANTS*. Lausanne: Proceedings of the Hydraulic Machinery and Systems 21st IAHR Symposium.
- Richter, Wolfgang. 2010. *3D-numerische Strömungssimulation von hydraulischen Rückstromdrosseln in Wasserschlässern*. Diplomarbeit, Universität: Innsbruck.
- Rønn, P.-E., und M. Skog. 1997. „New method for estimation of head loss in unlined water tunnels.“ *Hydropower'97* (Broch, Balkema).
- Seeber, Gerhard. 1999. *Druckstollen und Druckschächte*. Stuttgart - New York: ENKE.
- Solvik, Ø., und E. Tesaker. 1997. „Floor paving in unlined hydropower tunnels.“ Broch, Lysne, Balkema. 691-695.
- Svee, R. 1970. *Untersuchungen über die Stabilität bei Wasserkraftanlagen mit idealer Regelung*. Mitteilungen Nr. 15 Institut für Wasserbau Technische Universität Graz.
- Thoma, D. 1910. *Theorie des Wasserschlosses bei selbsttätig geregelten Turbinenanlagen*. Dissertation, Kgl. Technische Hochschule zu München: R. Oldenbourg.

- Widmann, W., T. Lebesmühlbacher, A. Eder, und K. Knorpp. 2015. „Design and operation of the Stanzertal hydro power plant headrace tunnel as reservoir.“ *Hydro Congress*. Bordeaux.
- Zenz, G., H. Knoblauch, W. Richter, W. Dobler, und F. Lazar. 2011. *Modellversuch Wasserschloss Burgstall*. Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft: TU Graz.

### 13. ANHANG

#### 13.1 Strömungssituation Variante 1 - Darstellungen

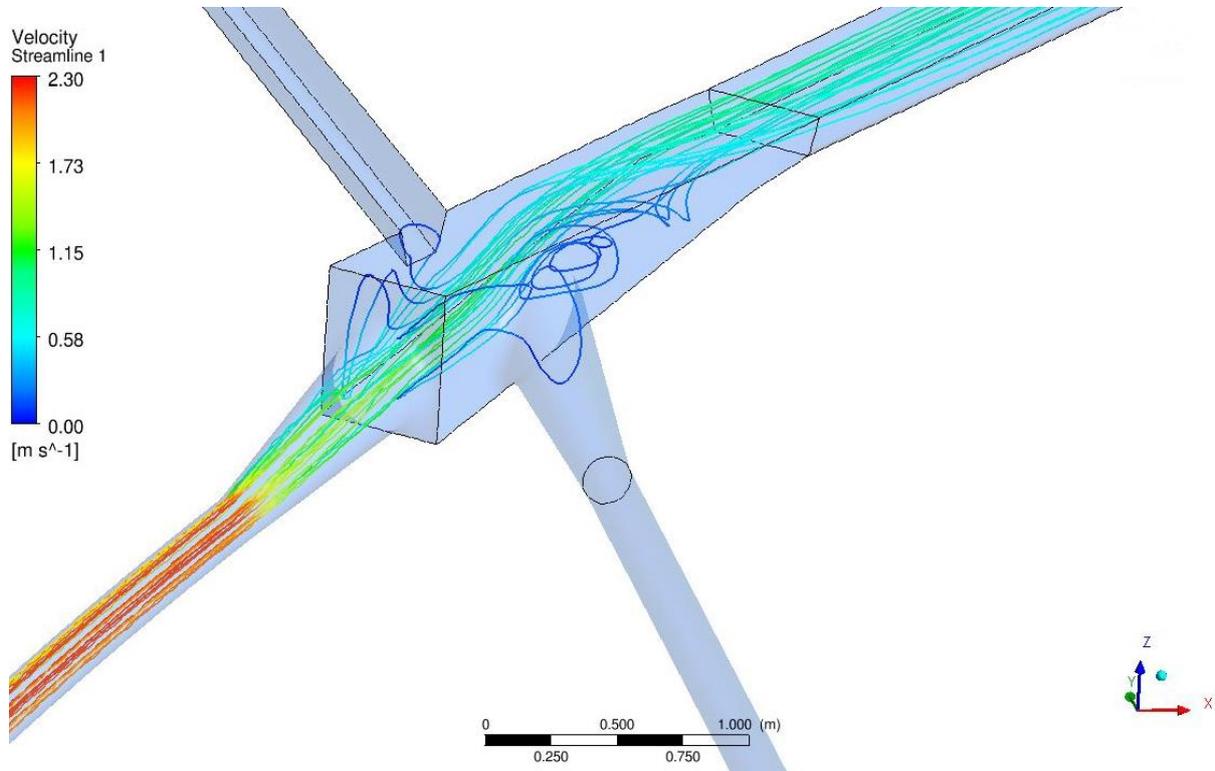


Abbildung 129: LF SB-Turbinieren – ASZ – ausgerundet Variante 1

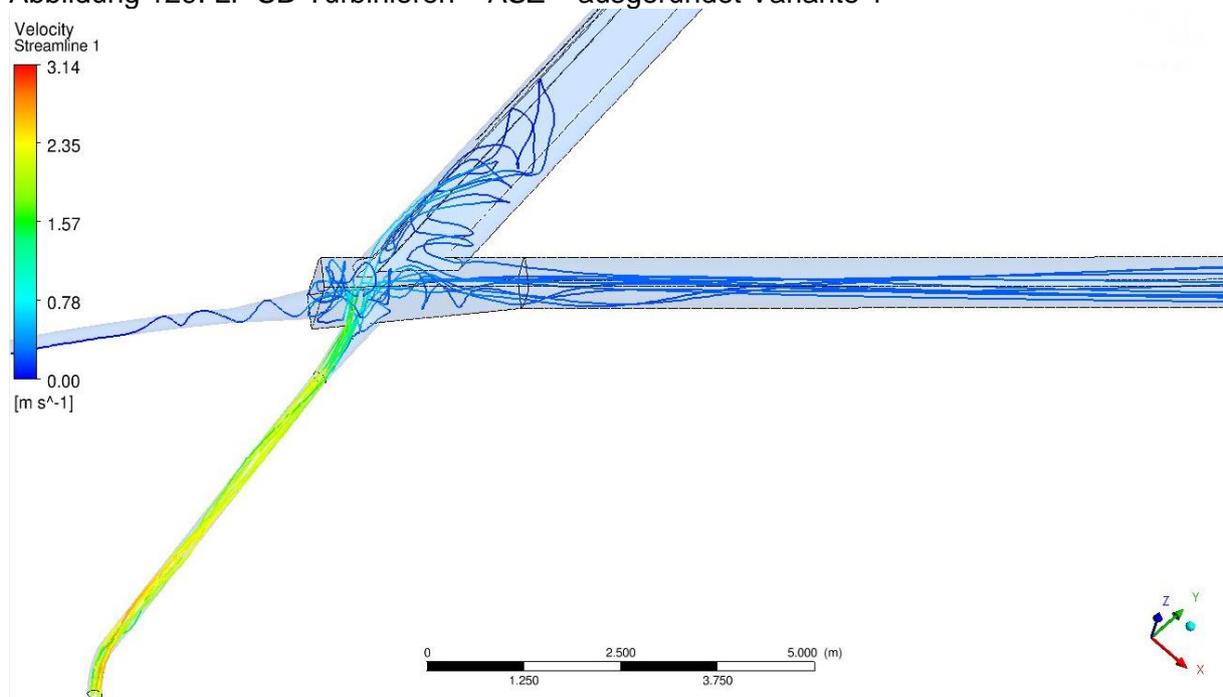


Abbildung 130: LF MUW-Turbinieren STZ – ausgerundet Variante 1

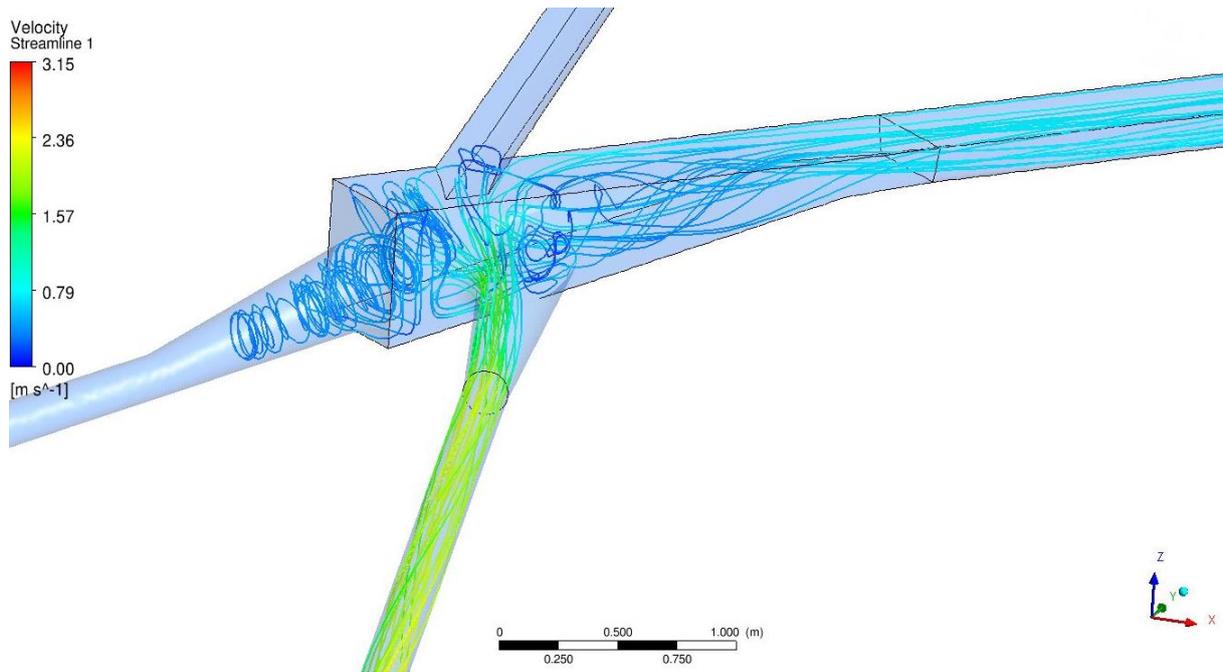


Abbildung 131: LF Murg Turbinieren ASZ Variante 1 ausgerundet

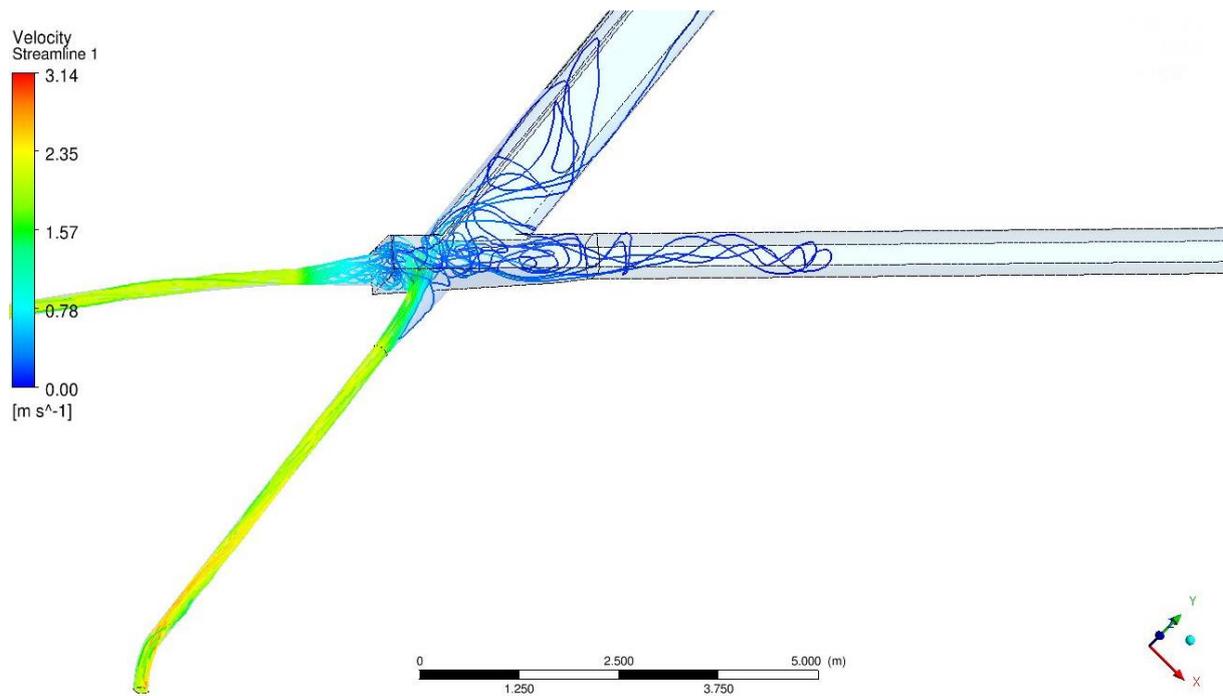


Abbildung 132: LF SB Pumpen – Murg Turbinieren – STZ Variante 1

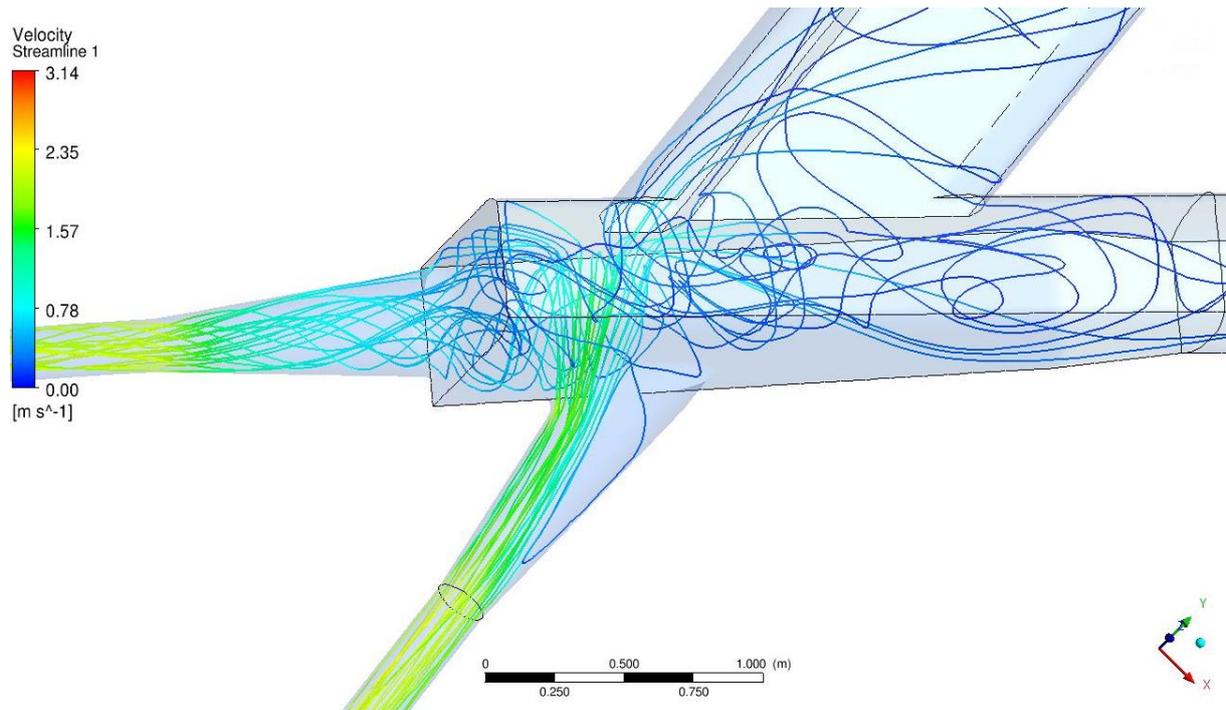


Abbildung 133: LF SB Pumpen – Murg Turbinieren – STZ ausgerundet Variante 1

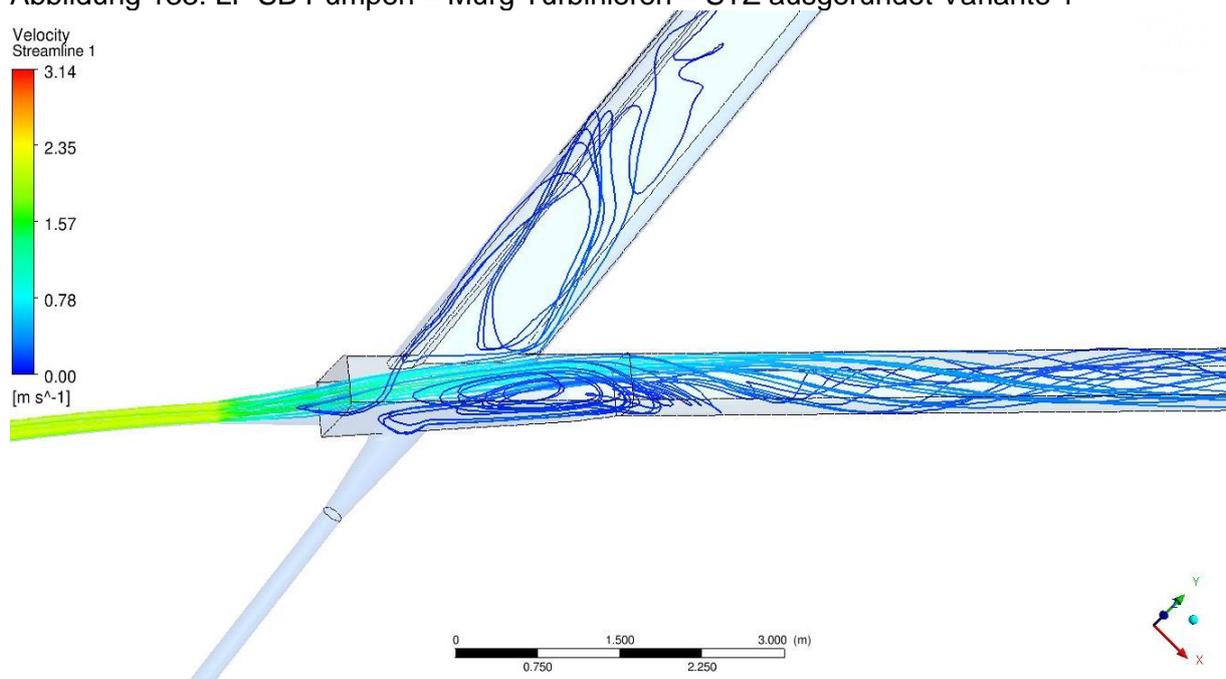


Abbildung 134: LF SB Turbinieren – STZ – ausgerundet Variante 1

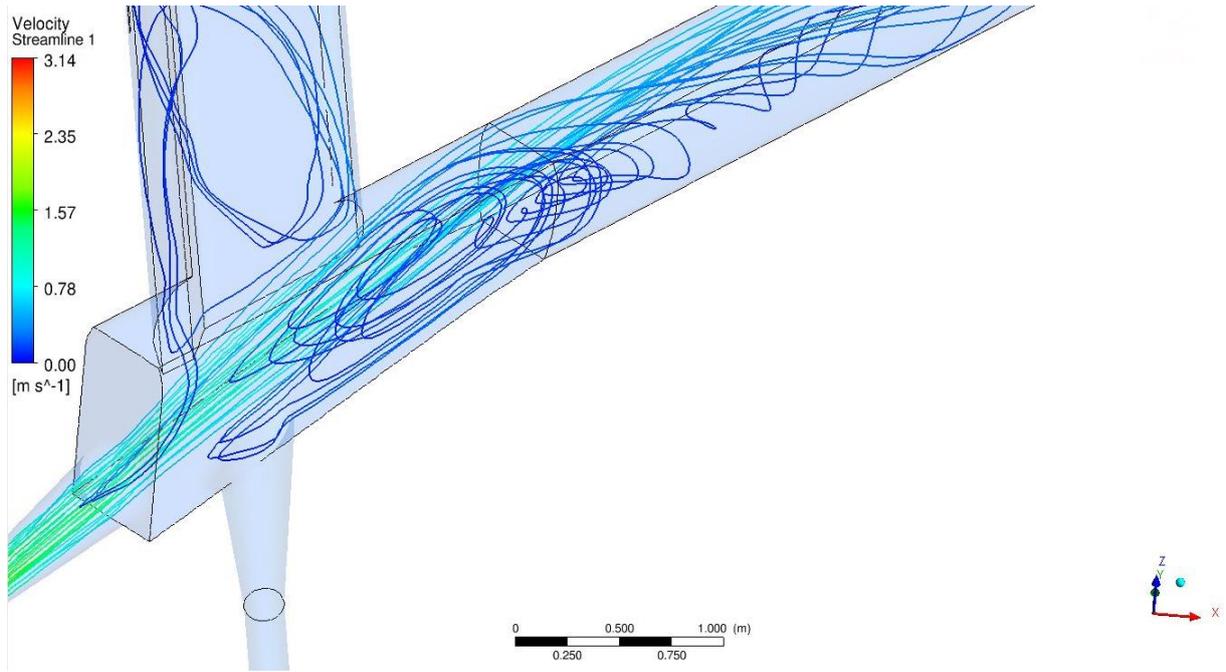


Abbildung 135: LF SB Turbinieren – STZ – ausgerundet Variante 1

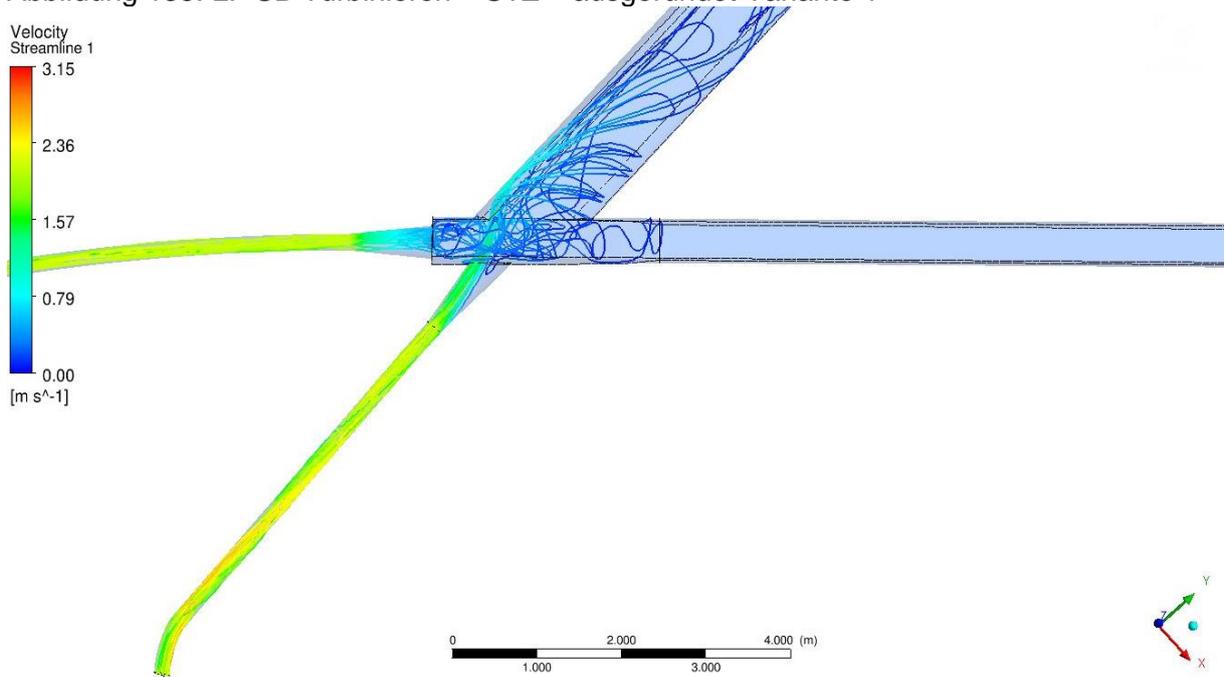


Abbildung 136: LF SB Pumpen – Murg Turbinieren – STZ Variante 1 eckig

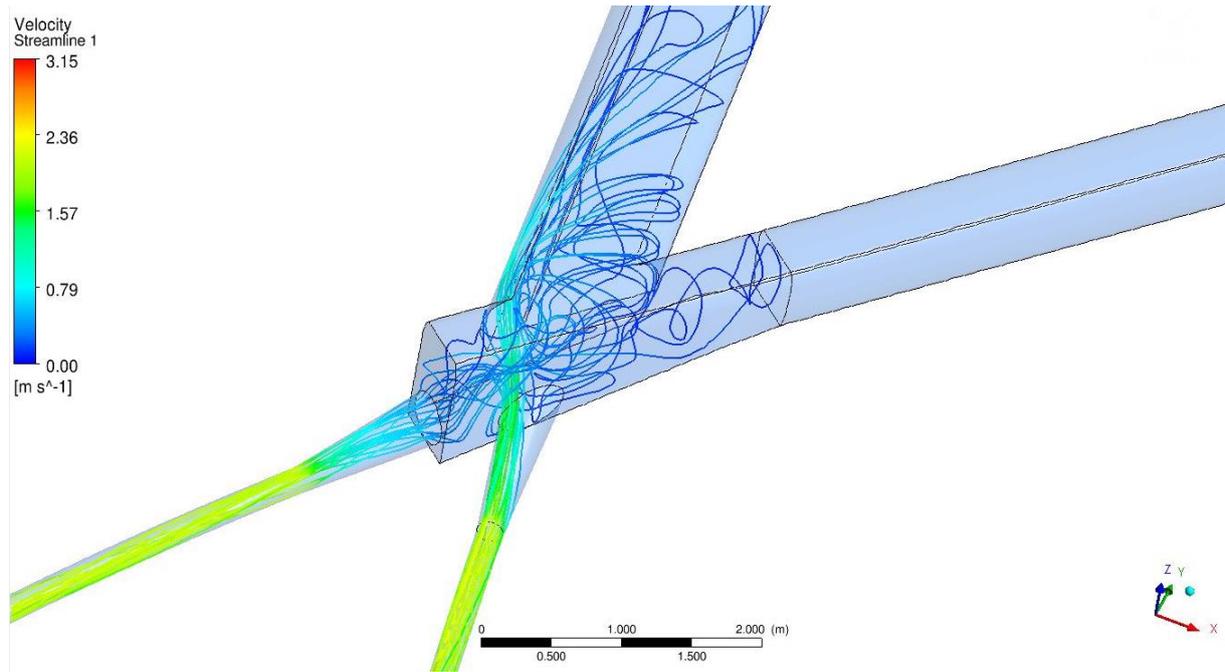


Abbildung 137: LF SBW Pumpen – MUW Turbinieren – STZ Variante 1 eckig

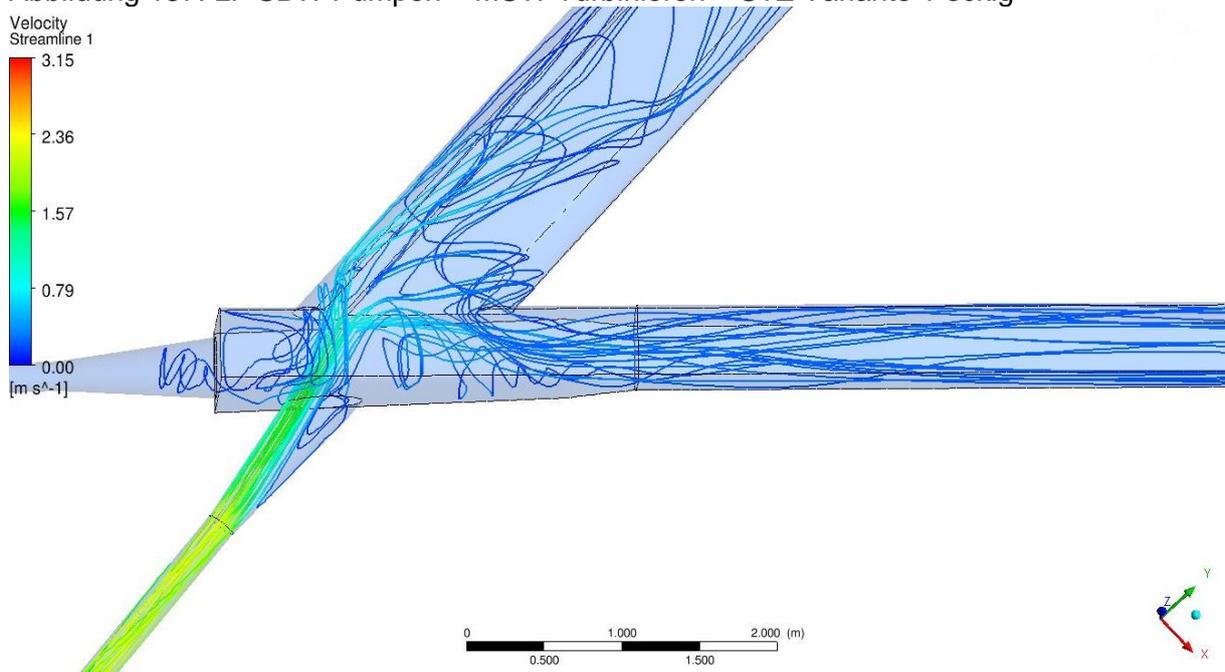


Abbildung 138: LF MUW Turbinieren – STZ Variante 1 eckig

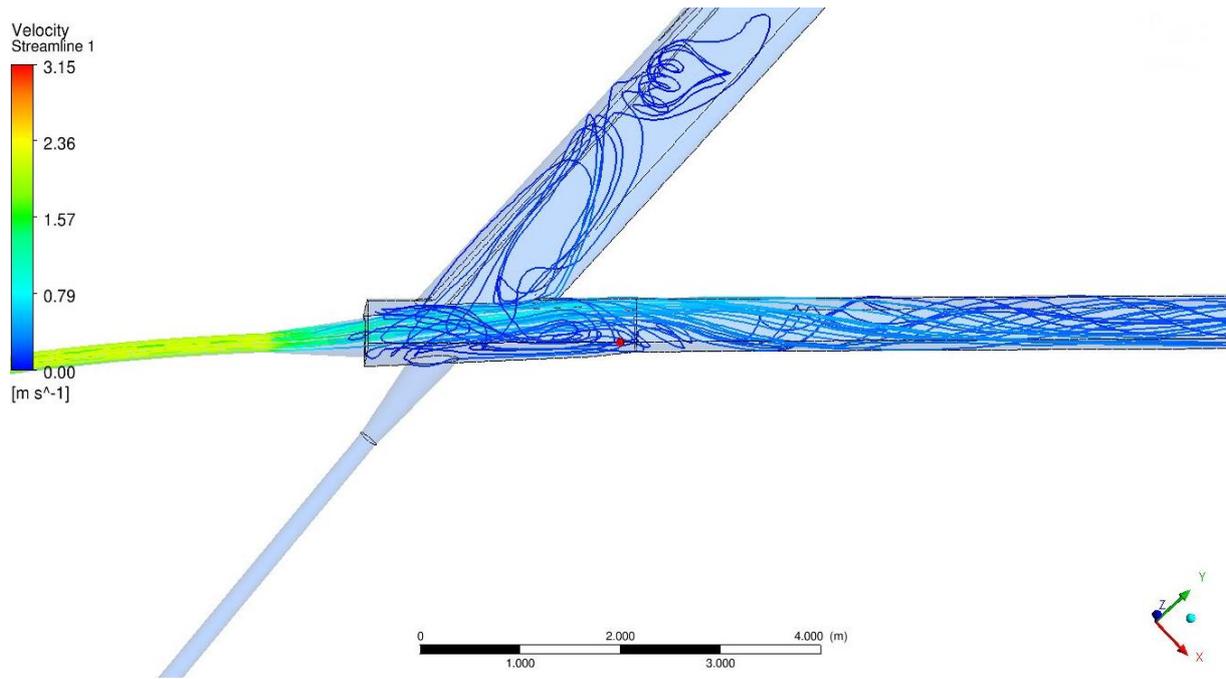


Abbildung 139: LF SBW Turbinieren – STZ - eckig

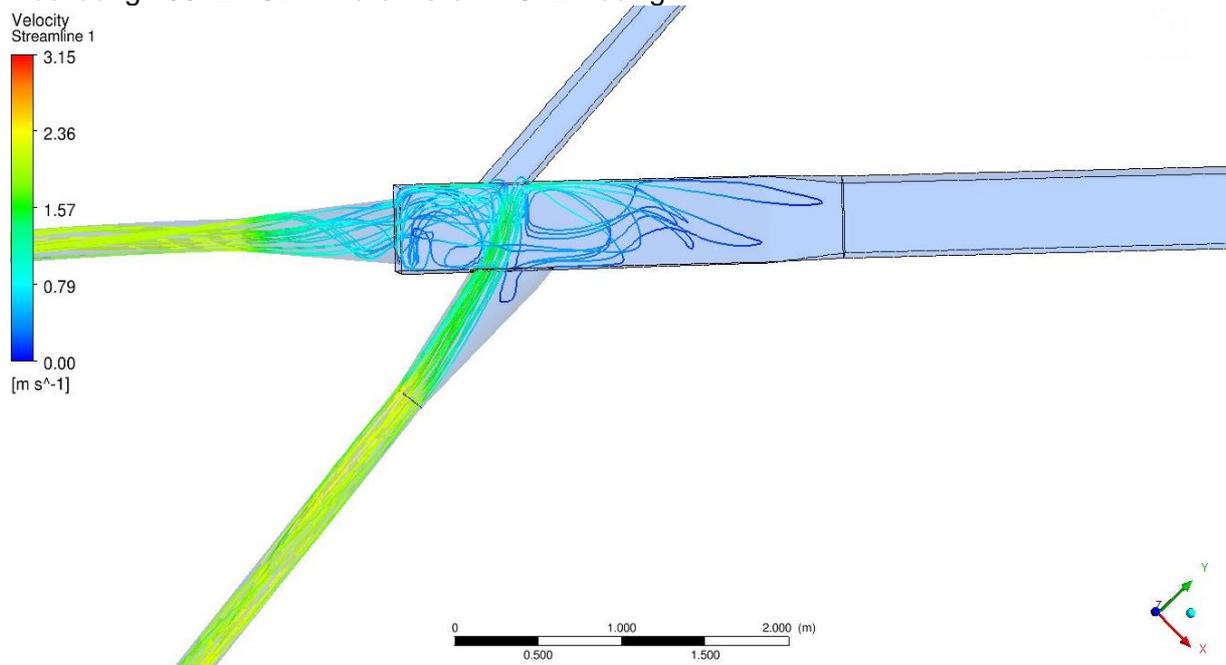


Abbildung 140: LF SBW Pumpen MUW Turbinieren ASZ - Variante 1 eckig

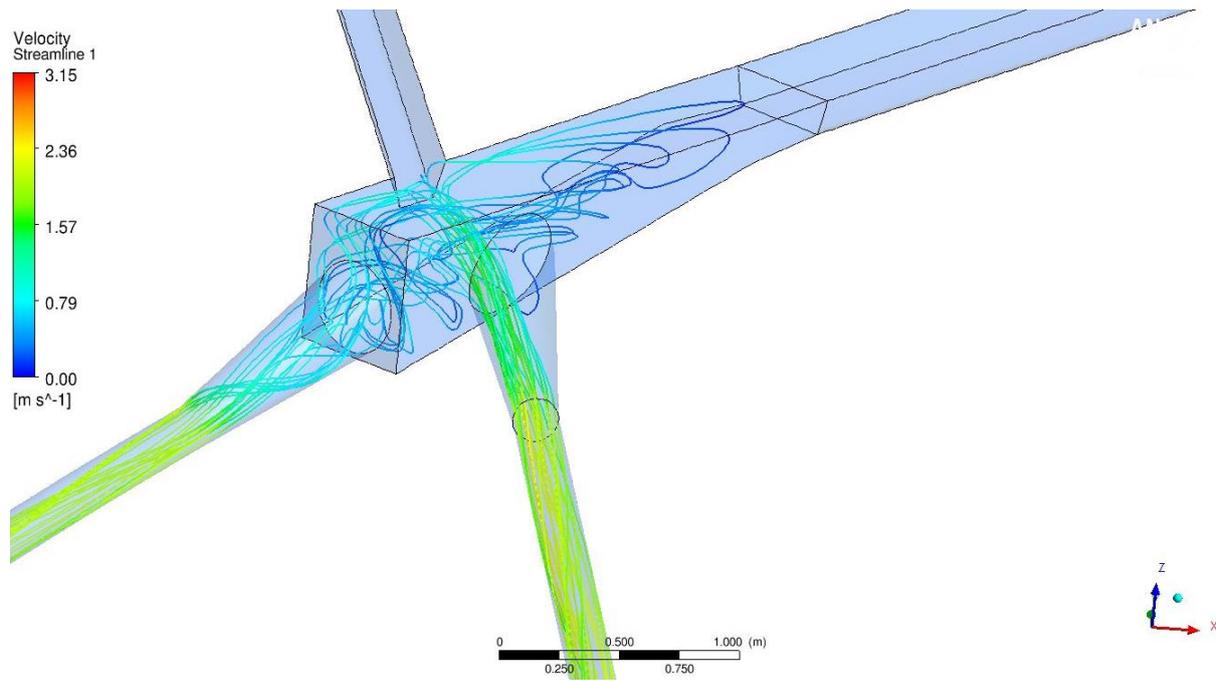


Abbildung 141: LF SBW Pumpen MUW Turbinieren ASZ - eckig

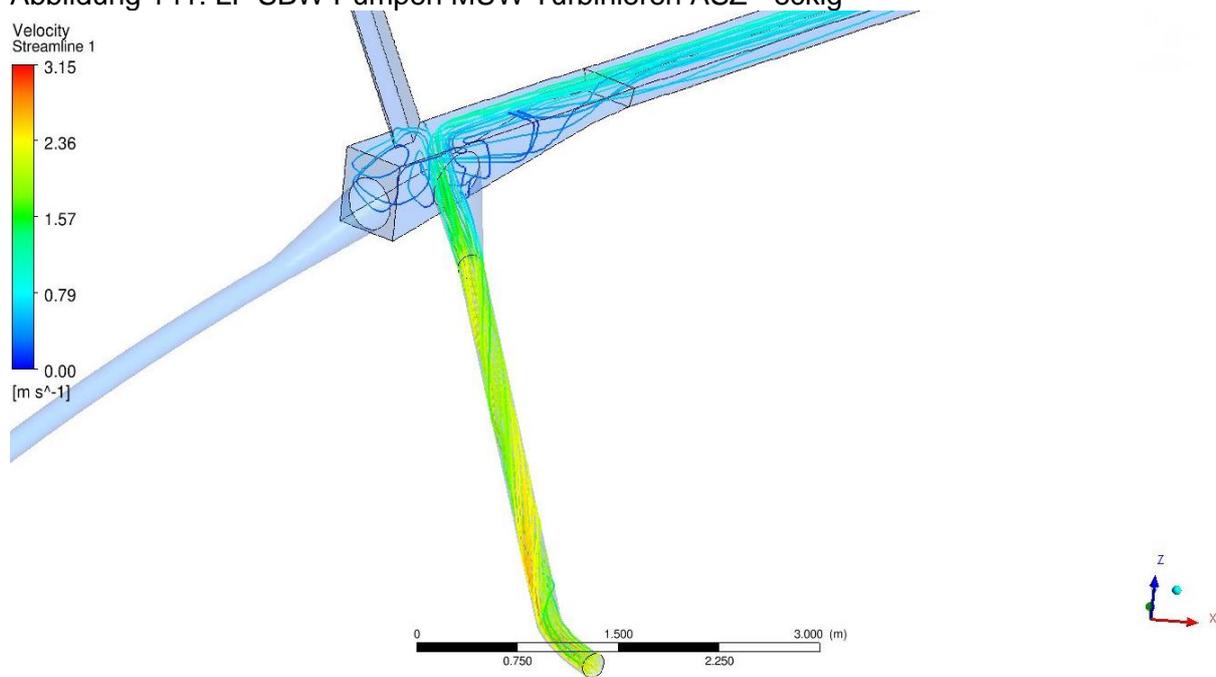


Abbildung 142: LF MUW Turbinieren ASZ - Variante 1 eckig

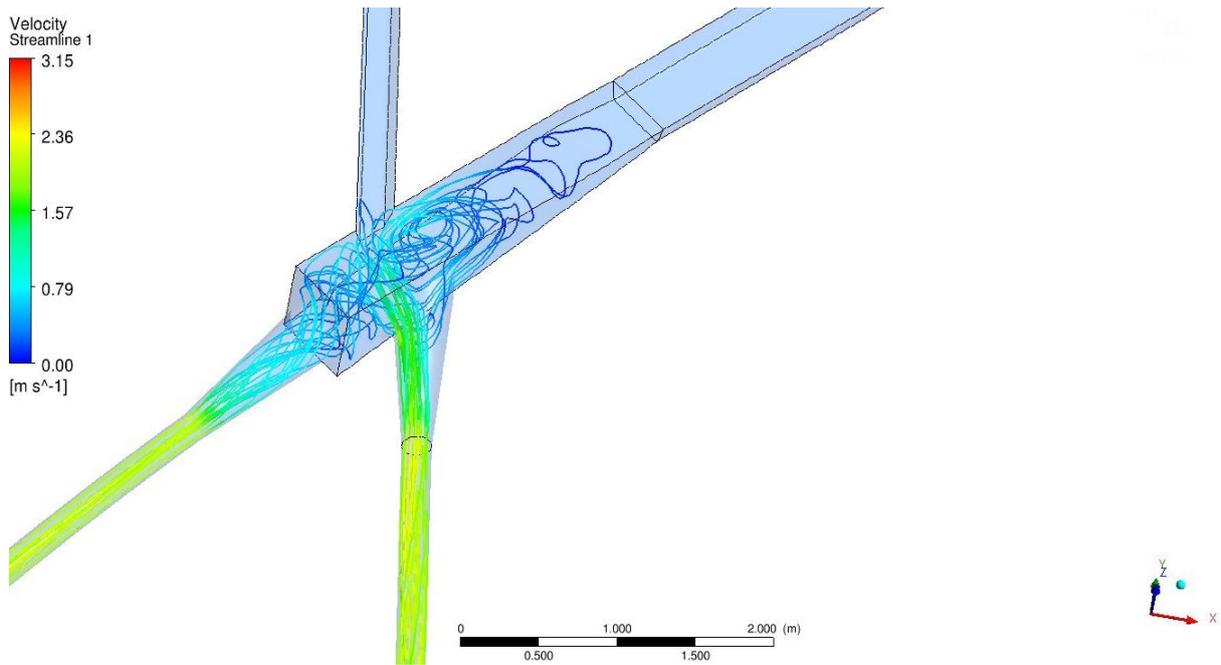


Abbildung 143: LF SBW Pumpen – MUW Turbinieren ASZ ausgerundet

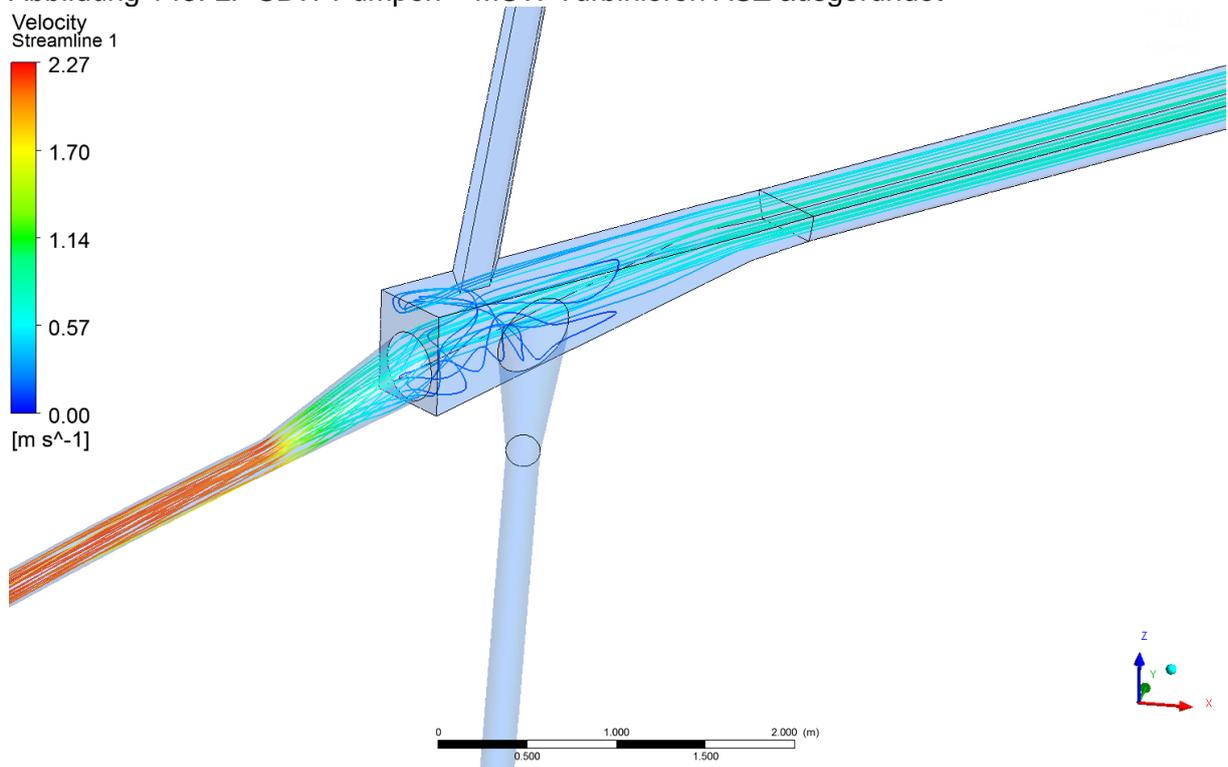


Abbildung 144: LF- Pumpen SBW – ASZ Variante 1 eckig

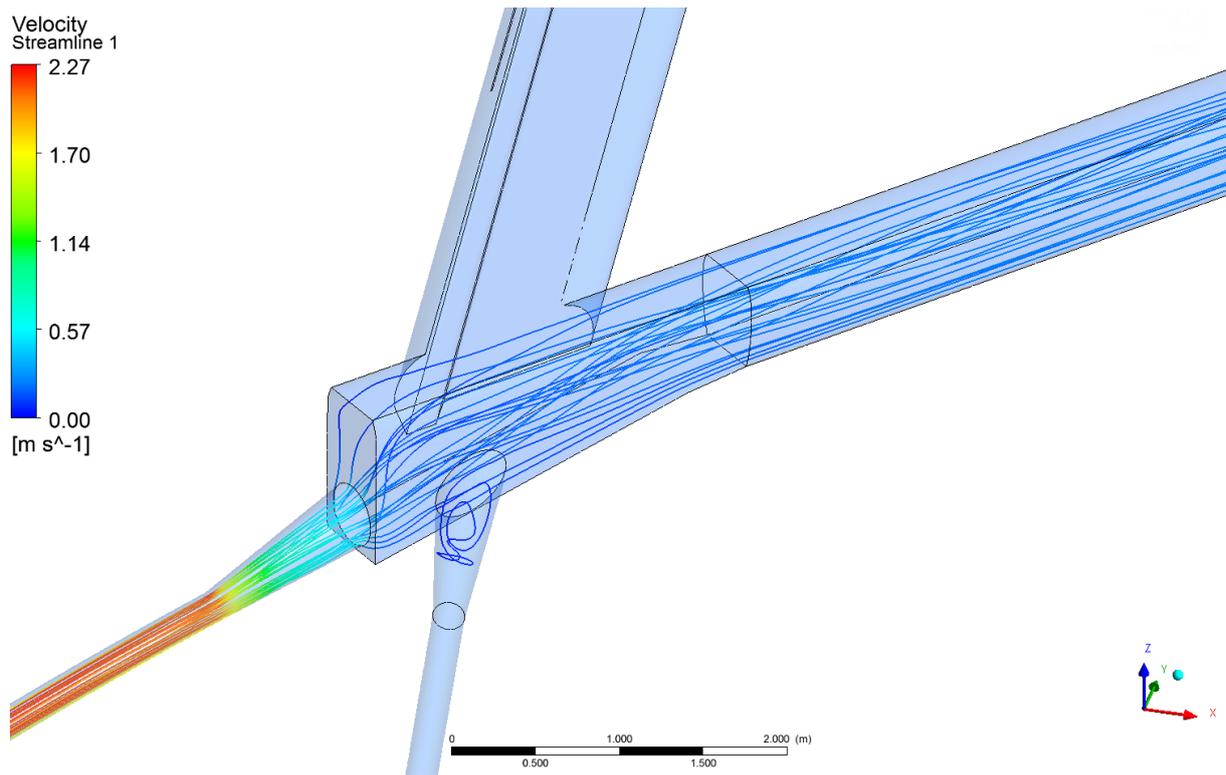


Abbildung 145: LF- Pumpen SBW – STZ eckig Variante 1

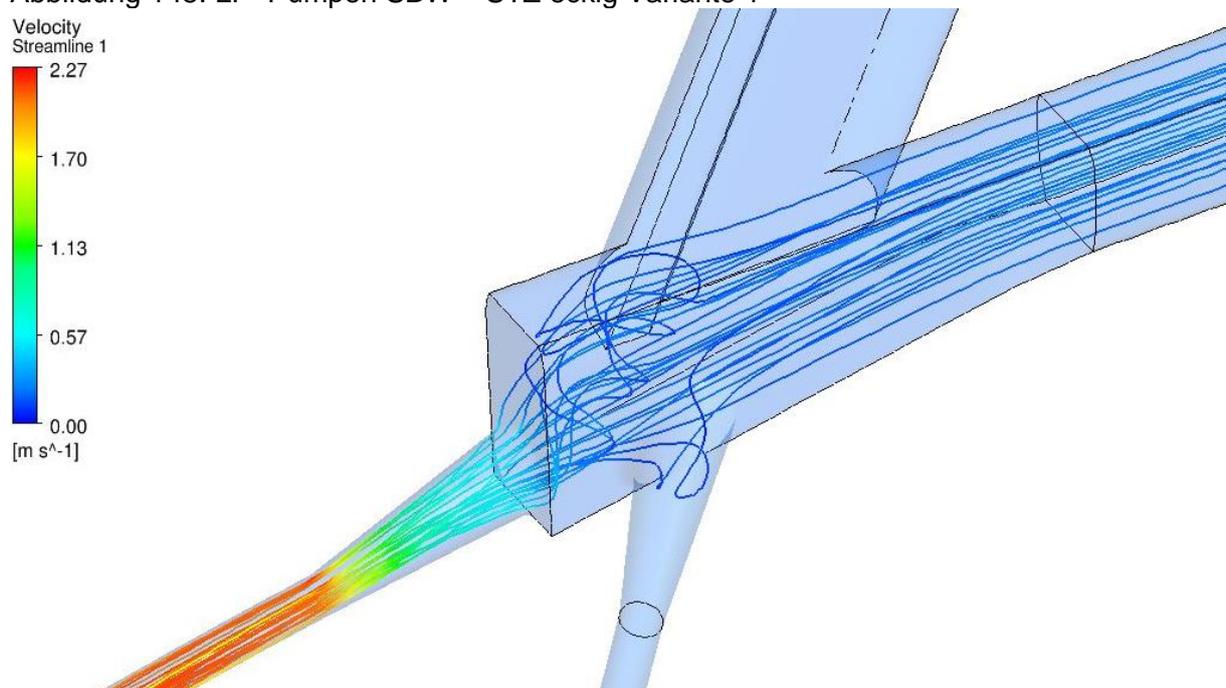


Abbildung 146: LF- Pumpen SBW – STZ Variante 1 ausgerundet

### 13.2 Strömungssituation Variante 4 – Darstellungen

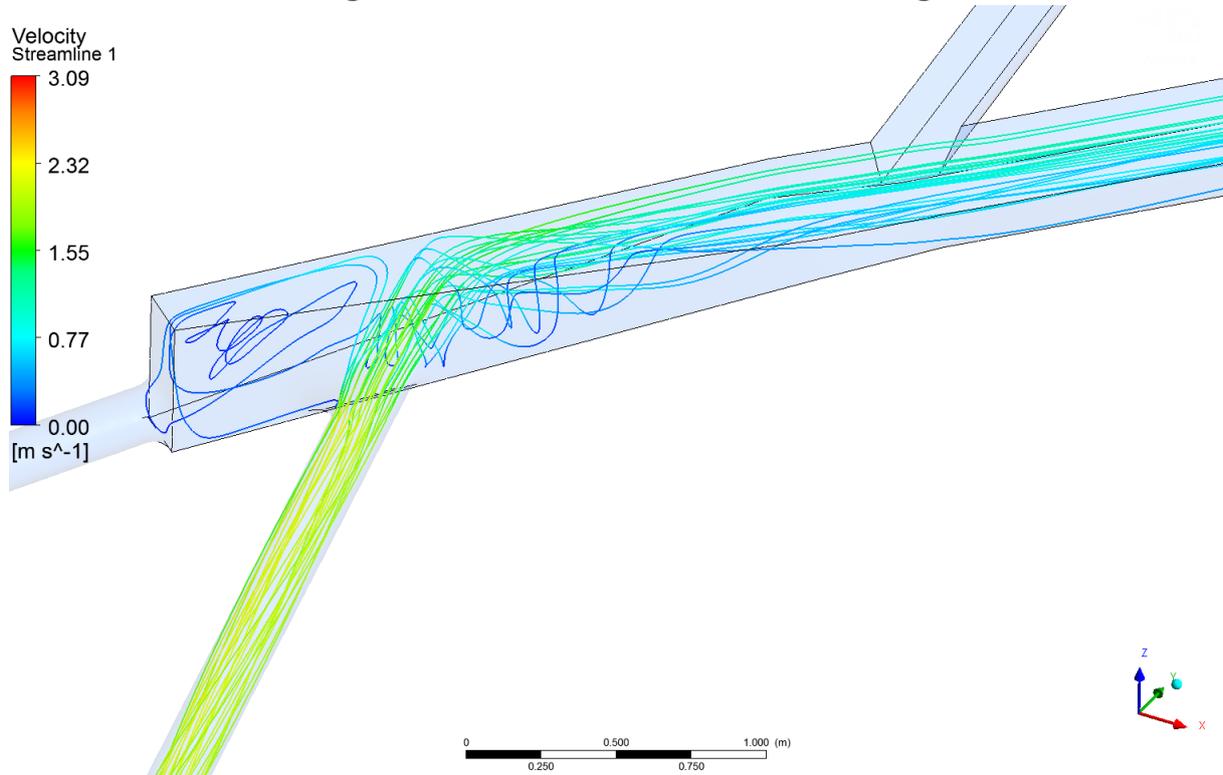


Abbildung 147: Variante 4 Turbinieren MUW ASZ

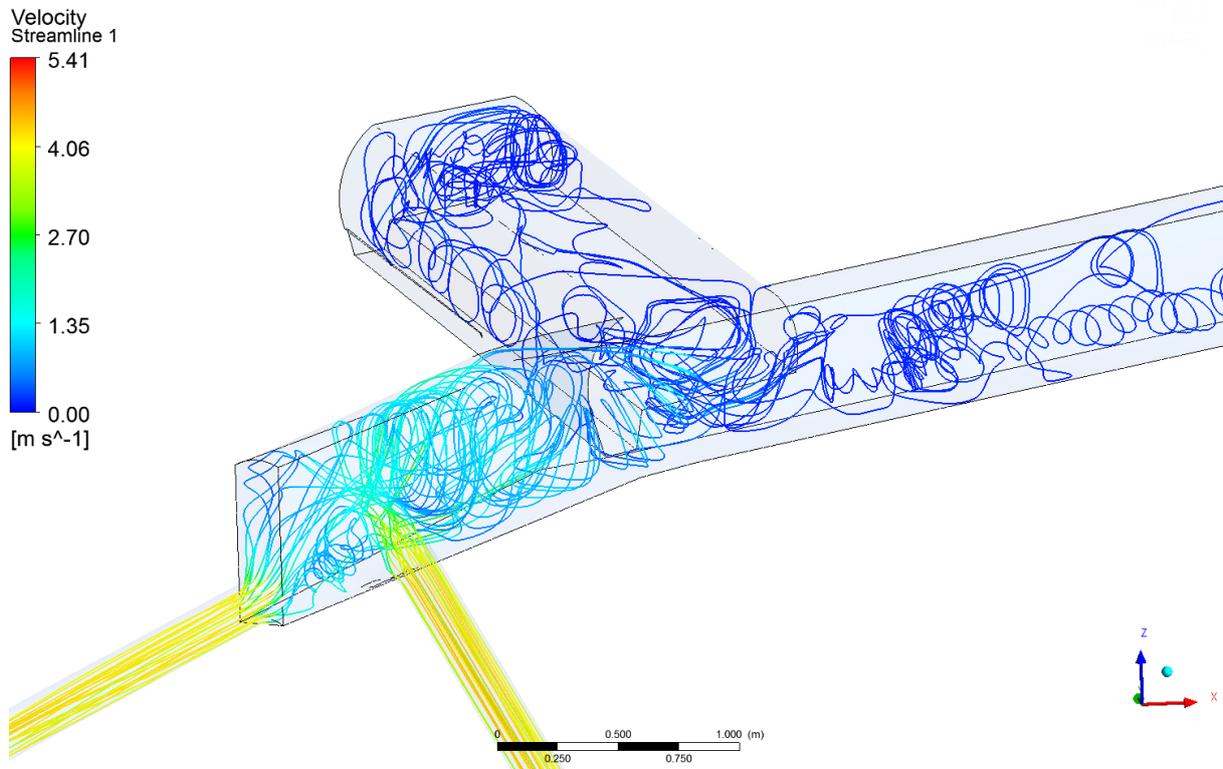


Abbildung 148: Variante 4 Turbinieren MUW – Pumpe SBW STZ

### 13.3 Strömungssituation Variante 5b – Darstellungen

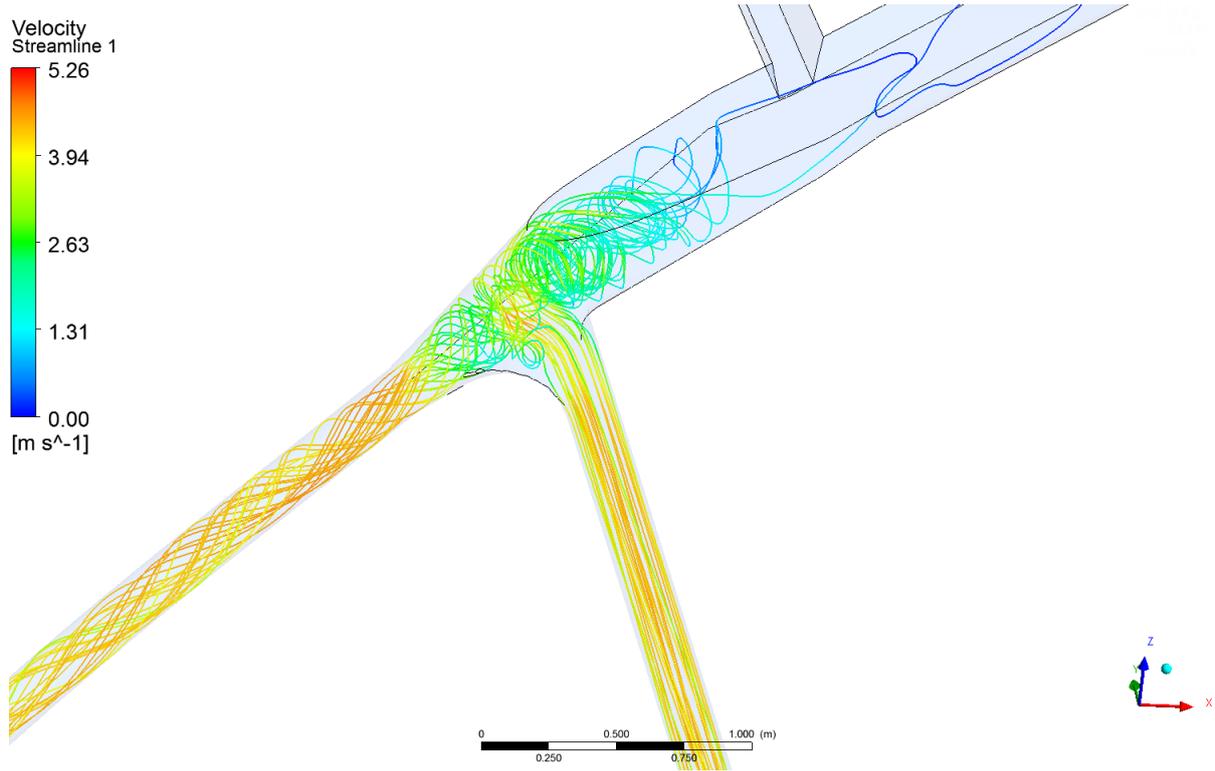


Abbildung 149: LF Pumpe SBW und MUW Turbinenbetrieb ASZ Variante 5b

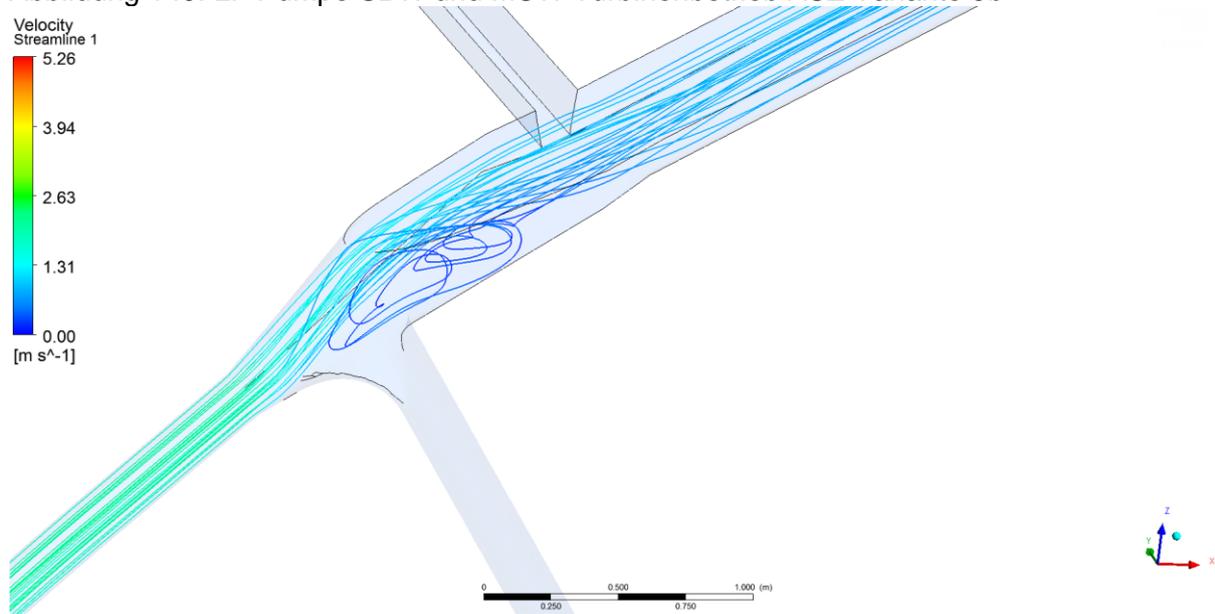


Abbildung 150: LF Turbine SBW – ASZ Variante 5b

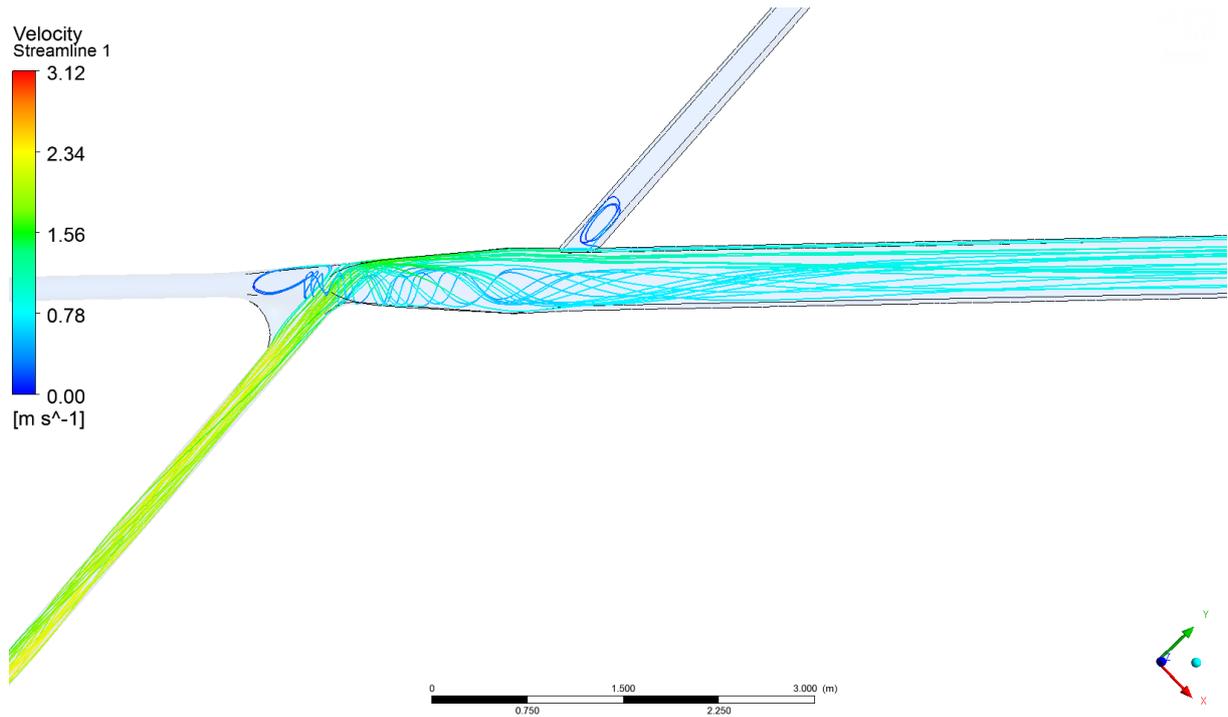


Abbildung 151: LF Turbine MUW - ASZ Variante 5b

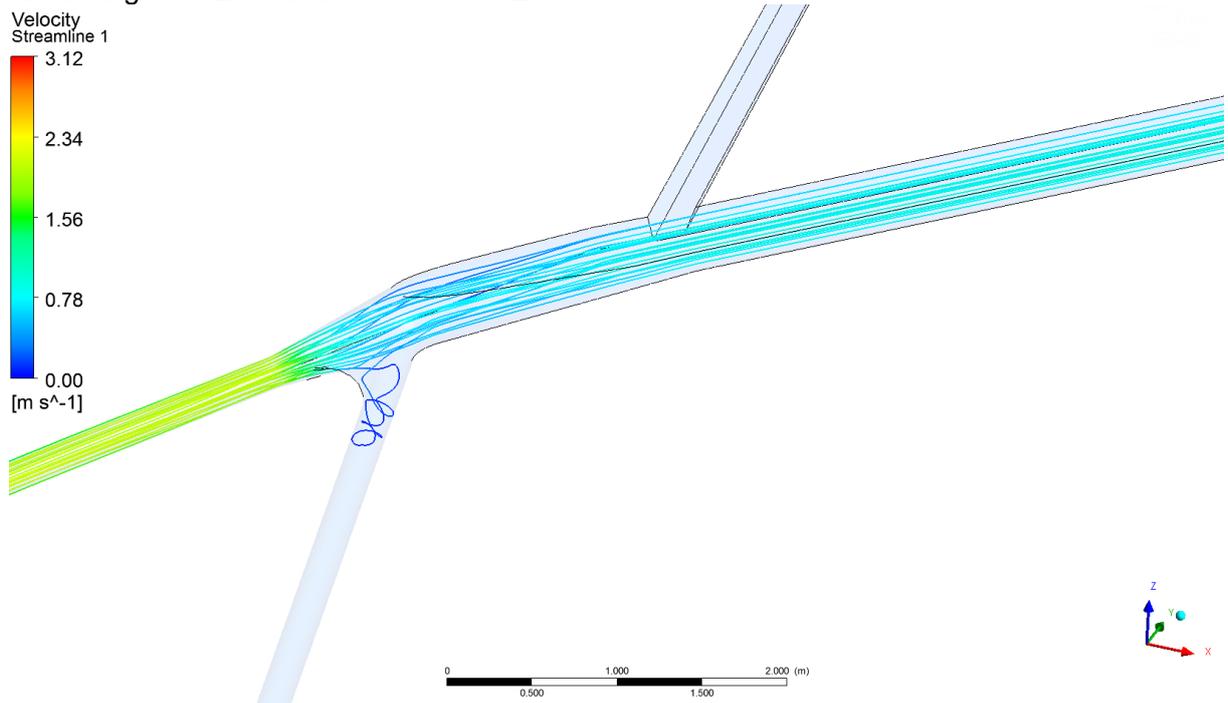


Abbildung 152: LF Pumpe Turbine - ASZ Variante 5b

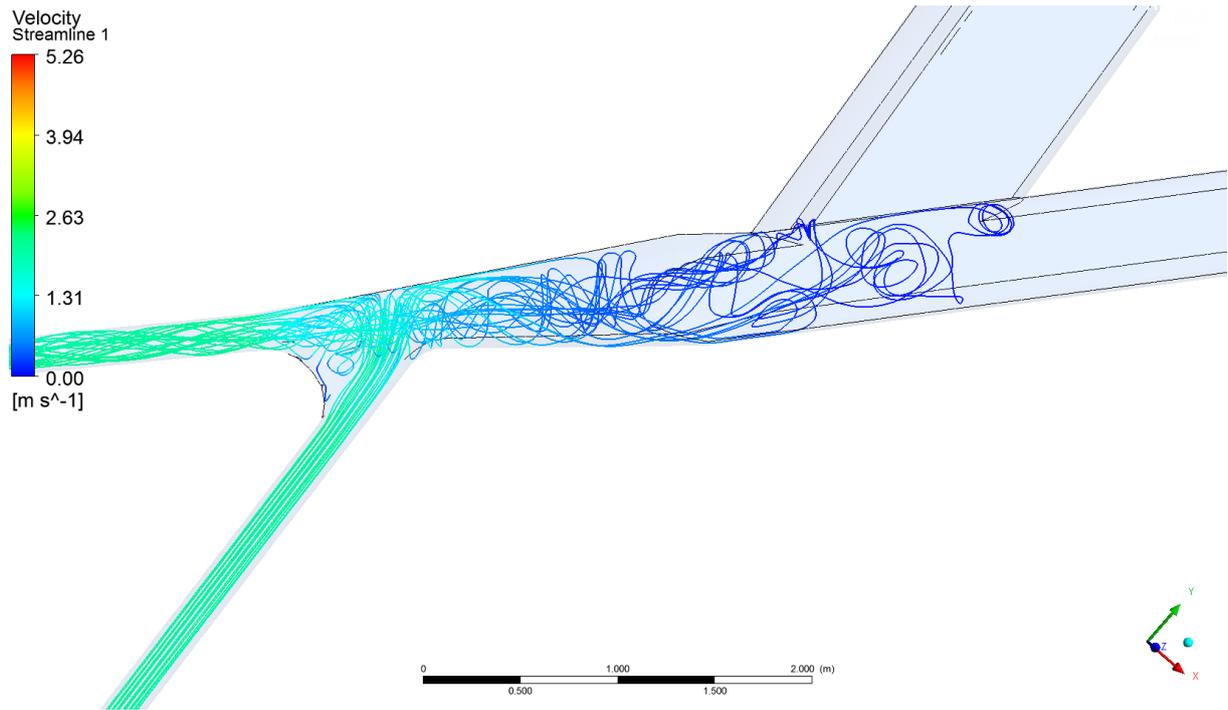


Abbildung 153: LF Pumpe SBW und MUW Turbinenbetrieb ASZ Variante 5b

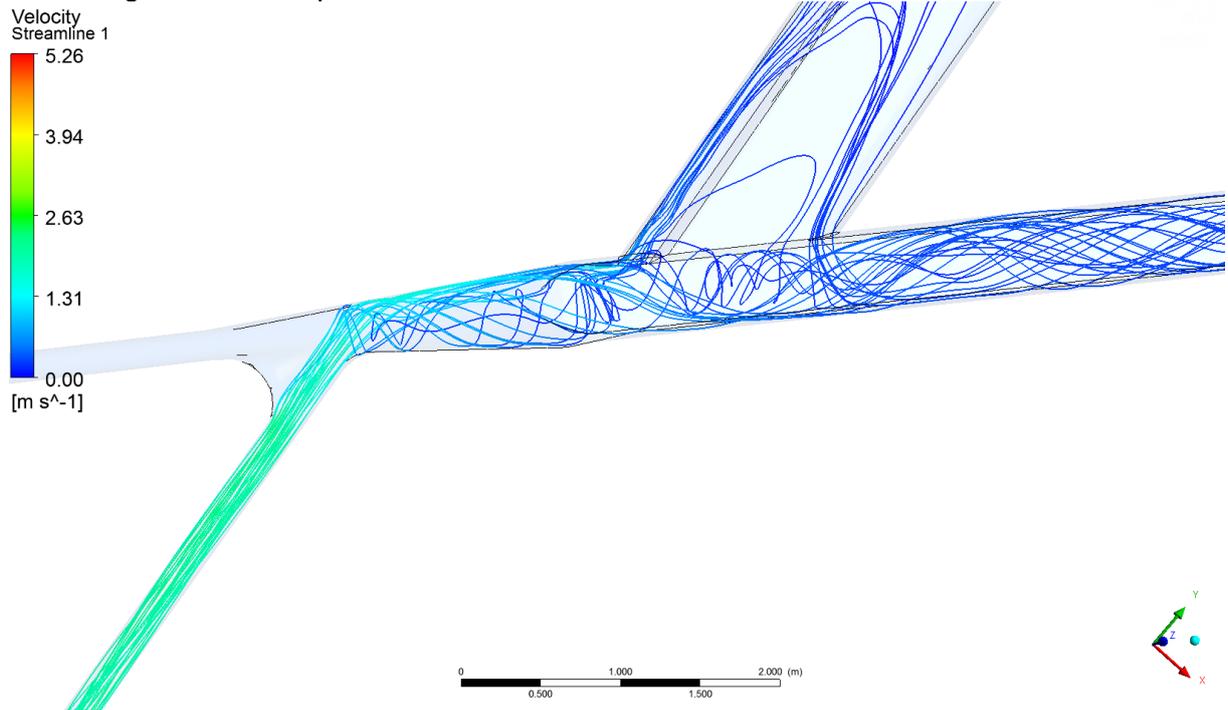


Abbildung 154: LF Turbine MUW - STZ Variante 5b

### 13.4 Strömungssituation Variante 6 – Darstellungen

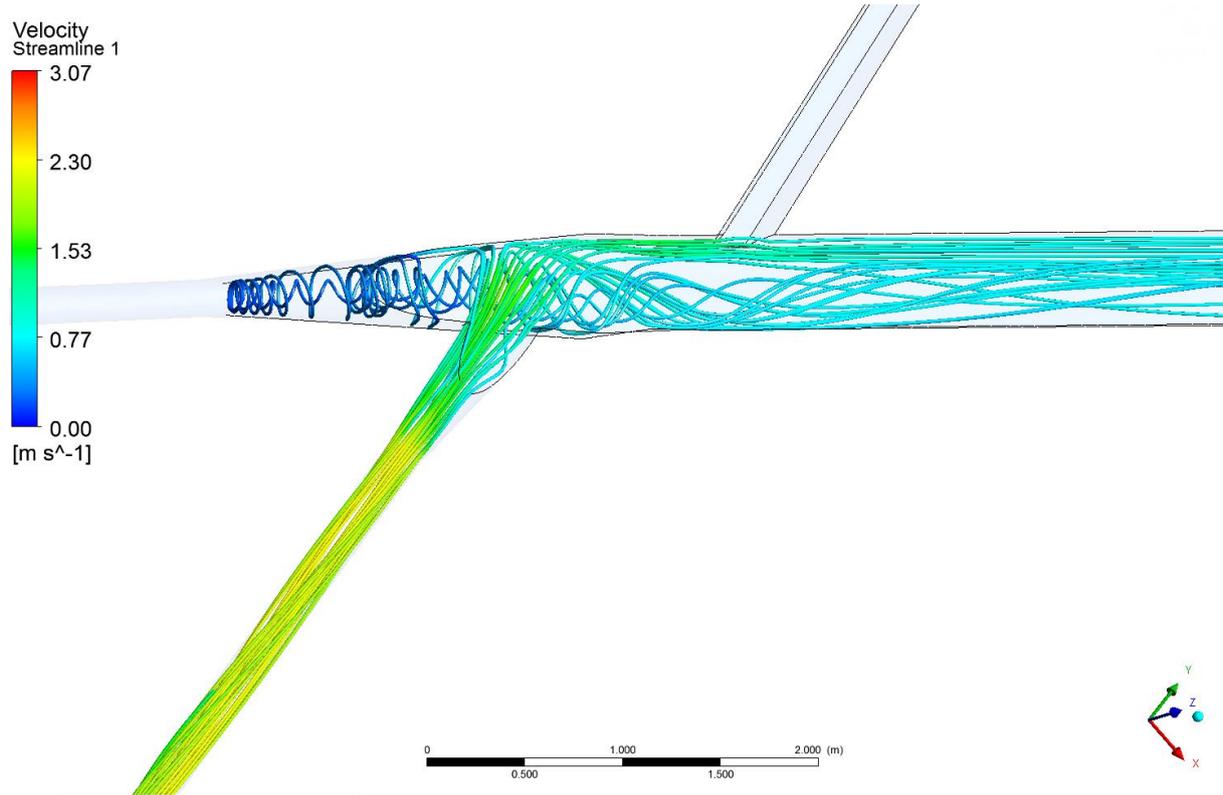


Abbildung 155: LF Turbine MUW ASZ Variante 6

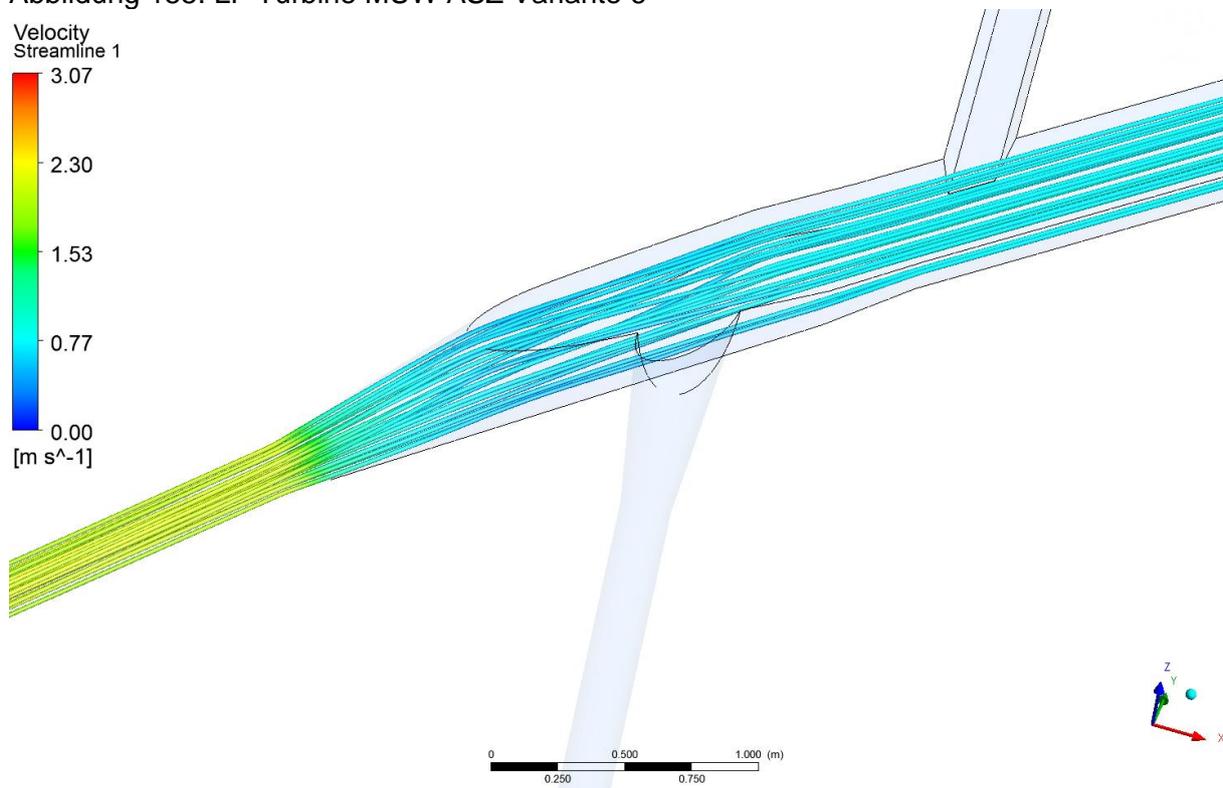


Abbildung 156: LF Pumpe SBW ASZ Variante 6

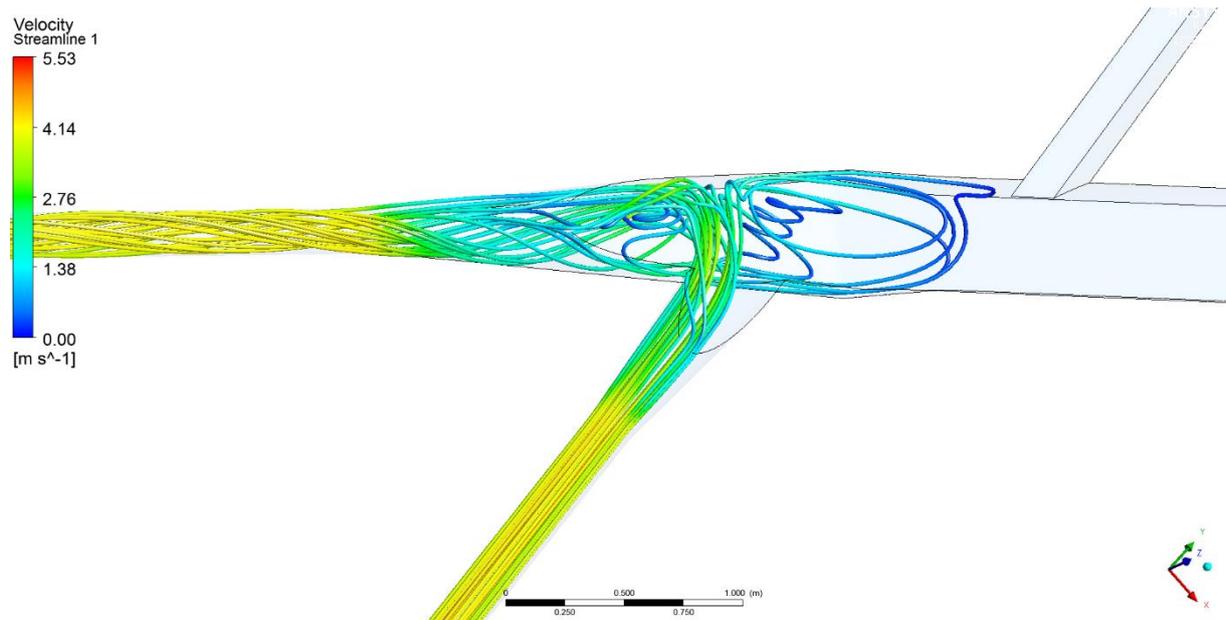


Abbildung 157: LF Pumpe SBW und MUW Turbinenbetrieb ASZ Variante 6

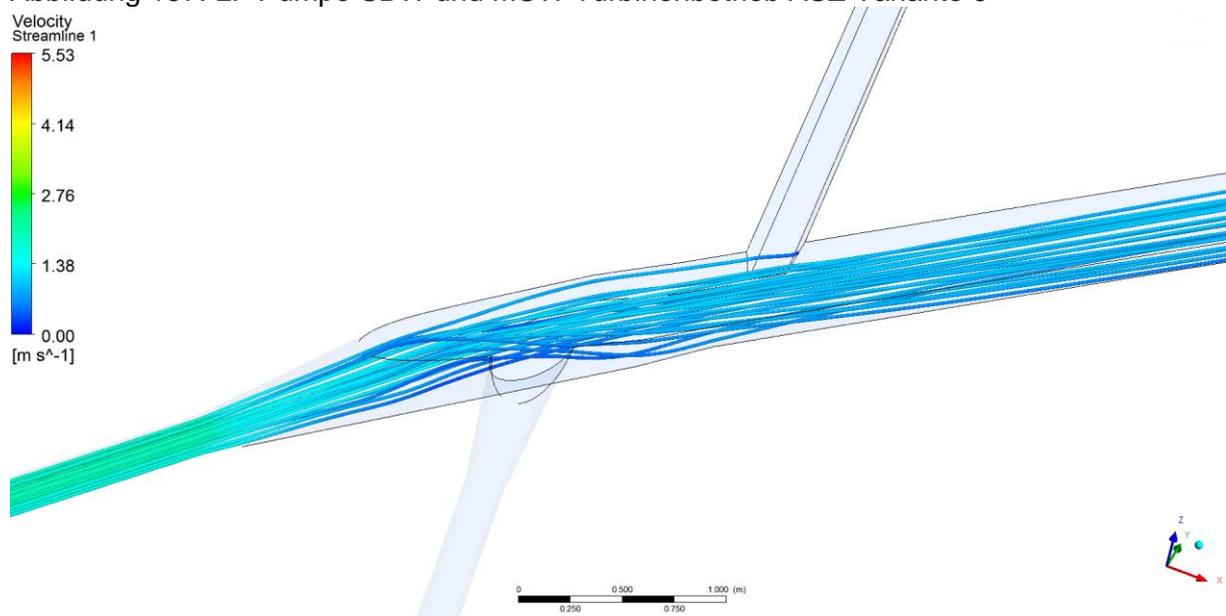


Abbildung 158: LF Turbine SBW ASZ Variante 6

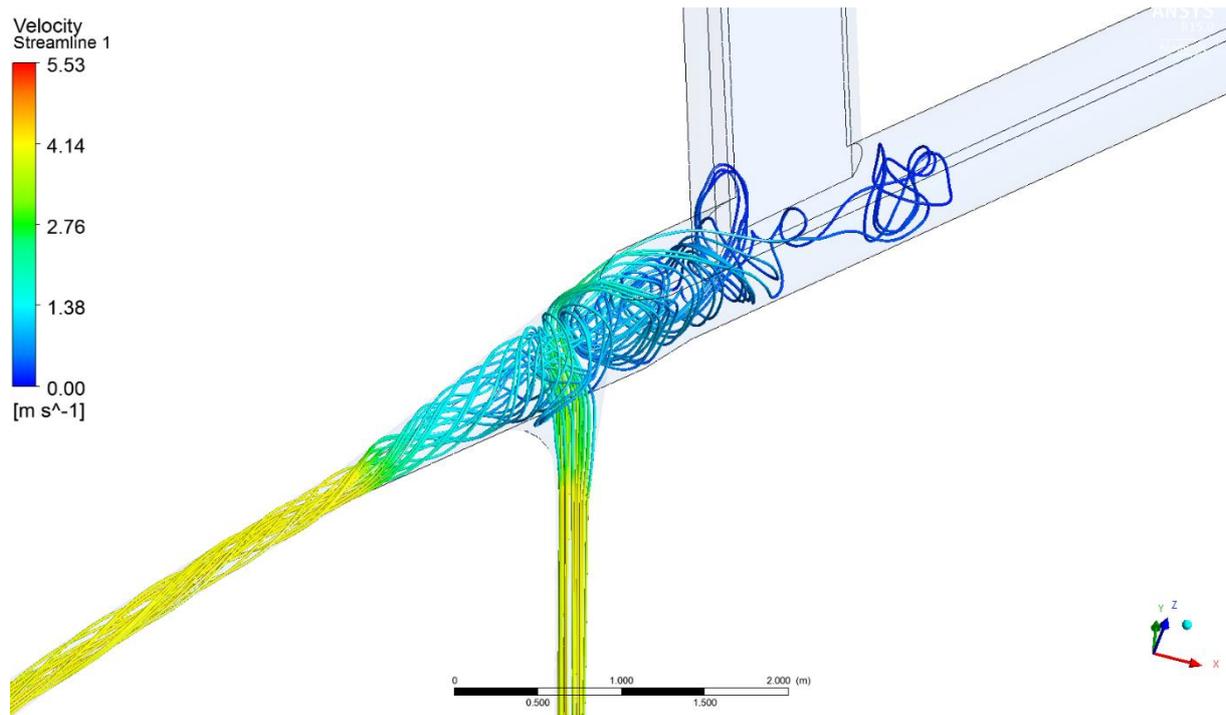


Abbildung 159: LF Pumpe SBW und MUW Turbinenbetrieb STZ Variante 6

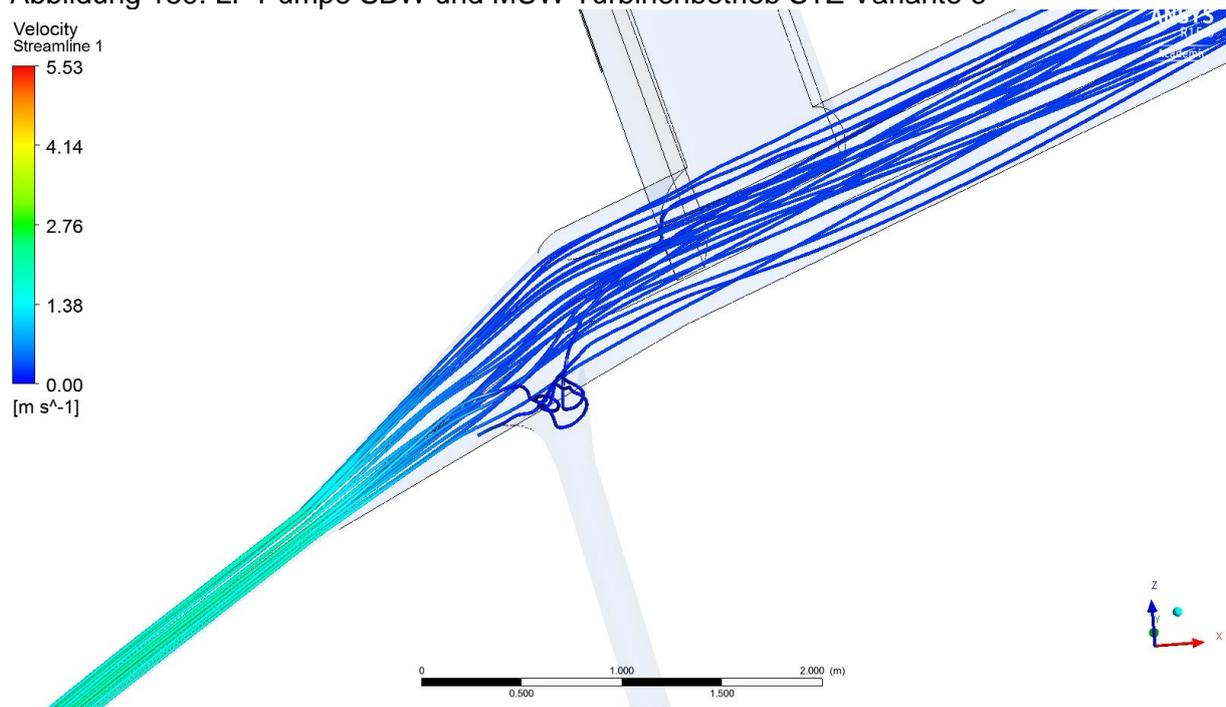


Abbildung 160: LF Pumpe SBW STZ Variante 6

### 13.5 Strömungssituation Variante 7 – Darstellungen

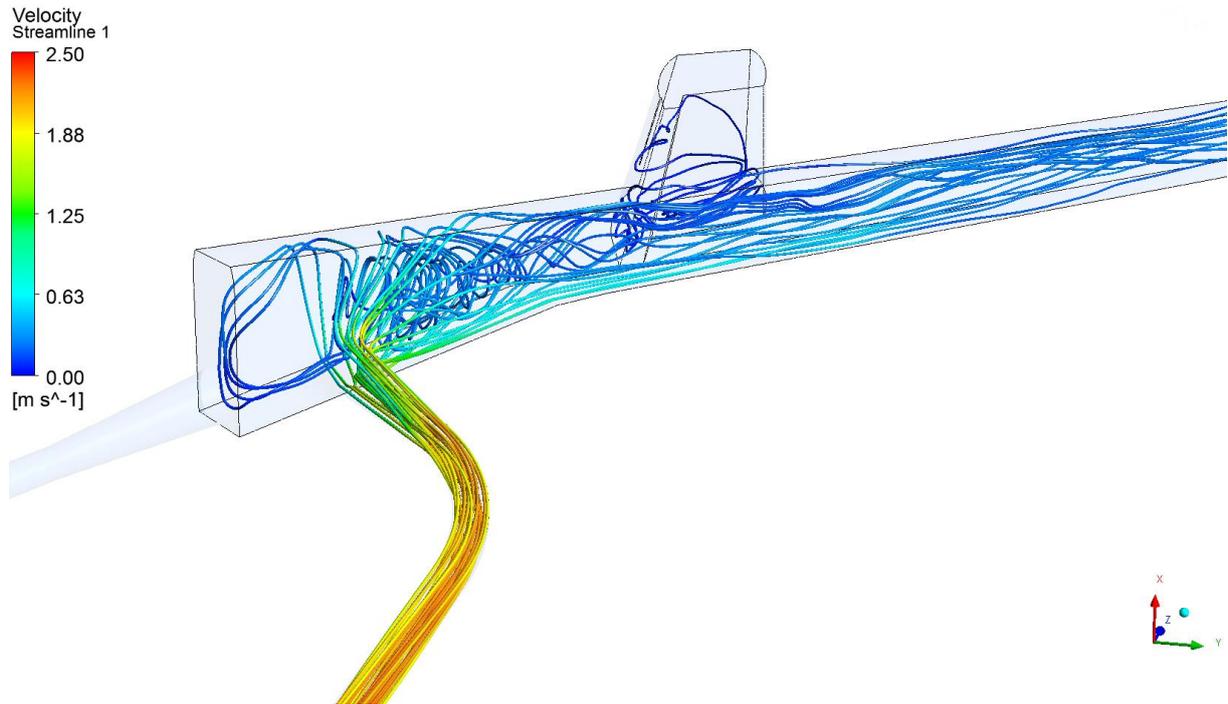


Abbildung 161: LF Turbine MUW ASZ Variante 7

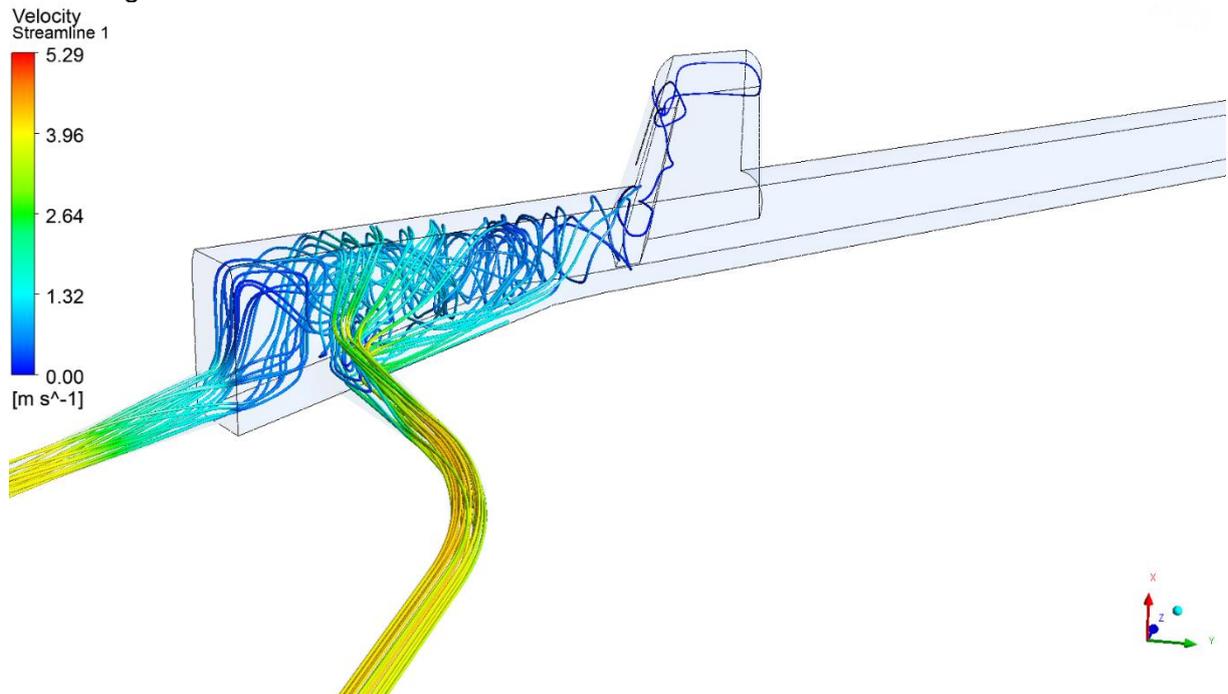


Abbildung 162: LF Pumpe SB Wund MUW Turbinenbetrieb STZ Variante 7

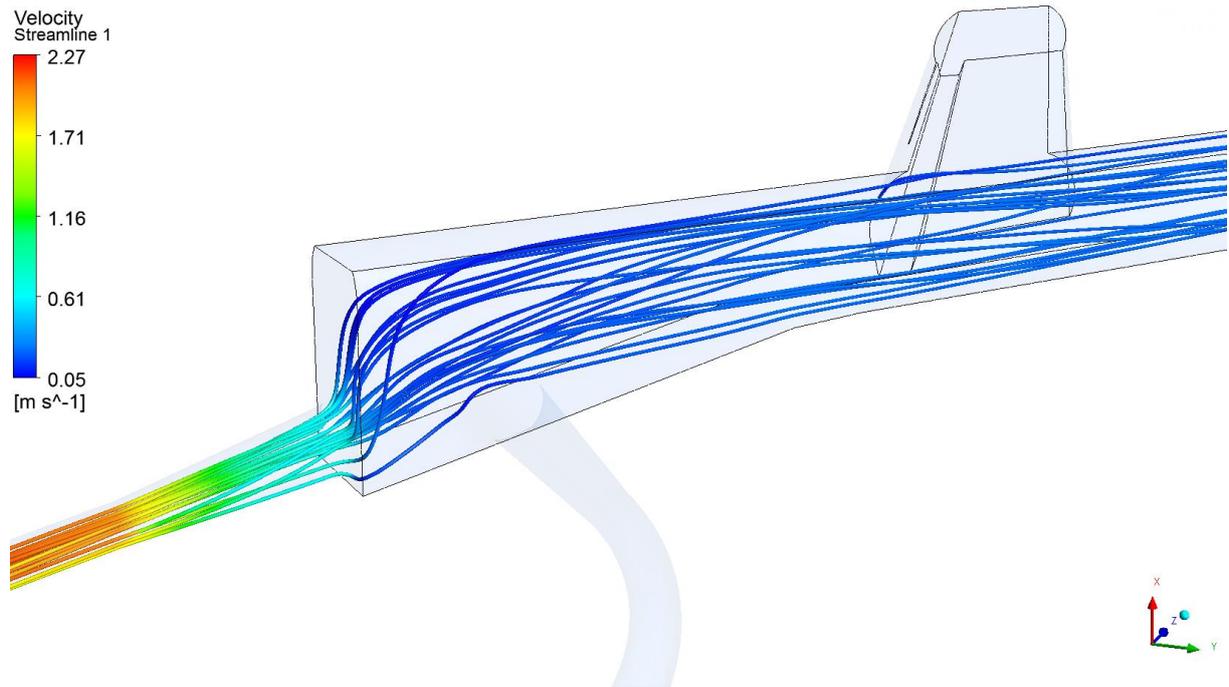


Abbildung 163: LF Pumpe SBW, STZ Variante 7

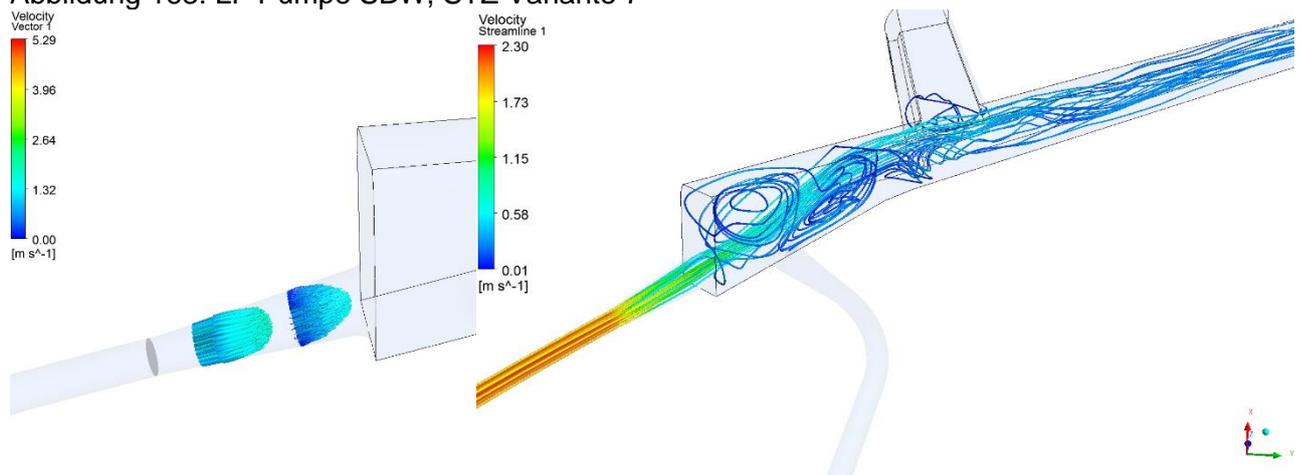


Abbildung 164: LF Turbine SBW STZ Variante 7

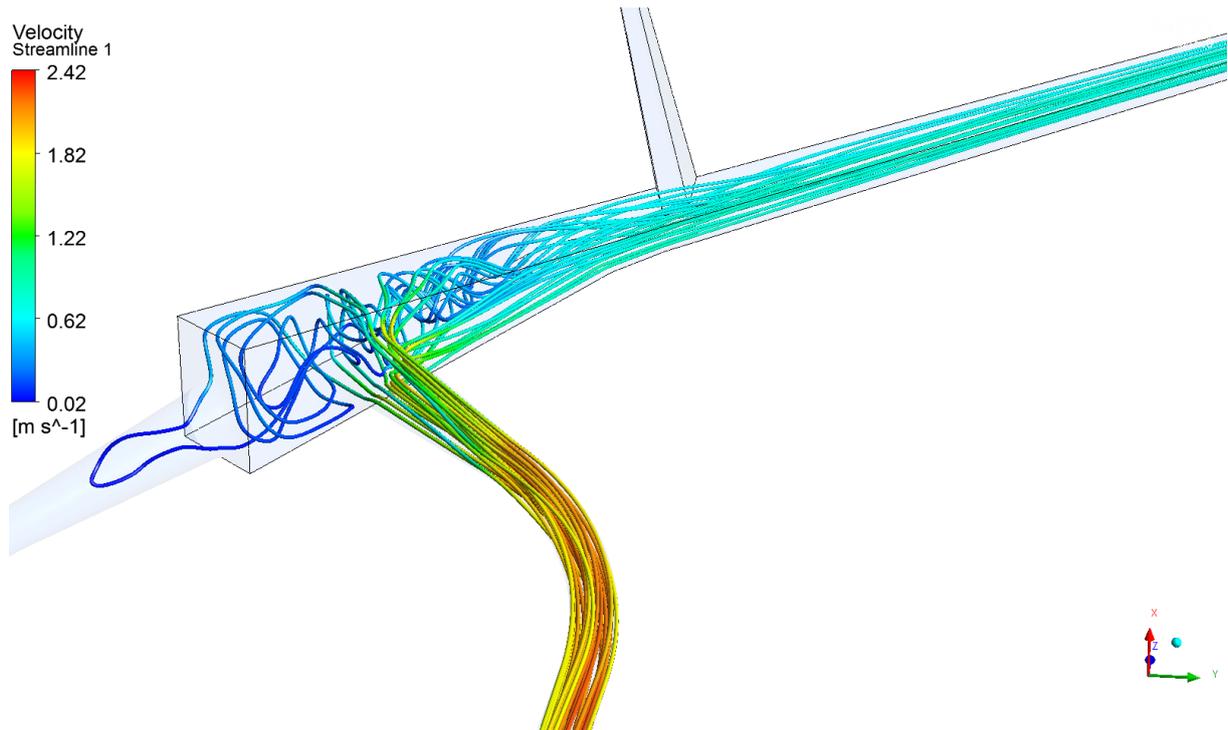


Abbildung 165: LF Turbine MUW ASZ Variante 7

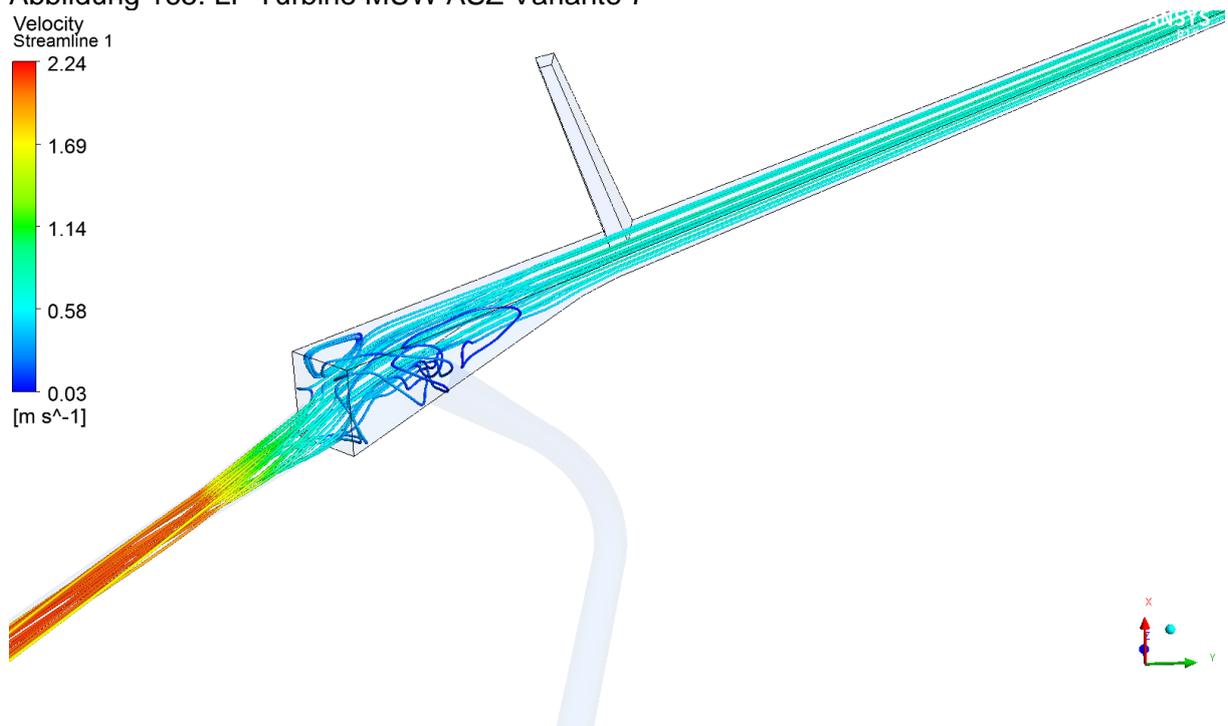


Abbildung 166: LF Turbine SBW ASZ Variante 7

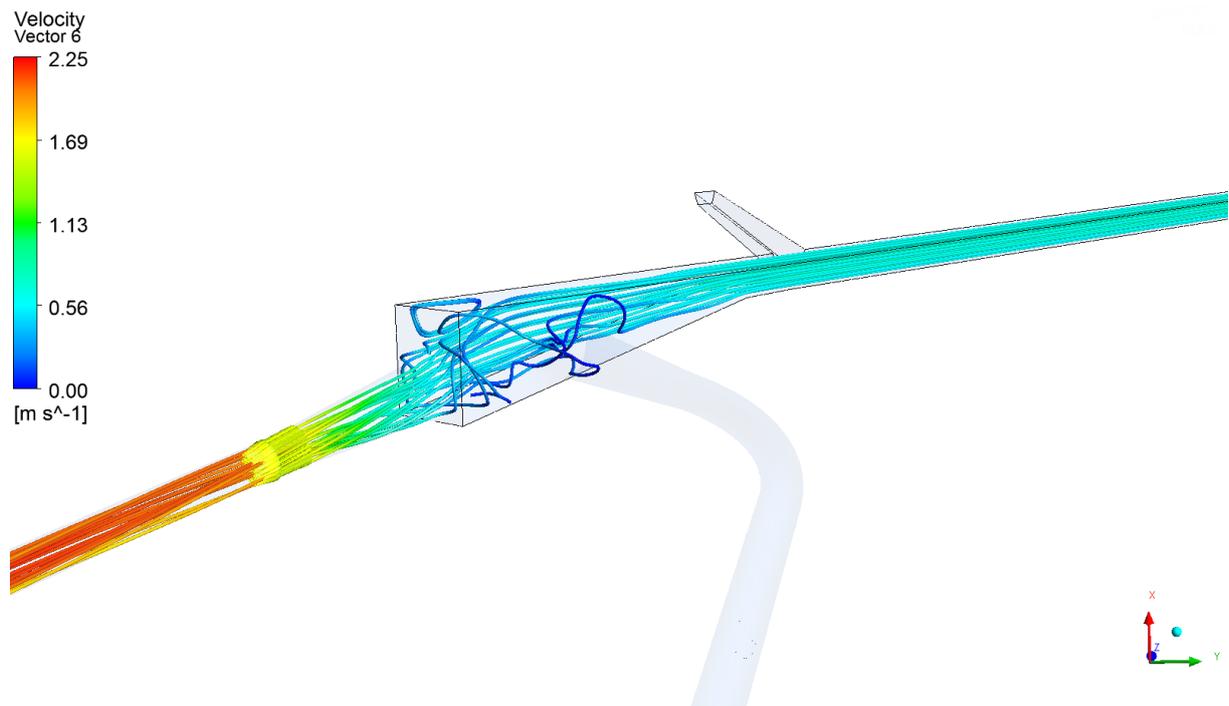


Abbildung 167: LF Pumpe SBW ASZ Variante 7

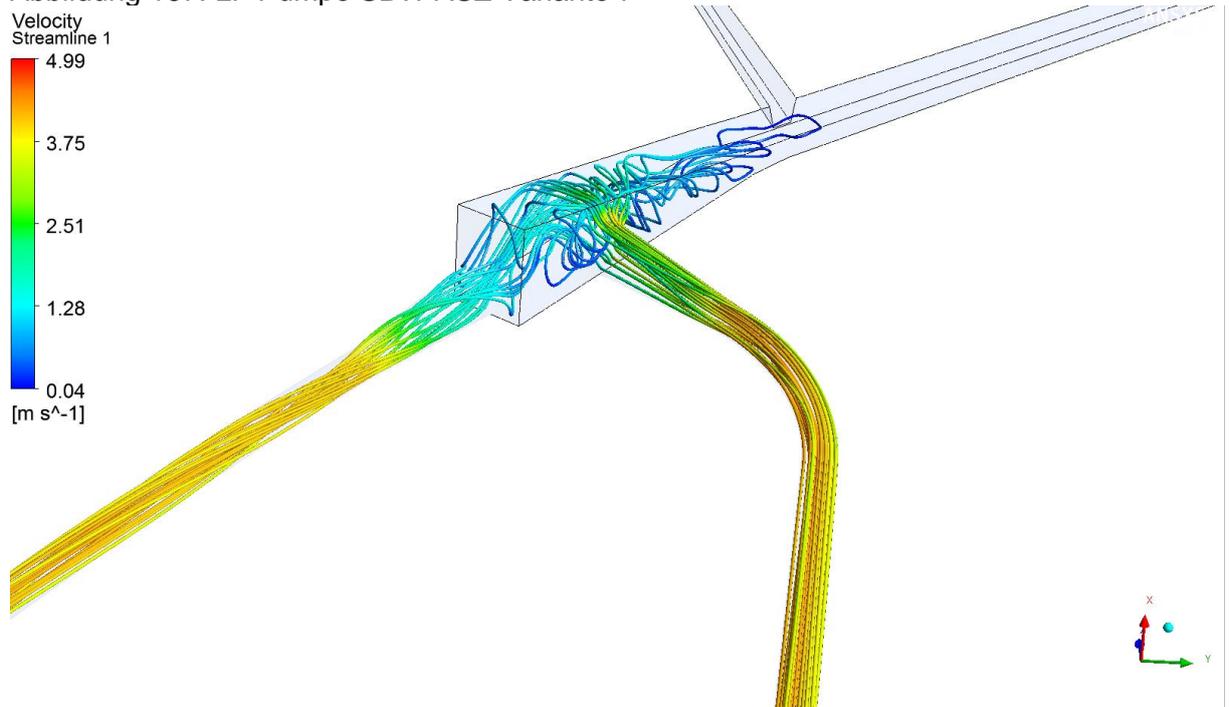


Abbildung 168: LF Pumpe SBW und MUW Turbinenbetrieb ASZ Variante 7

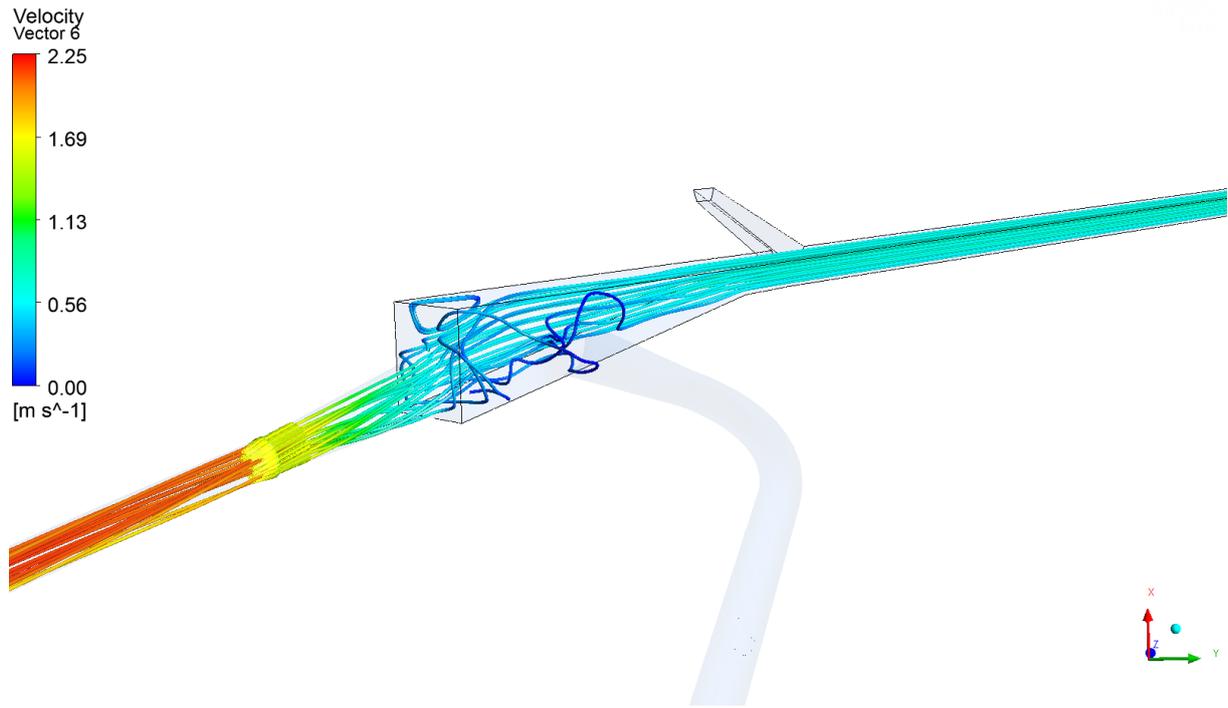


Abbildung 169: LF Pumpe SBW ASZ Variante 7

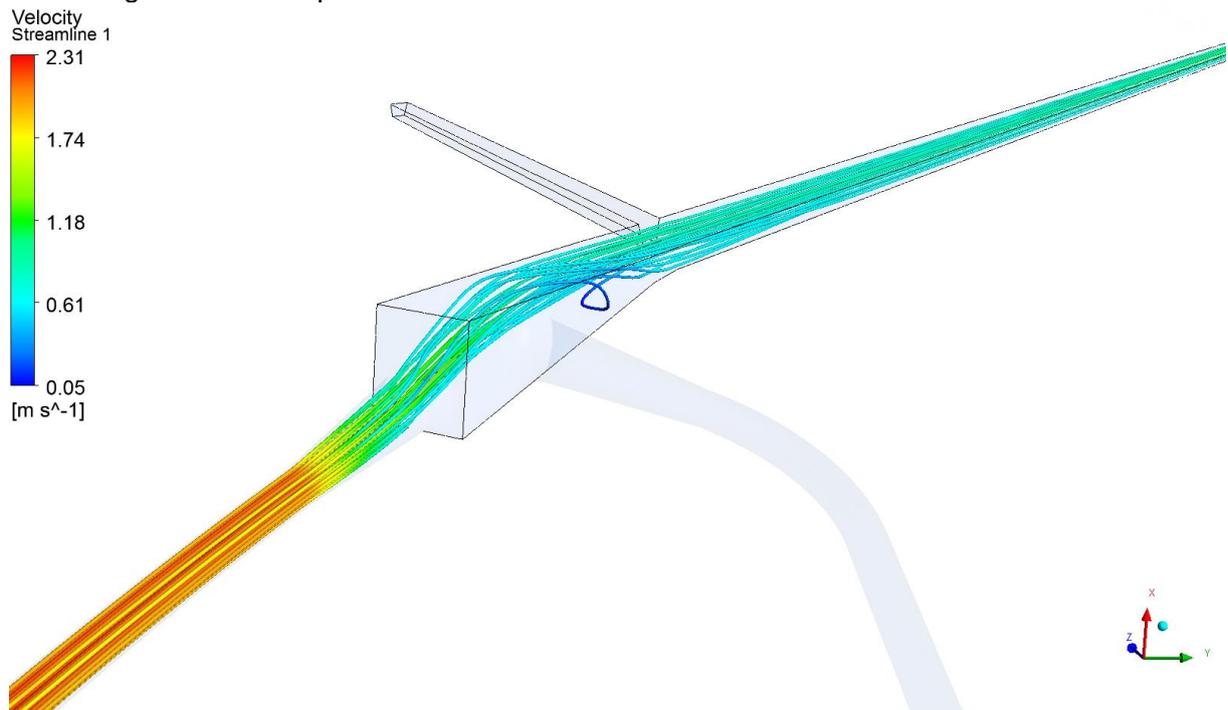


Abbildung 170: LF Turbine SBW ASZ Variante 7

### 13.6 Strömungssituation Variante 8 – Darstellungen

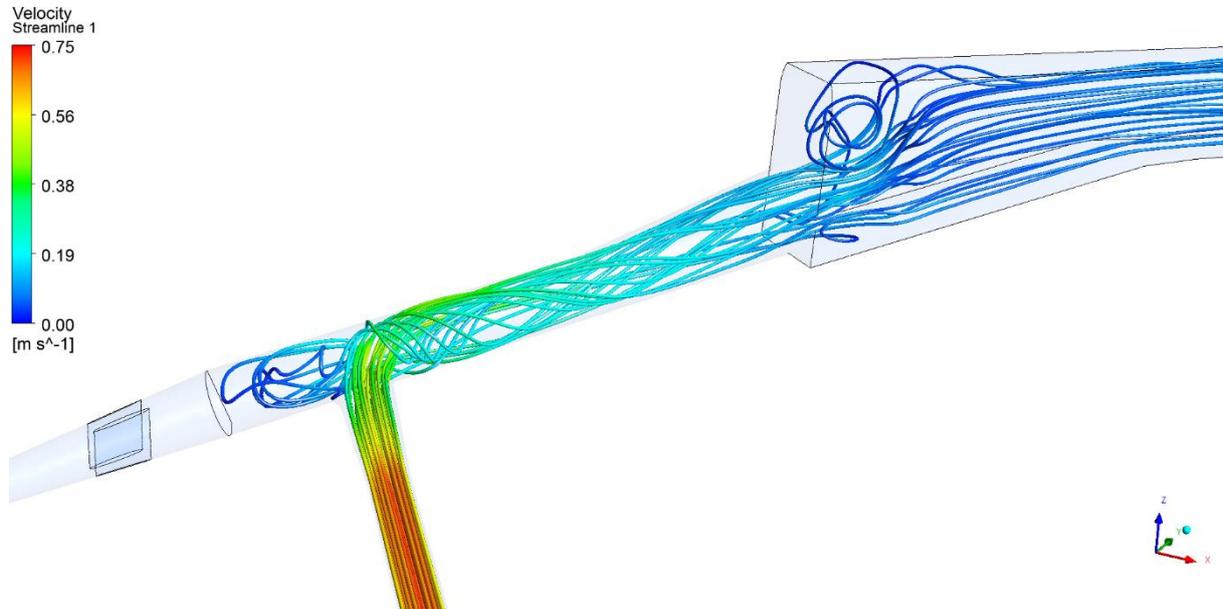


Abbildung 171: LF Turbine MUW ASZ Variante 8

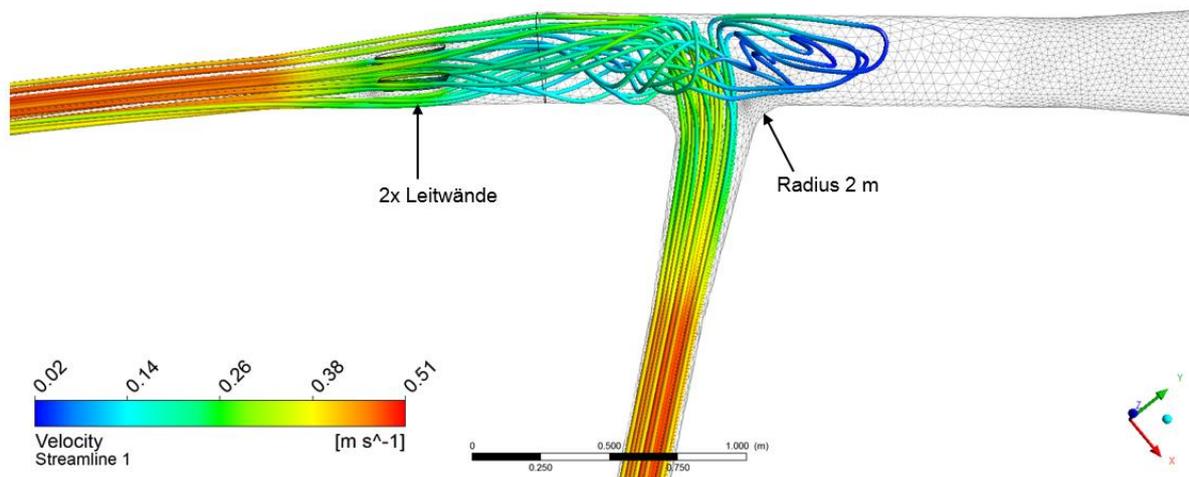


Abbildung 172: LF SBW-Pumpe und MUW-Turbinenbetrieb bei STZ, Variante 8  
Simulation am 1:15 Modell – Geschwindigkeit Froude skaliert

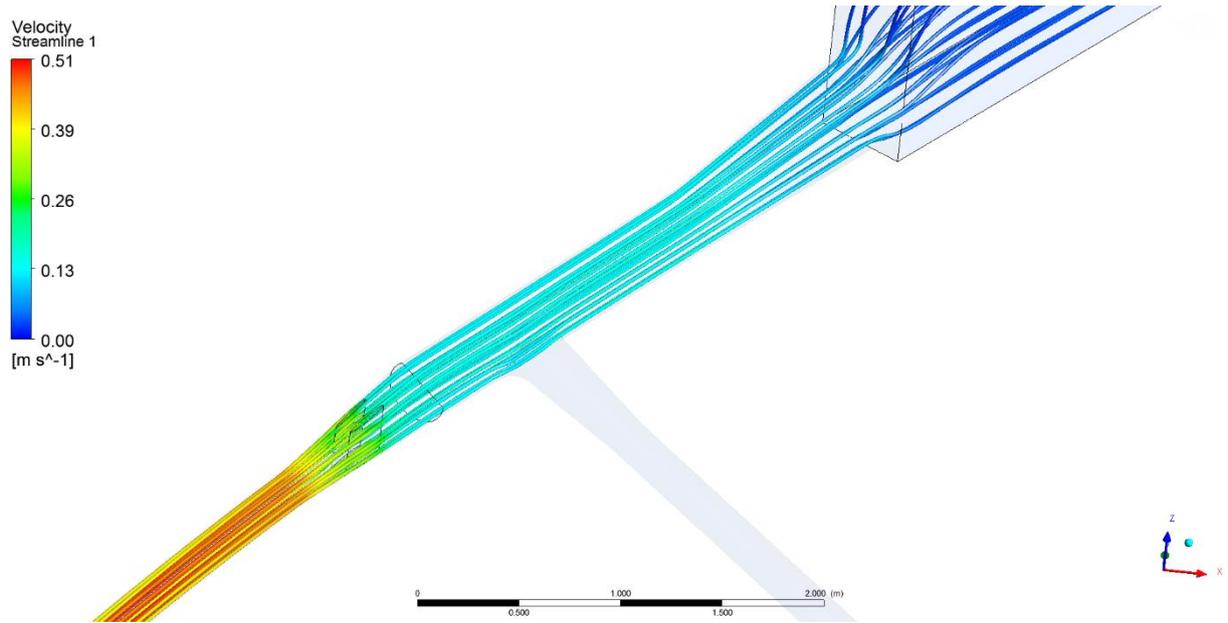


Abbildung 173: LF Pumpe SBW, STZ Variante 8

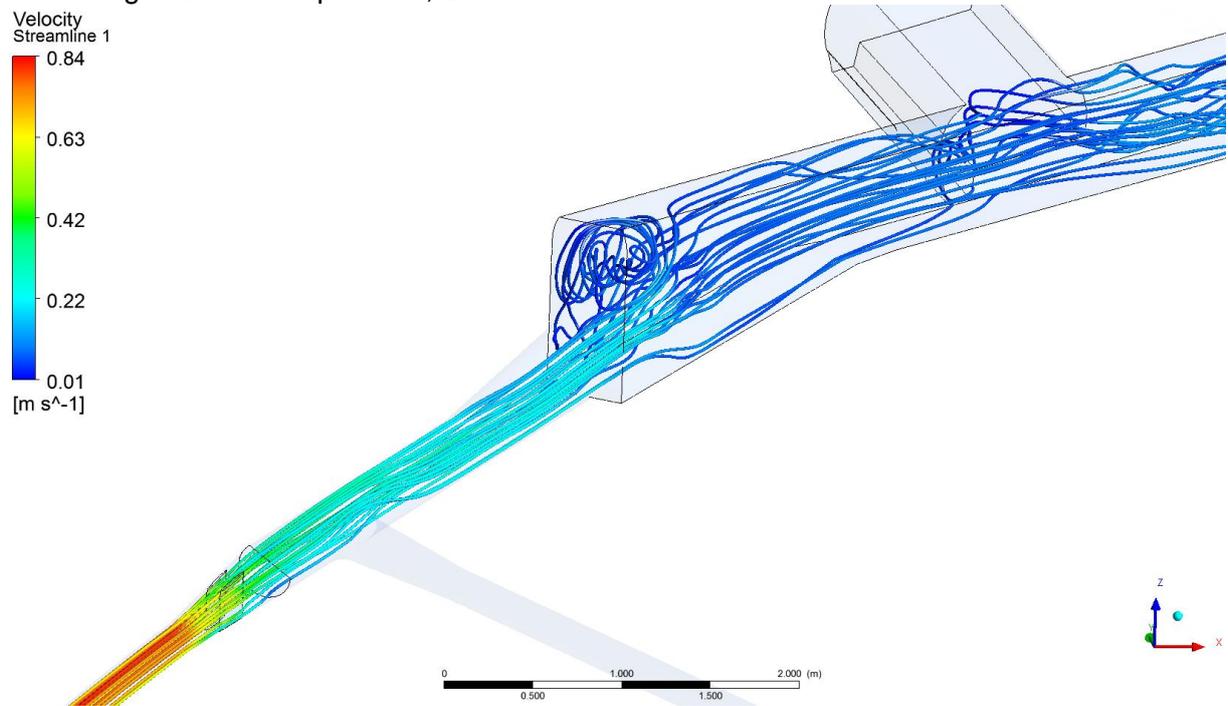


Abbildung 174: LF Turbine SBW, STZ Variante 8

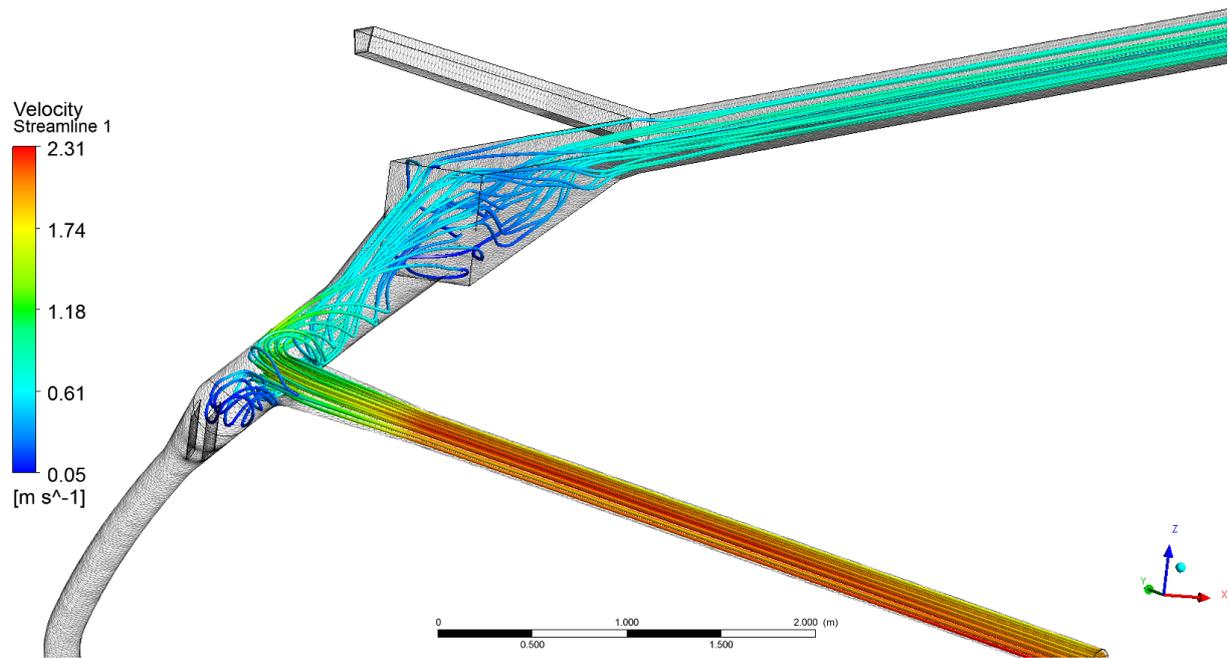


Abbildung 175: LF Turbine MUW, ASZ Variante 8

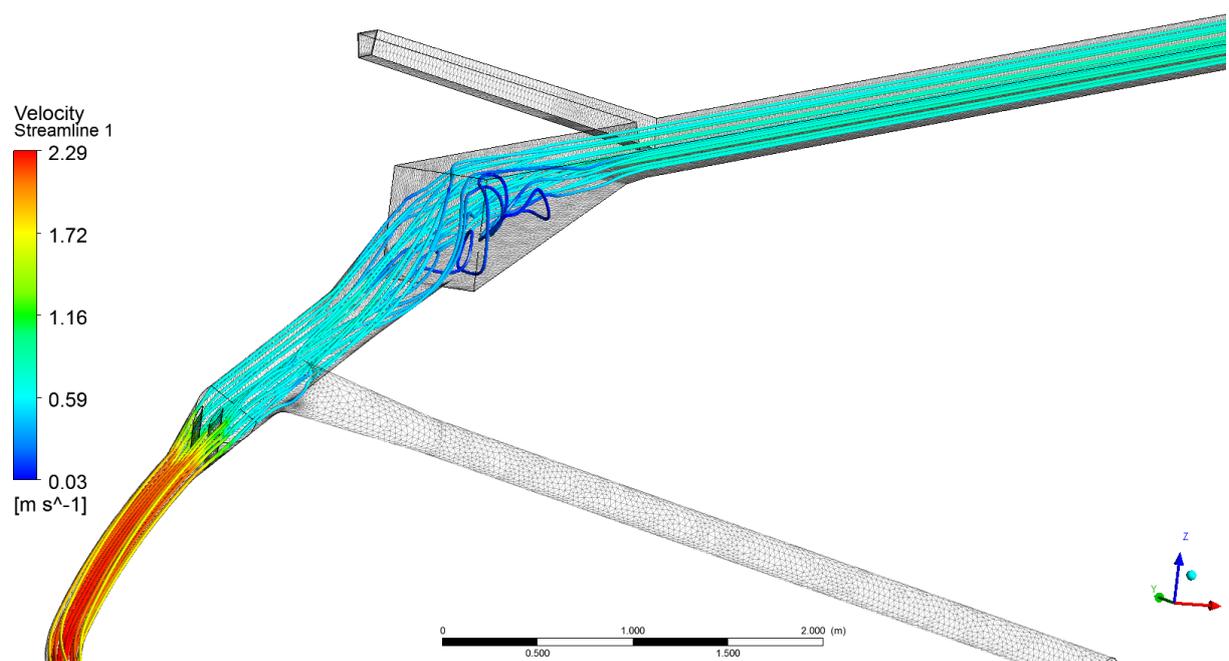


Abbildung 176: LF Pumpe SBW, ASZ Variante 8

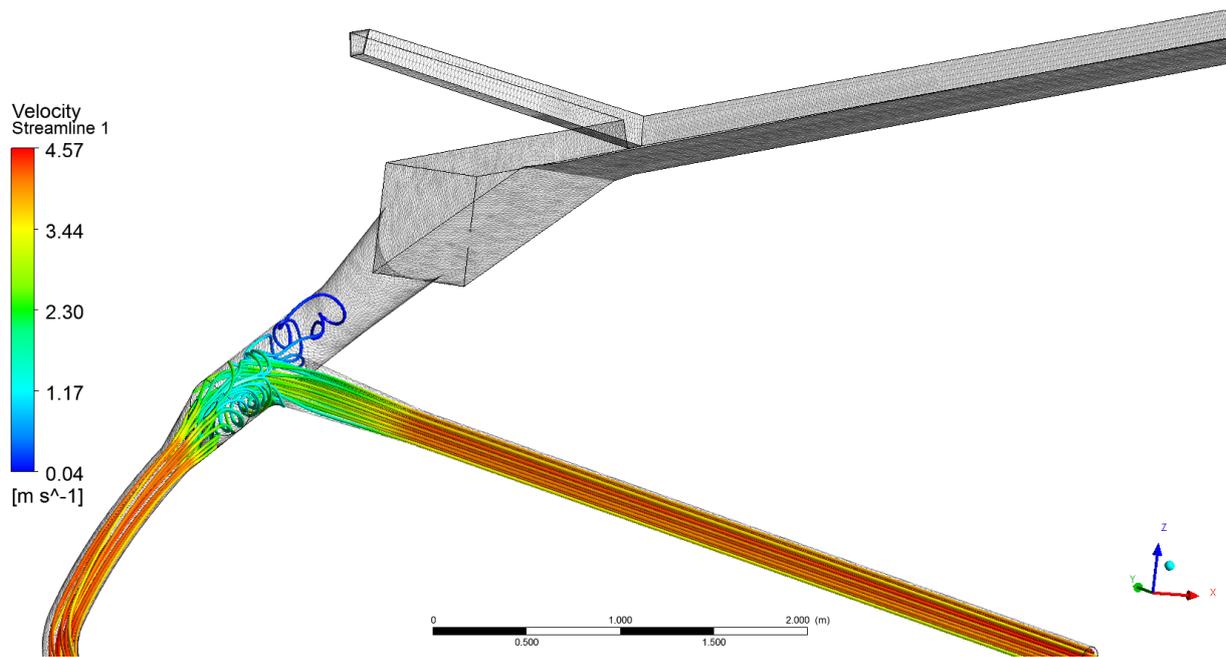


Abbildung 177: LF SBW-Pumpe und MUW-Turbinenbetrieb bei ASZ, Variante 8

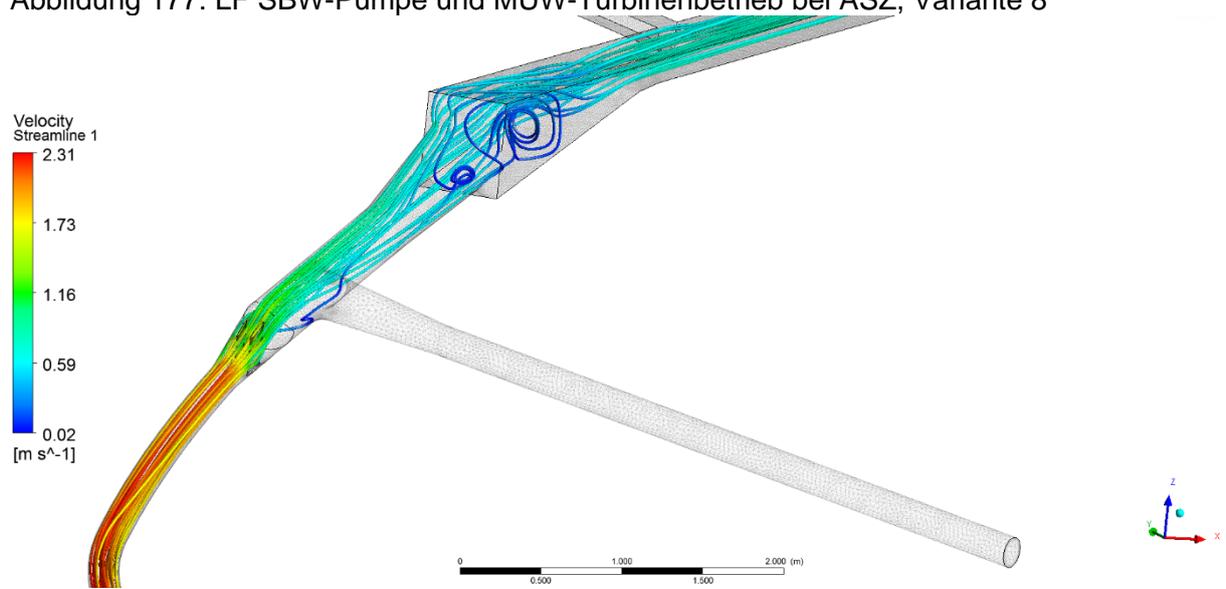


Abbildung 178: LF Turbine SBW, ASZ Variante 8

### 13.7 Strömungssituation Variante 9 -Ausführungsvorschlag

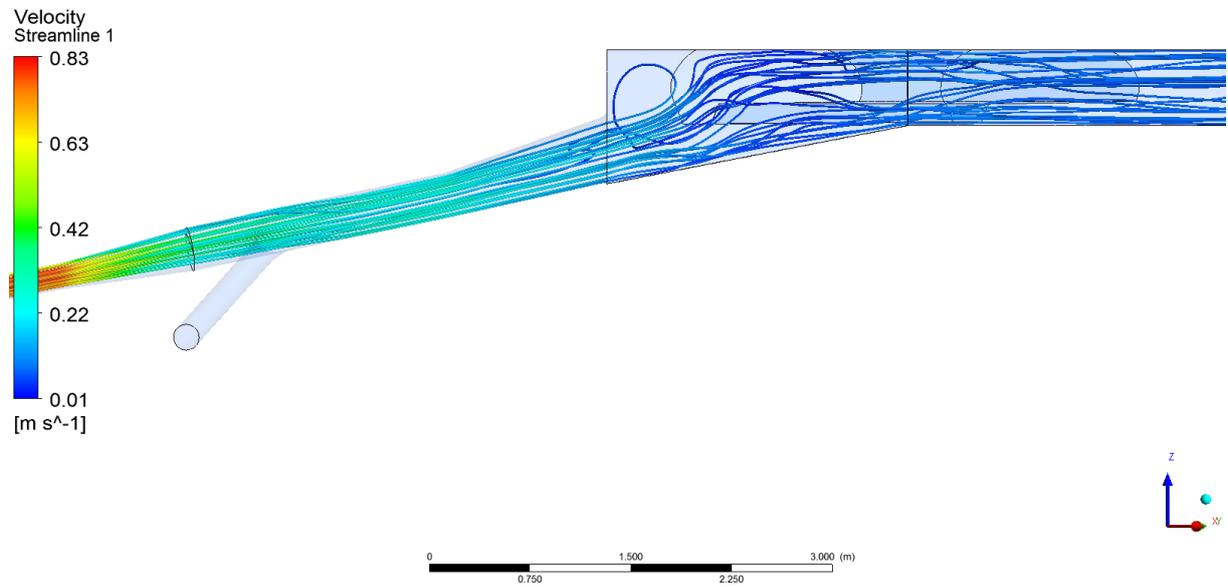


Abbildung 179: LF Turbine SBW, ASZ Variante 9 Ausführungsvorschlag

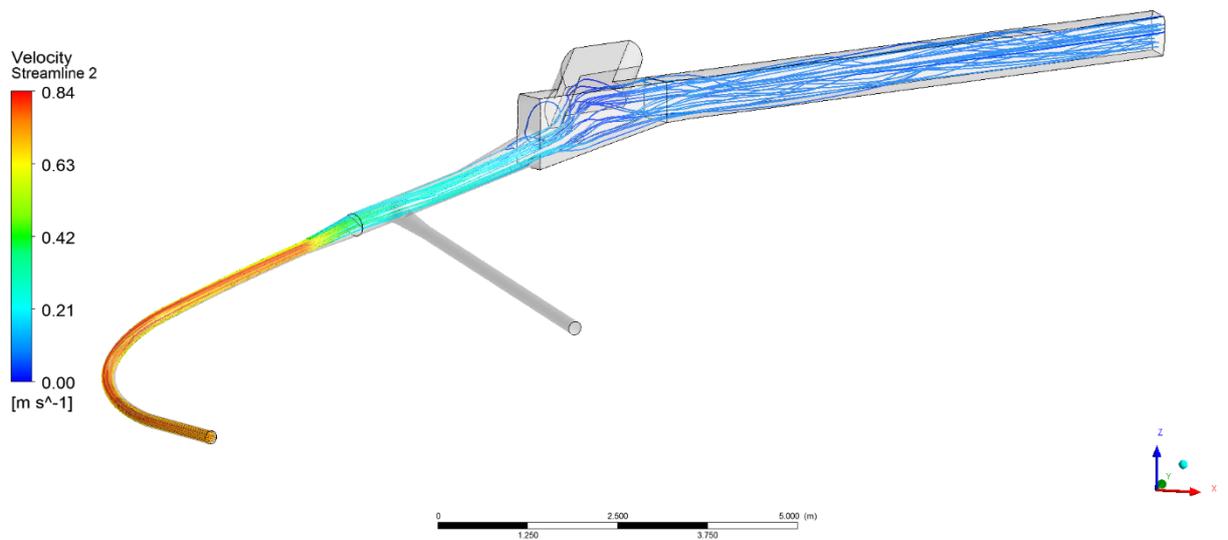


Abbildung 180: LF Turbine SBW, STZ Variante 9 Ausführungsvorschlag

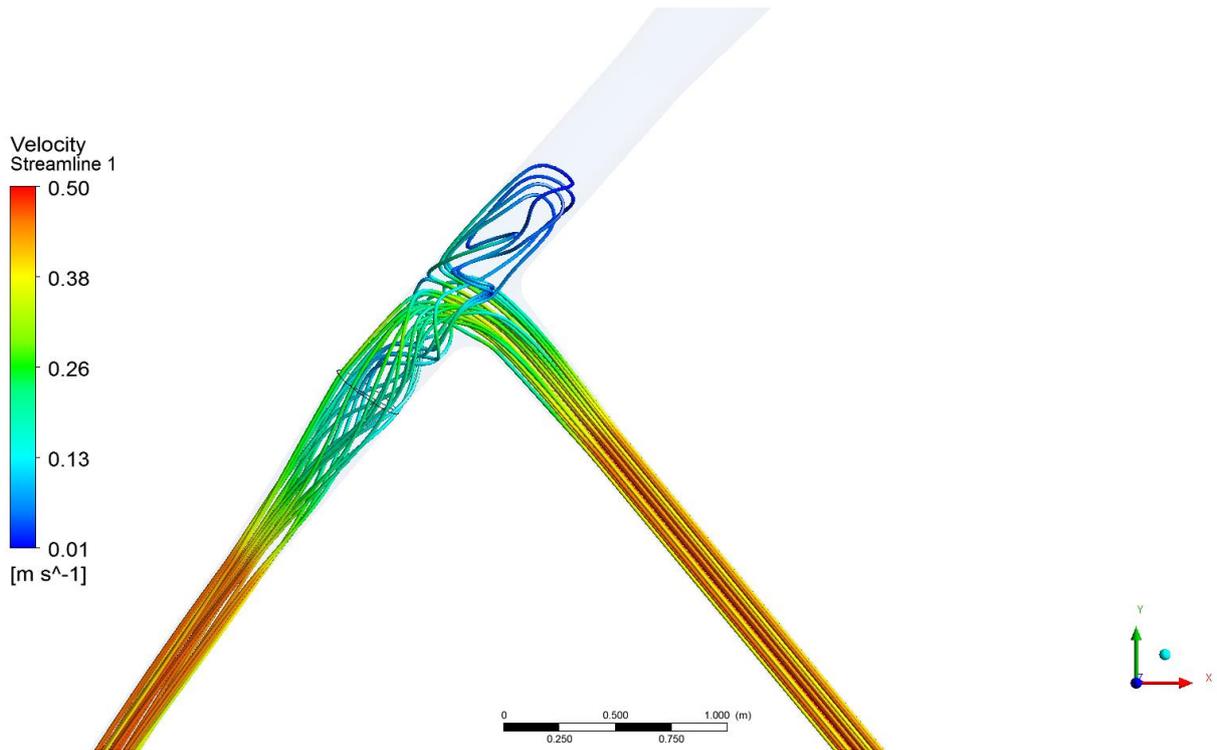


Abbildung 181: LF Pumpe SBW, Turbine MUW, STZ Variante 9 Ausführungsvorschlag



Abbildung 182: LF Pumpe SBW, Turbine MUW, ASZ Variante 9 Ausführungsvorschlag

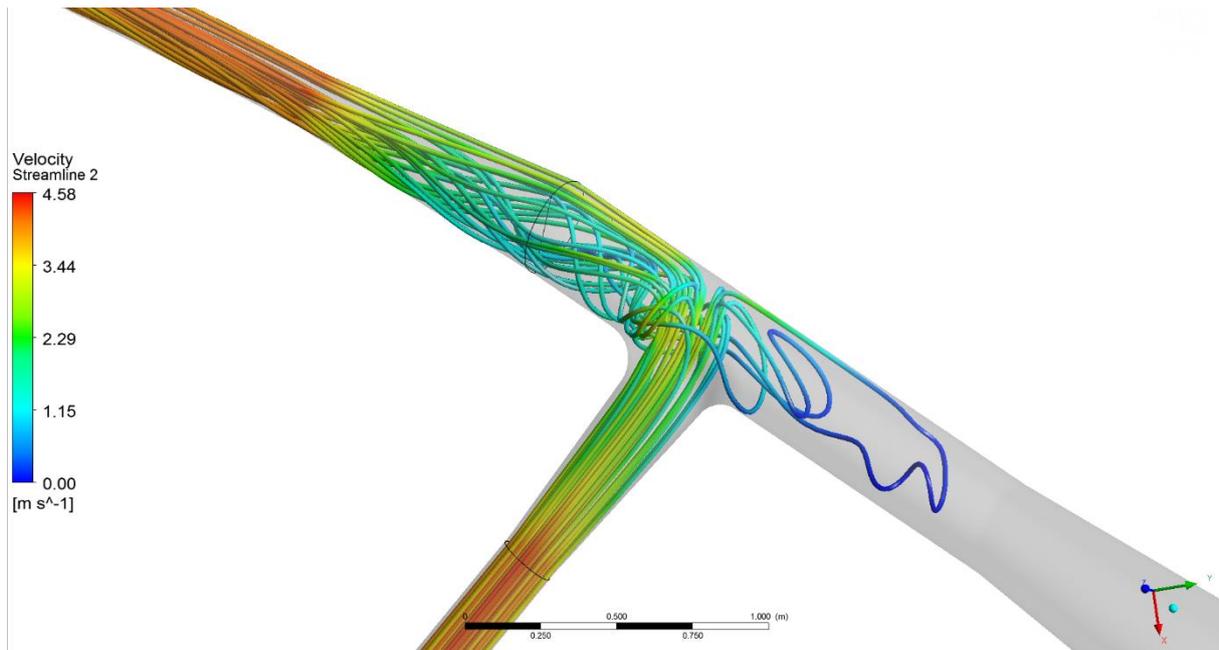


Abbildung 183: LF Pumpe SBW, Turbine MUW, ASZ Variante 9 Ausführungsvorschlag

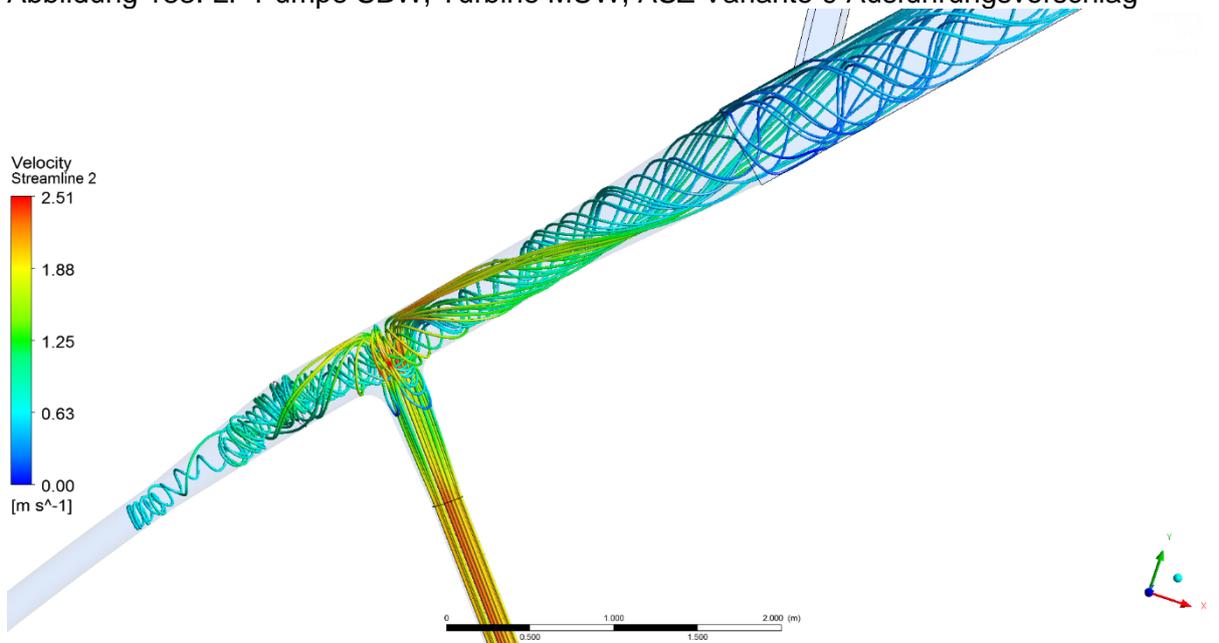


Abbildung 184: LF Turbine MUW, ASZ Variante 9 Ausführungsvorschlag

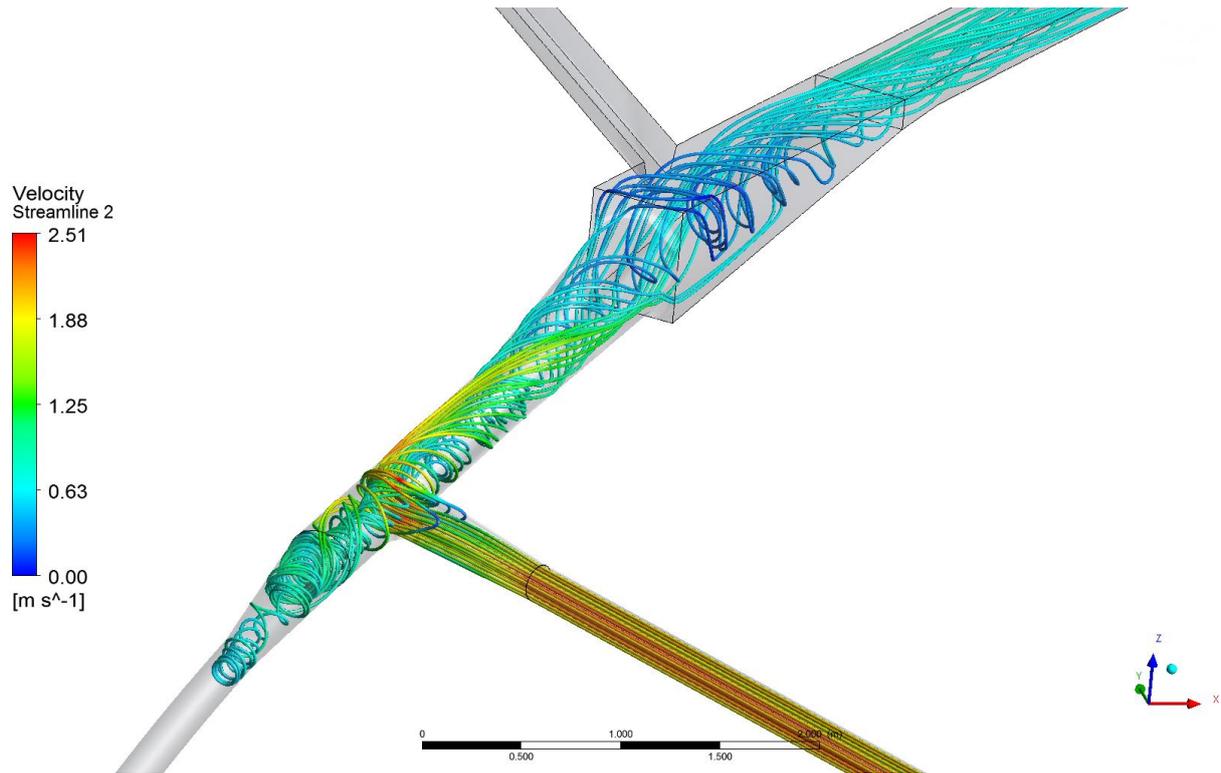


Abbildung 185: LF Turbine MUW, ASZ Variante 9 Ausführungsvorschlag

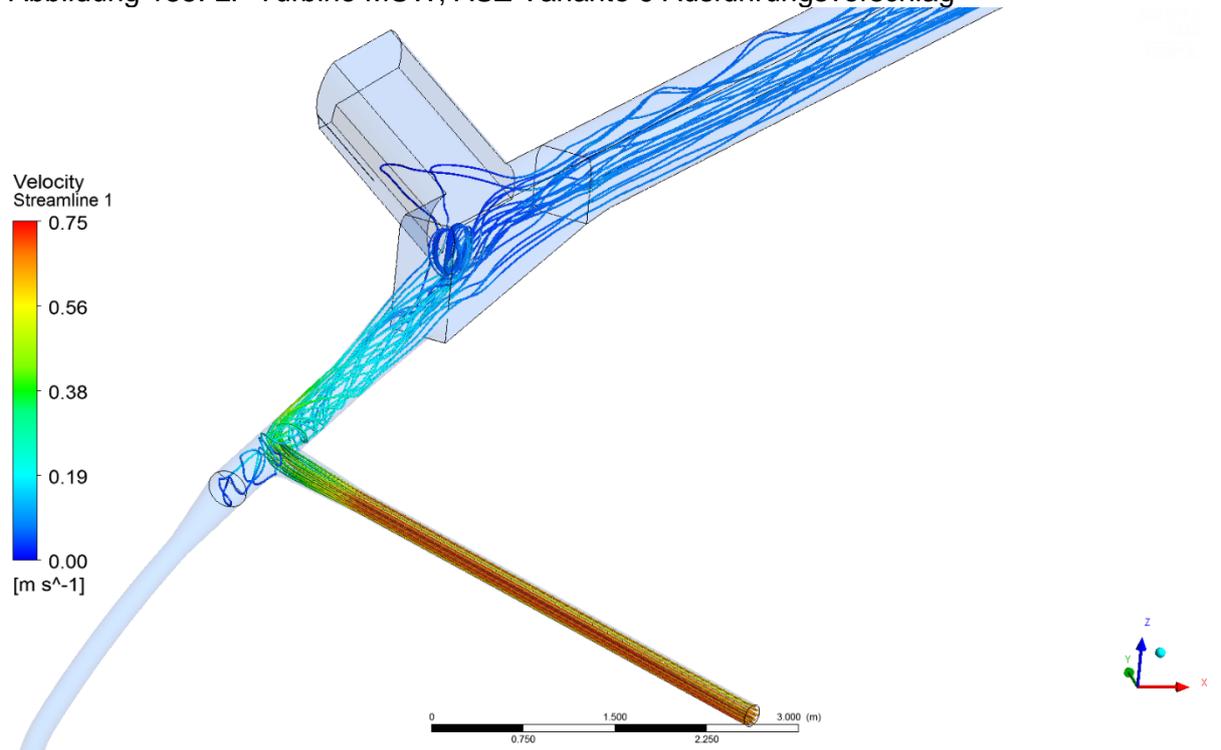


Abbildung 186: LF Turbine MUW, STZ Variante 9 Ausführungsvorschlag

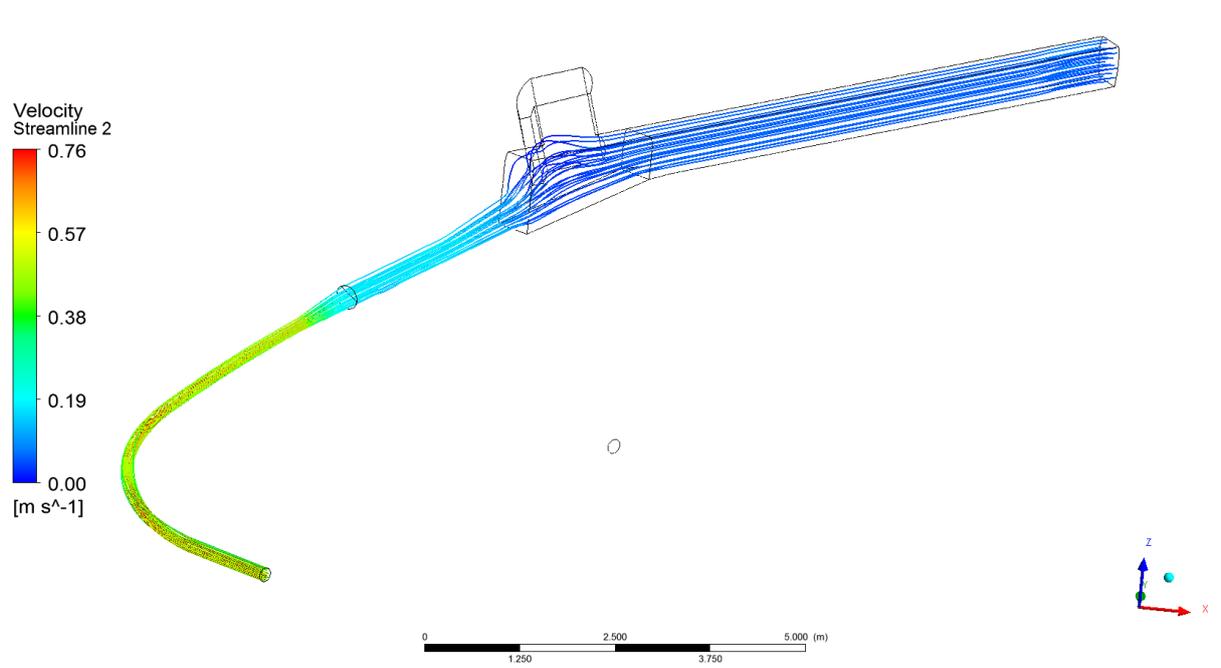


Abbildung 187: LF Pumpe SBW, STZ Variante 9 Ausführungsvorschlag

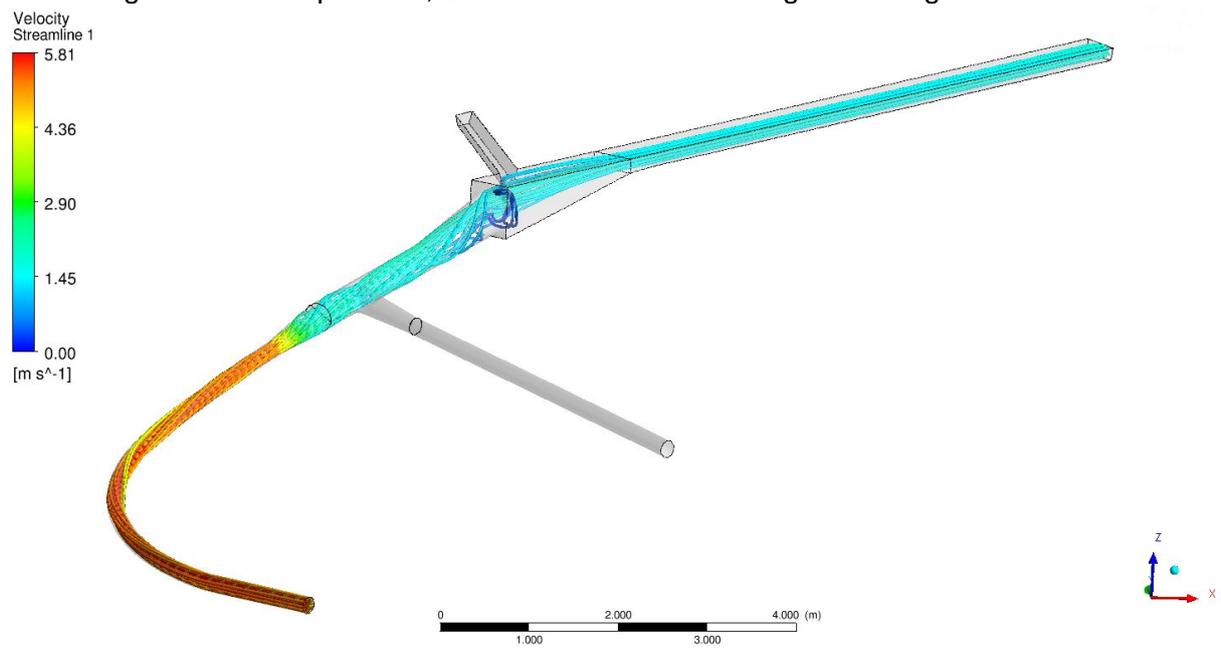


Abbildung 188: LF Pumpe SBW, ASZ Variante 9 Ausführungsvorschlag