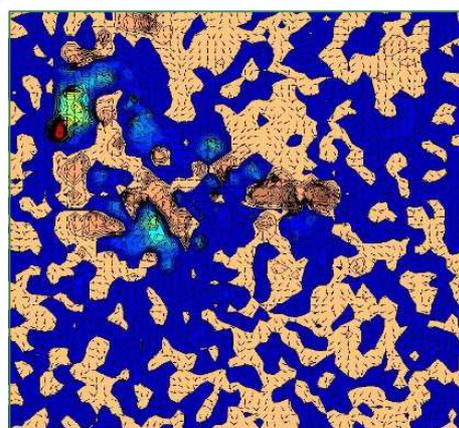
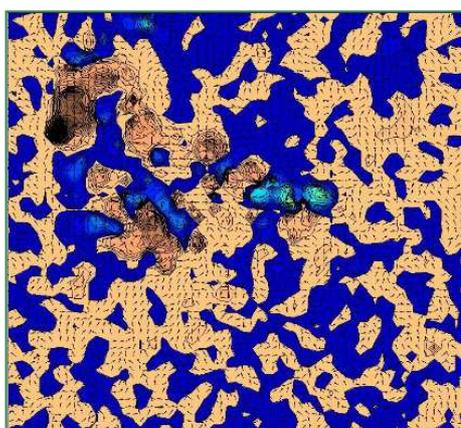


MASTERARBEIT



MODELLUNTERSUCHUNGEN AM WASSERSCHLOSS KRESPA DES PSKW OBERVERMUNTWERK II

Thomas Urach, BSc

Vorgelegt am
Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft

Betreuer
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerald Zenz

Mitbetreuender Assistent
Dipl.-Ing. Wolfgang Richter

Graz am 27. August 2015

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am

.....

(Unterschrift)

STATUARY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

Graz,

date

.....

(signature)

Danksagung

Zu Beginn möchte ich einen großen Dank an meine Familie aussprechen, die mich während meines Bildungsweges in jeder Hinsicht unterstützt hat.

Vielen Dank an Herrn Dipl.-Ing. Wolfgang Richter, der als mitbetreuender Assistent an der Masterarbeit immer ein offenes Ohr für mich hatte und mir mit Begeisterungsfähigkeit für das vorliegende Thema und fachlicher Kompetenz stets zur Seite stand. Ich möchte mich auch bei Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Gerald Zenz und allen Mitarbeitern des Instituts Wasserbau und Wasserwirtschaft bedanken, ohne die die Erstellung der vorliegenden Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Ein ganz besonderer Dank gilt meinen Studienkollegen des Wasserbau Zeichensaals, die im Laufe meiner Studienzzeit zu sehr guten Freunden geworden sind und mit denen ich viele schöne Stunden verbracht habe die mir noch lange in Erinnerung bleiben werden. Auf dass der Kontakt nie abreißt und die Freundschaften auch über größere Distanzen erhalten bleiben.

(Ort), am (Datum)

(Unterschrift des Studenten)

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dem Thema Lufteintrag in Wasser und der Möglichkeit der Überführung von Messungen am Modell auf den Prototypen in der Natur. Das Pumpspeicherkraftwerk Obervermuntwerk II befindet sich aktuell (Stand Sommer 2015) in Bau und erfordert auf Grund der Kapazität und vorliegenden Grundvoraussetzungen zum störungsfreiem Betrieb und Regelbarkeit den Einbau eines Wasserschlosses, welches Krespa benannt ist. Dieses Ausgleichsbauwerk ist zu Untersuchungen und Optimierungen im Labor der Technischen Universität Graz als physikalisches Modell im Maßstab 1:30 aufgebaut und wird in der vorliegenden Masterarbeit bezüglich der Eintragstiefe von Luft durch den Oberkammerschwall in den Steigschacht zufolge Resonanzschaltvorgänge untersucht. Die Umrechnung vom Modell auf die Natur erfolgt durch den Froude'schen Modellmaßstab. Die Untersuchungen sind mit Hilfe der PIV – Messmethode bei mehreren vordefinierten Lastfällen durchgeführt. Numerische Untersuchungen vor Beginn der Arbeit ergeben die Notwendigkeit des Einbaus eines Dämpfungselements in der Kopfkaverne des Wasserschlosses, welche den Abfluss des Oberkammerschwalls in den Steigschacht reguliert und somit die Lufteintragstiefe verringert. Die verschiedenen Lastfälle werden bei unterschiedlichen spezifischen Durchflüssen und Wasserspiegel mit und ohne Dämpfungselement in der Kopfkaverne durchgeführt und verglichen. Die Ergebnisse der Messungen zeigen, dass Umrechnungen mit Hilfe des Froude'schen Modellmaßstab mit den Messungen übereinstimmen und der Einbau des Dämpfungselements in der Kopfkaverne für eine Regulierung und Verringerung der Eindringtiefe der Luftblasen in den Steigschacht notwendig ist.

Abstract

The present work deals with the issue of air entrainment into water and the possibility of the transfer of measurements of the model on the prototype in nature. The pumped storage power plant Obervermuntwerk II is currently (summer 2015) in construction and requires the installation of a surge tank for trouble-free operation and controllability due to the capacity and present basic requirements. It is named Krespa. Due to tests and optimizations this structure is build up as a model in 1:30 scale in the laboratory of Graz University of Technology and is being studied in the present thesis due to air entrainment through the flow of the upper chamber to the shaft according resonance shifts. The conversion of model on nature is carried out by the Froude model scale. The investigations are using the PIV measurement method at several predefined load cases. Numerical investigations before starting the thesis showed the need for installation of a damping element in the shaft head chamber. It regulates the outflow of the upper chamber surge in the shaft and reduces the depth of air entrainment. The various load cases are carried out and compared with different specific discharges and water levels with and without built-in damping element in the shaft head chamber. The results of the measurements show that a conversion using the Froude model scale consistent with the measurements and the installation of the damping element in the shaft head chamber for regulation and reduce the entrainment of air bubbles in the riser shaft is necessary.

Inhaltsverzeichnis

0	Einleitung	1
0.1	Ziel der Masterarbeit	2
0.2	Struktur der Masterarbeit	3
1	Wasserkraft	4
1.1	Energieumwandlung durch Wasserkraft	5
1.2	Wirkungsgrad und Erntefaktor Wasserkraft	6
1.3	Klassifizierung von Wasserkraftanlagen	8
1.3.1	Niederdruckanlagen	8
1.3.2	Mitteldruckanlagen	8
1.3.3	Hochdruckanlagen	9
2	Das Pumpspeicherkraftwerk	10
2.1	Aufbau eines PSWK	10
2.2	Betriebsarten des PSKW	11
2.3	Maschinenkonzepte	11
2.3.1	Ternärer Pumpspeichersatz	13
2.3.2	Reversible Pumpturbine	14
2.3.3	Drehzahlvariable Maschinensätze	15
3	Das Wasserschloss	16
3.1	Aufgaben des Wasserschlosses	16
3.2	Instationäres Strömungsverhalten	17
3.3	Dimensionierung von Wasserschlossern	18
3.3.1	Der Druckstoß	19
3.3.2	Schwingungsperiode	21
3.3.3	Mindestschachtquerschnitt mit Hilfe des Thoma Kriteriums	21
3.3.4	Der maximale Wasserspiegelausschlag	22
3.4	Anordnung des Wasserschloss	23
3.5	Bauweisen des Wasserschlosses	24
3.5.1	Becken- oder Schachtwasserschlößer	24
3.5.2	Kammerwasserschlößer	25
3.5.3	Gedrosselte Wasserschlößer	25
3.5.4	Differentialwasserschlößer	26
4	Das Pumpspeicherkraftwerk Obervermuntwerk II	27
4.1	Anlagenschema und technische Daten des Obervermuntwerk II	27
4.2	Das Bauprojekt Obervermuntwerk II	28
4.3	Das Wasserschloss Krespa	31
5	Messungen am physikalischen Wasserschlossmodell	33
5.1	Hydraulische Modelle	33
5.1.1	Kriterien der mechanischen Ähnlichkeit	33
5.1.2	Froude'sches Modellgesetz	35
5.2	Luft eintrag in Wasser	37
5.2.1	Luft eintragsmechanismen eines Jets nach Danciu, 2011	37
5.2.2	Ermittlung der Eindringtiefe nach Clanet, et al., 1997	38
5.2.3	Ermittlung der Eindringtiefe nach Ervine, et al., 1987	40

5.2.4	Aufstiegsgeschwindigkeit von Luftblasen	42
5.2.5	Zusammenfassung der Literaturstudie zum Thema Lufteintrag in Wasser	43
5.3	Particle Image Velocimetry	44
5.3.1	Grundprinzip des PIV	44
5.3.2	CCD-Kameras	45
5.3.3	ND:YAG Laser	45
5.3.4	Messung mittels PIV	46
5.4	Messung am Modell des Wasserschloss Krespa	49
5.4.1	Das Modell des Wasserschloss Krespa	49
5.4.2	Das Dämpfungselement in der Kopfkaverne des Wasserschloss Krespa	51
5.4.3	Vorbereitungen der Messungen	53
5.4.4	Der Messbereich am Wasserschloss Krespa	55
5.4.5	Kalibrierung des Lasers	57
5.4.6	Kalibrierung der Auswertesoftware – Dynamic Studio	60
5.5	Betrachtete Lastfälle am Modell	62
5.5.1	Kurzbeschreibung der betrachteten Lastfälle	63
5.5.2	Darstellung der Messungen über Vektorplots	66
5.5.3	Lastfall 1a (konstanter Wasserspiegel auf 2000 müA)	68
5.5.4	Lastfall 1b (konstanter Wasserspiegel auf 2023 müA)	73
5.5.5	Lastfall 2a (konstanter Wasserspiegel auf 2006 müA)	78
5.5.6	Lastfall 2b (konstanter Wasserspiegel auf 2023 müA)	86
5.5.7	Lastfall 2c (konstanter Wasserspiegel auf 2043 müA)	91
6	Zusammenfassung und Fazit	99
6.1	Zusammenfassung der Ergebnisse der behandelten Lastfälle	99
6.1.1	LF1a: WSP 2000 müA, mit Dämpfungselement, Q 3 l/s (15 m ³ /s Prototyp), Fallhöhe des Wasserfalls 1,6 m (48 m Prototyp)	99
6.1.2	LF1b: WSP 2023 müA, mit Dämpfungselement, Q 6,1 l/s (30 m ³ /s Prototyp), Fallhöhe des Wasserfalls 0,8 m (25 m Prototyp)	100
6.1.3	LF2a: WSP 2006 müA, ohne Dämpfungselement, Q 3 l/s (15 m ³ /s Prototyp), Fallhöhe des Wasserfalls 1,4 m (62 m Prototyp)	100
6.1.4	LF2b: WSP 2023 müA, ohne Dämpfungselement, Q 6,1 l/s (30 m ³ /s Prototyp), Fallhöhe des Wasserfalls 0,8 m (25 m Prototyp)	101
6.1.5	LF2c: WSP 2043 müA, ohne Dämpfungselement, Q 16,2 l/s (80 m ³ /s Prototyp), Fallhöhe des Wasserfalls 0,16 m (5 m Prototyp)	102
6.2	Fazit	104
7	Anhang	114
7.1	Matlab Code	114
7.2	Vektorplots	122
7.3	Bilder	124

Abkürzungsverzeichnis

CCD	Charged Coupled Device
EDT	Eindringtiefe
EROEI	Energy Return on Energy Invested
FH	Fallhöhe
HD-PT	Hochdruck Pumpturbine
LF	Lastfall
ND-PT	Niederdruck Pumpturbine
Nd:YAG Laser	Neodym-dotierter Yttrium-Aluminium-Granat-Laser
OW	Oberwasser
OVW II	Obervermuntwerk II
PIV	Particle Image Velocimetry
PSKW	Pumpspeicherkraftwerk
SKW	Speicherkraftwerk
UV	Ultraviolett
UW	Unterwasser
WSP	Wasserspiegel

Einheiten

m	Meter (Länge)
nm	Nanometer (= 10^{-9} m)
m/s	Meter pro Sekunde (Geschwindigkeit)
m ³ /s	Kubikmeter pro Sekunde (Durchfluss = 1000 l/s)
s	Sekunde (Zeit)
kg	Kilogramm (Gewicht = 10^3 Gramm)
müA	Meter über Adria (Höhe)
Pa	Pascal (Druck = $\text{N/m}^2 = \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{m}^{-1}$)
MJ	Mega Joule (Arbeit = $\text{N} \cdot \text{m} = 10^6$ Joule = $\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)
MW	Watt (Leistung = $\text{J/s} = 10^6$ Watt = $\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-3}$)
kHz	Hertz (Frequenz = $1/\text{s} = 10^3$ Hertz)

Kenngrößen und Symbole

a	Druckwellengeschwindigkeit	[m/s]
A_S	Querschnittsfläche des Stollens	[m ²]
A_{Th}	Thoma-Querschnitt	[m ²]
A_w	Querschnittsfläche des Wasserschlosses	[m ²]
D	Durchmesser des Jets (bei Auftreffen auf die Flüssigkeitsoberfläche)	[m]
D	Jetdurchmesser	[mm]
d_0	Anfangsjetdurchmesser	[m]
d_i	Jetinnendurchmesser (bei Auftreffen auf die Flüssigkeitsoberfläche)	[m]
E	Energie	[kWh]
E_k	kinetische Energie	[kWh]
E_p	potentielle Energie	[kWh]
E_R	E-Modul der Rohrleitung ($E_{R,Gussrohr} = 1,67 \cdot 10^{11}$ [N/m ²])	[Pa]
E_w	E-Modul des Wassers ($E_w = 2,1 \cdot 10^9$ [N/m ²])	[Pa]
Fr	Froude'sche-Zahl	[-]
g	Erdanziehungskraft (ca. 9,81 m/s ²)	[m/s ²]
h	Höhe	[m]
H	maximale Eindringtiefe	[m]
h_B	Bruttofallhöhe	[m]
h_D	Druckhöhe (p/γ)	[m]
h_E	Energiehöhe	[m]
$h_{f,0}$	Fallhöhe bei stationärem Betrieb	[m]
h_k	kinetische Energiehöhe	[m]

h_p	potentielle Energiehöhe	[m]
$h_{vS,0}$	Verlusthöhe bei stationärem Betrieb	[m]
l	Rohrlänge	[m]
l_s	Druckstollenlänge	[m]
m	Masse	[kg]
$\max h_{a,jou}$	max. Druckstoßhöhe (Joukowsky-Stoß)	[m]
P	Leistung der Anlage	[W]
p	Überdruck	[N/m ²]
Q	Durchfluss	[m ³ /s]
$Q_{s,0}$	Durchfluss Druckstollen	[m ³ /s]
Re	Reynolds-Zahl	[-]
T	Schwingungsperiode des Wasserspiegels	[s]
t	Zeit	[s]
T_L	Laufzeit der Druckwelle	[s]
T_R	Reflexionszeit der Druckwelle	[s]
t_s	Schließzeit	[m]
U_i	mittlere Geschwindigkeit im Kern des Jets	[m/s]
u_T	Aufstiegsgeschwindigkeit der Blasen	[m/s]
V	Volumen der Blasen	[m ³]
v	Geschwindigkeit (vereinfacht querschnittsgemittelt)	[m/s]
v_0	Anfangsgeschwindigkeit des Wasserstrahls (bei Auftreffen auf die Flüssigkeitsoberfläche)	[m/s]
We	Weber-Zahl	[-]
y_p	maximale Eindringtiefe der Luftblasen	[m]
z	geodätische Höhe	[m]

α	Coriolis- Beiwert (vereinfacht $\alpha = 1$)	[-]
α	Ausbreitungswinkel des Jets unter Wasser	[°]
α_2	Ausbreitungswinkel der Blasen nach Außen	[m]
Δv	Änderung der Durchflussgeschwindigkeit	[m/s]
η	Wirkungsgrad Gesamt (Triebwasserführung, Turbine und Generator)	[-]
η_{Th}	Sicherheits- oder Vergrößerungsfaktor (1,5 – 1,8)	[-]
v	Strömungsgeschwindigkeit (zwischen umgebendem Medium und Tropfen)	[m/s]
ξ	Ortsveränderung	[m]
σ	Oberflächenspannung (Wasser = 0,073 N/m bei 20°C)	[kg/s ²]
ρ	Dichte der Verwendeten Flüssigkeit	[kg/m ³]
ρ_w	Dichte des Wassers (bei T = 10 °C; $\rho_w \approx 1000$ kg/m ³)	[kg/m ³]

0 Einleitung

In einer Zeit der Energiewende, in der ein Umorganisieren in der Nutzung und Verwertung der vorhandenen Rohstoffen stattfindet spielen Kraftwerke, die einer Energieumwandlung mit Hilfe erneuerbarer Energiequellen dienen eine immer wichtigere Rolle. Wind- und Solarkraftwerke sind von aktuellen Wetter- Jahreszeit- und/oder Tagesverhältnissen abhängig, dies macht es erforderlich in Zeiten niedriger „Stromerzeugung“ auf alternative Kraftwerke zuzugreifen. Wasserkraftwerke können weitgehend unabhängig der Wettervorhersage betrieben werden. Speicherkraftwerke (SKW) besitzen zusätzlich dazu den Vorteil elektrische Energie in Form von potentieller Energie (Lageenergie) speichern zu können. Der Einsatz von Wasserkraftwerken zeigt, dass ökonomisches Denken und Umweltbewusstsein kein Widerspruch sein müssen.

Eine spezielle Form der Speicherkraftwerke stellen Pumpspeicherkraftwerke (PSKW) dar, die zusätzlich der Energieumwandlung von Wasserkraft in elektrischen Strom die technische Ausstattung besitzen Energie temporär in Form von Lageenergie zu speichern. Im Pumpbetrieb wird das Wasser aus einem Vorfluter oder unterem Becken in ein oberes Becken gepumpt und so durch Anheben des Stauziels im oberen Speicher in Form potentieller Energie gespeichert. Im sogenannten Turbinenbetrieb kann äquivalent zu herkömmlichen Speicherkraftwerken Strom durch Energieumwandlung mit Hilfe von Turbinen erfolgen. (Schwab, 2009)

Das folgende Bild zeigt den schematischen Aufbau eines Pumpspeicherkraftwerkes mit unterwasserseitig situiertem Krafthaus (Abbildung 1).

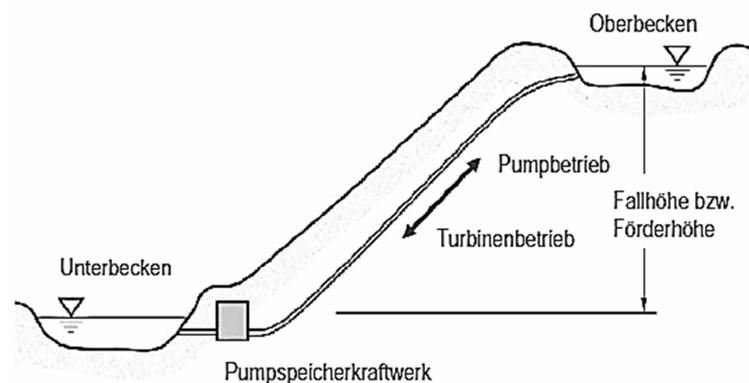


Abbildung 1: Prinzipskizze PSKW, Pump- und Turbinenbetrieb (Strobl, et al., 2006)

Die verschiedenen Betriebsarten der Pumpspeicherkraftwerke generieren durch das annähernd inkompressible Medium Wasser bedingt hohe Drücke und Massenschwingungen im System wenn die kinetische Energie des zuvor fließenden Wassers durch Ab- oder Zuschaltungen verändert wird. Die Auftretenden Drücke werden durch Integrierung von Wasserschlossern, die eine wasserbauliche Anlage im Triebwasserweg des Wasserkraftwerkes darstellen, kontrolliert gedämpft. Insbesondere sorgt eine adäquate Wasserschlosskonzeption bei Triebwasserwegen mit langen Stollen für die Regelbarkeit der Maschinen.

Das im Vorarlberger Montafon situierte Pumpspeicherkraftwerk (PSKW) Obervermuntwerk II erfordert die Integration eines Wasserschlosses, welches Krespa benannt ist (nach der durchhörten Bergspitze). Ein physikalisches Modell des Wasserschlosses im Wasserbaulabor der Technischen Universität Graz im Maßstab 1:30 dient der Überprüfung der hydraulischen Funktionalität für die maßgebenden dynamischen Lastfälle.

Durch 1D numerische Berechnungen und Simulation spezieller Resonanzschaltfälle wird die Notwendigkeit der konstruktiven Umgestaltung des Bereiches der Kopfkaverne untersucht. Um den Eintrag von Luft in den Druckstollen zu unterbinden, welcher zur durch Wasserfälle in den Steigschacht gegeben wäre, wird der Einbau eines Dämpfungselements vorgeschlagen. Dieses Element in der Kopfkaverne ermöglicht die gezielte Verteilung und energetische Definition des Durchflusses von der Oberkammer in den Fallschacht. Durch die Regulierung verringert sich die Eindringtiefe der Luftblasen etwa um das Dreifache. (Zenz, et al., 2014)

0.1 Ziel der Masterarbeit

Das Ziel der Masterarbeit ist es das Verhalten des aus der Oberkammer reflektierten Oberkammerschwalls in den Steigschacht durch Messungen am Modell des Wasserschlosses Krespa im Labor der Technischen Universität Graz an mehreren aussagekräftigen Lastfällen zu untersuchen. Das Verhalten ist vom Einbau des Dämpfungselements in der Kopfkaverne maßgebend abhängig. Das Dämpfungselement stellt eine Konstruktion in der Kopfkaverne des Wasserschlosses Krespa dar, welche eine Aufteilung des Oberkammerschwalls in den Fallschacht durch definierte Rohre in horizontaler, aber vorwiegend vertikaler Richtung vorgibt. Jedenfalls wird eine Mitnahme von Luft in den Wasserkörper des Steigschachtes beobachtet, welche im Zuge dieser Arbeit untersucht wird.

Die Untersuchungen finden im Steigschacht des Wasserschlossmodells mit Hilfe von PIV-Messungen (*Particle Image Velocimetry*) statt. Es wird die Eindringtiefe von großen und kleinen Luftblasen durch den Oberkammerschwall in den Steigschacht bei mehreren vordefinierten Lastfällen untersucht und dokumentiert. Die Messungen finden mit und ohne Dämpfungselement in der Kopfkaverne statt und werden bezüglich der Eindringtiefe der Luftblasen verglichen.

Belüftungsphänomene in Modellversuchen können nicht innerhalb des globalen hydraulischen Modellgesetzes modelliert werden. Durch die Tatsache, dass keine Möglichkeit der Verkleinerung der Luftblasen besteht, fallen Lufteinträge und insbesondere Lufteintragstiefen im Modell im Vergleich zur Natur verhältnismäßig gering aus. Durch die Verwendung der Froude'schen Gesetzmäßigkeiten wird daher versucht mit Daten der Lufteintragstiefe (Belüftungsgrenze) am Modell die nach Durchführung von Versuchen am physikalischen Modell erhalten wurden, die Eindringtiefe der Luftblasen in der Natur ermitteln zu können.

0.2 Struktur der Masterarbeit

Wasserkraft

Zu Beginn der Arbeit ist ein Überblick über die Grundlagen der Wasserkraft geboten. Einleitend werden kurz verschiedene Möglichkeiten der Energieumwandlung durch Nutzung erneuerbarer Energiequellen aufgelistet, anschließend daran ist die Energieumwandlung durch Wasserkraft (bzw. die nutzbare Energie des Wassers) erklärt. Abschließend wird auf den Erntefaktor unterschiedlicher Kraftwerkstypen sowie die Klassifizierung unterschiedlicher Wasserkraftanlagen eingegangen.

Pumpspeicherkraftwerke

Nach den Grundlagen der Wasserkraft wird im Kapitel 2 die Thematik der Pumpspeicherkraftwerke, deren prinzipieller Aufbau und Nutzen erklärt. Es werden die Betriebsarten eines Pumpspeicherkraftwerks sowie damit zusammenhängend Maschinenkonzepte der Anlagen bearbeitet und dessen Vor- und Nachteile aufgelistet.

Wasserschloss

Das Kapitel 3 fokussiert das Wasserschloss allgemein und gibt einen Überblick über Aufbau und Nutzen. Nach Erläuterung der Dimensionierung erfolgt ein Verweis auf die Problematik der Druckstöße und Massenschwingungen bei Betrieb des Pumpspeicherkraftwerkes.

Pumpspeicherkraftwerk Obervermuntwerk II

Im Kapitel 4 wird das (mit Stand Sommer 2015) in Bau befindliche Bauprojekt Pumpspeicherkraftwerk Obervermuntwerk II beschrieben und näher auf das Wasserschloss Krespa eingegangen.

Messungen am physikalischen Wasserschlossmodell

Zu Beginn des Kapitel 5 erfolgt ein Überblick über die Anwendung und Kriterien hydraulischer Modelle, sowie einer Erklärung des angewendeten Froude'schen Modellgesetzes und dessen Anwendungsgrenzen. Darauf folgend finden sich Literaturstudien zu den Themengebieten Lufteintrag in Wasser und der Messmethode PIV. Anschließend daran folgen die Unterkapitel zum Thema Messung am Modell des Wasserschloss Krespa und eine Beschreibung der betrachteten Lastfälle.

Zusammenfassung und Fazit

Die Masterarbeit wird abgeschlossen durch eine Zusammenfassung der erhaltenen Ergebnisse der betrachteten Lastfälle am Modell und Erkenntnisse der Messungen in Bezug auf die Einbringung der Luft in den Fallschacht.

1 Wasserkraft

Die Umwandlung von Primärenergie in elektrische Energie erfolgt in Kraftwerken, diese können abhängig der verwendeten Energieformen unterschieden werden in:

- Wärmekraftwerke
- Wasserkraftwerke
- Additive Technologien (Windgeneratoren, Photovoltaik, Solarthermik, Biomasseanlagen, ...)

Wärme und Wasserkraftwerke bieten gegenüber der additiven Technologien den Vorteil der vollen und ständigen Einsatzfähigkeit der Stromerzeugung, additive Technologien können, auf Grund der Tatsache dass der ständige Einsatz durch äußere Rahmenbedingungen bedingt nicht kontinuierlich angesehen werden kann, keine ständige Einsatzfähigkeit bieten. Wasserkraftwerke, zu denen auch Gezeiten-, Wellen-, und Osmosekraftwerke zählen bieten gegenüber den Wärmekraftwerken neben der dauerhaften Verfügbarkeit des Rohstoffes (allerdings Niederschlagsabhängigkeit der Wassermenge) den Vorteil im Betrieb keine schädlichen Emissionen auszustoßen und zeichnen sich auch trotz hoher Investitionskosten, verbunden mit langwieriger und aufwändiger Errichtung der Bauwerke als kostengünstige Methode der Stromerzeugung auf Grund der Langlebigkeit der Anlagen aus. (Schwab, 2009)

Bei Betrachtung des Wasserkreislaufes kann festgehalten werden, dass Wasserkraft eine ideale Kombination aus mehreren Energieressourcen darstellt. Sonnenenergie lässt Wasser verdampfen und es kommt zur Wolkenbildung. Durch Wechselwirkungen mit dem Wind werden die entstandenen Wolken landeinwärts transportiert, wo es zum Abregnen kommt. Ein großer Teil des abgeregneten Wassers wird im Boden gespeichert und kontinuierlich in Form von kinetischer Energie über Bäche und Flüsse abgeleitet bzw. dient der Befüllung von Speichern, dessen Speicher- oder Flusskraftwerke die erhaltene Energie mit Hilfe von Turbinen wieder in elektrischen Strom umwandeln. (Strobl, et al., 2006)

Die teilweise starken Eingriffe in die Natur und das lokale Ökosystem sind neben der Gefährdung der Wasserlebewesen und Fische die Nachteile von Wasserkraftanlagen und müssen durch bauliche Vorkehrungen und detaillierter Auflistung aller Aspekte und Folgen genau betrachtet und in die Planung des Projektes miteinbezogen werden. Es erscheint hier noch intensiver Forschungsbedarf notwendig, um eine möglichst hohe Energienutzung in Kombination mit funktionierenden Ökosystemen zu gewährleisten.

1.1 Energieumwandlung durch Wasserkraft

Als nutzbare Energie des Wassers wird die Gesamtheit der zur Verfügung stehenden potentiellen und kinetischen Energie verstanden. Die Energiehöhe h_E wird auch als Bernoulli- oder Energiehöhe des Wassers über einem Bezugshorizont bezeichnet. Auf Grund der Tatsache, dass in der Praxis jedoch nie von idealen Verhältnissen ausgegangen werden kann, wird die Energiehöhe noch um den Faktor der Verlusthöhe $h_{v,i}$ erweitert, welcher Verluste die durch Reibung, Turbulenzen und Weiterem hervorgerufen werden berücksichtigt und in kontinuierliche Verluste entlang eines Weges im System und punktuell auftretenden Verluste differenziert. (Giesecke, et al., 2009)

$$E = E_p + E_k = m * g * h_E \text{ [kWh]} \quad (1)$$

mit

$$h_E = h_p + h_k = \frac{p}{\rho_w * g} + z + \frac{v^2}{2 * g} + h_{v,i} \text{ [m]} \quad (2)$$

E	Energie	[kWh]
E_k	kinetische Energie	[kWh]
E_p	potentielle Energie	[kWh]
h_E	Energiehöhe	[m]
h_p	potentielle Energiehöhe	[m]
h_k	kinetische Energiehöhe	[m]
z	geodätische Höhe	[m]
ρ_w	Dichte des Wassers (für $T=10^\circ\text{C}$; $\rho_w \approx 1000 \text{ kg/m}^3$)	[kg/m ³]
p	Überdruck	[N/m ²]
v	Geschwindigkeit (vereinfacht querschnittsgemittelt)	[m/s]
g	Erdanziehungskraft	[m/s ²]

1.2 Wirkungsgrad und Erntefaktor Wasserkraft

Die elektrische Leistung, welche durch eine Pumpspeicherkraftanlage erzielt werden ist maßgebend von der zur Verfügung stehenden Fallhöhe abhängig und zudem neben dem Einfluss der Gravitation durch ihren Durchfluss, das geförderte Medium und dem Wirkungsgrad bestimmt ist und kann durch folgenden mathematischen Zusammenhang ermittelt werden :

$$P = Q * h_B * \eta_{ges} * g * \rho_w [W] \tag{3}$$

P	Leistung der Anlage	[W]
Q	Durchfluss	[m ³ /s]
h _B	Bruttofallhöhe	[m]
η	Wirkungsgrad Gesamt (Triebwasserführung, Turbine und Generator) (0,65 < η _{ges} < 0,88) (Giesecke, et al., 2009)	[-]
g	Erdanziehungskraft	[m/s ²]
ρ _w	Dichte des Wassers (für T=10°C; ρ _w ≈ 1000 kg/m ³)	[kg/m ³]

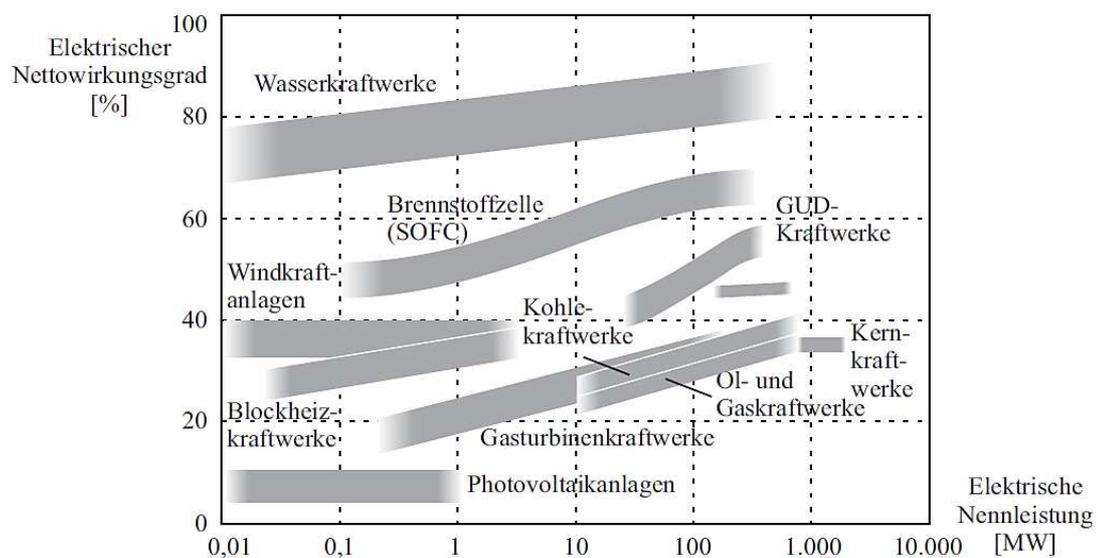


Abbildung 2: Wirkungsgrad Wasserkraft (Giesecke, et al., 2009)

Der Erntefaktor (Energy Returned on Energy Invested, oder auch kurz EROI) stellt einen Verhältniswert zwischen der während der gesamten Lebensdauer der Anlage betrachteten möglichen erzeugbaren (umwandelbarer) Energie zur für den Bau der Anlage und dem Abriss im Anschluss nach Ende des Betriebs benötigten Energie dar. Dies kann als Verhältnis von Energiegewinn zu Energieaufwand betrachtet werden. (Strobl, et al., 2006)

$$\text{Erntefaktor} = \frac{\text{Energiegewinn}}{\text{Energieaufwand}} [-] \quad (4)$$

Je größer der erhaltene Wert der Gegenüberstellung, desto lohnender der Bau und der Betrieb der Anlage. Kraftwerke die mit Hilfe erneuerbarer Energie betrieben werden besitzen einen hohen Erntefaktor, wobei Wasserkraftwerke aller Art im Schnitt den höchsten EROI besitzen. Der Wert gibt an, wie oft die investierte Energie über die Lebensdauer wieder erzeugt werden kann. Folgende tabellarische Darstellung des Erntefaktors (Tabelle 1) bezieht sich einheitlich auf eine 100 jährigen Lebenszyklus des jeweiligen Kraftwerkes.

Tabelle 1: Vergleich unterschiedlicher Kraftwerkstypen (Giesecke, et al., 2009)

Kraftwerkstyp	Erntefaktor [-]
Kleinwasserkraft	40 – 100
Laufwasserkraft	100 – 200
Speicherwasserkraft	100 – 200
Photovoltaik	20 – 100
Windkraft	9 – 30
Kohlekraftwerk	30 – 80
Kernkraftwerk	bis 100

1.3 Klassifizierung von Wasserkraftanlagen

Die Klassifizierung von Wasserkraftanlagen kann anhand unterschiedlicher Schwerpunkte erfolgen. Eine gebräuchliche Unterteilung erfolgt über die vorhandene Nutzfallhöhe. (Giesecke, et al., 2009)

Die Fallhöhe bezeichnet die Differenz der Energiehöhen zweier Querschnitte im Ober- und im Unterwasser. Es muss eine Unterscheidung zwischen Bruttofallhöhe (Rohfallhöhe) und Nettofallhöhe (Nutzfallhöhe) gemacht werden. Als geodätisch vorhandene Bruttofallhöhe versteht man bei PSKW Anlagen die Differenz von Ober- und Unterwasserspiegel. Die Nettofallhöhe berücksichtigt zusätzlich Reibungs- und Krümmungsverluste in den Triebwasserleitungen, sowie lokale Einlaufverluste an der Triebwasserfassung, was in der im Anschluss angeführten Abbildung (Abbildung 3) bei Verwendung einer Überdruckturbine dargestellt wird. (Patt, et al., 2011)

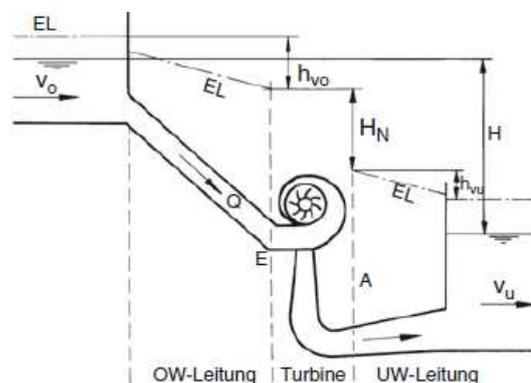


Abbildung 3: Brutto- und Nettofallhöhe (Patt, et al., 2011)

1.3.1 Niederdruckanlagen

Niederdruckanlagen weisen meist nur relativ kleine Speicher mit nur geringen Fallhöhen auf, besitzen jedoch große Durchflüsse zur Energieerzeugung und sind meist als Laufkraftwerke ausgeführt. Der Übergang von Niederdruck- zu Mitteldruck- bzw. Hochdruckanlagen erfolgt fließend, wobei sich Mitteldruckanlagen im Bereich zwischen 15 m bis 50 m Nutzfallhöhe ansiedeln. (Giesecke, et al., 2009)

1.3.2 Mitteldruckanlagen

Auf Grund der topografischen Lage und Größe der Anlagen haben Mitteldruckanlagen nicht nur das Ziel der Energieerzeugung, sondern dienen auch als Hochwasserschutz und Trinkwasserversorgung, wobei hier wieder eine Unterteilung in Einzweck- und Mehrzweckanlagen erfolgen kann. Die ähnlich der Hochdruckanlagen am Fuße der Talsperre situierten Krafthäuser sind meist mit Francis-Turbinen ausgestattet, Kaplan- oder Pelton-Turbinen kommen bei Mitteldruckanlagen nur selten zum Einsatz. (Giesecke, et al., 2009)

1.3.3 Hochdruckanlagen

Die zur Gewinnung der benötigten Nutzfallhöhe meist im Gebirge situierten Speicherkraftwerke wie auch Pumpspeicherkraftwerke sind in die Kategorie der Hochdruckanlagen einzuordnen und bestehen aus einem Oberbecken und einem durch einen Triebwasserstollen verbundenen Unterbecken (oder Vorfluter). Sie dienen dem Zweck der Energieerzeugung indem Wasser des Staubeckens über den Triebwasserweg dem Krafthaus, welches sich am Fuße des Tals befindet und wegen der großen Nutzfallhöhe meist mit Francis- oder Pelton-Turbinen ausgestattet ist, zugeführt wird. Neben der erforderlichen Leistung ist die vorhandene Fallhöhe ein wichtiger Parameter in der Wahl der Turbinenart. Die folgende Abbildung zeigt den Zusammenhang zwischen Fallhöhe und verwendeter Turbine, sowie den umsetzbaren Durchfluss (Abbildung 4). (Giesecke, et al., 2009)

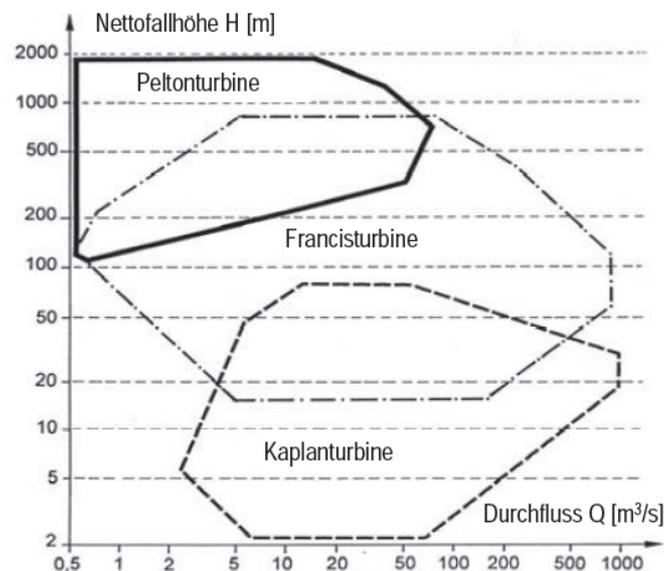


Abbildung 4: Auswahl der Turbinenart (Strobl, et al., 2006)

2 Das Pumpspeicherkraftwerk

Pumpspeicherkraftwerke sind eine spezielle Art von Wasserkraftwerken, die im Vergleich zu herkömmlichen Speicherkraftwerken neben der Möglichkeit der „Energieerzeugung“ durch Umwandlung der Wasserkraft in elektrischen Strom auch die technische Ausstattung bereitstellen Energie in Form von potentieller Energie zu „speichern“. Insbesondere tragen PSKWs wegen der schnellen Einsatzfähigkeit und der vorhandenen trägen Massen zur Netzstabilität bei. Das aktuelle Kapitel soll einen Überblick über den Aufbau wie auch die Betriebsarten und Maschinenkonzepte eines PSKWs geben.

2.1 Aufbau eines PSWK

Der Aufbau eines PSKW zeigt einen oberen und einen Speicher, welche durch ein unter oder oberirdisches Rohrleitungssystem (Triebwasserführung) miteinander verbunden sind (Abbildung 5). Die Triebwasserführung besteht im oberen Bereich der Anlage meist aus einer Niederdruckleitung (Stollen- oder Rohrleitung) mit geringer Neigung, die in eine Hochdruckleitung mit großem Gefälle (Falleitung, Druckschacht, Druckrohrleitung, Schrägschacht) übergeht und schließlich über das Krafthaus, welches mit Turbinen und Pumpen ausgestattet ist in das Unterwasser mündet. Der obere Speicher des PSKWs und das Krafthaus sind wegen topografischer Verhältnisse und zur Gewinnung der Höhendifferenz oft weit voneinander entfernt situiert. Bei Hochdruckanlagen ist die Integrierung eines Wasserschloß in das System, welches ober oder unterwasserseitig angeordnet sein kann bei Stollenlängen über etwa einem Kilometer unumgänglich, um insbesondere die Regelfähigkeit und die Verträglichkeit auf Druckstöße gewährleisten zu können (Thoma, 1910). Die Möglichkeit der ökonomischen Bauausführung und Wartung der Anlage muss gegeben sein, weshalb neben der ausreichenden Belüftung der Anlage auch Wartungsstollen und deren Zugänge von großer Bedeutung sind (Giesecke, et al., 2009).

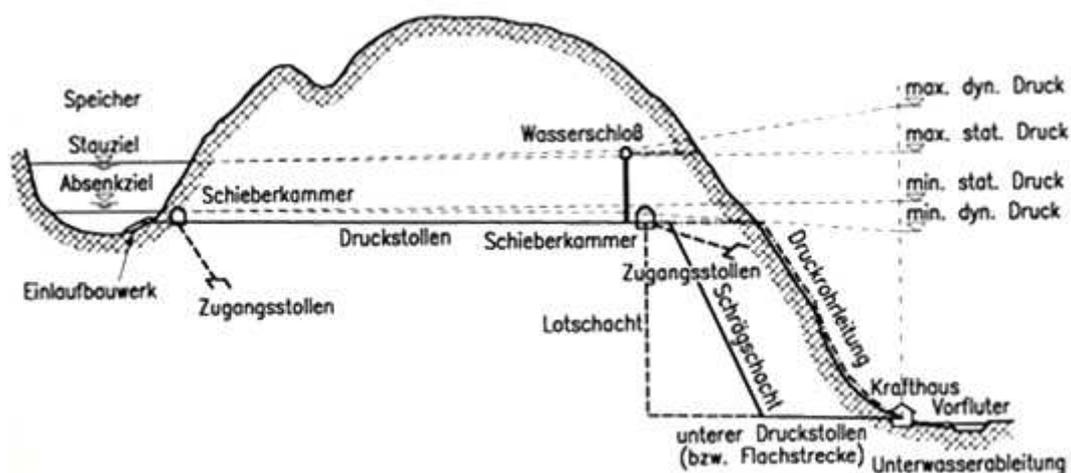


Abbildung 5: PSKW – Schema (Seeber, 1999)

2.2 Betriebsarten des PSKW

Pumpspeicherkraftwerke bieten die Möglichkeit der „Energieerzeugung“ und dessen „Speicherung“ in Form von potentieller Energie. Die „Energieerzeugung“ erfolgt über die im Bereich des Unterwassers situierten Turbinen die mit Wasser aus einem oberen Speicher gespeist werden und somit mechanische Energie in elektrischen Strom umgewandelt werden kann. Die spezielle technische Ausstattung eines PSKW ermöglicht zusätzlich dazu die „Energiespeicherung“ durch Hochpumpen von Wasser des unteren Speichers (Vorfluter) in den oberen Speicher, was einen Anstieg des Wasserspiegels des oberen Speichers zur Folge hat und so Energie in Form von potentieller Energie gespeichert werden kann.

Die unterschiedlichen Betriebsarten (Turbinen- oder Pumpbetrieb, bzw. Teillastbetrieb der Turbine oder Regelpumpenbetrieb) werden abhängig vom aktuellen Strombedarf gefahren. Zur Gewährleistung der Netzstabilität kann das Kraftwerk im Turbinenbetrieb (oder Generatorbetrieb) zu Spitzenlastzeiten unter Tag Strom in das Netz einspeisen, in den Nachtstunden vorherrschenden Schwachlastzeiten besteht die Möglichkeit im Pumpbetrieb Wasser vom Unterwasser in den Speicher zu pumpen (Schwab, 2009). Diese Art des Betriebs einer Pumpspeicherkraftanlage, der einem Ausgleich zwischen Überschuss und Bedarf von elektrischer Energie (tages-, wochen- oder jahresweise) im regionalen, überregionalen oder internationalen Verbundnetz dient, wird als Wälzbetrieb bezeichnet (Giesecke, et al., 2009). Die Möglichkeit innerhalb kürzester Zeit auf Netzschwankungen zu reagieren ist einer der großen Vorteile der Anlagen.

2.3 Maschinenkonzepte

Bei den ersten Pumpspeichieranlagen werden vermehrt getrennte Turbinen/Generatorsätze und Pumpen/Motorsätze eingesetzt. Diese Art von Maschinenkonzept nutzt eine gemeinsame Druckrohrleitung und ist auf unter 1 MW beschränkt. Anschließend dazu sind ternäre Maschinensätze (Drei-Maschinenlösungen) im Einsatz, hierbei werden Turbine, Pumpe und Motorgenerator auf einer Welle kombiniert verbaut (hydraulischer Kurzschluss ist möglich). Es kommen Francis- und Pelton Turbinen zum Einsatz. Ab Mitte des 20. Jh. kommen einstufige reversible Francis Pumpenturbinen zur Anwendung (variable oder fixe Drehzahl), Pumpbetrieb und Turbinenbetrieb haben jeweils eine entgegengesetzte Drehrichtung. Höhere Fallhöhen erfordern mehrstufige reversible Pumpenturbinen. Deriaz-Turbinen (Diagonal-Turbinen) werden bei niedriger Leistung und geringem Gefälle verwendet. Diese Turbinen besitzen bewegliche Schaufeln und zeichnen sich somit durch eine doppelte Regulierbarkeit aus. (Jansen, et al., 2011)

Die unterschiedlichen Hauptbauarten der Maschinenkonzepte sind im folgenden Bild (Abbildung 6) dargestellt. Die mittig abgebildete mehrstufige Pumpe stellt einen Teil des ternären Satzes dar. Zugehörige Einsatzgebiete in Bezug auf Leistung und Fallhöhe sind im nachfolgenden Diagramm (Abbildung 7) farblich erkennbar auf die Umrandungen der verschiedenen Maschinenkonzepte im Bild davor abgestimmt.

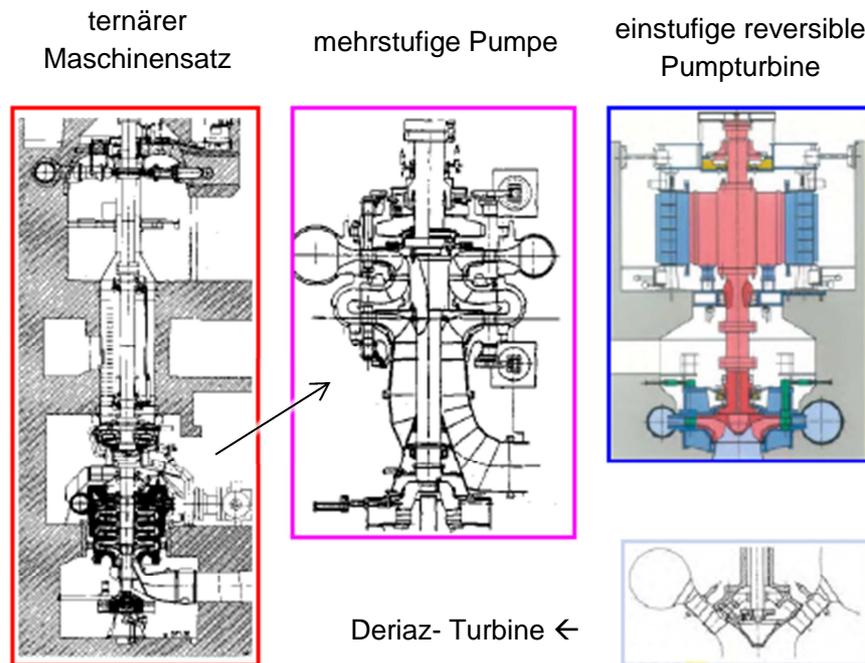


Abbildung 6: Aufbau unterschiedlicher Maschinenkonzepte (Voith-Hydro, 2012)

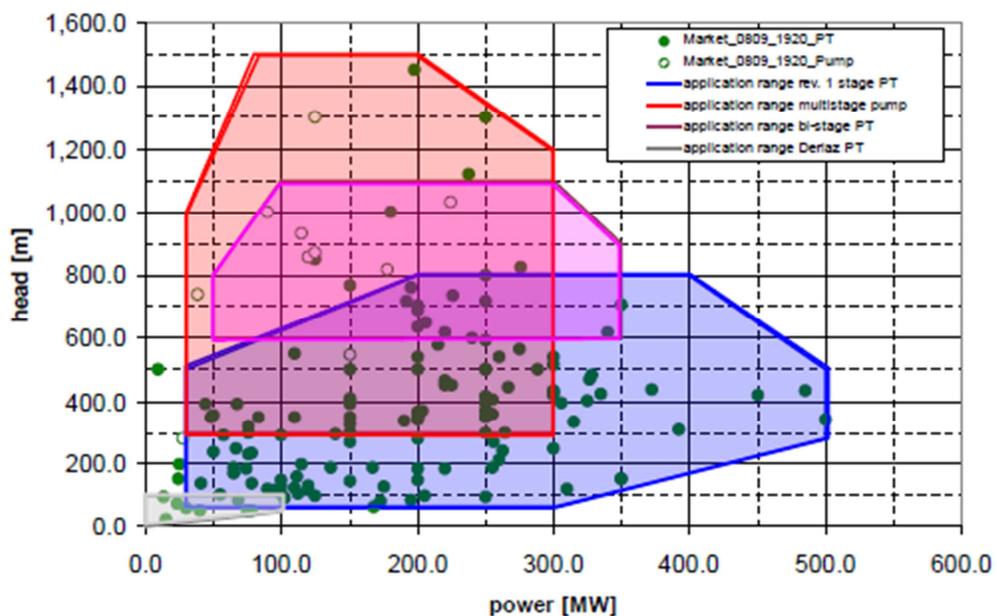


Abbildung 7: Einsatzgrenzen unterschiedlicher Maschinenkonzepte (Voith-Hydro, 2012)

Durch einen steigenden Ausbau im Sektor der erneuerbaren Energie und Veränderung der Energieflüsse im Netz bzw. auch dessen Ausbau, steigen auch die Anforderungen an Netze und vorhandene PSKWs bzw. PSKWs in Planung. Neue Bedürfnisse an PSKW-Anlagen sind mehrere Starts der Anlage pro Tag, der Teillastbetrieb, Regulierung im Pumpbetrieb und hohe Flexibilität. Anforderungen an Maschinensätze sind hohe Lebensdauer und hohe Anzahl an Zyklen bewältigen zu können, Pumpe und Turbine mit großem Betriebsbereich, eine variable Pumpleistung und hohe Flexibilität

(somit hohen Wirkungsgrad. Um den steigenden Anforderungen gerecht zu werden unterliegt auch der Sektor der maschinellen Ausrüstung von PSKW ständiger Forschung, was in neuen Entwicklungen wie z.B. mehrstufigen Pumpturbinen (Double und Multi Stage Pumpe Turbine) resultiert.

2.3.1 Ternärer Pumpspeichersatz

Ein ternärer Maschinensatz besteht aus einer Turbine (Pelton oder Francis) mit anschließender Kupplung, Motor-Generator, Wandler und (ein- oder mehrstufiger) Pumpe. Trotz der Einführung von reversiblen (ein- oder mehrstufigen) Pumpturbinen werden ternäre Maschinenkonzepte bis dato auf Grund der hoher Flexibilität und Jahrzehnten an Betriebserfahrungen eingebaut (z.B. bei Kopswerk II und Obervermuntwerk II). Die Haupteigenschaften der ternären Maschinenkonzepte sind ein hoher Wirkungsgrad im Pumpbetrieb (Auslegung der Pumpe unabhängig von der Turbine) wie auch ein hoher Wirkungsgrad im Turbinenbetrieb (durch Wahl der bestmöglichen Turbinenart und Erweiterung durch hydraulischen Kurzschluss). (Jansen, et al., 2011)

Durch Entkopplung von Pumpe und Turbine bestehen niedrige Verluste durch Reibung und es sind kurze Startzeiten der Anlage möglich, da die Pumpe oder Turbine auch wassergefüllt gestartet werden kann. Für den Volllast Turbinenbetrieb benötigt ein ternärer Satz bestehend aus Pumpe, Wandler und Pelton Turbine etwa 25 s (konventionelle reversible Pumpturbinen benötigen etwa 420 s). Als weiteren Vorteil kann die hohe Flexibilität (schnelle Betriebsübergänge) der Maschine angeführt werden, da Pumpe und Turbine in dieselbe Drehrichtung besitzen. Es können hohe Fallhöhen bewältigt werden (die Verwendung von mehrstufigen Pumpen in Kombination mit einer Pelton Turbine erlaubt Fallhöhen bis 800 m). Als Nachteil sind hohe Investitionskosten sowie hohe Betriebs- und Wartungskosten durch den komplexen Aufbau des Maschinensatzes anzuführen. (Heimerl, 2013)

Der hydraulische Kurzschluss beschreibt einen Betriebszustand, bei dem sich die Leistungsaufnahme der Maschine regulieren lässt indem Wasser gepumpt und ein Teil des Wassers wieder direkt der Turbine zugeführt wird (Heimerl, 2013). Turbinen besitzen die Eigenschaft der Regelbarkeit in einem gewissen Leistungsbereich, Pumpen können diesen Vorteil nicht aufweisen, sie kennen nur die Betriebszustände Ein oder Aus und können so an Leistungsschwankungen im Netz nicht optimal reagieren. Besteht ein Überschuss im Stromnetz, der jedoch die Leistungsaufnahme der Pumpe nicht erreicht, so kann die Pumpe dadurch betrieben werden, indem die fehlende Leistung aus dem Netz durch das PSKW selbst erzeugt wird. Es wird dafür jener Anteil an Wasser gefördert, der den Überschuss ausgleicht und im kurzen Kreislauf zwischen Turbine und Pumpe geführt. Für den Betrieb im hydraulischen Kurzschluss ist eine Trennung von Pumpe und Turbine erforderlich. Die jeweiligen Teile der Maschine befinden sich weiterhin auf einer Achse, jedoch müssen sie voneinander separiert werden, da sie im hydraulischen Kurzschluss getrennt betrieben werden und so ein Reagieren der Anlage auf den jeweiligen aktuellen Bedarf schnell erfolgen kann (Abbildung 8). (Illwerke VWK Magazin, 2010)

Hydraulischer Kurzschluss

Beispiel: Pumpleistung 150 MW, Leistung aus dem Netz 100 MW.

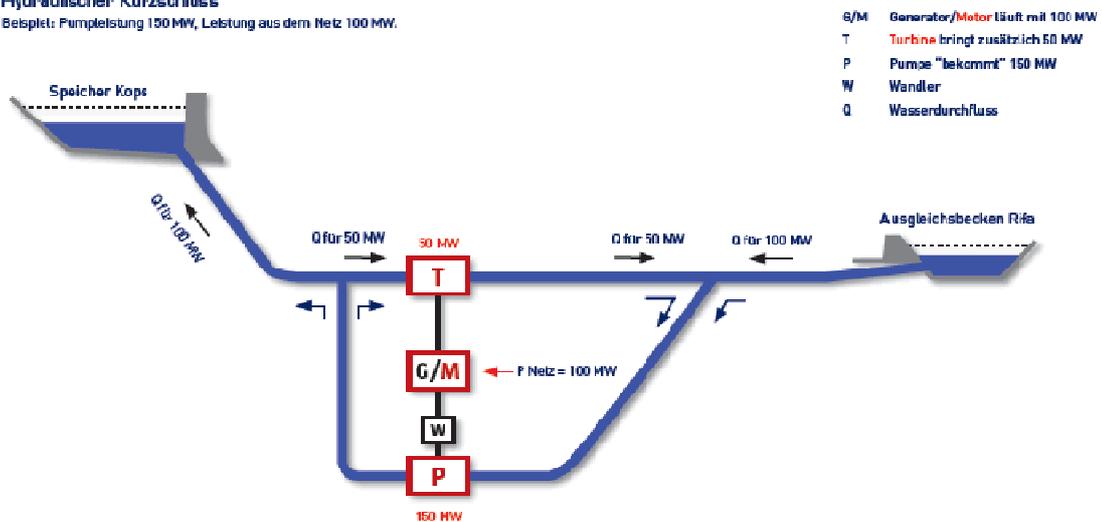


Abbildung 8: Hydraulischer Kurzschluss (Illwerke VWK Magazin, 2010)

2.3.2 Reversible Pump turbine

Pumpturbinen können zufolge der vorhandenen Fall- bzw. Förderhöhe in Hochdruck- und Niederdruck – Pump turbinen (HD-PT und ND-PT) eingeteilt werden. HD-PT weisen im Vergleich zu ND-PT auf Grund der hohen Fallhöhe lange Wasserführungswege auf. Diese werden mit hohem Drücken belastet und verursachen im Vergleich zu ND-PT hohe Aufwendungen für die Auskleidung (Stahlpanzerung) auf. Dem instationären Verhalten der Anlagen wird durch Optimierung der Wasserwege und ausreichender Dimensionierung von Wasserschlossern begegnet. Ein Merkmal von ND-PT ist im Vergleich zu HD-PT eine geringe Steigung der Pumpenkennlinie (Entstehung größerer Durchflussvarianz für eine gleiche Pumpleistung). Eine Herausforderung in der Planung der Verwendung von ND-PT besteht darin den kavitationsfreien Betrieb über große Fallhöhen gewährleisten zu können. (Heimerl, 2013)

Reversible Pump turbinen - Maschinensätze bestehen aus einem Motor-Generator und einer umkehrbaren Pump turbine. In Abhängigkeit der Drehrichtung arbeitet der Maschinensatz entweder als Pumpe oder als Turbine. Das Maschinenkonzept der reversiblen Pump turbinen bedient ein großes Spektrum von Pumpspeicherprojekten, da Fallhöhen von 100 m (oft in industriellen Zentren vorzufinden) bis Fallhöhen von mehreren hundert Metern (in alpinen Regionen) behandelt werden. Frühere Auslegungsgrenzen von 600 m Fallhöhe werden mittlerweile beherrscht und überboten.

Pumpturbinen weisen im Vergleich zu ternären Maschinensätzen geringere Investitionskosten auf (auch durch geringere bauliche Abmessungen), sind jedoch im Allgemeinen schlechter regelbar. Weitere Vor- und Nachteile von Pump turbinen gegenüber dem Einsatz ternärer Maschinensätze sind der Tabelle 2 zu entnehmen. (Jansen, et al., 2011)

Tabelle 2: Vergleich ternärer MS und Pumpturbine (Jansen, et al., 2011)

Maschinenkonzept	ternär	Pumpturbine
Investition	—	+
Platzbedarf	—	+
Wirkungsgrad	+	—
Einbau	+	—
Umschaltzeiten	+	—
Hydraulischer Kurzschluss	+	—
Hohe Fallhöhen	+	—
Betriebskosten	—	+
technische Risiken	—	+
Instandhaltung	—	+

2.3.3 Drehzahlvariable Maschinensätze

Bei der Verwendung von drehzahlvariablen Maschinensätzen (Asynchronmotor oder Synchronmotor - Generator mit Frequenzumrichter), kann die Drehzahl der Pumpturbine variiert und somit die Leistungsaufnahmen der Pumpe geregelt werden. Durch die Regelungen kann der Fallhöhenbereich einer Pumpturbine erweitert werden, weshalb ein solcher Maschinensatz speziell für ND-PT eine interessante Option bietet. Werden extreme Fallhöhenverhältnisse ($H_{max}:H_{min} > 1,5$) gefordert, so ist ein drehzahlvariabler Maschinensatz zwingend nötig. Ein stabilerer Betrieb, ein besseres dynamisches Verhalten und verbesserte Netzstabilität spiegelt sich auch in der Erhöhung des Wirkungsgrades wieder. (Heimerl, 2013)

3 Das Wasserschloss

Das folgende Kapitel soll einen Überblick über Wasserschlösser, deren Dimensionierung und Aufgaben und die Erforderlichkeit des Einbaus zufolge des instationären Strömungsverhaltens in Speicherkraftwerken geben.

3.1 Aufgaben des Wasserschlosses

Zum Schutz der unter Druck stehenden Verbindungen durch die Durchflussänderungen im System auftretenden Druckstöße werden Ausgleichbauwerke benötigt. Neben der Druckstoßdämpfung ermöglichen Wasserschlösser bei Hochdruckanlagen mit Stollenlängen über etwa 1 km Länge erst die Regelbarkeit der Maschinensätze (Thoma, 1910). Wasserschlösser stellen eine bauliche Maßnahme dar durch Änderung des Durchflusses in SKW und vor allem auch in PSKW Anlagen hervorgerufene Druckstöße kontrolliert dämpfen und ableiten zu können um die Belastung auf die unterwasserseitig situierten maschinellen Anlageteile im Bereich des Krafthauses zu minimieren

Die Aufteilung der Aufgaben von Wasserschlossern in der Literatur nach Giesecke und Mosonyi (Giesecke, et al., 2009) wie auch nach Bollrich und Preißler (Bollrich, et al., 1993) beinhalten folgende Punkte:

- *Dämpfung der Druckstoßentwicklung (Verminderung der Druckstöße im System)*
- *Hydraulische Trennung des Druckstollens zum Druckschacht*
- *Ermöglichung der Regelbarkeit bei längeren Triebwassersystemen*
- *Beschleunigter Ausgleich der Wasservolumina*
- *Vermeidung der Makrokavitation an nach langen annähernd horizontal ausgeführten Hochpunkten bzw. Knicken von Rohrleitungen*

Änderungen des Durchflusses zufolge dem Schließen oder Öffnen von Armaturen und Turbinenleitapparaten verursachen abhängig von der Geschwindigkeit des Schließvorganges Druckstöße. Moderne Speicher- und Pumpspeicherkraftwerke besitzen die technische Ausstattung binnen weniger Sekunden die Betriebsart zu wechseln. Dadurch können hohe Drücke im System auftreten, was sich durch eine Druckwelle die nach dem Schließvorgang über die Druckleitung bis zum Wasserschloss geleitet wird erkenntlich macht. Die Druckwelle wird dort im Extremfall total reflektiert und läuft in Richtung ihrem Ursprung zurück auf dessen Weg sie durch Reibungsverluste abgeschwächt wird.

Neben der Dämpfung der Druckstöße kann das Abfangen der Druckstöße zufolge schneller Betriebswechsel aus der Triebwasserleitung durch die hydraulische Trennung von Zuleitungsstollen und Falleitung als eine der Hauptaufgaben des Wasserschlosses angesehen werden (Abbildung 9). Durch diese Trennwirkung wird die an die Hochdruckleitung (Druckschacht) angrenzende Niederdruckleitung (Druckstollen) in

Richtung oberen Speicher von schadhafte Druckstößen verschont bzw. erfolgt die Umwandlung der kinetischen Energie im Stollen in potentielle Energie im Wasserschloss. Diese potentielle Energie ist oft geringer als eine äquivalente Umwandlung in Druckenergie (Druckstoß) wie dies im Druckschacht der Fall ist. Eine Vermeidung der Entstehung kann ohne diese Vorrichtung nur durch sehr lange Schließzeiten (langsame Änderung des Durchflusses im Triebwasserkanal) der Anlage erreicht werden. Da ein PSKW jedoch auf plötzliche Schwankungen im Netz reagieren muss und so häufige Betriebswechsel durchführt stellt eine nur langsame Änderung des Durchflusses keinen wirtschaftlichen Betrieb des PSKWs dar. Außerdem bleibt die Gefahr einer plötzlichen Durchflussänderung mit schlagartiger dynamischer Steigerung des Druckes hervorgerufen durch eine Störung (plötzlichen Ausfall einer maschinellen Anlage oder durch einen Netzausfall).

Die Verbesserung der Regelung durch ein Wasserschloss im System zeigt sich durch eine höhere Stabilität im gesamten Regelkreis der Anlage, da die Netzstabilität durch eine Eingrenzung der Zeitspanne für Anfahr- und Abschaltvorgänge besser gewährleistet werden kann. Wasserschlosser bieten auch den Vorteil das bei Öffnung der Turbinen benötigte Wasser sofort bereitstellen zu können. Es entfallen der lange Transportweg vom Speicher bis zur Turbine und die zusätzliche Überwindung der Massenträgheit eines ruhenden Wasservolumens. Damit kann durch eine adäquate Dimensionierung des Wasserschlosses eine günstige Randbedingung für eine Regelfähigkeit der Anlage geschaffen werden (Primärregelung). Die Gefahr des Abreißen der Wassersäule im Übergang des Zuleitungsstollens zum Fallschacht und die damit zusammenhängende Gefahr der Makrokavitation im Triebwasserstollen kann somit vermieden werden, da das für den Betrieb benötigte Wasser direkt aus dem Fallschacht des Wasserschlosses in die Falleitung geleitet wird.

3.2 Instationäres Strömungsverhalten

Ändert sich der Durchfluss zufolge Beschleunigung oder Verzögerung des strömenden Wassers beim Wechseln der Betriebsart oder durch einen eventuellen Störfall in einer durchflossenen Rohrleitung, so führt dies zu Druckwellen und damit verbundenen Druckstößen im System. Diese Druckschwankungen werden durch den Einsatz eines Wasserschlosses ausgeglichen in dem ein Anheben und Absenken des Wasserspiegels folgt.

Eine Verringerung des Durchflusses (durch z.B. Abschalten der Turbine) lässt den Wasserspiegel so lange ansteigen. Hierbei wird die Bewegungsenergie (E_k) des Wassers in Lageenergie (E_p) im Schacht transformiert bis diese zusätzliche Wassermasse als Gegendruckkraft das Ansteigen abbremst. Der erhöhte Druck im Rohrsystem lässt den Wasserspiegel anschließend erneut ansteigen was ein Schwanken des Wasserspiegels zur Folge hat, der sich bis zur nächsten Änderung des Durchflusses allmählich in Gleichgewichtslage einstellt. Bei Erhöhung des Durchflusses im System wird dem Wasserschloss zunächst Wasser entnommen, was ein Absinken des Wasserspiegels im Wasserschloss nach sich zieht. (Bollrich, et al., 1993)

Die Dauer des Vorganges von Öffnen oder Schließen der jeweiligen Regelorgane ist maßgebend für die Größe der Änderung des Drucks. Es treten kurz- und langwellige Druckwellen auf, die als Druckstöße und Massenschwingung bezeichnet werden. Langwellige Druckänderungen (Massenschwingungen), welche sich im Minuten- bis Stundenbereich befinden, sind auf die Massenträgheit des Wassers zurückzuführen, kurzweilige Druckänderungen (Druckstöße), die sich im Sekundenbereich befinden, treten zufolge des Kompressibilitätsverhaltens von Wasser und der Verformungsfähigkeit der Stollen bzw. der Rohrwandungen auf. Die im System entstehenden hochfrequenten Druckschwankungen werden am Wasserschloss reflektiert, was eine Entlastung des Kraftabstiegs zur Folge hat. Die Energieumwandlung im Wasserschloss resultiert in Wasserschlossschwingungen (oszillierende Bewegung). Diese Massenschwingung wird durch eine eventuell vorhandene Drossel und die hydraulischen Verluste im Stollen selbst abgebaut. (Giesecke, et al., 2009)

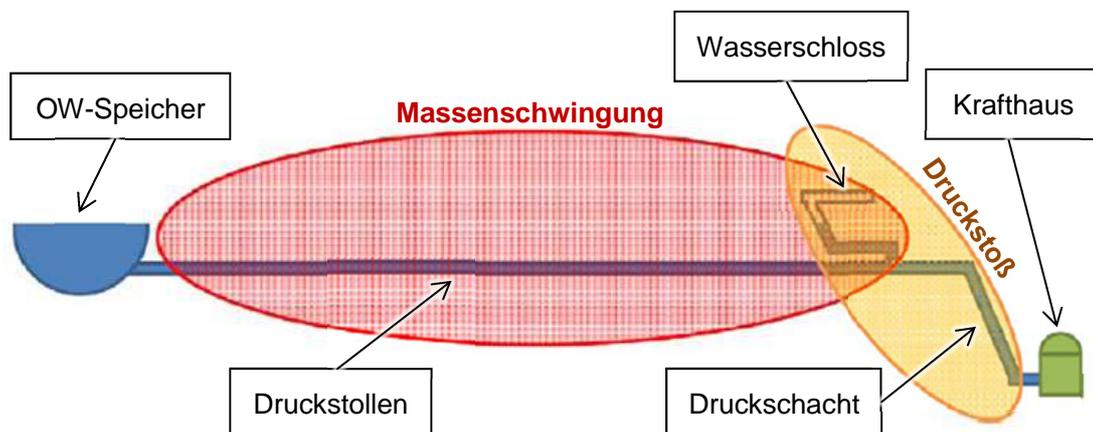


Abbildung 9: Druckstoß und Massenschwingung (Richter, et al., 2014)

3.3 Dimensionierung von Wasserschlossern

Die Dimensionierung von Wasserschlossern erfolgt durch 1-D numerische Computersimulationen, wobei bei komplexeren Wasserschlossern oder Ausgangssituationen die Notwendigkeit eines Modellversuches meist unumgänglich ist. Hierbei werden Wasserschlosser auf den größten Anstieg des Wasserspiegels (Oberkammerdimensionierung) und den niedrigsten Wasserspiegel (Unterkammerdimensionierung) bemessen. Der größte Anstieg im Wasserschloss wird durch Aufschwingen des Systems mithilfe eines ungünstigen Schaltens zwischen Turbinen- und Pumpbetrieb bei Stauziel erreicht, das tiefste Abschnigen im Wasserschloss wird bei ungünstigen Schaltvorgängen bei Absenkziel erreicht. Selbst im ungünstigsten Schaltvorgang bei Absenkziel darf das Wasserschloss nie unter einen gewissen Pegel absinken. Hierbei werden ein erstes Abschalten der Turbinen und ein erstes Druckstoß simuliert wobei die Turbinen im Bereich der maximalen Durchflussmenge (größte kinetische Energie im Druckstollen) wieder eingeschaltet werden. Bei der Bemessung des Schachtes des Wasserschlosses muss einen

Minstdurchmesser zur Ermöglichung der Stabilität im Betrieb eingehalten werden der durch das Thoma-Kriterium ermittelt und kontrolliert werden kann.

3.3.1 Der Druckstoß

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Druckstößen bei unendlich ausgedehnter Wasseroberfläche und einer Temperatur von 10°C kann folgendermaßen ermittelt werden:

$$a = \sqrt{\frac{E_w}{\rho_w}} = 1450 \left[\frac{m}{s} \right] \quad (5)$$

a	Druckwellengeschwindigkeit	[m/s]
E _w	E-Modul des Wassers (E _w = 2,1 * 10 ⁹ [N/m ²])	[Pa]
ρ _w	Dichte Wasser (ρ _w = 1000 kg/m ³)	[kg/m ³]

Die Abschätzung des Extremfalles eines Druckstoßes in einem Wasserschloss kann durch den Joukowsky-Stoß erfolgen. In der Abschätzung tritt eine plötzliche Verzögerung der Fließgeschwindigkeit um Δv ein, die anschließend eine plötzliche Druckerhöhung Δp_{Jou} nach sich zieht. Der Druckstoß wird als Überdruckwelle mit Druckwellengeschwindigkeit a im Rohrsystem getragen, welche die Laufzeit T_L besitzt. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Druckwellen in Rohrleitungen ist von den Eigenschaften der Flüssigkeit und der Abmessung und den Materialeigenschaften der Rohrleitung abhängig. Jene Zeit, die die Welle für die anschließende Reflexion zum Ursprung benötigt wird mit T_R ermittelt. (Giesecke, et al., 2009)

$$T_L = \frac{l}{a} \text{ [s]} \quad (6)$$

$$T_R = 2 * T_L = \frac{2 * l}{a} \text{ [s]} \quad (7)$$

T _L	Laufzeit der Druckwelle	[s]
----------------	-------------------------	-----

T_R	Reflexionszeit der Druckwelle	[s]
l	Rohrlänge	[m]

Trifft die Druckwelle am Ende der Laufstrecke auf einen freien Wasserspiegel, so wird sie total reflektiert was zu einer Entlastung führt. Wenn die Zeit, in der sich der Durchfluss im System ändert kürzer ist als die Reaktionszeit T_R so kann keine Entlastung eintreten und es bildet sich der Druckstoß infolge des Joukowsky-Stoßes nach folgendem mathematischen Zusammenhang:

$$\max h_{a,jou} = \frac{a * \Delta v}{g} [m] \quad (8)$$

$\max h_{a,jou}$	max. Druckstoßhöhe (Joukowsky-Stoß)	[m]
Δv	Änderung der Durchflussgeschwindigkeit	[m/s]

Der Einfluss der Schließzeit ist entscheidend dafür ob sich der volle Joukowsky-Stoß ausbildet. Beträgt der Wert der Schließzeit weniger als die Reflexionszeit ($t_S < T_R$) so bildet sich unabhängig der Schließcharakteristik immer der volle Joukowsky-Stoß aus, beträgt der Wert mehr ($t_S > T_R$), so kommt es zur Abschwächung des Druckstoßes durch Überlagerung der Überdruckwellen (Abbildung 10). (Giesecke, et al., 2009)

$$\max h_a = \frac{a * \Delta v}{g} * \frac{T_R}{t_S} [m] \quad (\text{für } t_S > T_R) \quad (9)$$

t_S	Schließzeit	[m]
-------	-------------	-----

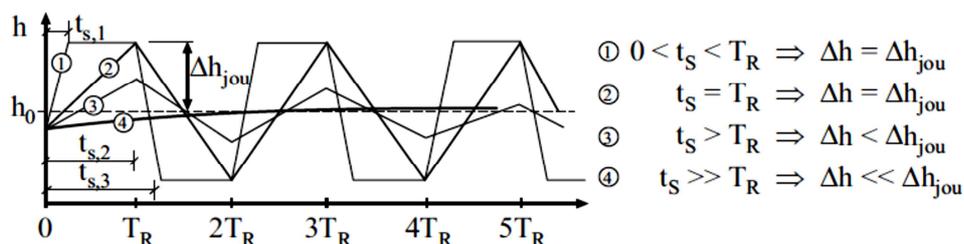


Abbildung 10: Einfluss der Schließzeit auf den Joukowsky-Stoß (Giesecke, et al., 2009)

3.3.2 Schwingungsperiode

Die Schwingungsperiode T des Wasserspiegels im Wasserschloss die durch die Durchflussänderung und den damit zusammenhängenden Druckstoß erzeugt wird kann durch folgenden mathematischen Zusammenhang definiert werden (Giesecke, et al., 2009) :

$$T = 2 * \pi * \sqrt{\frac{l_s * A_w}{g * A_s}} \text{ [s]} \quad (10)$$

T	Schwingungsperiode des Wasserspiegels	[s]
l_s	Druckstollenlänge	[m]
A_w	Querschnittsfläche des Wasserschlosses	[m ²]
A_s	Querschnittsfläche des Stollens	[m ²]

3.3.3 Mindestschachtquerschnitt mit Hilfe des Thoma Kriteriums

Die Integration von Wasserschlossern in PSKW-Anlagen minimiert Druckstöße auf maschinelle Anlagenteile und macht die Maschinen überhaupt zielführend regelbar, was jedoch zu Wasserspiegelschwankungen im Wasserschloss führt. Diese Schwankungen des Wasserspiegels wirken sich auf den Bereich des Druckstollens aus und erzeugen ein hin und her Schwingen der Wassermassen zwischen oberen Speicher und Wasserschloss des PSKW. Diese Massenschwingungen können sich bis hin zur Resonanzschwingung verstärken. Genau darauf ist das Wasserschloss bei einem Regelkraftwerk auszulegen. (Giesecke, et al., 2009)

Der Thoma-Querschnitt beschreibt ein Kriterium das eingehalten werden muss um bei konstanter Last keine Resonanzerscheinung im Steigschacht zu erhalten.

$$A_{Th} = \frac{Q_{s,0}^2}{2 * g * A_s} * \frac{l_s}{h_{v,s0} * h_{f,0}} \text{ [m}^2\text{]} \quad (11)$$

A_{Th}	Thoma-Querschnitt	[m ²]
$Q_{s,0}$	Durchfluss Druckstollen	[m ³ /s]
g	Erdanziehung	[m/s ²]
A_s	Querschnitt Druckstollen	[m ²]

$h_{vs,0}$	Verlusthöhe bei stationärem Betrieb	[m]
$h_{f,0}$	Fallhöhe bei stationärem Betrieb	[m]

Der Thoma-Querschnitt muss anschließend um den Faktor η_{Th} der von der Betriebs- bzw. Regelweise, sowie dem Dämpfungsverhalten des PSKW abhängig ist erweitert werden um den minimalen Querschnitt für das Wasserschloss zu erhalten.

$$A_w = \eta_{Th} * A_{Th} [m^2] \quad (12)$$

A_w	Mindestquerschnitt für das Wasserschloss	[m ²]
η_{Th}	Sicherheits- oder Vergrößerungsfaktor (1,5 – 1,8)	[-] (Giesecke, et al., 2009)

3.3.4 Der maximale Wasserspiegelausschlag

Durch das Abschalten der Turbinen (oder Betriebswechsel) entsteht zunächst ein kleiner Abfluss aus dem Wasserschloss. Die sich noch immer im Bewegung befindenden Wassermassen aus dem oberen Speicher in Richtung Turbine werden im Bereich des Wasserschlosses umgeleitet um sich nicht weiter in Richtung den Druckschachtes zu bewegen. Die so entstehenden überschüssigen Wassermassen werden in das Wasserschloss geleitet, was zur Folge hat dass der Wasserspiegel ansteigt. Die Periode endet, wenn gegenüber dem oberen Speicher eine Druckdifferenz (bzw. transferierte Lageenergie) entsteht welche äquivalent der kinetischen Energie des Wassers aus dem Stollen entspricht. Danach fließt das Wasser wieder zurück in Richtung Speicher und wieder umgekehrt. Dieser Vorgang wird durch lokale Verluste und Reibungsverluste gebremst.

Zur Gewährleistung der Einhaltung der erforderlichen Mindesthöhe, der besten Positionierung und Vorbemessung des Wasserschlosses kann der maximale Wasserspiegelausschlag (bei Abschalten) betrachtet werden. Anzumerken ist, dass bei Annahme etwa der doppelten Ausbauwassermenge die Mehrfachschaltfälle abgedeckt werden können. Bei bekanntem Durchfluss im Druckstollen wird der maximale Wasserspiegel durch folgenden mathematischen Zusammenhang definiert (Giesecke, et al., 2009):

$$z_{max} = Q_{s,0} * \sqrt{\frac{l_s}{g * A_s * A_w}} [m] \quad (13)$$

z_{\max}	höchster Spiegelausschlag	[m]
A_s	Querschnitt des Druckstollens	[m ²]
$Q_{S,0}$	Durchfluss im Druckstollen	[m ³ /s]
A_w	Querschnitt des Wasserschlosses	[m ²]

3.4 Anordnung des Wasserschloss

Bei einer oberflächennahen Ausbildung der Triebwasserführung kommen Wasserschloss-Hochbauten zum Einsatz, welche in Beton oder Stahl ausgeführt werden können. Eine unterirdisch angeordnete Triebwasserführung oder Druckschächte erfordert Schacht- Stollen- oder Kavernenwasserschlösser. Bei einer nicht ausreichenden Gebirgsüberdeckung können auch Mischvarianten beider Ausbildungen zum Einsatz kommen. (Giesecke, et al., 2009)

Wird das Wasserschloss oberwasserseitig angeordnet (Abbildung 11), so kann dieses entweder oberirdisch als Turm oder als unterirdisch als Schacht ausgeführt werden, wobei sich die oberirdische Variante als kostengünstiger, die unterirdische Variante jedoch als bessere Lösung zeigt. (Giesecke, et al., 2009)

Da der Druckstoß in einer Rohrleitung mit der Länge der Leitung zunimmt, ist man bemüht die hoch belastete Druckrohrleitung so kurz wie möglich auszuführen. Durch Anordnung einer Drossel im Fußpunkt oder Steigschacht des Wasserschlosses kann eine Dämpfung der Massenschwingung unterstützt werden. Die Verwendung einer Drossel darf jedoch nicht dazu führen, dass der Druck zu stark abfällt (Makrokavitation) oder die Reflexion der Druckwellen verringert wird. (Landolt-Börnstein, 2006)

Die Möglichkeit des Ausgleiches der Druckschwankungen bei langen Unterwasserstollen kann auch durch unterirdisch angeordnete Schwallkammern erfolgen, welche unterwasserseitig vom Krafthaus angeordnet sind (Abbildung 11). Die Notwendigkeit eines Baus einer UW-Schwallkammer oder eines UW-Wasserschlosses folgt aus möglicher großer Länge eines Unterwasserstollens welcher durch Belastungsschwankungen als Druckstollen wirkt oder bei wechselnden Wasserständen eines Vorfluters in welchen der Unterwasserstollen mündet. Durch Randbedingungen und gegebene Voraussetzungen vor Ort, sowie der Größe der Kraftwerksanlage ist es gegebenenfalls auch ratsam eine Kombination aus einer ober- und unterwasserseitigen Anordnung von Druckausgleichsbauwerken zu realisieren. (Giesecke, et al., 2009)

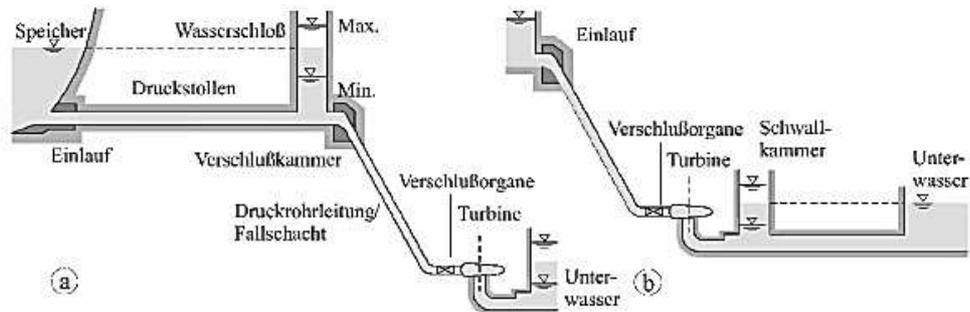


Abbildung 11: Anordnung von Druckausgleichsbauwerken (Giesecke, et al., 2009)

3.5 Bauweisen des Wasserschlosses

Je nach vorliegenden Randbedingungen und Anforderungen an das Kraftwerkssystem werden Wasserschlosser in unterschiedlichen Bauweisen ausgeführt (Abbildung 12). Es werden 4 Hauptgruppen betreffend ihrer hydraulischen Wirkungsweise unterschieden:

- Becken- oder Schachtwasserschloss
- Kammerwasserschloss
- Drosselwasserschloss
- Differentialwasserschloss

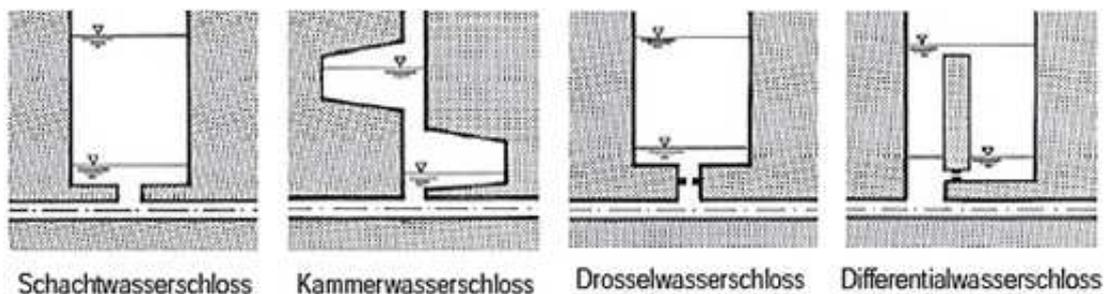


Abbildung 12: Bauweisen von Wasserschlossern (Strobl, et al., 2006)

3.5.1 Becken- oder Schachtwasserschlosser

Die einfachsten Formen der Ausbildung eines Wasserschlosses stellen Becken- oder Schachtwasserschlosser dar. Die große Eintrittsöffnung ermöglicht einen ungehinderten Transport der Wassermassen vor der Triebwasserleitung in den Schacht und wieder zurück. Schachtwasserschlosser weisen im Vergleich zu anderen Bauweisen eine große Wasseroberfläche auf, die eine totale Reflexion des Druckstoßes ermöglichen, durch die relativ große Oberfläche fallen Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgänge

der Wassermassen im Triebwasserleitung jedoch relativ langsam ab. Dadurch ist das auszubrechende Gebirgsvolumen prinzipiell höher als im Fall von Kammerwasserschlossern. Im Gegenzug dazu haben Schachtwasserschlösser den Vorteil das im Schacht vorhandene Wasser schnell beschleunigen oder verzögern zu können (geringe Trägheitskoeffizienten). (Giesecke, et al., 2009)

3.5.2 Kammerwasserschlösser

Kammerwasserschlösser werden mit übereinander angeordneten Schwallkammern, die miteinander durch senkrechte oder geneigte Schächte verbunden sind ausgeführt. Der Pegel bei Ruhelage befindet sich im Vertikalschacht zwischen den Kammern. Die Befüllung der Kammern erfolgt bei Änderungen des Durchfluss und den damit zusammenhängenden Wasserspiegelausschlägen. Durch den relativ geringen Querschnitt des Verbindungsschachtes (mind. Thoma - Querschnitt) treten hohe Beschleunigungen und Verzögerungen der Wassermassen auf. Die Kammern dienen deshalb dazu den Anstieg des Wasserspiegels beim höchsten Ausschlag bzw. dem Niedrigsten Niveau im Bereich der Kammern zu halten. (Giesecke, et al., 2009)

Kammerwasserschlösser haben gegenüber Schachtwasserschlösser den Vorteil, dass die Höhe durch entsprechend groß dimensionierte Schwallkammern kompensiert werden kann, der Nachteil gegenüber Schachtwasserschlossern liegt in der aufwendigeren Herstellung. (Giesecke, et al., 2009)

3.5.3 Gedrosselte Wasserschlösser

Eine Drosselwirkung des Durchflusses wird erreicht, wenn der Querschnitt der Einlauföffnung in das Wasserschloss kleiner ist als der Querschnitt der Triebwasserleitung. Durch Einführung einer gedrosselten Verbindung entsteht eine Dämpfung des Durchflusses, wodurch prinzipiell die Stabilität im Regelbetrieb des Kraftwerkes etwas erhöht wird. Reibungs- und Energieverluste werden im Vergleich zu Schacht- und Kammerwasserschlösser gering gehalten, was den Gesamtwirkungsgrad des Gesamtsystems verbessert. Bei der Dimensionierung der Drossel muss darauf geachtet werden die Drossel nicht zu klein auszuführen. Bei zu kleiner Dimensionierung können Druckwellen aus dem Druckschacht an der Drossel in das Wasserschloss „durchgelassen“ werden, dadurch kann sich zusätzlich ein Druckstoß im Druckstollen aufbauen. Durch die hohe Frequenz können Interferenzen auftreten, welche sich im Falle einer Makrokavitation negativ auswirken können. (Giesecke, et al., 2009)

Ein Nachteil beim Einbau einer Drossel ist die Erzeugung einer Gegendruckhöhe, die vom dynamischen Drosselwiderstand abhängt. Für nicht vorhergesehene Lastfälle können in der Triebwasserleitung oberwasserseitig unzulässig hohe Drücke entstehen. Darauf ist jedenfalls bei der Drosselauslegung zu achten. (Giesecke, et al., 2009)

3.5.4 Differentialwasserschlösser

Der Aufbau von Differentialwasserschlossern umfasst zwei Schwallkammern, die durch einen oberen Überlaufstollen (Oberkammer) und einen unteren Verbindungsstollen (Unterkammer) miteinander verbunden sind (Abbildung 13). Durch die relativ geringe Querschnittsfläche (mind. Thoma – Querschnitt) im Steigschacht ergeben sich hohe Spiegelausschläge und damit zusammenhängend schnelle Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgänge. Der Hauptschacht besitzt eine große Querschnittsfläche und dient der Aufnahme des Anfallenden Wassers. Die Möglichkeit des Flusses von Hauptschacht zu Steigschacht durch den Verbindungsschacht sowie dem zusätzlichen Überfall in den Hauptschacht erzeugt ein ausgeprägtes Dämpfungsverhalten. Es entstehen keine Triebwasserverluste, da das Wasser immer in den Hauptschacht zurückgeführt werden kann. (Giesecke, et al., 2009)

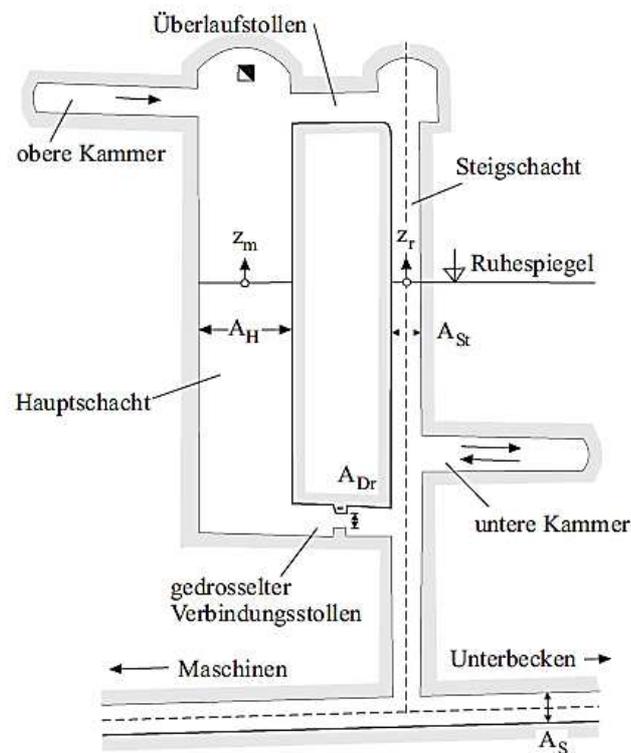


Abbildung 13: Differentialwasserschloss (Giesecke, et al., 2009)

4 Das Pumpspeicherkraftwerk Obervermuntwerk II

Das PSKW Obervermuntwerk II (OVW II) ist ein derzeit in Bau befindliches Pumpspeicherkraftwerk (Baustart 2014 – geplante Inbetriebnahme 2018), welches zwischen den Speichern Silvretta und Vermunt im Vorarlberger Montafon situiert ist.

4.1 Anlagenschema und technische Daten des Obervermuntwerk II

Die Abbildung 14 zeigt das Anlagenschema der PSWK Anlage OVW II mit Kennzeichnung der wichtigsten Bestandteile, technische Daten sind der anschließenden Tabelle (Tabelle 3) zu entnehmen.

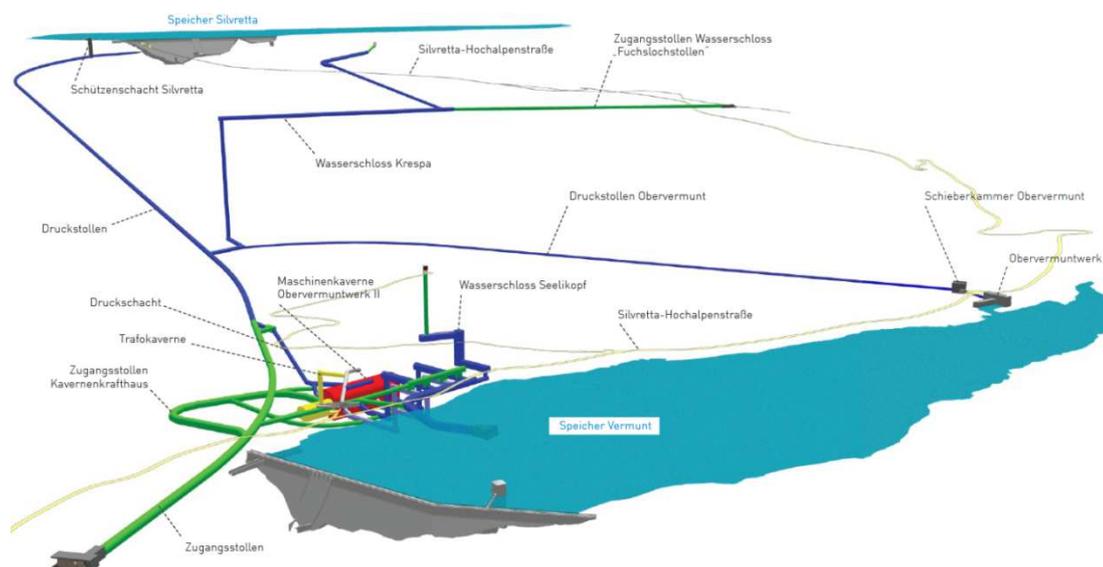


Abbildung 14: Systemskizze des OVW II (Vorarlberger Illwerke AG, 2012)

Tabelle 3: Technische Daten des OVW II

Nennleistung Turbinen		$2 \times 180 \text{ [MW]} = 360 \text{ [MW]}$
Nennleistung Pumpen		$2 \times 180 \text{ [MW]} = 360 \text{ [MW]}$
Fallhöhe		291 [m]
Ausbauleistung	Turbinenbetrieb (360 [MW])	$Q_{T,A} = 150 \text{ [m}^3\text{/s]}$
	Pumpbetrieb (360 [MW])	$Q_{P,A} = 135 \text{ [m}^3\text{/s]}$

4.2 Das Bauprojekt Obervermuntwerk II

Das Projektgebiet befindet sich auf Vorarlberger Boden, wobei das Gesamtsystem auch Liegenschaften der Tiroler Nachbargemeinde Galtür beinhaltet (Vorarlberger Illwerke AG, 2012). Das PSKW, ist in die Werksgruppe „Obere III – Lünersee“ einzuordnen (Abbildung 15), die durch die Wassermassen des Silvretta-, Vermunt-, Kops-, und Lünersee betrieben werden. Die Werksgruppe besitzt eine aktuelle Turbinenleistung von 1792 MW und eine Aufnahmeleistung im Pumpbetrieb von 990 MW. (Illwerke)

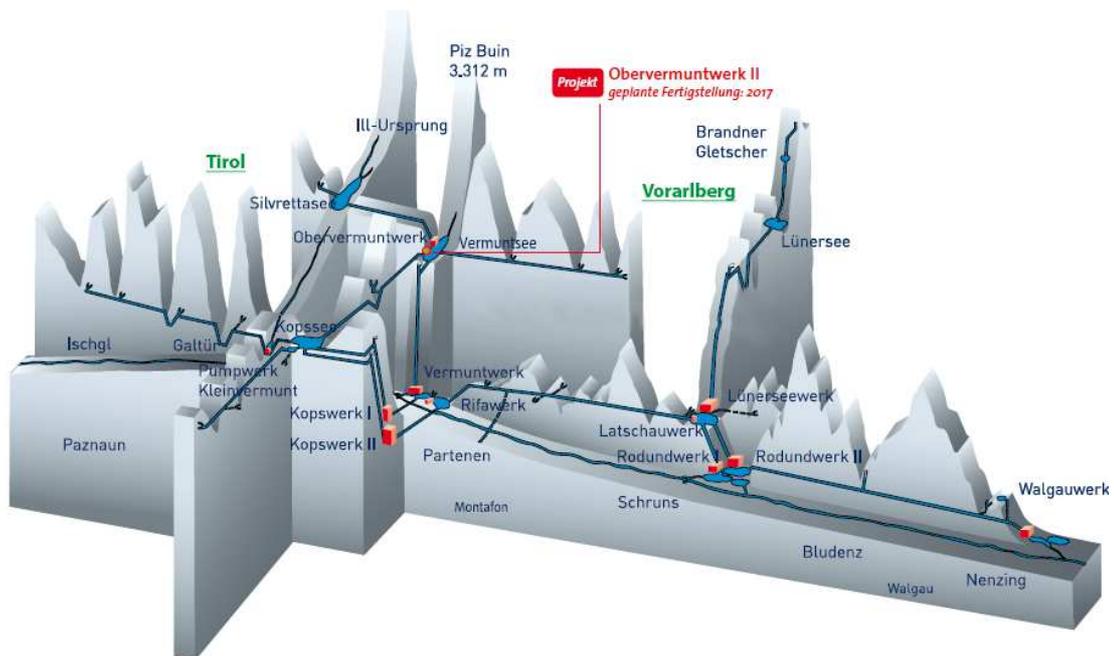


Abbildung 15: Kraftwerksgruppe Obere III – Lünersee (Illwerke VWK Magazin, 2010)

OVW II soll als Parallelkraftwerk zum schon seit 1943 in Betrieb befindlichen Speicherkraftwerk Obervermuntwerk I fungieren um die beiden Speicher Vermunt und Silvretta optimal nutzen zu können. Es soll zur Erzeugung von Spitzen- und Regenergie eingesetzt werden und eine Steigerung der Kapazitäten im Montafon durch optimale Nutzung der vorhandenen Ressourcen ermöglichen. (Illwerke)

Durch das OVW II erfährt die Werksgruppe „Obere III-Lünersee“ eine Steigerung der Kapazität um 360 MW, wobei die das Kraftwerk auf eine Regelbarkeit im Bereich von – 360 MW im Pumpbetrieb bis + 360 MW im Turbinenbetrieb konzipiert ist. Ein großer Vorteil der PSKW Anlage ist es, dass keine neuen Wasserressourcen benötigt werden, da es auf die bestehenden Kapazitäten der beiden Speicher Silvretta und Vermunt zugreifen kann. (Illwerke)

Die Hauptkomponenten des Kraftwerks sind der Schützenschacht mit Belüftungseinrichtung, der Druckstollen, ein Zweikammern Wasserschloss und ein Druckschacht mit Verteilerrohrleitung zu den zwei Maschinensätzen in der Krafthauskaverne. Der Großteil der Anlagenteile wird unterirdisch errichtet,

ausschließlich die Belüftung des Wasserschloss und Portalbauwerke zu den Zugangsstollen sind oberirdisch angeordnet. (Vorarlberger Illwerke AG, 2012)

Durch Parallelbetrieb des Obervermuntwerk I und Obervermuntwerk II bietet sich die Möglichkeit das alte SKW in die Triebwasserführung des neuen PSKW zu integrieren, bestehende Druckrohrleitungen des Obervermuntwerk I werden nach Anschluss in das neue unterirdisch geführte Triebwassersystem abgetragen. (Vorarlberger Illwerke AG, 2012)

Aus Richtung des Einlaufbauwerkes Silvretta kommend verläuft ein 3 km langer Druckstollen (Silvrettastollen) der ein Gefälle von etwa 9 % aufweist und in den etwa 100 m langen gepanzerten Druckschacht mündet, welcher eine Neigung von etwa 48 % aufweist. Im Anschluss dazu sind das Kavernenkrafthaus, die Unterwasserführung und der Unterwasserstollen angeordnet, der mit einer Neigung von etwa 19,5 % in den Speicher Vermunt mündet (Abbildung 16). Etwa 480 m vor Beginn des Druckschachtes zweigt der etwa 1300 m lange Druckstollen Obervermunt in Richtung des bestehenden Obervermuntwerk ab. Der Verbindungsstollen des Wasserschloss Krespa ist etwa 60 m nach Abzweigung des Druckstollens Obervermunt vom in Bau befindlichen Silvrettastollen situiert. (Zenz, et al., 2014)

Nach vom Vorarlberger Landtag im Juni 2009 die Energieautonomie 2050 als langfristiges Ziel fixiert wurde kam im März 2011 der Beschluss des Vorarlberger Landtages zum Ausbau der Wasserkraft in Vorarlberg. Im Anschluss daran startete für das Projekt OVW II im März 2011 eine Umweltverträglichkeitsprüfung, was Ende 2012 in einem Baubeschluss resultierte. Die Baudurchführung sollte demnach von 2013 bis 2018 mit Inbetriebnahmen 2018 erfolgen. Der Rückbau der vorhandenen Druckrohrleitungen und Rekultivierungsarbeiten sind von 2018 bis 2019 geplant. (Vorarlberger Illwerke AG, 2012)

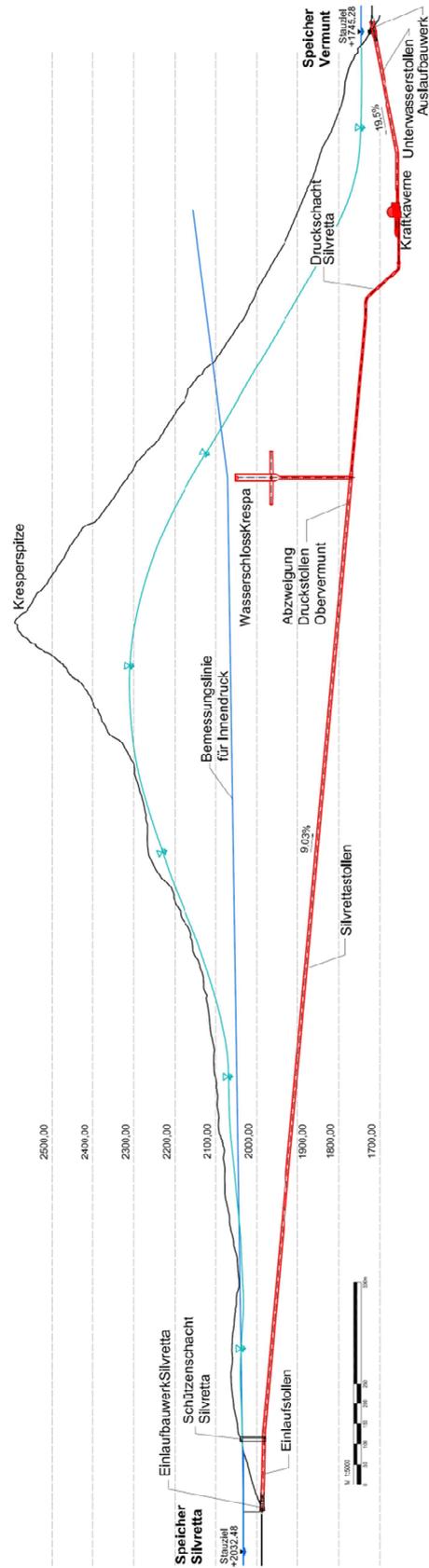


Abbildung 16: Längsschnitt OVW II (Zenz, et al., 2014)

4.3 Das Wasserschloss Krespa

Das Wasserschloss Krespa stellt ein wichtiges Bauwerk des Pumpspeicherkraftwerk OVW II dar und ist über einen Verbindungsstollen an den Druckstollen Obervermunt in das Gesamtsystem des OVW II integriert (Abbildung 17).

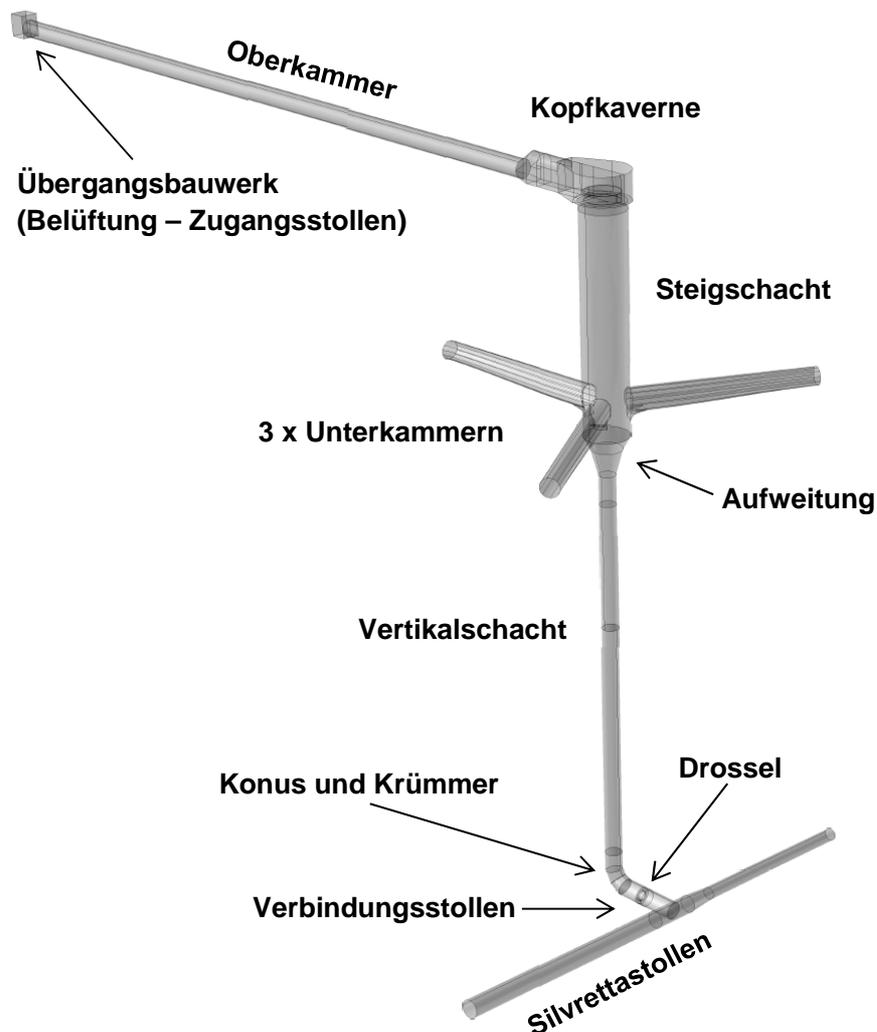


Abbildung 17: 3D-Darstellung des Wasserschloss Krespa

Am Fußpunkt des Wasserschloss ist im Bereich der Einmündung in den Silvrettastollen etwa auf Höhe 1770 müA eine Drossel vorgesehen. Die Ausführung des Wasserschloss zeigt einen unteren Vertikalschacht welcher in einen größeren Steigschacht mit drei sternförmig zueinander angeordneten Unterkammern und einer horizontal verlaufenden Oberkammer übergeht. Die Länge der Unterkammern beträgt jeweils 70 m, wobei Firste und Sohle eine gegenläufige Neigung besitzen (Firste 2 % Neigung, Sohle 1 % Neigung). Durch die gegenläufige Neigung der Unterkammern verjüngt sich der Durchmesser der 3 Kammern jeweils von 9,1 m auf 7 m. Die Oberkammer besitzt einen Durchmesser von 7 m und besitzt auf einer Länge von etwa 320 m (Achse Vertikalschacht bis Übergangsbauwerk) eine Steigung von 1,5 %.

Das Kammerwasserschloss Krespa setzt sich von unten nach oben aus folgenden Hauptkomponenten zusammen:

- **Verbindungsstollen:** $D_i = 6,8$ m, $L = 50$ m, etwa auf Höhe 1770 müA, Neigung 2% (mündet in Silvrettastollen)
- **Drossel:** $D_i = 3,854$ m, (hydraulisch asymmetrisch)
- **Krümmen:** $D_i = 6,8$ m (Übergang in den Vertikalschacht)
- **Konus:** $D_i = 6,8$ m auf $6,3$ m (Übergang in den Durchmesser des Vertikalschachtes)
- **Vertikalschacht:** $D_i = 6,3$ m, $H = 185$ m (Achse Silvrettastollen bis Unterkante Aufweitung)
- **Aufweitung:** $D_i = 6,3$ m auf 17 m, $H = 15$ m (Übergang in den Steigschacht)
- **3 x Unterkammern:** $D_i = 7$ m (vertikale Aufweitung auf 9 m), Höhe Unterkante (Überfallkante) = 1878 müA, $L = 70$ m, 2 % Firstneigung, 1% Sohlneigung
- **Steigschacht:** $D_i = 17$ m, $H = 78$ m, auf Höhe 1970 müA bis 2048 müA
- **Kopfkaverne:** $D_i = 20,3$ m (Decke im Prototyp als Gewölbe), Unterkante auf Höhe 2048 müA, Lochkranz $368 \times \text{DN } 180$, Brüstung $64 \times \text{DN } 180$
- **Oberkammer:** $D_i = 7$ m, $L = 320$ m (Achse Steigschacht bis Übergangsbauwerk zu Belüftungsstollen), Unterkante auf Höhe 2048 müA, Neigung $1,5$ %

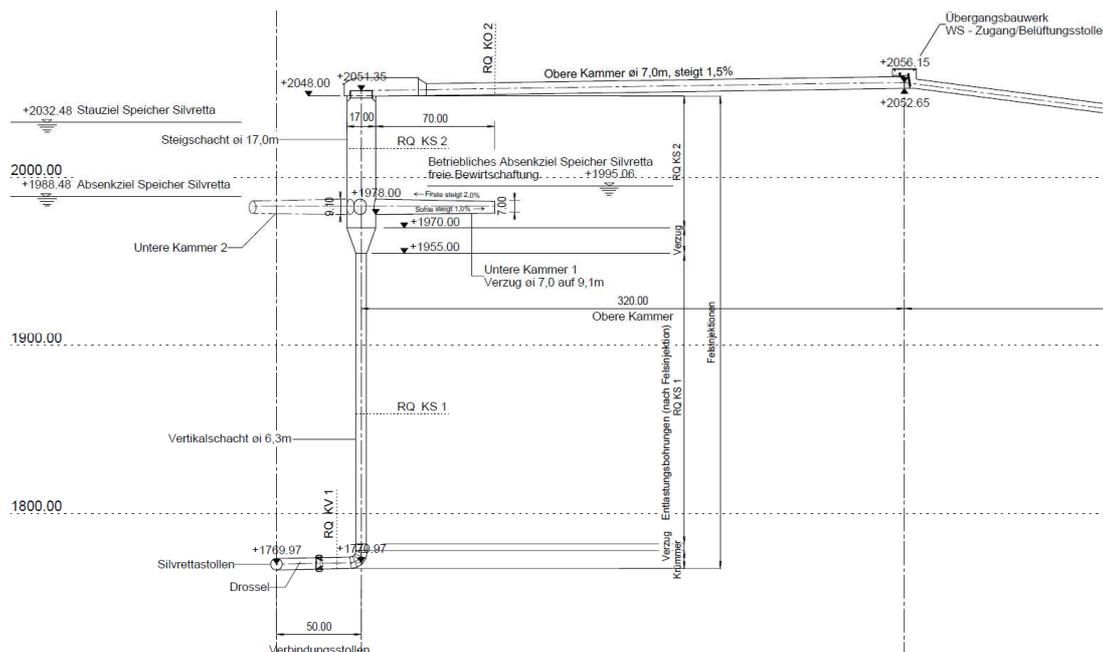


Abbildung 18: Längsschnitt Entwurf Wasserschloss Krespa (Zenz, et al., 2014)

5 Messungen am physikalischen Wasserschlossmodell

Das folgende Kapitel soll einen Überblick über Lufteintrag in Wasser durch einen Wasserjet geben, das verwendete Messverfahren PIV (Particle Image Velocimetry) soll erläutert werden. Es werden aktuelle Messergebnisse der PIV Messung am Modell dargestellt. Das Froude'sche Modellgesetz, welches bei der Modellbildung des Wasserschloss Krespa zum Einsatz kam wird erklärt.

5.1 Hydraulische Modelle

Die Erstellung wasserbaulicher Anlagen ist meist mit hohem Kapitaleinsatz und langen Vorlaufzeiten verbunden, weshalb Planungsfehler oder nicht optimale Ausführungen sehr rasch zeitintensive Ausbesserungen oder Nachrüstungen erfordern und daher möglichst zu vermeiden sind. Wenn komplexe räumliche hydraulische Strömungsvorgänge vorliegen, so ist die Erstellung eines Modelles wegen der Tatsache der schwierigen Simulation aller zusammenhängender hydraulischen Abläufe einer wasserbaulichen Anlage meist unumgänglich. Neben der Darstellung von spezifischen Strömungssituationen lassen sich auch Zweiphasen Strömungsprobleme durch Modelle (z.B. Wasser-Feststoff oder Wasser-Luft) untersuchen. Aus diesen Gründen müssen für Großprojekte, oder Projekte welche spezifischer Randbedingungen aufweisen, und nicht rein analytisch erfasst werden können, neben rechnerisch hydraulischer Nachweise auch Simulationen an physikalischen Modellen der Projekte durchgeführt werden. (Schröder, et al., 1999)

5.1.1 Kriterien der mechanischen Ähnlichkeit

Modellversuche beruhen auf dem Ansatz der geometrischen, kinematischen und dynamischen Ähnlichkeit zwischen Natur und dem Modell, werden all diese Kriterien erfüllt, so wird dies als „mechanische Ähnlichkeit“ bezeichnet (Abbildung 19). Geometrische Ähnlichkeit besagt, dass alle in der Natur vorkommenden Längen, Flächen und Volumina auch im Modell in einem konstanten Verhältnis zueinander stehen. Die der geometrischen Ähnlichkeit übergeordnete kinematische Ähnlichkeit erfordert konstante Verhältnisse von Geschwindigkeit und Beschleunigung welche durch festgelegte Punkte im Strömungsfeld definiert werden, die innerhalb festgelegter Zeitintervalle Strecken mit konstantem Verhältnis in der Natur und im Modell zurücklegen. Basierend auf der geometrischen und kinematischen Ähnlichkeit erfordert die dynamische Ähnlichkeit ein konstantes Verhältnis aller im Modell und der Natur vorkommenden Kräfte und somit Resultierende auf ein Teilchen stets die gleiche Richtung haben. (Bollrich, 1989)

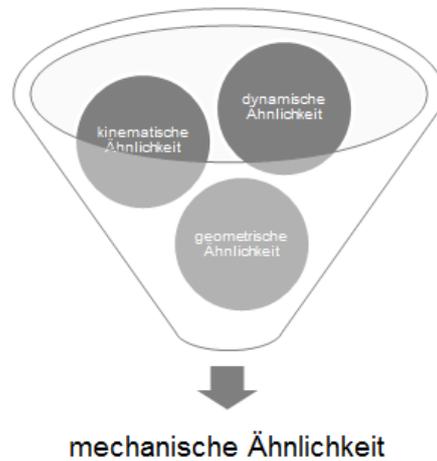


Abbildung 19: Kriterien mechanischer Ähnlichkeit

Zur eindeutigen Vergleichbarkeit von Modell und Natur ist es erforderlich, dass die dynamische Ähnlichkeit der Strömungsvorgänge erfüllt ist. Bei hydraulischen Modellen, bei denen Wasser als Strömungsmedium in Verwendung ist, kann jedoch keine vollständige Ähnlichkeit erreicht werden, da sich diverse Parameter wie Dichte des Wassers, Temperatur oder der Einfluss der Gravitation im Modell und in der Natur gleich verhalten und nicht im Verhältnis dargestellt werden können.

Da jedoch meist nur gewisse Komponenten von Bedeutung für die Betrachtung im Modell sind besteht die Möglichkeit untergeordnete Parameter des Modelles zu vernachlässigen, was als „angenäherte dynamische Ähnlichkeit“ bezeichnet wird. Hierbei muss neben der Trägheitskraft immer jene Größe gewählt werden, die für die Betrachtung von Bedeutung ist und das dafür vorgesehene Modellgesetz verwendet werden. (Strobl, et al., 2006)

Tabelle 4: Ähnlichkeit von Modell und Natur (Strobl, et al., 2006)

geometrische Ähnlichkeit	Längenmaßstab:	$M_l = \frac{l_{Natur}}{l_{Modell}}$
kinematische Ähnlichkeit	Zeitmaßstab:	$M_t = \frac{t_{Natur}}{t_{Modell}}$
dynamische Ähnlichkeit	Kräftemaßstab:	$M_F = \frac{F_{Natur}}{F_{Modell}}$

5.1.2 Froude'sches Modellgesetz

Das Froude'sche Modellgesetz findet häufige Verwendung in der Modellierungen hydraulischer Problemstellungen mit dominierenden Einflüssen der Trägheits- und Schwerkraft in Strömungen und setzt voraus, dass jene Parameter der Trägheits- und Schwerkraft in der Natur und im Modell im Verhältnis gleich sind (Strobl, et al., 2006). Aus dieser Tatsache lassen sich die Maßstabsfaktoren für Trägheit und Schwerkraft wie folgt herleiten:

$$\frac{\text{Trägheit}}{\text{Schwerkraft}} = \frac{F}{G} = \frac{m * a}{m * g} = \frac{\rho * V * a}{\rho * V * g} = \frac{\rho * L^4 * t^{-2}}{\rho * g * L^3} \quad (14)$$

Eine Erweiterung der Gleichung führt zum Froude'schen Modellgesetz:

$$\frac{\rho * L^4 * t^{-2}}{\rho * g * L^3} = \frac{L}{t^2 * g} = \frac{v^2}{g * L} = Fr^2 \quad (15)$$

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g * h}} \quad (16)$$

Unter Berücksichtigung, dass die Gravitationskonstante im Modell und der Natur denselben Betrag besitzt, ergibt eine Gegenüberstellung des Froude Maßstabs von Natur zu Modell folgenden Zusammenhang:

$$\frac{v_{Natur}}{\sqrt{h_{Natur}}} = \frac{v_{Modell}}{\sqrt{h_{Modell}}} \quad (17)$$

Durch Annahme des Modellmaßstab M_L der in der vorhergehenden Tabelle (Tabelle 4) angeführt ist und Integrierung des Modellmaßstab M_L in die vorherige Gleichung folgt:

$$\frac{v_{Natur}}{\sqrt{h_{Natur}}} = \frac{v_{Modell}}{\sqrt{\frac{h_{Natur}}{M_L}}} \quad (18)$$

Aus Lösung der vorhergehenden Gleichung resultiert das Ergebnis des Verhältnisses der Geschwindigkeit in Natur zu Model im Froude'schen Maßstab wie folgt:

$$\frac{v_{Natur}}{v_{Modell}} = \sqrt{M_l} \quad (19)$$

Aufbauend auf den erhaltenen Umrechnungsfaktor können weitere Umrechnungsfaktoren für diverse Vorgänge bestimmt werden, einige Beispiele sind in der folgenden Tabelle (Tabelle 5) aufgelistet:

Tabelle 5: Umrechnungsfaktoren für das Froude'sche Ähnlichkeitsgesetz (Bollrich, 1989)

Länge	M_l		
Zeit	M_t	$M_t = \sqrt{M_l}$	
Geschwindigkeit	M_v	$M_v = \frac{M_l}{M_t}$	$M_v = \sqrt{M_l}$
Durchfluss	M_Q	$M_Q = \frac{M_l^3}{M_t}$	$M_Q = M_l^{5/2}$
Kraft	M_F	$M_F = M_\rho * M_l^3 * \frac{M_v}{M_t}$	$M_F = M_l^3$

Die Grenzen des Froude'schen Modellgesetzes sind folgende (Strobl, et al., 2006):

- Turbulente Strömungen in der Natur müssen auch im Modell als turbulente Strömungen abgebildet werden
- Die Berücksichtigung von Reibungskräften bei turbulenten Strömungen muss bedacht werden.
- Oberflächenspannungen im Modell sind im Vergleich zur Natur verhältnismäßig stark ausgeprägt, weshalb Abflusstiefen größer gleich einem Minimum von 3 cm bzw. der 5-fachen Sandrauheit sein müssen.
- Belüftungsgrenze: Lufteinträge im Modell fallen im Vergleich zur Natur verhältnismäßig gering aus, weshalb Belüftungsprobleme nur qualitativ modelliert werden können.
- Kavitationsgrenze: Da die Grenze des Unterschreitens des Dampfdruckes zum Auftreten der Kavitation ist von der Natur nicht maßstabsgerecht auf das Modell übertragbar, da die Unterschreitungsgrenze des Dampfdruckes im Modell und der Natur nicht ident sind.

- Da das elastische Verhalten des Materials aus der Natur meist nicht im Verhältnis in das Modell übertragbar ist, so können Einwirkungen auf die Elastizität nur dann untersucht werden, wenn das Material im Modell um das M_1 -fache weicher als in der Natur modelliert wird.

5.2 Lufteintrag in Wasser

Der Eintrag der Luft aus der Oberkammer in den Fallschacht des Wasserschlosses Krespa stellt ein technisches Problem dar, welches im Labor der TU Graz am Modell untersucht wird.

Das Auftreffen eines Wasserstrahls auf eine Flüssigkeitsoberfläche, dessen Fallstrahl über der kritischen Geschwindigkeit liegt, resultiert mit der Mitnahme von Luft in die Flüssigkeit, und einem Luft-Wasser-Gemisch im Bereich des eintreffenden Wasserstrahls. Durch die Kompressibilität von Luftblasen kann es zu einem unregelmäßigen Maschinendurchfluss kommen der zu einem stoßweisen Betrieb führen kann, was wiederum starke Druckschwankungen verursacht. Der luftblasenfreie Betrieb einer Pumpspeicherkraftanlage ist notwendig um die volle Leistung der Anlage ausschöpfen zu können. Daher ist es unumgänglich, jene Bereiche, welche dafür anfällig sind Luft in das Rohrsystem einzubringen zu untersuchen und zu optimieren.

5.2.1 Lufteintragsmechanismen eines Jets nach Danciu, 2011

Mechanismen eines Jets der in ein Wasserpolster eindringt sind (Danciu, 2011):

- Einschluss von Luftpaketen zwischen eindringendem Jet und der Wasseroberfläche (Abbildung 20)
- Bildung kleiner Hohlräume beim Eindringen des Jets in das Wasserpolster, welche in die Tiefe transportiert werden

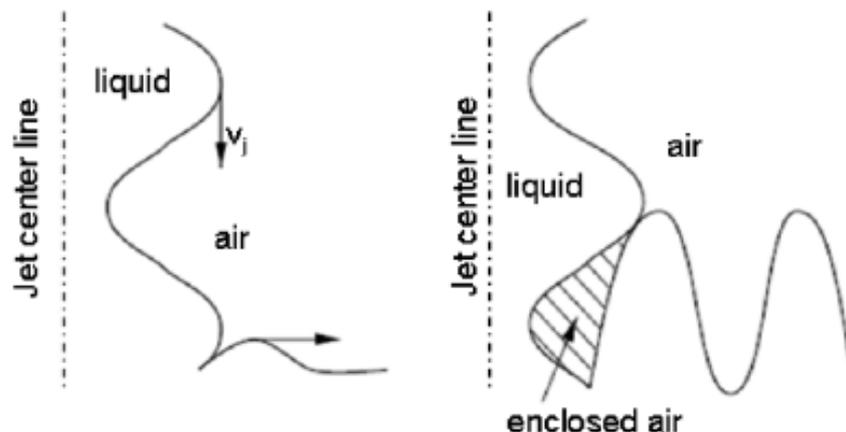


Abbildung 20: Lufteinschluss bei Auftreffen des Jets auf die Wasseroberfläche (Danciu, 2011)

Strömungskraftkomponenten und Auftriebskraft sind die auf die Luftblase einwirkenden Hauptkomponenten. Der Bewegungsvektor der Blasen variiert durch Deformation, Kompression und Expansion der Blasen stark, außerdem bewirkt der Effekt der Koaleszenz (Zusammenschluss kolloidaler Teilchen) eine Vereinigung kleiner Luftblasen zu großen Blasen wodurch eine Verringerung der Oberfläche und der Reibungskomponente erzeugt wird, gleichzeitig wird das Volumen und damit die Auftriebskomponente erhöht.



Abbildung 21: Lufteintrag eines Jets (Danciu, 2011)

5.2.2 Ermittlung der Eindringtiefe nach Clanet, et al., 1997

Die maximale Eindringtiefe eines Wasserstrahls auf eine Flüssigkeitsoberfläche ist maßgebend abhängig vom Jetimpuls des Fallstrahls und der Auftriebskraft der in die Flüssigkeit eingebrachten Luftblasen. Wird eine kritische Geschwindigkeit des Jets beim Auftreffen auf die Oberfläche erreicht, so ist die von dem eingetauchten Strahl erzeugte Ansaugkraft stark genug die Kapillarkräfte des Wassers zu überwinden und einen Luftscheiter in die Flüssigkeit mit einzutragen.

Durch die weitere Strömung des Jets werden die Blasen unter Wasser mit dem Strom mitgerissen und breiten sich in axialer und radialer Richtung aus, was zu Verwirbelungen führt. Entsprechend der Koaleszenz vergrößern sich die Blasen, während sie tiefer in die Flüssigkeit eindringen und Reibungskräfte erzeugen. Sie erreichen ihre maximale Eindringtiefe, wenn die aufwärtsgerichtete Kraft des Auftriebs jene Kraftkomponente des Reibungswiderstandes der Abwärtsbewegung übersteigt, was für einen großen Anteil der eingebrachten Luftblasen an einer scharf ausgeprägte maximale Tiefe mit dem freien Auge erkennbar ist, kleinere Luftblasen tauchen jedoch tiefer in das Becken ein (Abbildung 22).

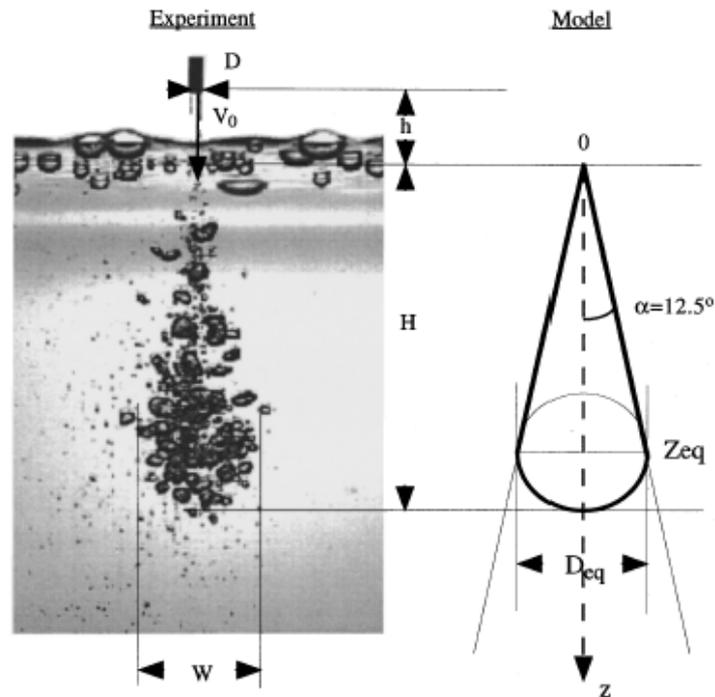


Abbildung 22: Maximale Eindringtiefe von Luftblasen (Clanet, et al., 1997)

Anhand Untersuchungen und Modellversuchen kann der Ausbreitungswinkel einer solchen Zweiphasenströmung unabhängig der Reynolds-Zahl mit einem Halbwinkel von $12,5^\circ$ angenommen werden. Die Eindringtiefe H kann als Abstand zur Oberfläche, dessen Abwärtsgeschwindigkeit der Aufstiegs geschwindigkeit der Blasen entspricht ermittelt werden. Die mittlere Luftblaseneindringtiefe kann durch folgenden mathematischen Zusammenhang beschrieben werden:

$$\frac{H}{D} = \frac{1}{2 * \tan(\alpha)} * \frac{v_0}{u_T} \quad (20)$$

H	maximale Eindringtiefe	[m]
D	Durchmesser des Jets (bei Auftreffen auf die Flüssigkeitsoberfläche)	[m]
α	Ausbreitungswinkel des Jets unter Wasser	[°]
v_0	Anfangsgeschwindigkeit des Wasserstrahls (bei Auftreffen auf die Flüssigkeitsoberfläche)	[m/s]
u_T	Aufstiegs geschwindigkeit der Blasen	[m/s]

Das Verhalten der Blasen im Unterwasserjet ist in Bezug auf Schwerkraft, Viskosität und Auftrieb folgt einem nicht monotonen Verhalten, die Steiggeschwindigkeit der in die Flüssigkeit eingedrungenen Blasen hängt nicht von der Eintrittsgeschwindigkeit des Jets, sondern ausschließlich von der Oberflächenspannung und der Dichte der Flüssigkeit ab. (Clanet, et al., 1997)

Die Zusätzliche Berücksichtigung der Verwirbelung einzelner Luftblasen bringt eine Standardeindringtiefe der Luftblasen in folgendem empirischen Zusammenhang:

$$\frac{H}{D} = \frac{1 + \tan(\alpha)}{2 * \tan(\alpha)} * \frac{v_0}{u_T} \quad (21)$$

5.2.3 Ermittlung der Eindringtiefe nach Ervine, et al., 1987

Ervine & Falvey beschreiben das Verhalten eines Wasserstrahls (Jets) mittels Modellversuchen an Großmodellen, welche die Grundlage für die Erstellung eines Diagramms zur Bestimmung der Luftblaseneindringtiefe in ein Auffangbecken darstellt.

Die Belüftung des Jets an der freien Atmosphäre nach Austritt aus der Düse hat großen Einfluss auf die maximale Eindringtiefe des Wasserstrahls und Lufteinbringung. Die physikalischen Mechanismen der Belüftung werden durch das Turbulenzverhalten des Jets vor Auftreffen auf die Flüssigkeitsoberfläche bestimmt.

Wichtige Fähigkeiten für die Fragestellung der Belüftung, der maximalen Eindringtiefe und Einbringung der Luftblasen in die Flüssigkeit des Jets sind die seitlichen Ausbreitung, die zunehmende Verzerrung während des Falls und der Abriss des Jetstrahls bei zunehmender Länge. Jets die diese Faktoren mit sich bringen treffen mit bedeutend weniger Wucht auf die Flüssigkeitsoberfläche auf als kompakte, nicht belüftete Jets.

Die Versuche am Modell haben zu folgenden Erkenntnissen geführt:

- Das anfängliche Turbulenzverhalten legt die Höhe der seitlichen Ausbreitung des Jets fest
- Der Winkel des Zerfall des inneren Kern mit 15 – 20% des Winkel der Aufweitung des Jets angenommen werden
- Die Wahrscheinlichkeit der Begegnung von Wasser außerhalb des kompakten Kerns nach außen hin kann über die Normalverteilung nach Gauß beschrieben werden

- Die Abbruchlänge beträgt etwa $50 - 100 \cdot d_0$ (...Anfangsjetdurchmesser)

Beim Auftreffen des Jets auf die Flüssigkeitsoberfläche hat sich der Ausgangsdurchmesser des Wasserstrahls verändert und kann unterteilt werden in einen inneren Kern und eine sich auflösende äußere Region welche abhängig der Geschwindigkeit, Länge und Turbulenz des Jets belüftet sein kann.

Die Steiggeschwindigkeit u_b der Luftblasen an der maximalen Eindringtiefe unter der Wasseroberfläche wurde aus Erfahrungswerten und vorherigen Untersuchungen mit etwa 0,25 m/s angenommen.

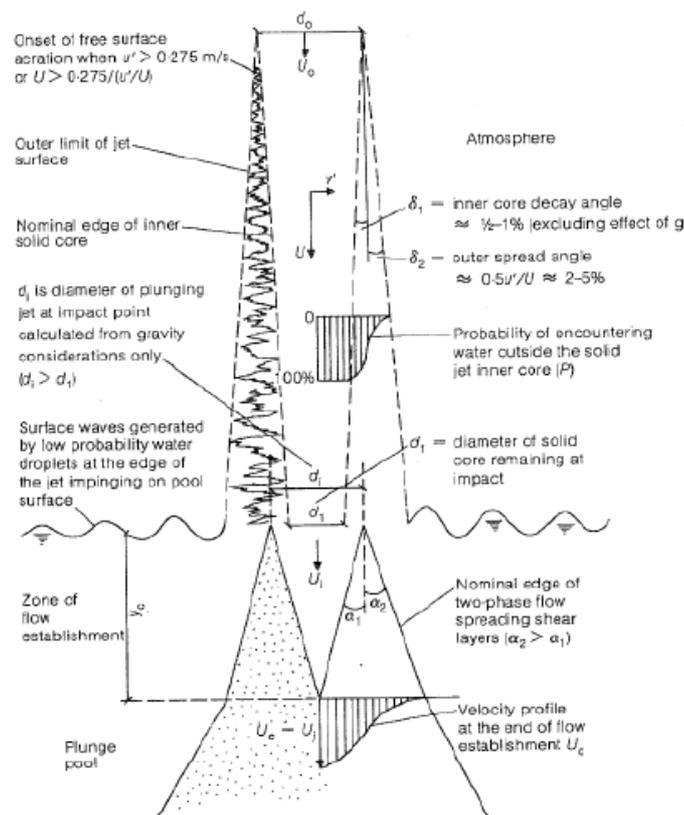


Abbildung 23: Eindringtiefe der Luftblasen (Ervine, et al., 1987)

Mit Unterscheidung zweier seitlicher Ausweitung bedingt durch Turbulenz und Belüftung des Jets bilden sich grob zwei Abgrenzungen im Diagramm, welches die maximale Eindringtiefe über die beiden Verhältnisse Eindringtiefe zu Jetdurchmesser und Jetanfangsgeschwindigkeit zur Aufstiegsgeschwindigkeit darstellt.

5.2.4 Aufstiegsgeschwindigkeit von Luftblasen

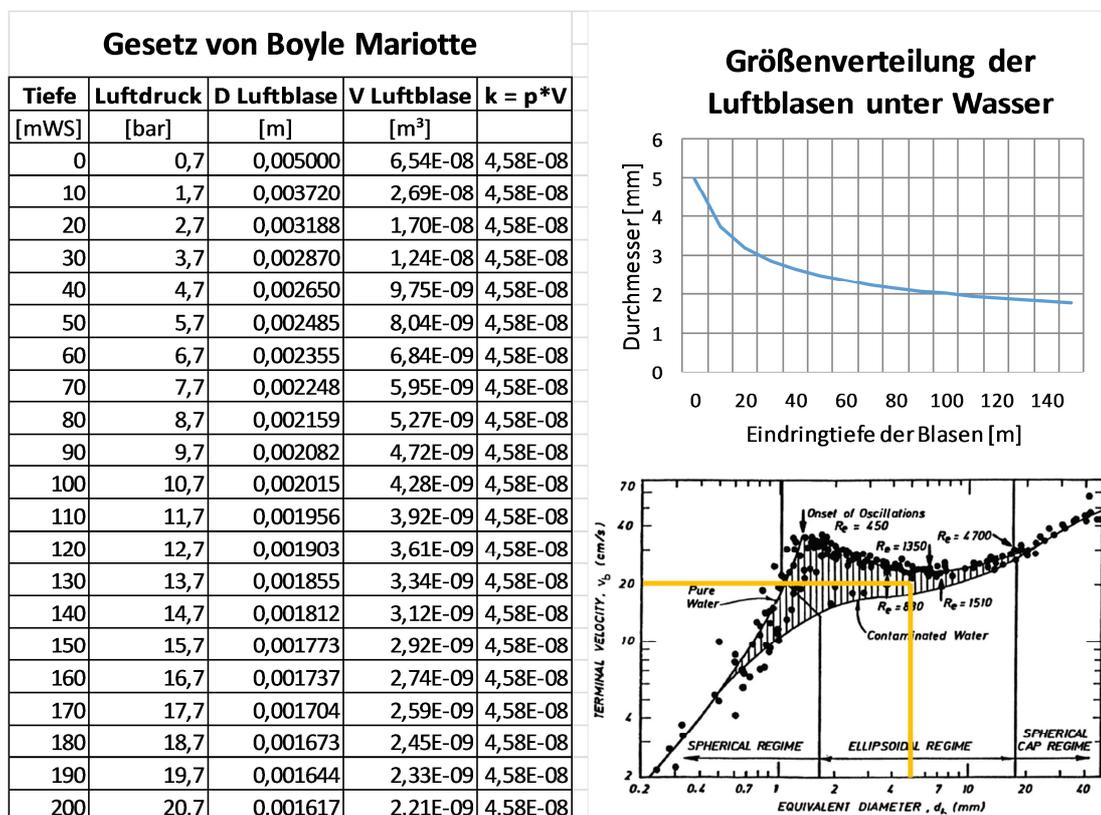
Eine Beobachtung der im Modellversuch eingebrachten Luftblasen ergab, dass große Blasen im Bereich von etwa 4 mm bis 5 mm liegen, kleine Blasen (welche Tiefer unter die Oberfläche eingetragen werden) liegen im Größenbereich von etwa 1 mm bis 2 mm. Bei Anwendung des *Gesetzes von Boyle-Mariotte* kann ermittelt werden, ob sich in den im Versuch anzutreffenden Tiefen eine Änderung der Endgeschwindigkeit der Luftblasen durch Änderung des Volumens einstellt. Das Gesetz besagt, dass bei konstanter Temperatur und konstanter Teilchenanzahl bei einem idealen Gas der Druck umgekehrt proportional vom Volumen ist:

$$p * V = const. \quad (22)$$

p Luftdruck [m]

V Volumen der Blasen [m]

Tabelle 6: Änderung des Luftblasenvolumens pro Eindringtiefe



Nach Betrachtung des Gesetzes von Boyle Mariotte kann davon ausgegangen werden, dass keine gravierende Änderung der Endgeschwindigkeit der Luftblasen im Größenbereich der Eindringtiefe des Wasserschlosses eintritt. Die Endgeschwindigkeit von 0,2 m/s kann bei allen betrachteten Lastfällen zur Anwendung kommen.

5.2.5 Zusammenfassung der Literaturstudie zum Thema Lufteintrag in Wasser

Die maximal erreichbare Eindringtiefe von Luftblasen ist jene Tiefe, bei der sich ein Gleichgewicht der Aufstiegsgeschwindigkeit der Blasen und Abwärtsgeschwindigkeit des Jetimpulses einstellt. Wichtig ist auch die Betrachtung des Verhaltens des Jet an der Atmosphäre vor dem Eintauchen in den Wasserkörper, da der Wasserstrahl bedingt durch das Turbulenzverhalten abreißen und/oder sich aufweiten kann. Dieses Verhalten resultiert in einer Belüftung des Strahls, was wiederum Einfluss auf die Eindringtiefe und die Mitnahme von Blasen in die Flüssigkeit hat.

Zufolge der abhängig vom jeweiligen Durchfluss hervorgerufenen Instabilität eines Wasserfalls wird der Jet des Wasserfalls aufreißen und sich in große Wasserpakete auflösen, die nacheinander auf die Wasseroberfläche auftreffen. Die auftreffenden Pakete erzeugen Hohlräume, die nach Verschließen Hohlkörper unter Wasser bilden und vom auftreffenden Jet nach unten transportiert werden.

Tritt der Fall ein, dass ein Wasserfall vor Eindringen in die Wasseroberfläche noch nicht abgerissen ist, so ist davon auszugehen, dass der Jet die eingebrachten Luftblasen tiefer unter die Wasseroberfläche mitreißt als ein schon vor Auftreffen auf die Wasseroberfläche abgerissener Jet. Ein vor Auftreffen auf die Wasseroberfläche abgerissener Wasserfall bewirkt eine durch das Turbulenzverhalten bestimmte und die damit verbundene ungleichmäßige Abwärtskomponente auf die Luftblasen geringere Eindringtiefe des Jets und damit auch der Luftblasen.

Liegt die Geschwindigkeit des Jets bei Eindringen über der kritischen Geschwindigkeit, so werden die Kapillarkräfte überwunden und Luft wird in Form von Blasen unter Wasser eingebracht. Diese verteilen sich in axialer und radialer Richtung.

Die Aufstiegsgeschwindigkeit der Luftblase im Wasser kann durch das Bilden der Gleichgewichtsbedingung aller zusammenhängenden Faktoren die auf die Blase einwirken beschrieben werden. Die Gleichgewichtsbedingung in vertikaler Richtung setzt sich aus dem Gewicht der Blase, dem Auftrieb der Blase im Wasser, der Impulskraft des Jets und der Reibung von Luft im Wasser zusammen und pendelt sich zwischen 0,2 m/s und 0,3 m/s ein (Schröder, et al., 1999). Die Endgeschwindigkeit von 0,2 m/s kann in allen betrachteten Lastfällen zur Anwendung kommen. Übersteigt die Aufstiegsgeschwindigkeit, die nach Erfahrungswerten aus Messungen im Labor mit etwa 0,22 m/s angenommen wird die Reibkräfte, so steigen die Blasen wieder auf.

5.3 Particle Image Velocimetry

Anforderungen der komplexen Zusammenhänge von Strömungsfeldern und deren Messungen, welche eine große Zahl unterschiedlicher absoluter und zeitlich gemittelter Parameter aufweisen resultierten in der Entwicklung leistungsfähiger Messverfahren wie dem PIV (Particle Image Velocimetry). (Nitsche, et al., 2006)

5.3.1 Grundprinzip des PIV

Beim PIV handelt es sich um ein optisches Verfahren zum Erhalt von Geschwindigkeitsvektoren in einer projizierten 2D-Ebene in einer Flüssigkeitsströmung, durch Messung von Ort und Geschwindigkeit von Tracern in der Flüssigkeit (Dobler, 2012). Die Hauptkomponenten sind eine Lichtquelle (meist Nd:YAG-Laser), die Abbildungsvorrichtung (meist CCD-Kamera) und eine Synchronisierungseinheit für Laser und Kamera (meist ein PC). Der Laser, der zu einer Ebene aufgeweitet wird macht die in der Flüssigkeit mitbewegten Tracerpartikel sichtbar. Das reflektierte Licht der Partikel kann durch eine Kamera abgebildet werden. Nach vorbestimmten Zeitabschnitt Δt erfolgt eine weitere Abbildung der Ebene, welche dann miteinander verglichen werden können. Durch Korrelation der beiden Abbildungen kann die Verschiebung der für die Tracer spezifischen Punkte in x- und y-Richtung bestimmt werden, durch die Kenntnis des zusätzlichen Zeitabstandes der Lichtpulse folgt die Geschwindigkeit der Verschiebung, die bei hinreichend kleinen Zeitabständen als annähernd linear angesehen werden kann (Abbildung 24). (Nitsche, et al., 2006)

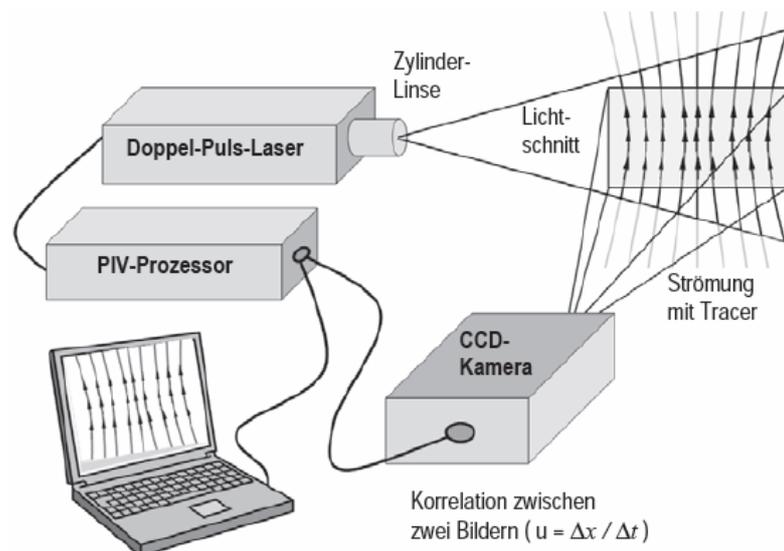


Abbildung 24: Grundaufbau und Hauptbestandteile des PIV (Strobl, et al., 2006)

5.3.2 CCD-Kameras

CCD-Kameras (Charge Coupled Device) sind Kameras, welche mit lichtempfindlichen CCD-Zellen ausgerüstet, welche für industrielle- und wissenschaftliche Zwecke zur Erfassung zweidimensionaler Bilder eingesetzt werden. CCD-Sensoren ermöglichen je nach Bauart die Abbildung sichtbarer Wellenlängen, wie auch die Erfassung des Infrarot-, UV- oder den Röntgen Bereiches. Die weiteste Verbreitung dieser Kameratechnologie findet man angefangen in herkömmlichen Fotokameras bis hin zu Infrarot- oder Hochgeschwindigkeitskameras. Die Abspeicherung von Bildern erfolgt durch das zeilenweise Auslesen von Pixeldaten, welche unter Berücksichtigung des Schwarzpegels verstärkt und digitalisiert werden und so für weitere numerische Bearbeitung bereit steht. Ein großer Anwendungsbereich der Kameras ist wie beim PIV die berührungslose Objekterfassung, hier können je nach Auslegung der Kamera Bewegungen mit mehreren 1000 Bildern pro Sekunde erfasst werden. (Litfin, 2005)

5.3.3 ND:YAG Laser

Der beim PIV eingesetzte Nd:YAG-Laser (Neodym-dotierter Yttrium-Aluminium-Granat-Laser) ist ein Festkörperlaser, welcher im Infrarotbereich bei 1064 nm arbeitet. Durch Vervielfachung der Frequenz kann die Auflösung des Lasers erhöht werden. Durch eine Verdopplung der Frequenz erfolgt eine Halbierung der Wellenlänge des Lasers auf 532 nm, was sich dadurch zeigt, dass der Laser nun im sichtbaren Bereich als grünes Licht angezeigt wird (Abbildung 25). Im Gegensatz zu CO₂-Lasern ist in einem Nd:YAG-Laser kein Gas sondern ein künstlich hergestellter Kristall mit regelmäßiger Struktur (Neodym-dotierter Yttrium-Aluminium-Granat-Kristall) verbaut. Durch eine Anregung der Atome des Kristalls durch Energiezufuhr (was als Pumpen bezeichnet wird) werden sie auf ein höheres Energieniveau gehoben und fallen anschließend wieder auf ein niedrigeres Energieniveau, wobei Licht ausgesendet wird. (Trotec Leipzig)

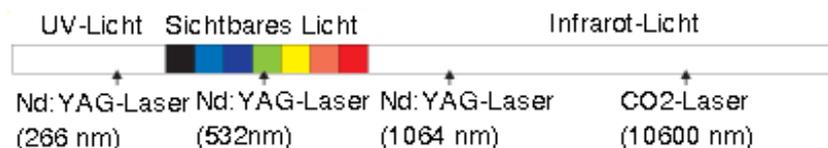


Abbildung 25: Wellenlänge des Lasers (Trotec Leipzig)

Die vom Laser abgegebene Leistung beträgt 23 MJ bei einer Wiederholrate von 1 kHz was einer Einstufung des Lasers in die Sicherheitskategorie 4 erfordert (Dobler, 2012). Durch Verwendung des Lasers bestand die Notwendigkeit der Einhausung der Messstelle am Modell um den Laser, Kennzeichnung durch entsprechende Warnschilder, Verwendung einer Warnleuchte bei in Betrieb genommenem Laser und die Verwendung von Schutzbrillen um die Gefahren beim Betrieb des Lasers so gering wie möglich zu halten, mögliche Gefahren bei Verwendung eines Lasers sind in der folgenden Abbildung (Abbildung 26) dargestellt.

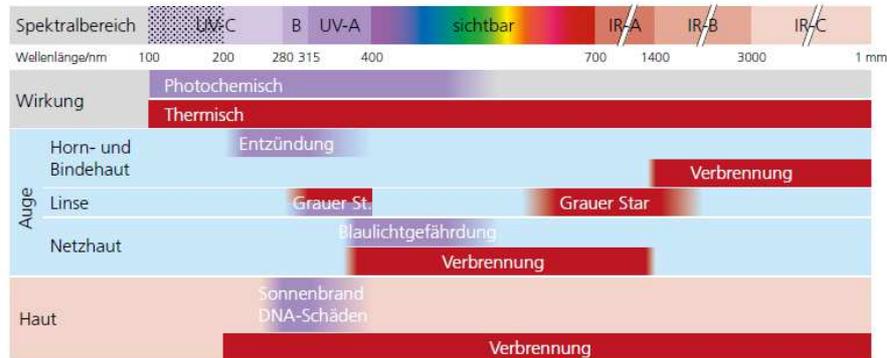


Abbildung 26: Gefahren beim Umgang mit Lasern (AUVA, 2014)

5.3.4 Messung mittels PIV

Nach Nitsch und Brunn (Nitsche, et al., 2006) kann die Messung in die zwei Hauptpunkte Imaging und Analysis unterteilt werden

Das **Imaging** umfasst die Bildaufnahme und alle zugehörigen Arbeitsschritte. Der Laserabschnitt zur Identifizierung der Teilchen und der Messebene kann beim PIV durch eine der zwei Betriebsarten Dauerstrich oder Puls laser erstellt werden. Puls laser erzeugen zwei koaxiale Laserpulse im Abstand von Δt welche durch eine Zylinderlinse fokussiert werden und anschließend in x- und y-Richtung durch eine Konvexlinse aufgeweitet werden (Abbildung 27). (Nitsche, et al., 2006)

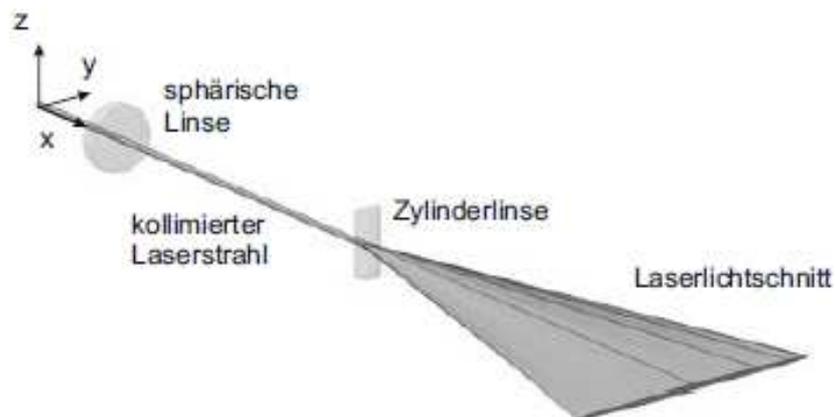


Abbildung 27: Aufweitung des Lasers (Nitsche, et al., 2006)

Dauerstrichlaser, die demselben Prinzip folgen müssen zum Erhalt zweier zeitlich voneinander unterschiedlicher Beleuchtungsintervalle durch eine zusätzliche Vorrichtung zur Ausblendung des Laserlichtes (Shutter) temporär ausgeblendet werden. Das Streulicht der Tracer in der Laserebene wird durch eine Kamera (meist CCD-Kamera) hoher Bildauflösung abgebildet. Der Aufnahmemodus der Kamera entscheidet über die Art der Analyse der erhaltenen Bilder aus der Laserebene. Es besteht die Möglichkeit der Aufnahme der beiden Laserpulse auf einem Bild und der Aufnahme der Laserpulse auf zwei separaten Bildern, wobei die Aufnahme der Pulse auf einem Bild durch die Autokorrelation und die Aufnahme der Pulse auf zwei separaten Bildern durch die Kreuzkorrelation ausgewertet werden. (Nitsche, et al., 2006)

Während durch die Autokorrelation der Pulse nur die Beträge der Partikelverschiebung innerhalb einer Belichtungszeit ermittelt werden kann, ermöglicht es die Kreuzkorrelation die eindeutige Ermittlung des Betrags der Geschwindigkeit sowie die Richtung der Verschiebung der Partikel, weshalb diese die meiste Anwendung findet. (Nitsche, et al., 2006)

Nach dem Imaging erfolgt die **Analysis**, bei der die erhaltenen Bilder (I_1 und I_2), welche in Form einer Grauwertverteilung vorliegen nun genauer analysiert werden. Zunächst werden die beiden Bildabschnitte die vom Laser im Imaging im zeitlichen Abstand von Δt abgebildet wurden in weitere einzelne Abfragefenster (Interrogation Areas) eingeteilt, die dann auf den beiden Bildern miteinander verglichen werden können (Abbildung 28). (Nitsche, et al., 2006)

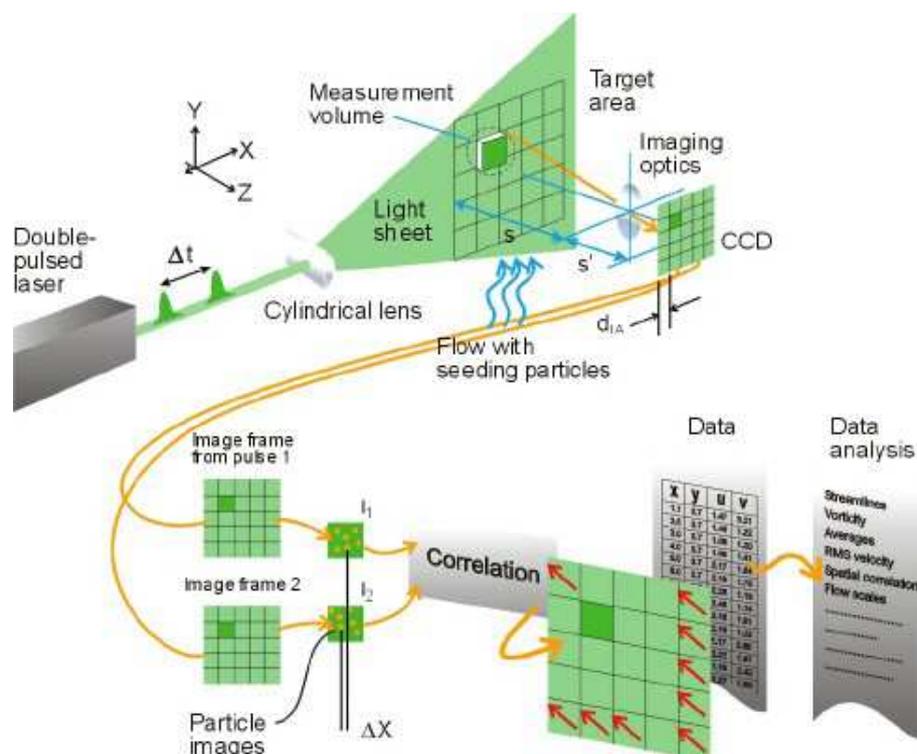


Abbildung 28: PIV Messung (Dantec Dynamics, 2013)

Die Größe und Anzahl der Abfragefenster wird anhand der vorliegenden Randbedingungen in Bezug auf Größe sowie Anzahl der Partikel und dem zeitlichen Abstand der Laserpulse empirisch ermittelt und ist ein Maß für die Auflösung des Geschwindigkeitsfeldes (Abbildung 29). (Nitsche, et al., 2006)

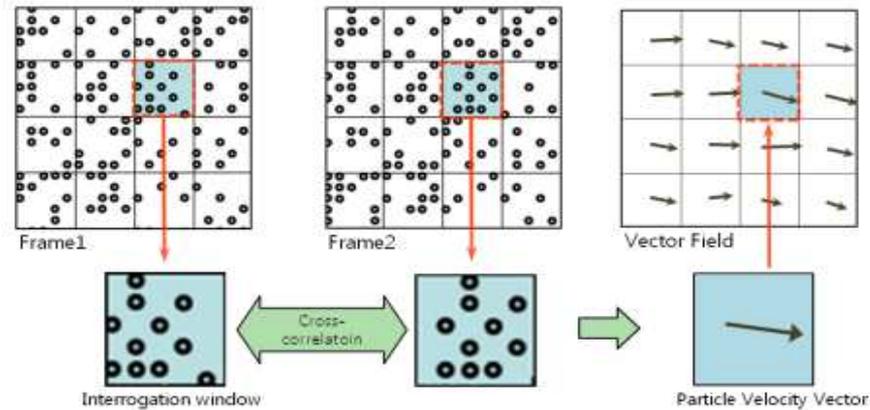


Abbildung 29: Interrogation Areas (Choi, et al., 2011)

Der mathematische Zusammenhang der Kreuzkorrelation zweier Interrogation Areas ist durch den folgenden mathematischen Zusammenhang der Korrelation zweier Funktionen x und h definiert: (Dobler, 2012)

$$z(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\xi) * h(t + \xi) * d\xi \quad (23)$$

ξ	Ortsveränderung	[m]
t	Zeit	[s]

Da eine numerische Lösung der Gleichung auf Grund von Multiplikations- und Integrationsoperationen sehr viel Zeit in Anspruch nehmen würde wird alternativ das Faltungstheorem eingesetzt. Es besagt, dass eine Multiplikation im Frequenzbereich einer Faltung im Zeitbereich gleichkommt. Eine Faltung kommt der Kreuzkorrelation sehr nahe, der Unterschied der beiden liegt in der Spiegelung der Funktion. Anschließend erfolgt die zweidimensionale diskrete Fourier-Transformation von zwei Interrogation Areas in den Frequenzbereich, in dem dann zum Erhalt eines Ergebnisses die Multiplikation und dann die inverse, zweidimensionale diskrete Fourier-Transformation erfolgen. Der Vektor der Verschiebung zwischen Peak und den Bildmittelpunkten kann mittels Peak-Erkennungs-Algorithmus ermittelt werden. (Dobler, 2012)

5.4 Messung am Modell des Wasserschloss Krespa

Das folgende Unterkapitel soll eine Übersicht über die im Labor erfolgten Messungen und deren Vorbereitungen geben. Die Messung wurde mit einem PIV-System der Firma Dantec Dynamics A/S betrieben, die folgende Auflistung (Tabelle 7) zeigt die jeweiligen Spezifikationen der verwendeten Einzelkomponenten.

Tabelle 7: Einzelkomponenten für die Messung

Laser	Litron Laser Modell: LDY303-PIV; Wiederholungsrate: 0,2 – 10 kHz mit 21,5 – 1,85 MJ; $\lambda = 527 \text{ nm}$
Software	Dynamic Studio 2.20.18
Kamera	Photron FASTCAM SA-1 Kamera, 5,4 kHz; 1024 x 1024 px; Speicher: 16 GB
Objektiv	AF Micro-Nikon, 60 mm f/2.8 D

5.4.1 Das Modell des Wasserschloss Krespa

Das Modell des Wasserschloss Krespa ist im Maßstab 1:30 im Labor des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Technischen Universität Graz aufgebaut und an den Wasserkreislauf im Labor angeschlossen. Zur Einstellung der für die Messungen erforderlichen Wasserspiegel kann der Schacht des Wasserschlosses entweder von unten her oder von oben über die Oberkammer mit Wasser befüllt werden. Die Konstruktion ist auf ein Stahl-Rahmensystem gestützt, welche die Begehung des Wasserschloss auf zwei Ebenen (Ober- und Unterkammer) ermöglicht (Abbildung 30).

Instationäre Strömungsverhalten und daraus resultierende Massenschwingungen werden im Oberkammer- und Unterkammerlastfall numerisch untersucht. Die betrachteten Lastfälle unterscheiden sich durch unterschiedliche Stauziele im oberen Becken. Der Oberkammerlastfall wird bei Stauziel, der Unterkammerlastfall wird bei Absenkziel im oberen Speicherbecken untersucht. An beiden Lastfällen werden Resonanzschaltfälle mit vordefinierten Ein- und Ausschaltzeitpunkten der Pumpen und Turbinen behandelt was eine maximale Beschleunigung der Wassermassen im Druckstollen führt. (Richter, et al., 2014)

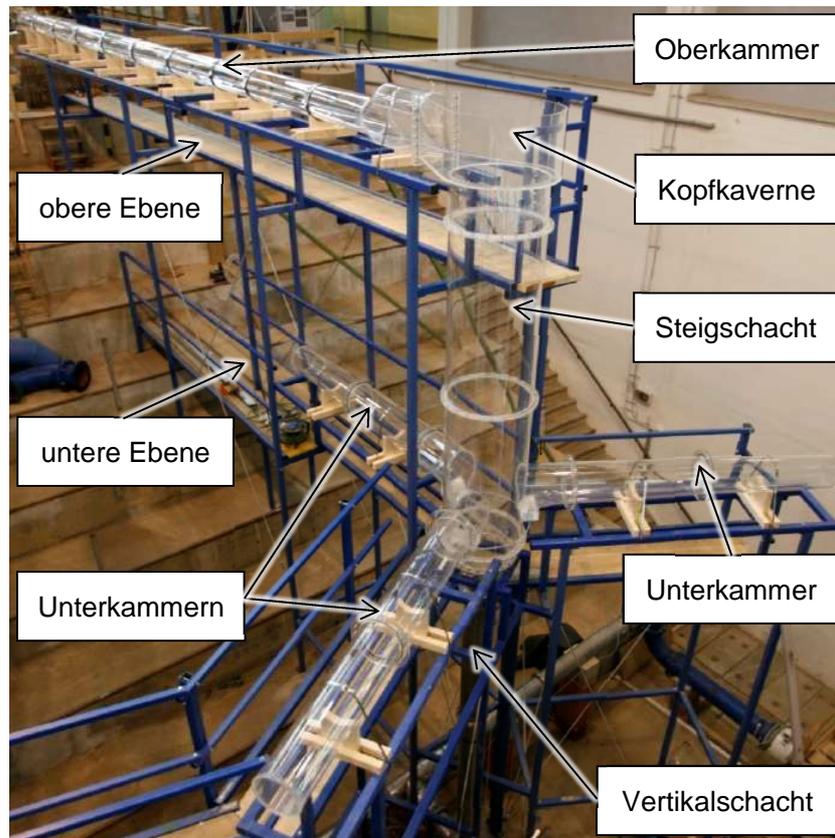


Abbildung 30: Modell des Wasserschloss Krespa (Zenz, et al., 2014)

Der maßgebende Bemessungslastfall für das Wasserschloss Krespa entsteht durch Resonanzschaltung bei Wasserspiegel 2025 müA im Schacht. Hierbei wird das Wasser nach Anstieg über den Schacht und Einfließen in die Oberkammer am Belüftungsgebäude der Oberkammer reflektiert und stürzt erneut in den Schacht. Der Durchfluss beträgt in diesem Zeitpunkt etwa 80 m³/s (Bemessungslastfall), die Fallhöhe des Wasserfalls beträgt etwa 3 m. Beim Aufschlagen des Wasserfalls auf die Wasseroberfläche im Steigschacht entsteht ein Luftpolster. (Richter, et al., 2014)

Weitere Betrachtungen des Eintrags der Luftblasen (maximale Lufteintragstiefe) im Lastfall werden mit Hilfe der 3D-Numerik durchgeführt (Abbildung 31), welche zum Ergebnis kommt, dass der Einfluss der Unterkaammern auf den Entgasungsprozess vernachlässigt werden kann. Es wurde erkannt, dass der ursprüngliche ungebremste Einlaufbereich der Kopfkaverne eine zu große Luft eindringtiefe zur Folge hatte, welche deshalb konstruktiv umgestaltet werden musste. Zur Vermeidung eines konzentrierten Jets muss ein Dämpfungselement, welches den kompletten Jet in kleine einzelne Jets teilt in der Kopfkaverne integriert werden. Der Einbau des Dämpfungselementes verringert die Eindringtiefe der Luftblasen um ein Drittel. (Richter, et al., 2014)

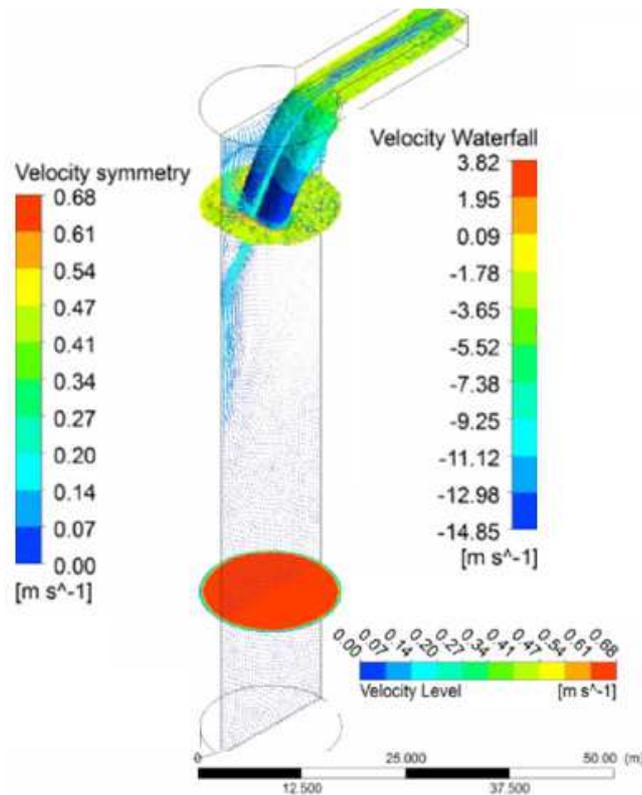


Abbildung 31: 3D-CFD Wasserfallsimulation im Wasserschloss (Richter, et al., 2014)

5.4.2 Das Dämpfungselement in der Kopfkaverne des Wasserschloss Krespa

Das Dämpfungselement setzt sich zusammen aus einem Betonring (Balkonbrüstung) und einer Bodenplatte (Balkonboden) welche mit 432 zylindrischen Aussparungen versehen sind. Diese Aussparungen haben einen Durchmesser von 0,18 m, wovon 368 Stück in der Balkonboden und 64 Stück in der Balkonbrüstung angeordnet sind. Die Balkonbrüstung dient dem Zweck das aus der Oberkammer reflektierte und in Richtung Steigschacht fließende Wasser zurückzuhalten und zu dämpfen. (Zenz, et al., 2014)

Durch das Dämpfungselement erfolgt der Abfluss in den Schacht kontrolliert durch die in der Balkonbrüstung und im Balkonboden vorhandenen zylindrischen Aussparungen, was verhindert, dass sich ein einziger großer Wasserfall ausbildet. Ein Leitbauwerk verhindert, dass die komplette Wassermasse nur im Bereich des Übergangs von Oberkammer zu Kopfkaverne auf das Dämpfungselement auftrifft und teilt die Wassermassen durch seitliche Lenkung gleichmäßig auf die komplette Kopfkaverne auf. Anstelle der einzelnen örtlich unkontrolliert abstürzenden kompakten Wassermasse werden viele einzelne kleine Jets gebildet die senkrecht nach unten in den Steigschacht geleitet werden. Durch den verzögerten Abfluss in den Steigschacht (Abnahme der Fließgeschwindigkeit) erfolgen eine Dämpfung der Wasserschlossschwingung und eine Limitierung der Eindringtiefe der Luftblasen nach Auftreffen auf die Wasseroberfläche im Steigschacht. (Zenz, et al., 2014)

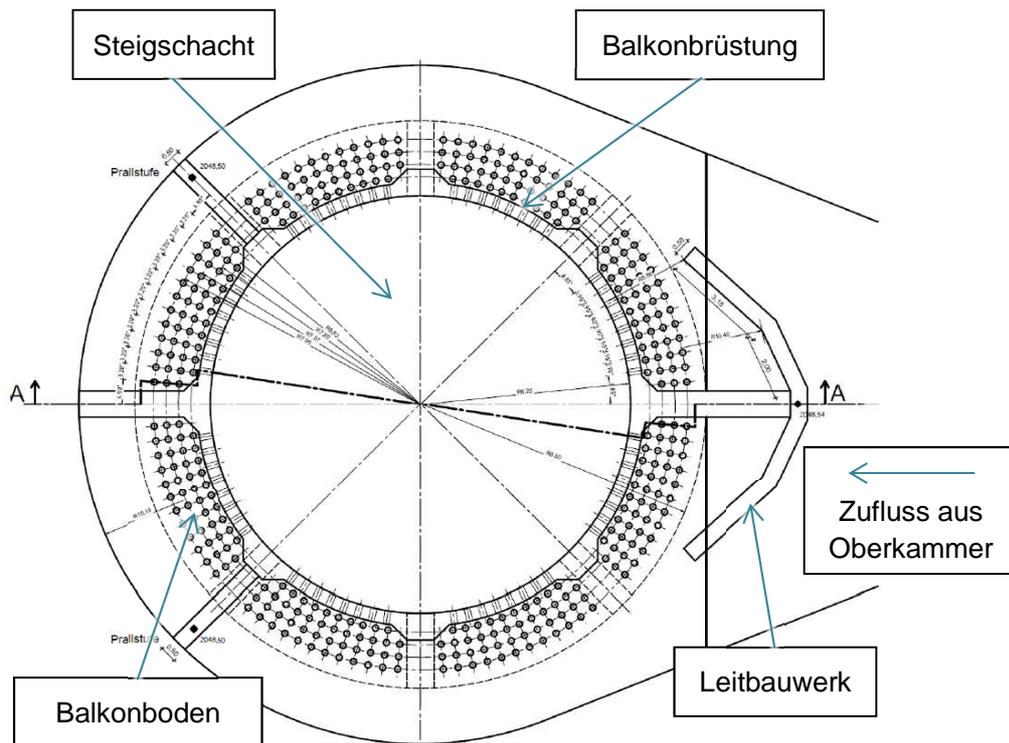


Abbildung 32: Dämpfungselement in der Kopfkaverne (Zenz, et al., 2014)

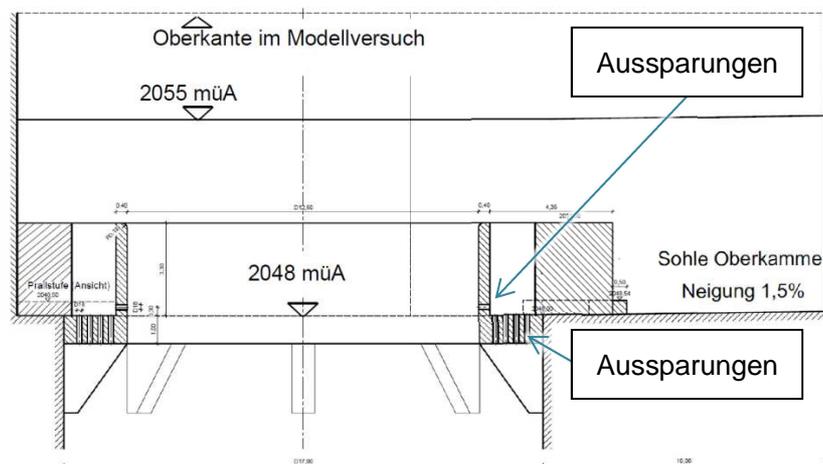


Abbildung 33: Schnitt A-A des Dämpfungselements (Zenz, et al., 2014)

5.4.3 Vorbereitungen der Messungen

Die Befüllung für die Messungen am Wasserschloss Krespa erfolgt über die am Leitungssystem des Wasserbaulabors angeschlossene Oberkammer. Der Durchfluss in die Oberkammer kann mit Hilfe eines Absperrventils reguliert werden. Bei vorherigen Untersuchungen am Modell des Wasserschlosses Krespa wurde die Oberkammer über einen Anschluss, welcher von oben herab an die Oberkammer angeschlossen war (Abbildung 34).



Abbildung 34: Oberkammeranschluss – alt (Ruetz, 2014)

Beobachtungen haben ergeben, dass sich bei hohen Durchflüssen und dieser Art von Anschluss ein annähernd schießendes Verhalten des Oberkammerschwalls einstellt, welches verhindert werden soll. Auf Grund dieser Problematik wurde vor Beginn des Umbaus der Einhausung und der Messapparaturen der Zulauf umgebaut. Der neue Zulauf in die Oberkammer erfolgt nun von unten, somit ist verhindert dass der Schwall zu schnell in die Oberkammer einfließt, was nicht der Situation am Objekt in der Natur entsprechen würde (Abbildung 35).



Abbildung 35: Oberkammeranschluss - neu

Nach Umbau der Zuleitung erfolgt der Aufbau der Hauptkomponenten für die Messung, wobei die Hauptgeräte Laser und CCD-Kamera direkt im Messbereich situiert werden, der Computer mit Auswertesoftware wie auch das Kühl- und Netzaggregat des Lasers werden außerhalb des Messbereiches aufgebaut. Der Messbereich am Ende der unteren Ebene am Modell muss auf Grund von Sicherheitsmaßnahmen beim Umgang mit Lasern komplett eingehaust werden. Eine Warnleuchte ohne die ein Einschalten des Lasers nicht möglich ist, wird im Bereich des Modells gut sichtbar positioniert um zu verhindern, dass außenstehende Personen im Labor den Messbereich während der Messungen und eingeschaltetem Laser betreten. Des Weiteren werden Warnschilder an der Türe die den Messbereich abgrenzen angebracht. (Abbildung 36)

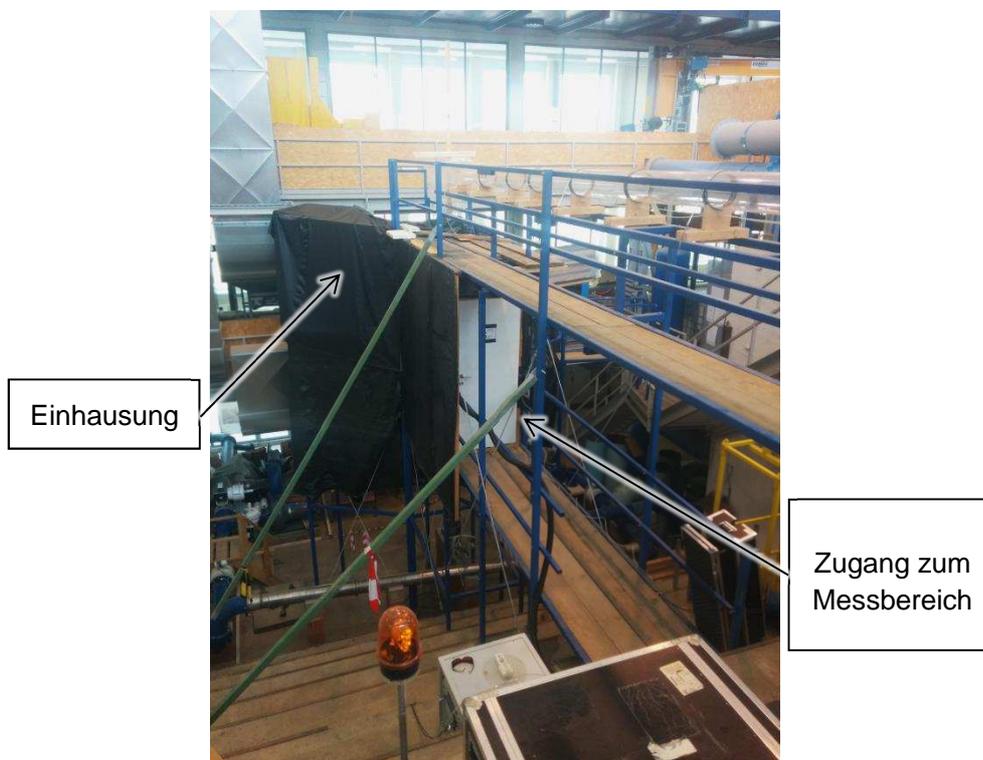


Abbildung 36: Eingehauster Messbereich mit Warnleuchte

Die Einhausung des Messbereiches wird durch eine Tür nach außen abgeschlossen und mit einem Warnschild, welches auf den Gefahrenbereich und die Verwendung des Lasers aufmerksam macht versehen. Die Arbeit am Messbereich bei in Betrieb genommenem Laser erforderte eine Laserschutzbrille. Diese Brille lässt kein Laserlicht durch, daher ist es zur Justierung notwendig Laserlicht in sichtbares Licht umzuwandeln (welches man durch die Brille sieht). Entweder man verwendet ein raues Papier oder eine Kamera (Handy), wobei hier durch Reflexion oder der Aufnahme eines Photoelektrischen Chips das Laserlicht in den sichtbaren Spektralbereich gebracht wird.

5.4.4 Der Messbereich am Wasserschloss Krespa

Auf Höhe des zu betrachtenden Bereiches am Fallschacht über den Unterkammern wird eine „PIV-Box“ installiert. Hierbei handelt es sich um einen außenliegenden Anbau an den Fallschacht aus Plexiglas. Die PIV-Box, die während den Messungen mit Wasser gefüllt wird, dient durch die gerade Ebene in Blickrichtung der Kamera dem Zweck die vorhandene Krümmung des Fallschachtes und damit zusammenhängende Verzerrung der Bilder zu vermeiden (Abbildung 37). Der Berechnungseinfluss der verschiedenen verwendeten Materialien in Bezug auf den Brechungsindex kann vernachlässigt werden, da Wasser (1,33) und Plexiglas (1,49) annähernd denselben Brechungsindex aufweisen (Dobler, 2012).

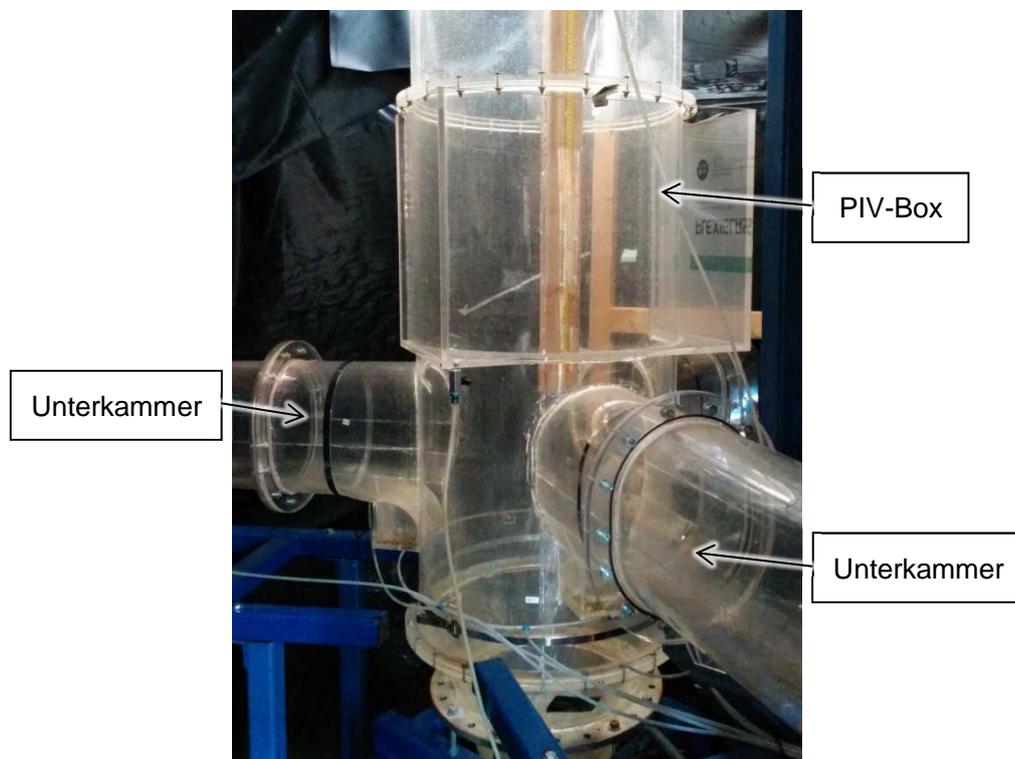


Abbildung 37: Modell Krespa - Messbereich mit PIV-Box und Unterkammern

Der Messbereich ist im Bereich über den Unterkammern angeordnet. Entlang der im Bild (Abbildung 37) nach vorne ragenden Unterkammer wird die CCD-Kamera normal zur PIV-Box Messebene aufgebaut, der Laser und zusätzliche Arm werden neben der im Bild nach links verlaufenden Unterkammer aufgebaut (Abbildung 38).

Der Laser, der die Messebene für die zu untersuchenden Messungen generiert, wird mit Hilfe eines Teleskoparms (Abbildung 39) normal zur Kamera auf Höhe der PIV-Box justiert und mit einem Kamera-Stativ-Arm fixiert, die Ebene des Lasers wird durch eine eigens angefertigte Messlatte fokussiert.

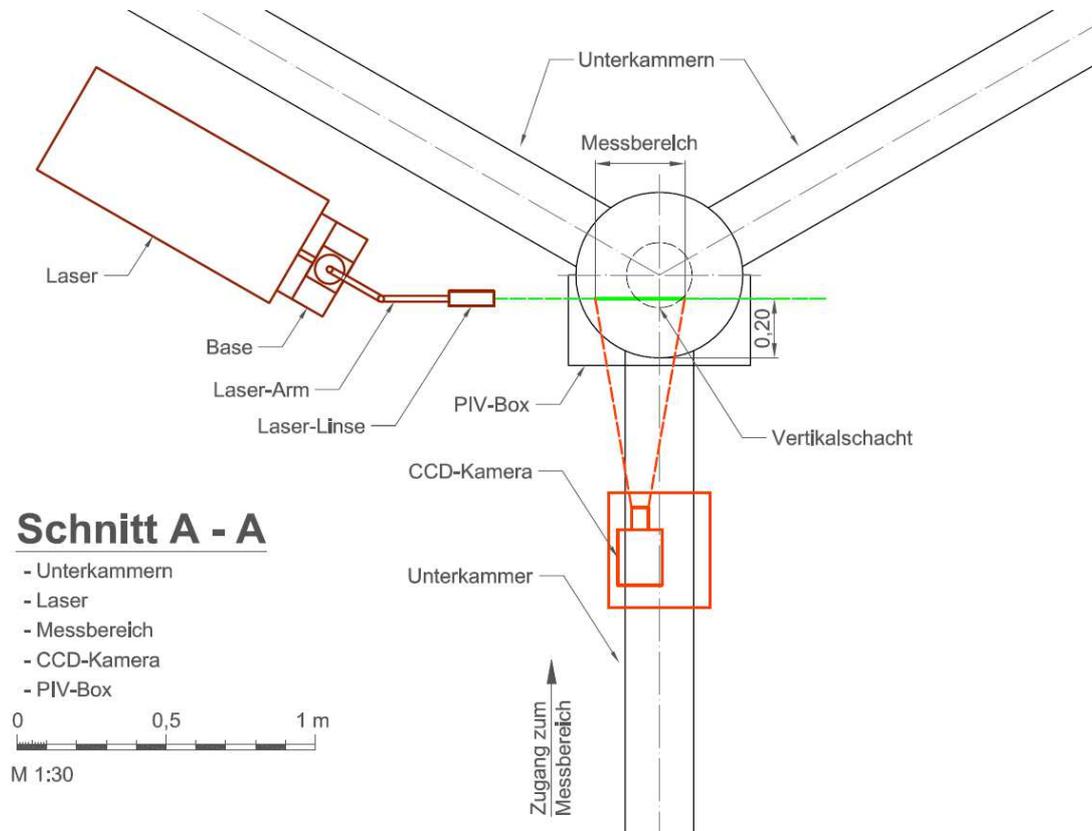


Abbildung 38: Schemaskizze Schnitt A-A (Höhe der PIV-Box)

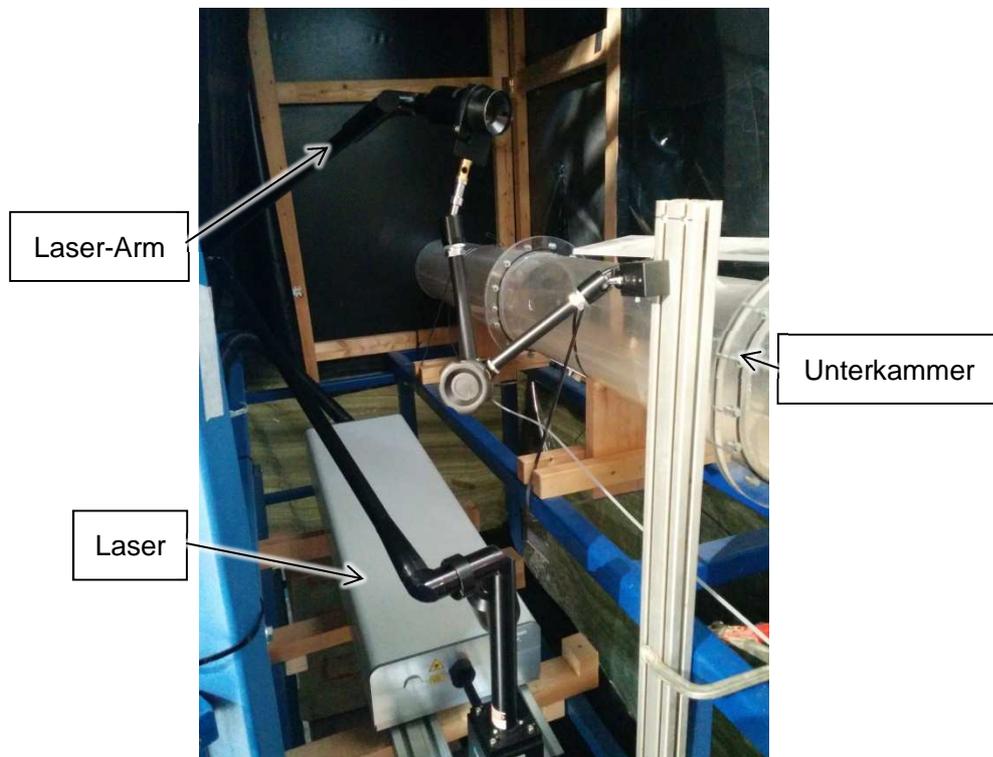


Abbildung 39: Laser mit Teleskoparm

5.4.5 Kalibrierung des Lasers

Als weitere vorbereitende Tätigkeit nach Aufbau der Hauptkomponenten erfolgt die Kalibrierung des Lasers. Hierbei wird nach anfänglichen Kalibrierversuchen und Kontrolle des ausgegebenen Laserstrahls festgestellt, dass eine Justierung an der Umlenkung des Lasers (Justierung des Output Mirror Laser 2) durchgeführt werden muss (Abbildung 40).

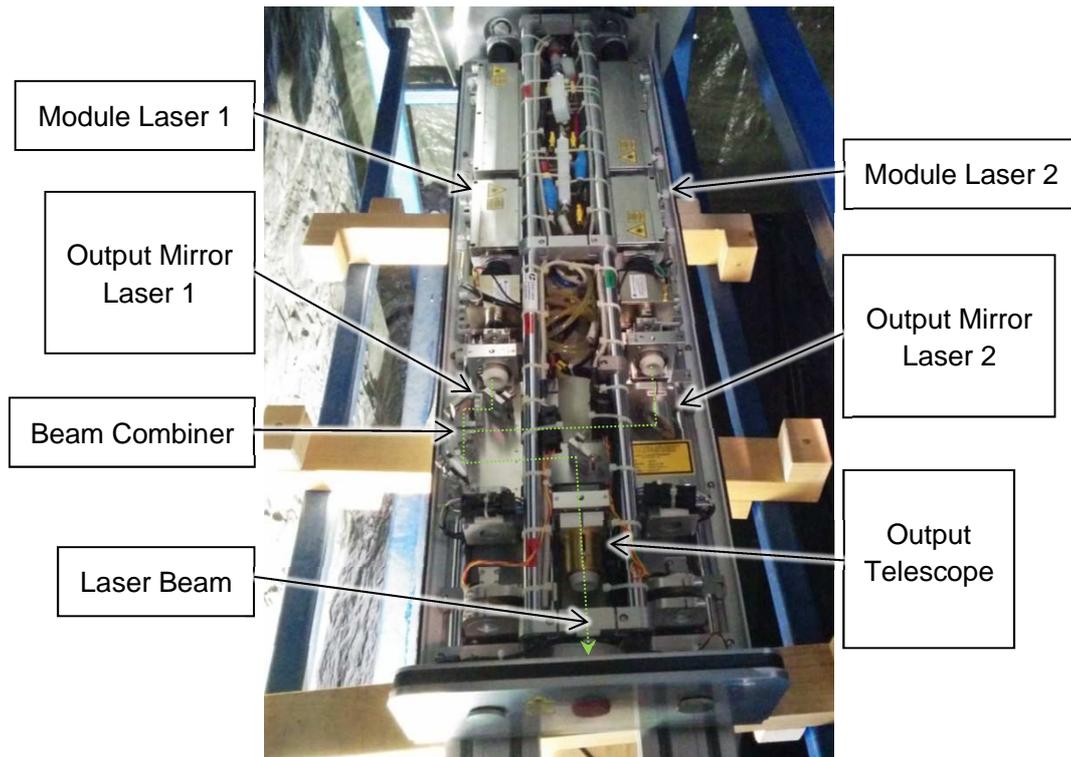


Abbildung 40: Laser geöffnet

Nach Justierung des geöffneten Lasers wird der ausgehende Laserstrahl auf einer für die Kalibrierung eigens an der Base (Sockel für den Laser-Arm welcher mit integrierter Umlenkspiegel für die weitere Kalibrierung des Lasers ausgestattet ist) montierten Deckplatte grobpositioniert (Abbildung 41). Im Anschluss dazu wird zur Erhöhung der Sicherheit am Messbereich eine Sicherheitsabdeckung zwischen Laserausgang und Base montiert und der nächste Schritt der Kalibrierung durchgeführt.

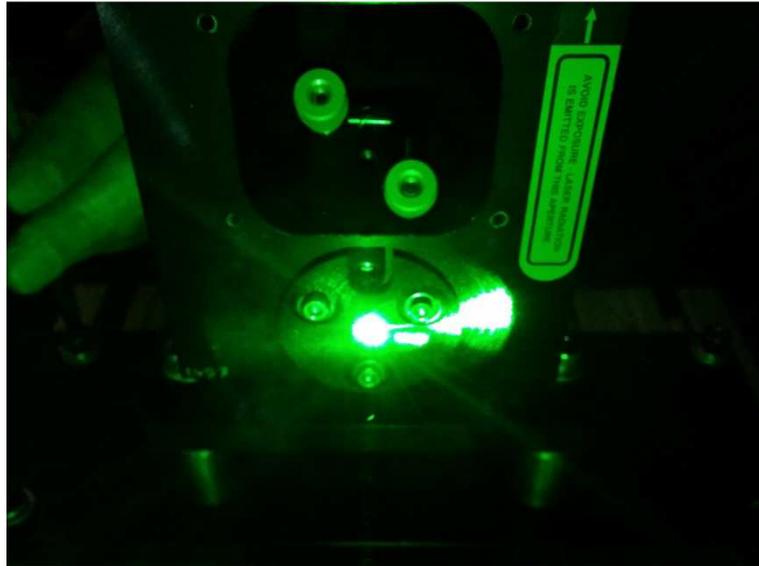


Abbildung 41: Grobpositionierung der Base mit Hilfe der Deckplatte

Nach dem Montieren der Sicherheitsabdeckung wird der Laser durch Stellschrauben an der Base vertikal kalibriert, wobei die grobe Justierung zunächst über die horizontal verschiebbare obere Deckplatte an der Base erfolgt (Abbildung 43) und im Anschluss durch Feinjustierung mit Hilfe eines Kalibrierrohrs durchgeführt wird. Nach Montage des Kalibrierrohrs auf die Base an die Stelle der oberen Deckplatte können durch Feinjustierung mit den in der Base integrierten Umlenkspiegeln ein optimal vertikal austretender Laserstrahl eingestellt werden. Beim Justieren wird der Laser von unten nach oben durch zwei kleine Öffnungen auf zwei Ebenen geleitet. Geht der Laser an einer LÖcher nicht exakt zentral durch so trifft er auf eine Ebene und erhellt diese, der Laser ist exakt vertikal zentriert wenn keine der Ebenen sichtbar hell erscheint.



Abbildung 42: Base mit oberer Deckplatte

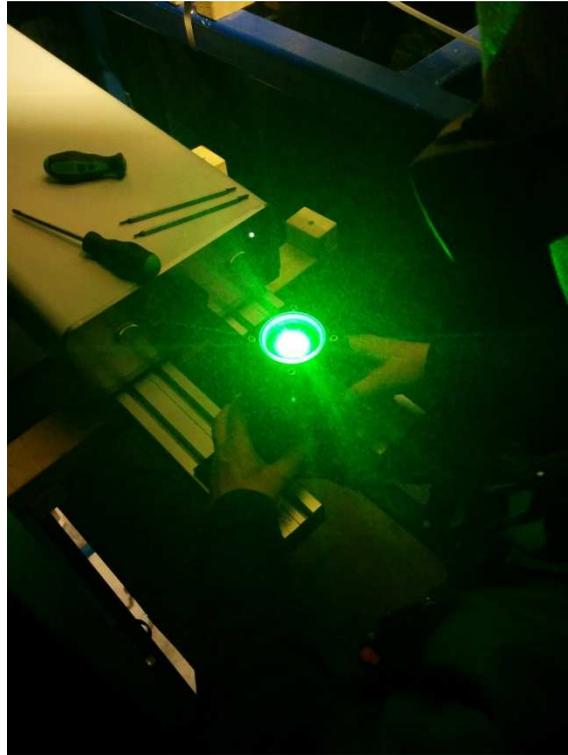


Abbildung 43: Justierung der Base mit Hilfe der oberen Deckplatte

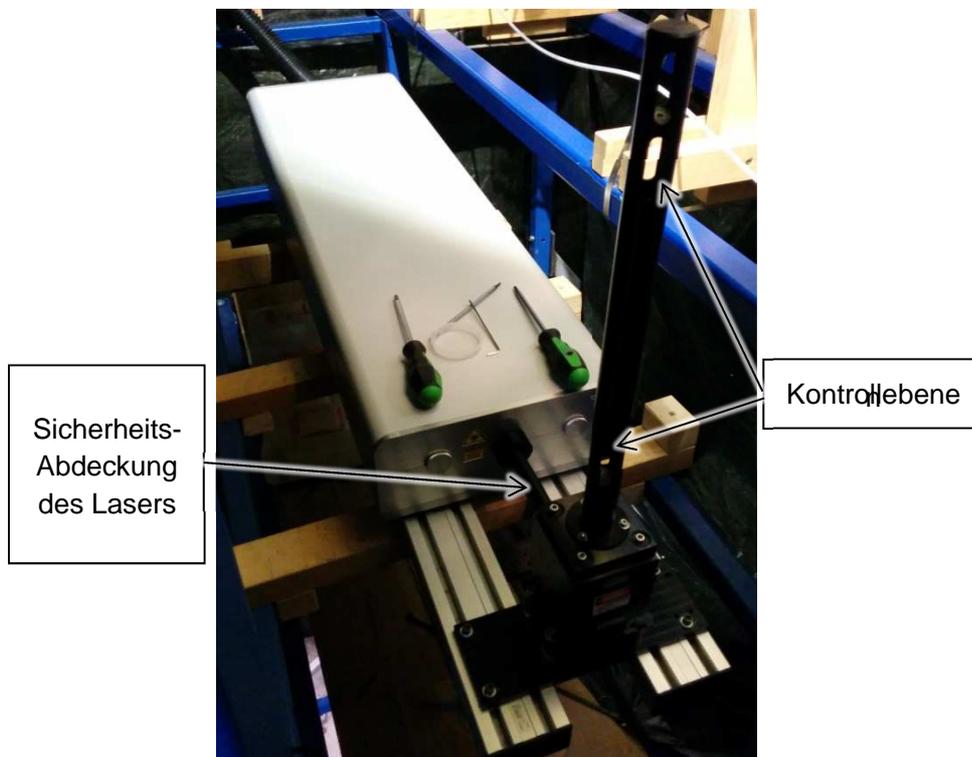


Abbildung 44: Laser, Schutzabdeckung, Base und Kalibrierrohr

Nach Justierung des Laserausgangs und des Laser-Arms muss die Messebene des Lasers noch im vordefinierten Abstand zur CCD-Kamera fokussiert werden. Die Fokussierung der Ebene erfolgt wie auch die Kalibrierung der Auswertesoftware über eine eigens angefertigte Messlatte, welche für diesen Zweck temporär in den Schacht eingebracht wird.

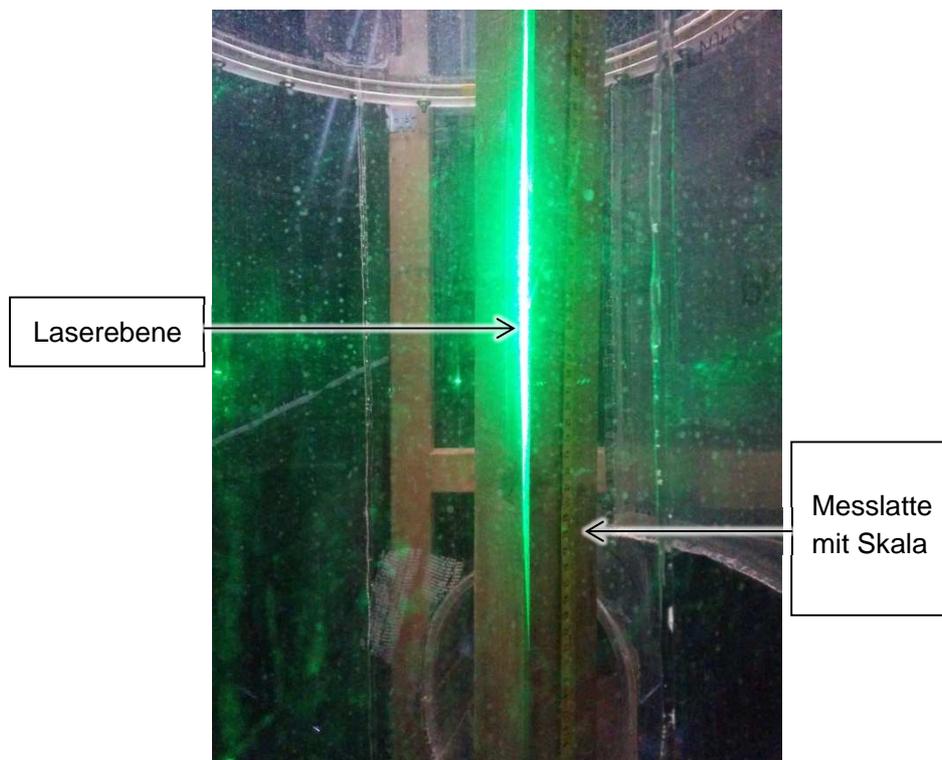


Abbildung 45: Fokussierung der Messebene im Schacht

5.4.6 Kalibrierung der Auswertesoftware – Dynamic Studio

Vor Verwendung der Auswertesoftware Dynamic Studio wird das verwendete Aufnahmemedium (CCD-Kamera) auf die geplante Ebene im Schacht fokussiert. Dies erfolgt mit Hilfe einer Messlatte, die im vorher festgelegten Abstand zur CCD Kamera im Schacht platziert wird. Nachdem der Schacht mit Wasser befüllt wird (Abbildung 46) kann ein „Calibration-File“ mit Hilfe von Dynamic-Studio erstellt werden (Abbildung 47) mit der die Kamera mit Hilfe des an der Messlatte fokussiert wird. Durch Auswahl zweier bekannter Punkte am Maßband kann die Software und Kamera kalibriert werden (Abbildung 48). Somit wird gewährleistet, dass der Abstand und somit auch die Geschwindigkeit der aufgenommenen Luftblasen der durchgeführten Messungen im richtigen Maßstab ausgegeben werden.



Abbildung 46: Befüllen des Schachtes für Kalibriervorgang mit Messlatte

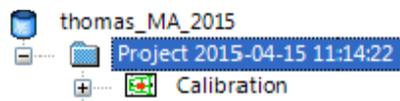


Abbildung 47: Calibration - File

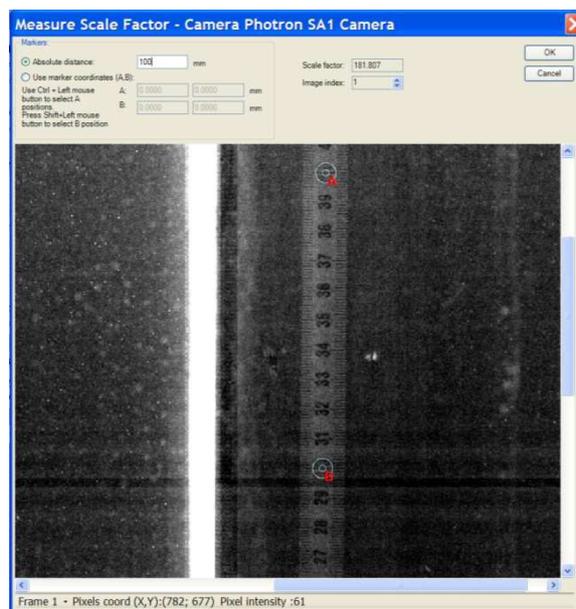


Abbildung 48: Kalibrieren der Software

5.5 Betrachtete Lastfälle am Modell

Es werden Lastfälle mit und ohne eingebautes Dämpfungselement in der Kopfkaverne betrachtet. Die beiden ersten Lastfälle (LF1a und LF1b) stellen Messungen mit eingebautem Dämpfungselement in der Kopfkaverne dar (Abbildung 49), die anschließenden Lastfälle (LF2a, LF2b und LF2c) beschreiben Messungen ohne eingebautem Dämpfungselement in der Kopfkaverne. Zur besseren Lenkung des Wasserstrahles im Modell in die Messebene wurde während den Beobachtungen und Messungen temporär eine Prallwand eingebaut (Abbildung 50).

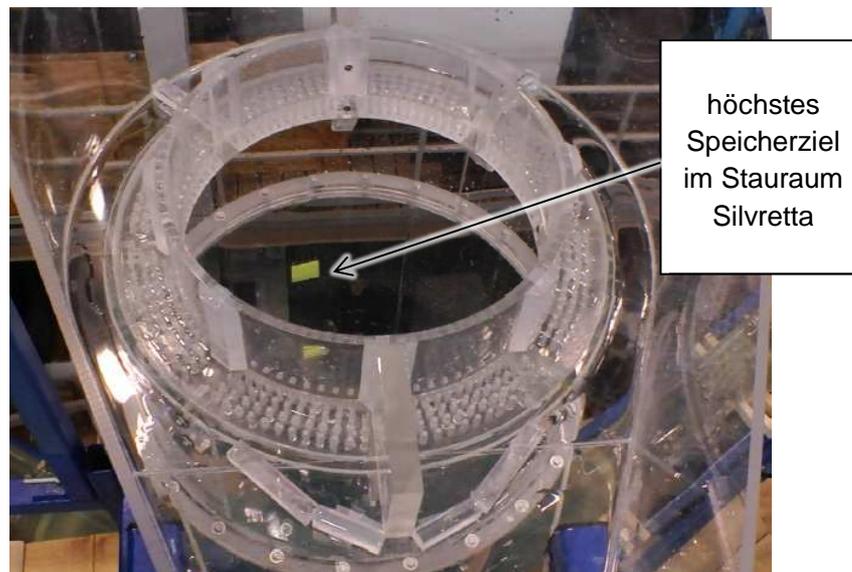


Abbildung 49: Kopfkaverne mit Dämpfungselement und Messlatte (Zenz, et al., 2014)

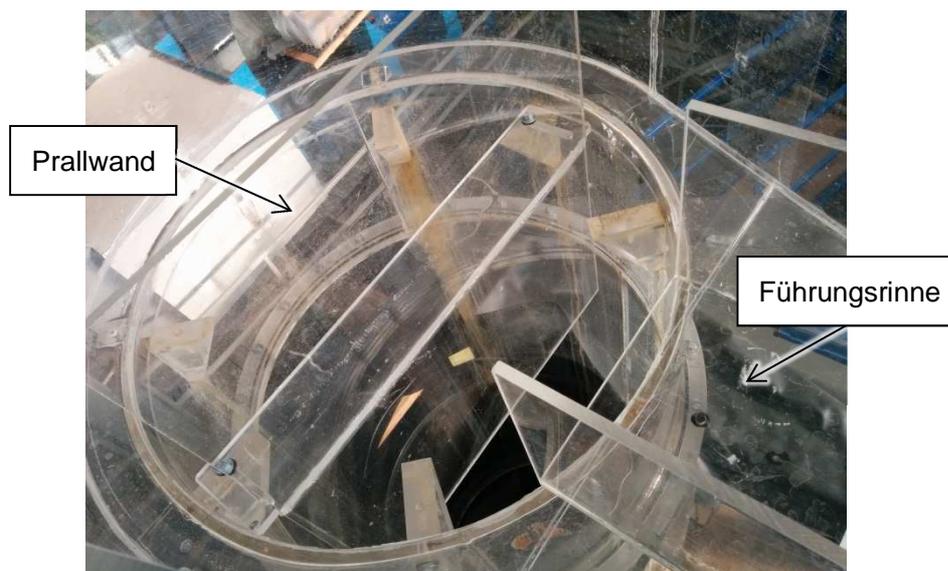


Abbildung 50: Umbau der Kopfkaverne - Führungsrinne und Prallwand

5.5.1 Kurzbeschreibung der betrachteten Lastfälle

- LF1a: 2000 müA (Dämpfungselement in der Kopfkaverne)

Der Wasserspiegel im Steigschacht liegt auf Höhenkote 2000 müA. Die Messung der Luftblaseneindringtiefe mittels PIV wird im Aufnahmebereich der CCD-Kamera durchgeführt. Die erhaltenen Messergebnisse des LF1a werden zur Ermittlung der Lufteindringtiefe im Modell und damit zur Konkretisierung von LF1b herangezogen.

- LF1b: 2023 müA (Dämpfungselement in der Kopfkaverne)

Der Wasserspiegel im Steigschacht liegt auf Höhenkote 2023 müA. Die Messung der Lufteindringtiefe erfolgt unter das Luftblasenpolster das durch den herabfallenden Wasserfall aus der Oberkammer entsteht. Die erhaltenen Daten des aktuellen Lastfalls können zur Übertragung der Lufteindringtiefe für den Prototyp verwendet werden.

- LF2a: 2006 müA (ohne Dämpfungselement mit Prallwand in der Kopfkaverne)

Der Wasserspiegel im Steigschacht liegt auf Höhenkote 2006 müA. Es erfolgt eine Betrachtung der Eindringtiefe des durch den Wasserfall entstehenden Luftblasenpolsters bei konstantem Wasserspiegel im Aufnahmebereich der CCD-Kamera. Die Messergebnisse aus LF2a werden zur Ermittlung der Eindringtiefe der Luftblasen im Modell verwendet.

- LF2b: 2023 müA (ohne Dämpfungselement mit Prallwand in der Kopfkaverne)

Der Wasserspiegel im Steigschacht liegt auf Höhenkote 2023 müA. Die Messung der Geschwindigkeit der Luftblasen im Betrachtungsbereich erfolgt bei konstantem Wasserspiegel. Durch den zu erwartenden kompakteren Wasserfall ist zu erwarten, dass eine größere Eindringtiefe der Luftblasen als im LF1b mit eingebautem Dämpfungselement vorherrscht.

- LF2c: 2043 müA (ohne Dämpfungselement mit Prallwand in der Kopfkaverne)

Der Wasserspiegel im Steigschacht liegt auf Höhenkote 2043 müA. Der betrachtete Lastfall stellt den maßgebenden Lastfall für das Wasserschloss der vorhergehenden numerischen Berechnungen dar. Es ist davon auszugehen dass durch den kompakten Jet und den auf Grund der geringen Fallhöhe noch nicht abgerissenen Wasserfall die größte Eindringtiefe der Luftblasen resultiert.

Die folgende Schemaskizze (Abbildung 51) zeigt einen Überblick des verwendeten Modells des Wasserschloss Krespa, sowie die für die verschiedenen Messungen der Lastfälle notwendigen Wasserstände. Die Messungen der Lastfälle erfolgen mit konstanten Wasserspiegeln.

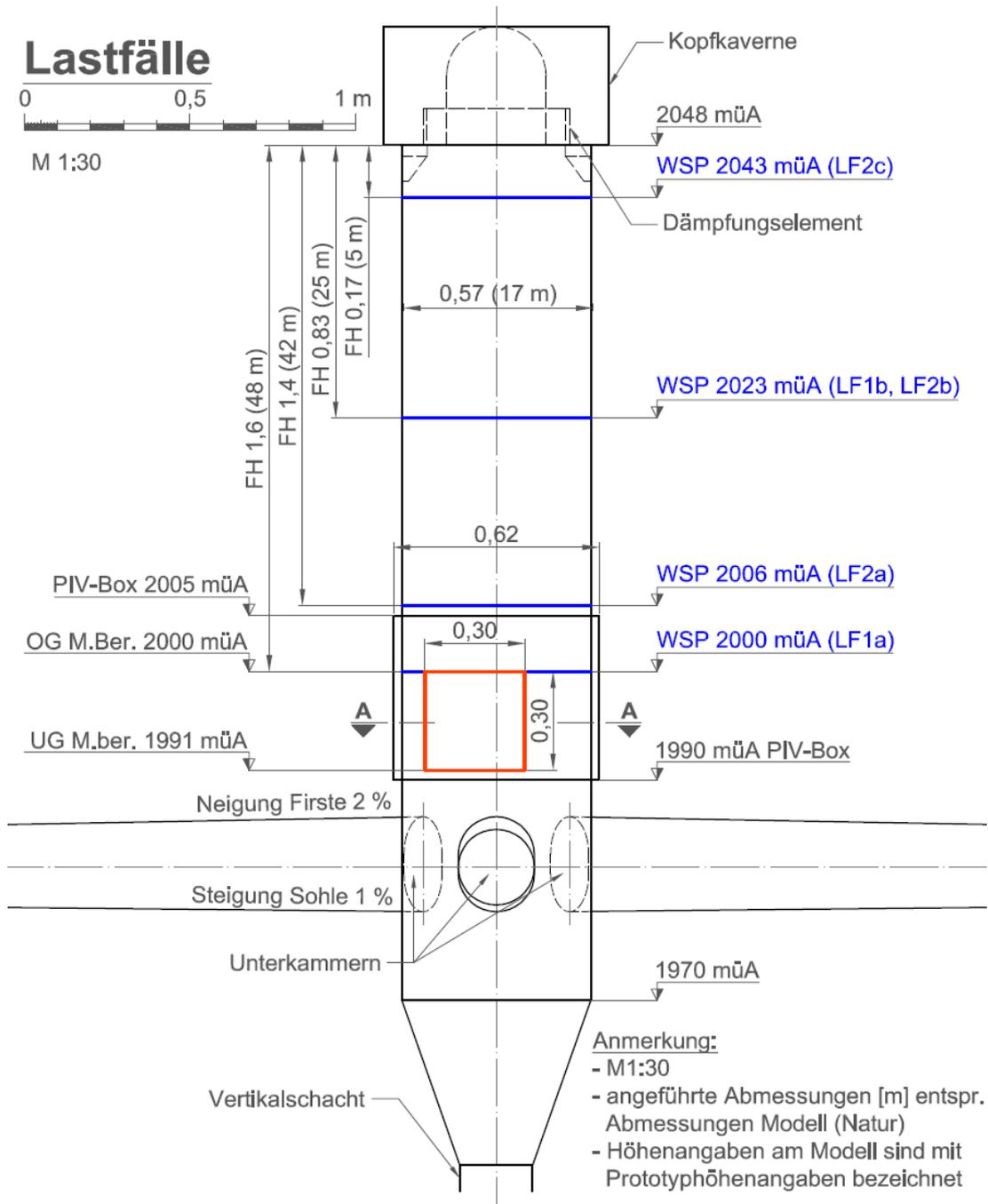


Abbildung 51: Schemaskizze der betrachteten Lastfälle (LF1a - 2000 müA, LF1b - 2023 müA, LF2a - 2006 müA, LF2b - 2023 müA, LF2c - 2043 müA)

Das folgende Diagramm (Abbildung 52) zeigt den Zusammenhang von Durchfluss und Wasserstand im Wasserschloss bei stoppen des Durchflusses im Unterwasser.

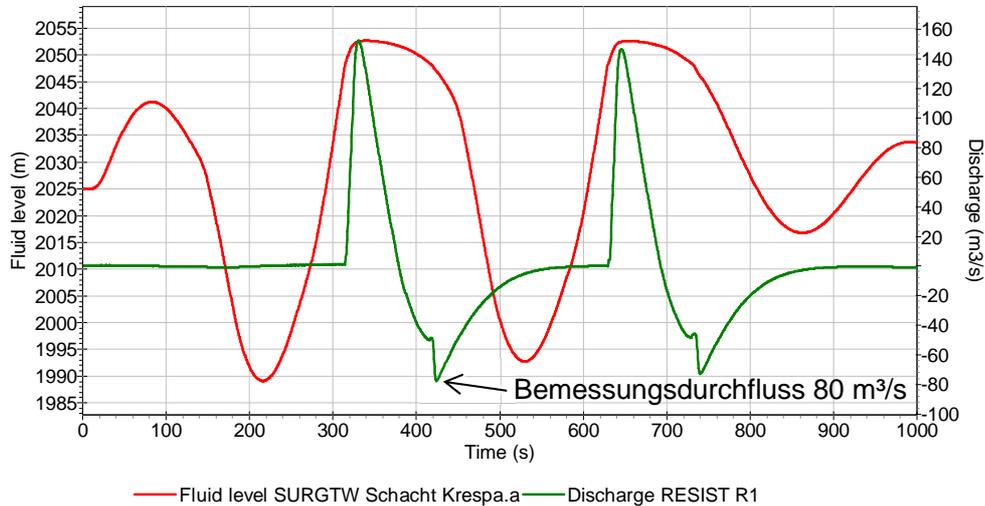


Abbildung 52: Wasserstände und Durchflüsse am Wasserschloss

Die Umrechnung der Durchflüsse in der Natur zu jenen im Froude'schen Modellmaßstab erfolgt durch:

$$Q_M = \frac{Q_N}{M_Q} = \frac{15 \frac{m^3}{s}}{30^{\frac{5}{2}}} = 0,003042 \frac{m^3}{s} \quad (24)$$

Tabelle 8: Durchflüsse der betrachteten Lastfälle

Lastfall	WSP [müA]	Q [m³/s]	Q [l/s]
1a	2000	15	3,04
1b	2023	30	6,09
2a	2006	15	3,04
2b	2023	30	6,09
2c	2043	80	16,23

5.5.2 Darstellung der Messungen über Vektorplots

Die zur Darstellung der Geschwindigkeitsverteilung der Luftblasen erfolgt durch mit Hilfe der Software Matlab© erstellte Vektorplots. Der Betrachtungsbereich besitzt etwa 30 cm Höhe, die Grenzen des Vectorplots liegen an der unteren Abgrenzung des Bildes auf etwa 1991 mÜA und auf der oberen Abgrenzung des Bildes auf etwa 2000 mÜA. Eine Kontrolle vor Messbeginn zeigt, dass Luftblasen des Lastfall 2b und Lastfall 2c unter das etwa 30 cm hohe Beobachtungsfeld abtauchen. Um trotz hoher Turbulenzen des eindringenden Jets eine genaue Geschwindigkeitsverteilung im unteren Bereich des Beobachtungsfeldes erhalten zu können ist der Laser für die Messungen der beiden Lastfälle auf das untere Drittel des Beobachtungsfeldes fokussiert.

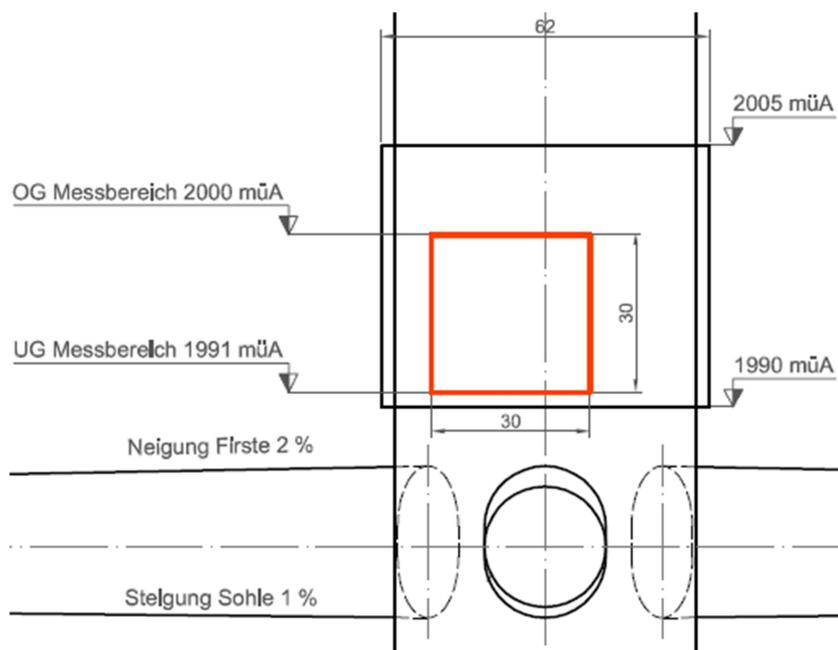


Abbildung 53: Beobachtungsfeld für die PIV – Messungen in der PIV - Box

Die dargestellten Vektorplots entsprechen jeweils genau einem bestimmten Zeitpunkt einer Messung, die Auswertung der Vektoren ist über die über den Bildern angebrachte Farbskalar in absinkender Richtung dargestellt. Die durch die Luftblasen im Wasser erzeugten Geschwindigkeitsvektoren sind für den jeweils betrachteten Lastfall skaliert dargestellt sodass gewährleistet ist, dass sich die für die Betrachtung wichtigen Bereiche farblich leicht erkennbar vom Hintergrund abheben. Lastfall 1a und Lastfall 2a werden auf Grund der hohen Geschwindigkeiten der großen Luftblasen im Bereich von $\pm 0,5$ m/s skaliert dargestellt, Lastfall 1b ist auf Grund der niedrigen Geschwindigkeiten auf $\pm 0,1$ m/s skaliert. Lastfall 2b ist wegen der noch hohen Geschwindigkeiten der kleinen Luftblasen im Beobachtungsfeld auf $\pm 0,2$ m/s skaliert, Lastfall 2c ist auf $\pm 0,1$ m/s (teilweise auf Grund von Messungen mit hohen Geschwindigkeiten auf $\pm 0,2$ m/s) skaliert dargestellt.

Die für die Betrachtung der maximalen Eindringtiefe aussagekräftigen Parameter sind auf den Bildern farblich zu erkennen. Als Beispiel dient Lastfall 1a (Abbildung 54), die

jeweils türkisen bis hellgrünen Bereiche der Vektorplots stellen Vektoren mit Geschwindigkeiten im Bereich von etwa 0,2 m/s dar, diese Bereiche können als Endgeschwindigkeiten des eindringenden Jets in Abwärtsrichtung in maximaler Eindringtiefe der Luftblasen gesehen werden.

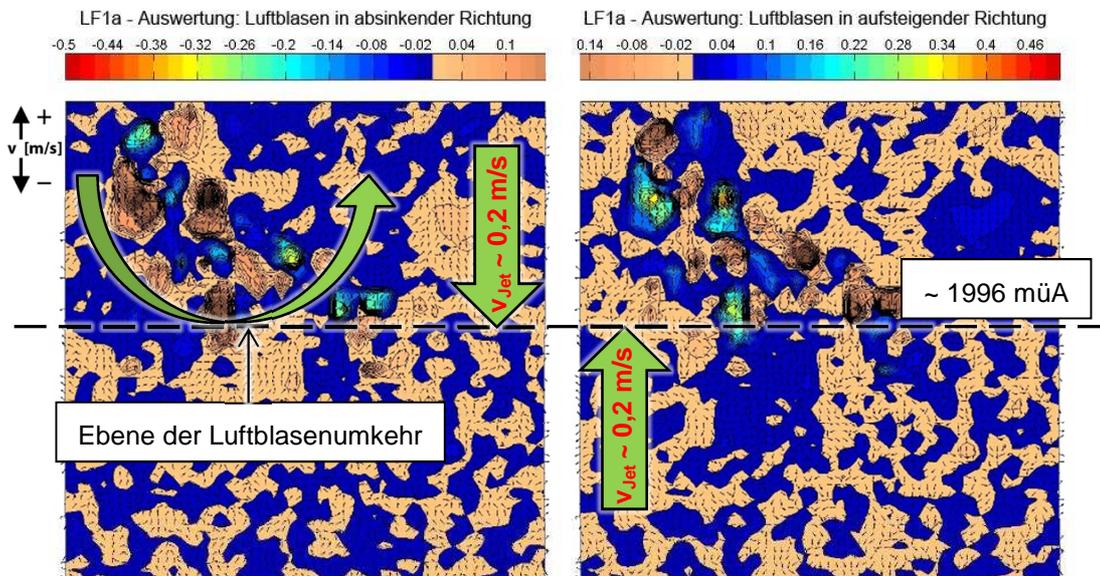


Abbildung 54:LF1a - 0326_142131#02 - Vergleich eines Vektorplots vertikaler Geschwindigkeit in aufsteigender und absinkender Richtung ausgewertet

Das oben angeführte Bild (Abbildung 54) soll die Gegenüberstellung der Auswertungen eines Vektorplots in absinkender und aufsteigender Richtung zeigen. Eine Grenze der absteigenden Luftblasen wie auch der in diesem Bereich aufsteigenden Luftblasen mit Grenzgeschwindigkeit von etwa 0,2 m/s ist farblich klar erkennbar. Die maximale Eindringtiefe kann (neben wenigen Ausreißern) im Mittel auf etwa 4 m im Prototyp auf etwa 1996 müA eingegrenzt werden.

Die im Anschluss bei den Lastfällen abgebildeten Bilder zeigen die Auswertung der Vektorplots in absinkender Richtung, da hier die maximale Eindringtiefe der Luftblasen im Modell gut erkannt werden kann. Der Wasserfall im Lastfall 1a und Lastfall 1b dringt über das Dämpfungselement in den Schacht ein und wird somit ringförmig im Bereich der Wandung des Schachtes eingeleitet. Dies spiegelt sich in den Vektorplots wieder, da der Messbereich von der Schachtwand bis über die Achse des Schachtes reicht (Abbildung 38, Abbildung 53) und die höchste Geschwindigkeitsverteilung dieser Lastfälle am im linken Bereich der Vektorplots (also im Bereich der Schachtwand) vorzufinden ist.

Es muss beachtet werden, dass bei Anwendung des Froude'schen Modellgesetzes die Fließgeschwindigkeit des Wassers im Modell um den Maßstabsfaktor ($\sqrt{M_l}$) schneller als in der Natur dargestellt wird. Luftblasen können jedoch nicht im Maßstab verkleinert werden, besitzen also im Modell und in der Natur denselben Auftrieb, sie dringen also in der Natur erweitert um den Maßstabsfaktor tiefer ein als im Modell.

5.5.3 Lastfall 1a (konstanter Wasserspiegel auf 2000 müA)

Zu Beginn wird die eigentliche Eindringtiefe wie auch die Grenzgeschwindigkeiten der Luftblasen in der Natur gemessen. Dies erfolgt über den Lastfall 1a, der einen konstanten Wasserspiegel auf Höhe 2000 müA am Modell darstellt. Es wird eine Blaseneindringtiefe von etwa 4 m an dem am Modell angebrachten Maßstab festgestellt (Eindringtiefe Prototyp), dies entspricht einer Eindringtiefe von etwa 15 cm am Modell (Abbildung 56).

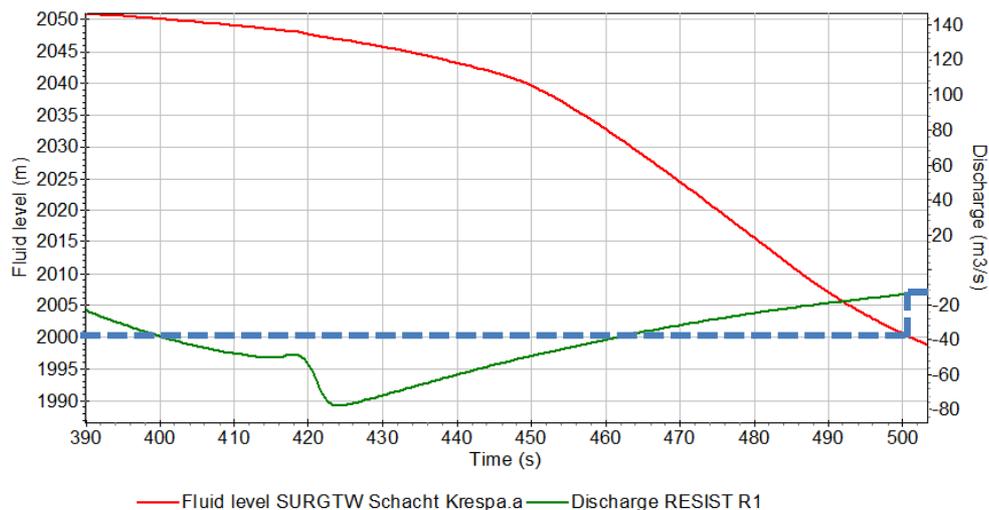


Abbildung 55: Durchfluss für Lastfall 1a (2000 müA)



Eindringtiefe
ca. 4 m

Abbildung 56: Luftblaseneindringtiefe LF1a

$$\text{Blaseneindringtiefe } t_M = \frac{t_{\text{Maßstab}}}{30} = \frac{4,5 \text{ m}}{30} = 0,15 \text{ m} = 15 \text{ cm} \quad (25)$$

Durch Untersuchungen des Lastfall 1a mit Hilfe des PIV kann in der zu erwartenden Tiefe von etwa 12 cm bis 15 cm die Grenzgeschwindigkeit von 0,2 m/s und somit der Bereich der maximalen Eindringtiefe gemessen werden. Eine Grenzgeschwindigkeit von 0,2 m/s in der Natur entspricht im Froude'schen Maßstab eine Grenzgeschwindigkeit von etwa 0,0365 m/s. Auf Basis dieser Kennwerte kann über das Froude'sche Modelgesetz die zu erwartende Eindringtiefe der Luftblasen am Prototyp bei etwa 24 m ermittelt werden, welche durch Messungen am Modell bestätigt werden sollten (Blasen dringen in der Natur etwa um den Faktor $\sqrt{30} = 5,48 [-]$ tiefer in den Schacht ein als im Modellversuch).

$$\text{Grenzgeschwindigkeit } v_{gr,M} = \frac{v_{gr,Natur}}{M_l} = \frac{0,2 \frac{m}{s}}{\sqrt{30}} = 0,0365 \frac{m}{s} \quad (26)$$

$$\text{Eindringtiefe in Natur} = t_{\text{Modell}} * M_l \approx 4,5 \text{ m} * \sqrt{30} \approx 24,6 \text{ m} \quad (27)$$

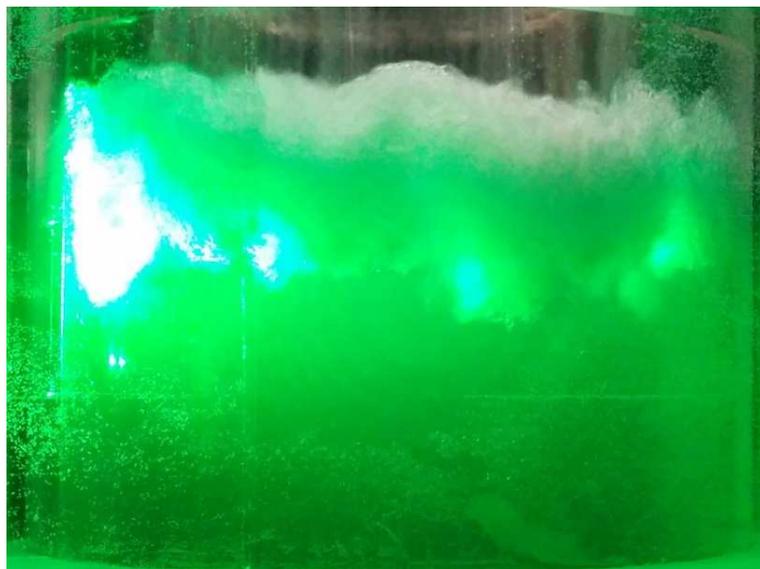


Abbildung 57: PIV-Messung von LF1a (von linker Seite eindringendes Laserlicht)

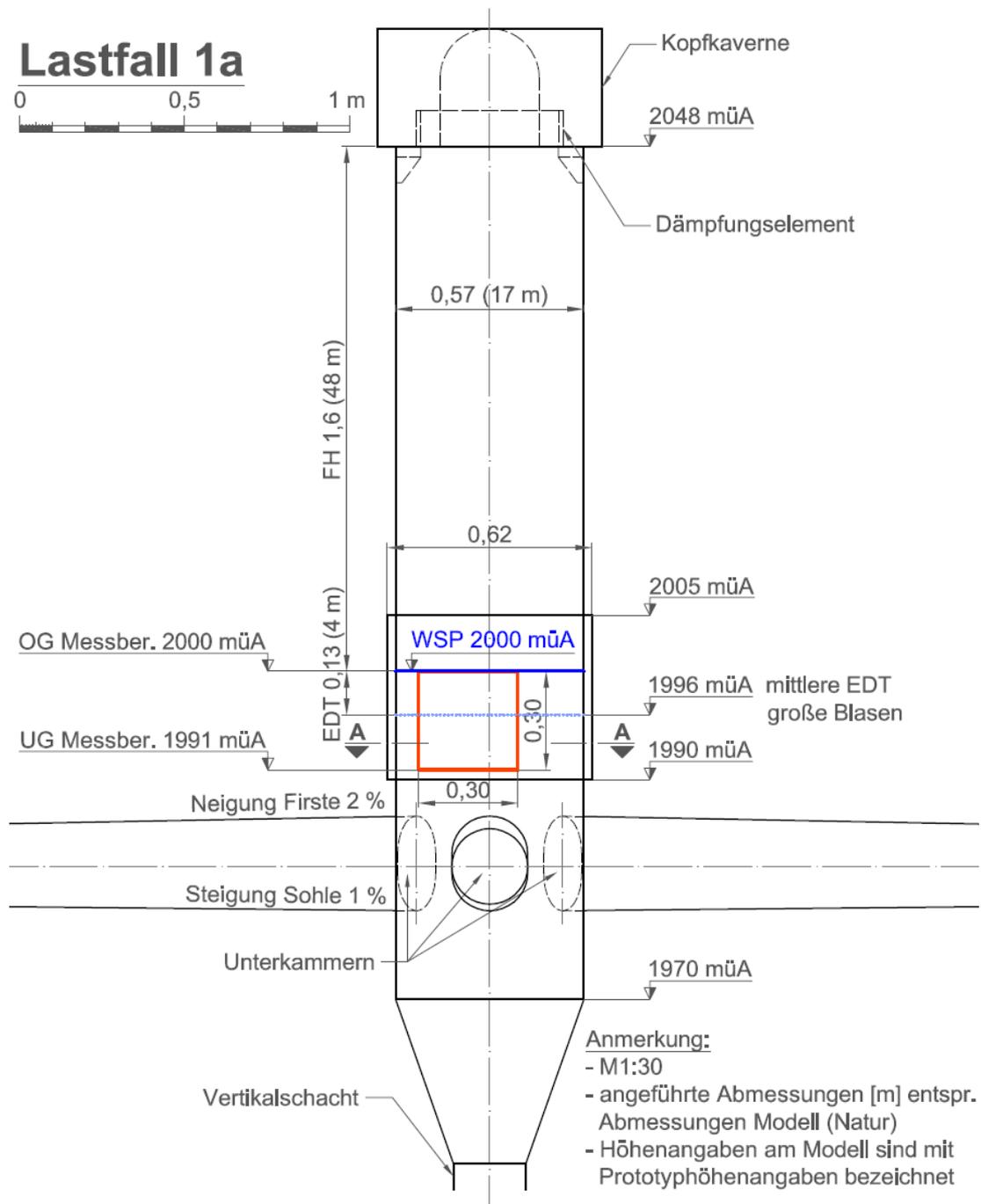


Abbildung 58: Schemaskizze Ergebnisse LF1a mit Dämpfungselement, WSP 2000 müA, Fallhöhe des Wasserfalls 1,6 m (48 m Prototyp), Q 3 l/s (15 m³/s Prototyp), EDT der Luftblasen ca. 4 m bis 4,5 m (22 m bis 25 m Prototyp)

Die gemessene maximale Eindringtiefe der Blasen beträgt etwa 12 cm bis 15 cm, dies ergibt im Modellmaßstab eine Eindringtiefe von ca. 4 m bis 4,5 m. Eine Eindringtiefe von etwa 4,5 m im Modell entspricht im Froude'schen Maßstab (durch Erweiterung um den Faktor 5,48 [-]) einer Eindringtiefe der Luftblasen in der Natur bis etwa 25 m (Prototyp).

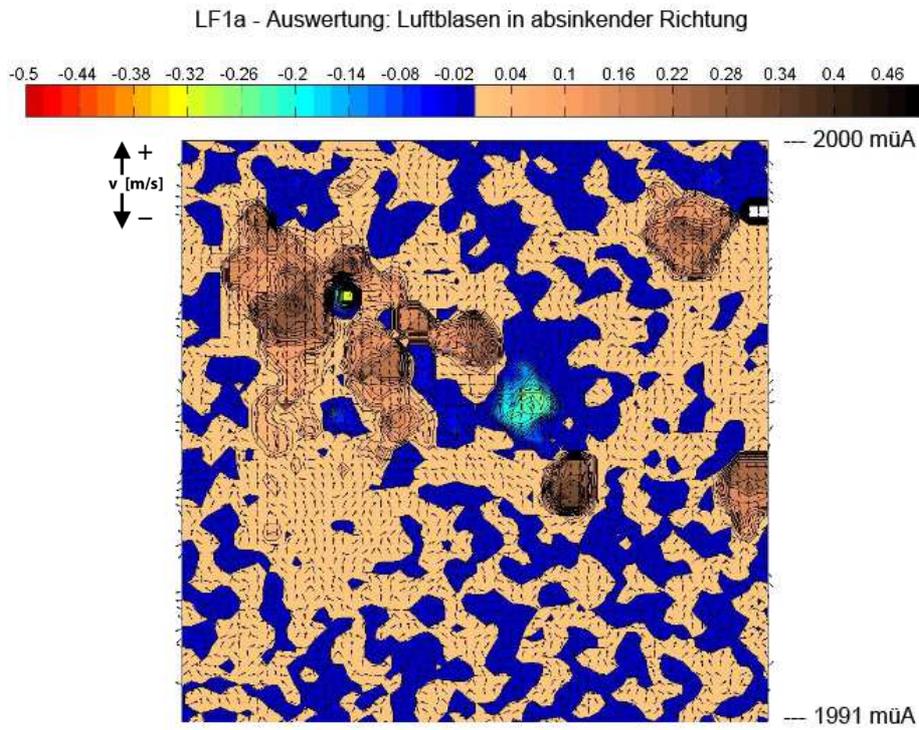


Abbildung 59: Vektorplot vertikaler Geschwindigkeitsverteilung - LF1a_0326_140759#27

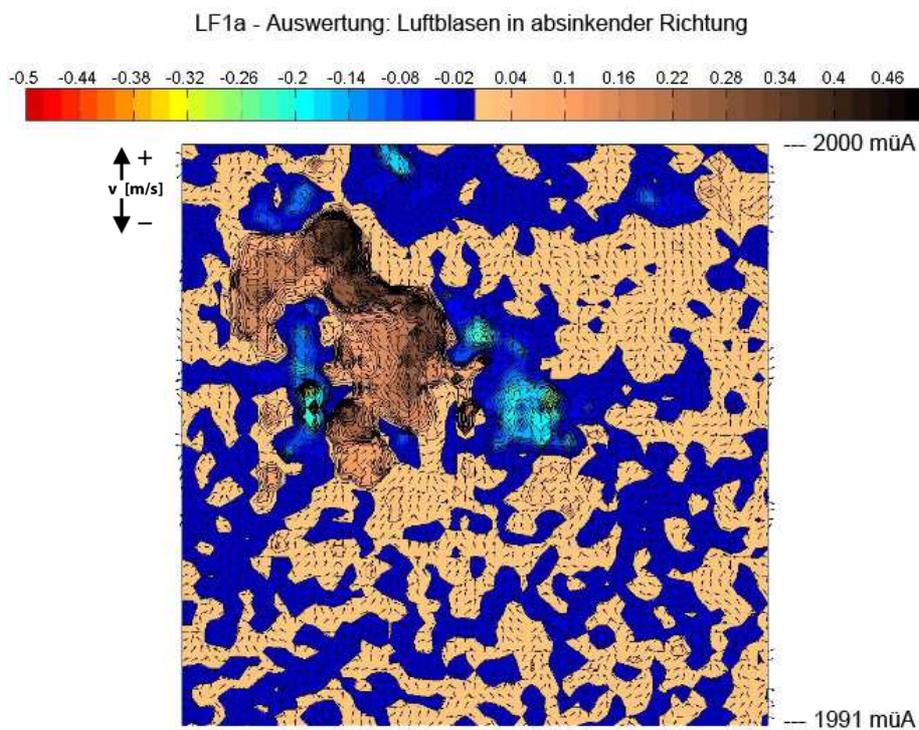


Abbildung 60: Vektorplot vertikaler Geschwindigkeitsverteilung - LF1a - 0326_142131#32

In Abbildung 61 ist eine Zusammenfassung aller mit Matlab ausgewerteten Vektorplots für den Lastfall 1a in absinkender Richtung dargestellt. Zugunsten der besseren Orientierung wurde der Bereich der aufsteigenden Luftblasen im Vektorplot ausgeblendet. Der Wasserspiegel befindet sich konstant auf 2000 müA. Die farblich dargestellten Bereiche zeigen eine Überlagerung aller einzelnen Vektorplots. Die maximale Eindringtiefe der Luftblasen ist bei einer Abwärtsgeschwindigkeit der Blasen von etwa 0,2 m/s erreicht (türkiser Bereich der Farbskala). Im Anschluss daran steigen die Luftblasen zufolge des Auftriebs wieder nach oben an die Wasseroberfläche. Eine Zuordnung der farblich dargestellten Bereiche zu den vorliegenden Geschwindigkeiten kann über die Skala ober dem Bild mit Maximum von 0,5 m/s erfolgen, die Eindringtiefe der Blasen kann über die vertikale Skala rechts bestimmt werden.

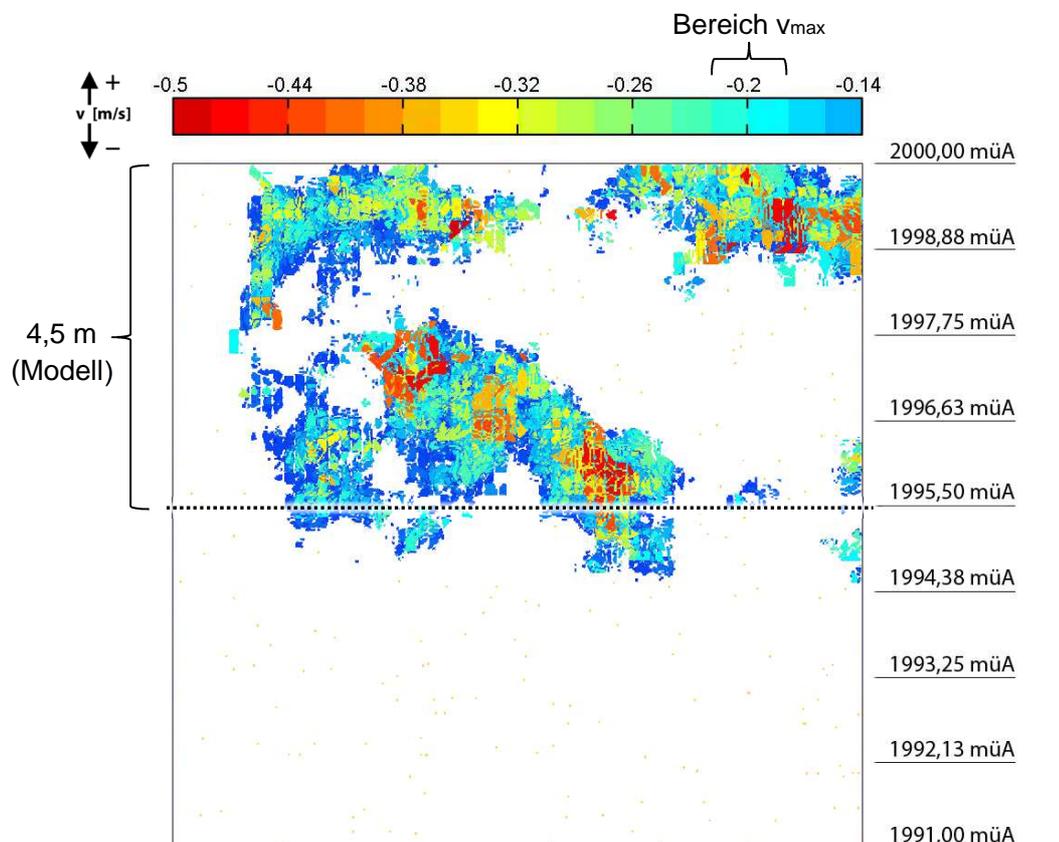


Abbildung 61: Zusammenfassung der Vektorplots für LF1a, vertikale Geschwindigkeiten, Fallhöhe Wasserfall 1,6 m (48 m Prototyp), Q 3 l/s (15 m³/s Prototyp), EDT Luftblasen im Mittel 4 m (22 m Prototyp) EDT Ausreißer bis ca. 5,5 m (30 m Prototyp)

Zufolge der Tatsache, dass sich Luftblasen nicht ausschließlich in vertikaler Richtung im Schacht auf und ab sondern auch horizontal in der Messebene bewegen und sich auf Grund der relativ hohen Endgeschwindigkeit untereinander beeinflussen sind auch im unteren Bereich der angezeigten Darstellung noch Bereiche hoher Geschwindigkeiten zu erkennen. Es kann daher keine alles umfassende Aussage über den Abstand der Bereiche der hohen Geschwindigkeiten zu den Bereichen der Endgeschwindigkeit der Luftblasen getroffen werden, es ist jedoch erkennbar, dass Luftblasen ihre maximale Tiefe bei einer maximalen Absinkgeschwindigkeit von etwa 0,2 m/s erreichen.

Der Arbeit vorhergehende Untersuchungen durch Videoanalysen und Messungen ergeben eine Eindringtiefe der großen Luftblasen von etwa 4 m am Modell. Aktuelle Messungen bestätigen, dass der Bereich der maximalen Eindringtiefe im Mittel bei etwa 4 m bis 4,5 m am Modell liegt, gelegentliche Ausreißer dringen tiefer unter die Wasseroberfläche ein (bei Abbildung 61 zu erkennen bis etwa 1994,5 müA am Modell). Tiefer eindringende Luftblasen sind unter anderem auf die Oberflächenfluktuation im Schacht zurückzuführen, die durch das Auftreffen der einzelnen Jets entsteht. Es ist erkennbar, dass sich kein starker Unterwasserjet ausbildet, die Luftblasen dringen über den Querschnitt verteilt relativ gleichmäßig bis auf eine Ebene ab. Das ist auf das Dämpfungselement, welches den Oberkammerschwall gleichmäßig auf den Schacht verteilt zurückzuführen.

5.5.4 Lastfall 1b (konstanter Wasserspiegel auf 2023 müA)

Zur Beobachtung wurde ein durch vorhergehende numerische Untersuchungen und Berechnungen ungünstiger Lastfall für das Wasserschloss herangezogen. Bei Stoppen der Turbine im Unterwasser steigt der Wasserspiegel im Schacht zunächst auf knapp über 2040 müA, sinkt im ersten Rückfluss ab und steigt danach im Anschluss bis über 2050 müA und somit in die Oberkammer an. Als Lastfall für die Vergleichsmessungen wird jener Wasserspiegel betrachtet, der sich beim nun anschließenden Absenken des Wasserspiegels mit sich einstellendem Wasserfall aus der Oberkammer im Schacht auf 2023 müA einstellt.

Das folgende Diagramm zeigt den für die die betrachteten Lastfälle wichtigen Bereich des Verhaltens vom kompletten Schaltvorgang (Abbildung 62).

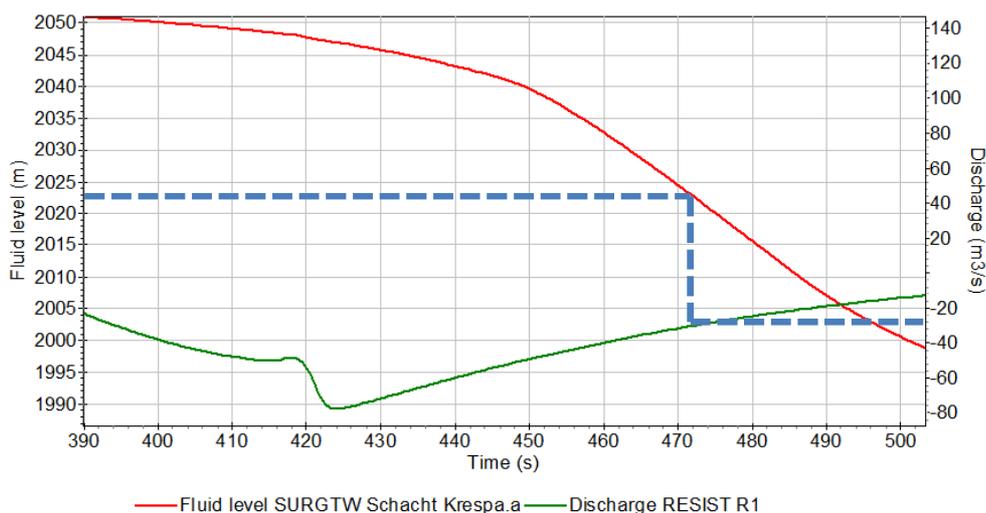


Abbildung 62: Durchfluss für Lastfall 1b (2023 müA)

Im aktuellen Lastfall wird der Zustand beobachtet, bei dem sich Abwärts- und Auftriebskräfte skaliert im Froude'schen Maßstab einander aufheben. Es wird untersucht ob die im Lastfall 1a ermittelte Grenzgeschwindigkeit der absteigenden Luftblasen von 0,0365 m/s im Beobachtungsbereich, welcher den Bereich der maximal

erwarteten Eindringtiefe der Luftblasen in der Naturlage entspricht erreicht wird. Die beobachtete Ebene befindet sich im unteren Bereich der PIV-Box zwischen den Höhenkoten 1991 müA bis 2000 müA.



Abbildung 63: konstanter Pegel 2023 müA für Lastfall 1b

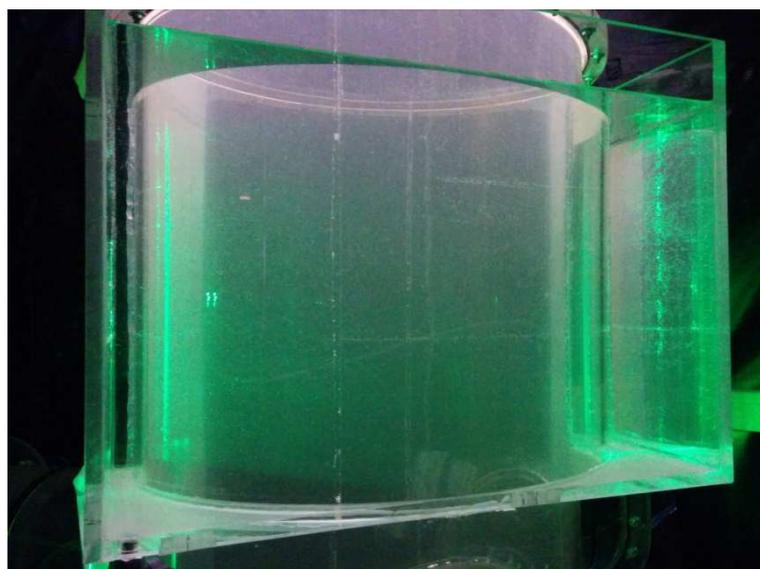


Abbildung 64: PIV-Messbereich bei Pegel 2023 müA

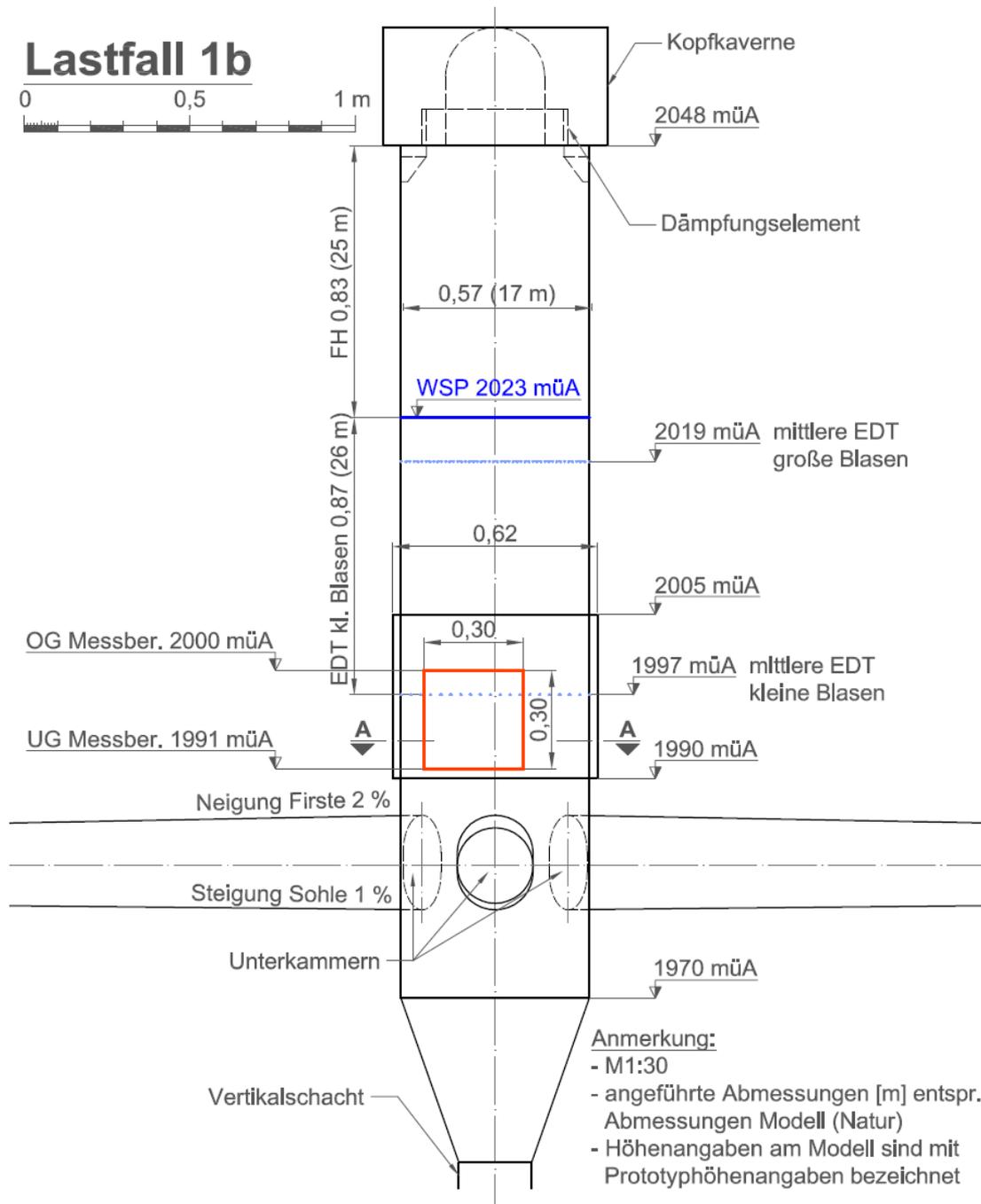


Abbildung 65: Schemaskizze Ergebnisse LF1b mit Dämpfungselement, WSP 2023 müA, Fallhöhe des Wasserfalls 0,83 m (25 m Prototyp), Q 6,1 l/s (30m³/s Prototyp), EDT kleiner Luftblasen ca.26 m (142m Prototyp)

Die ermittelten Annahmen, welche in Lastfall 1a über die maximale Eindringtiefe der errechneten im Froude'schen Modellmaßstab skalierten Absinkgeschwindigkeit bei Wasserspiegel 2023 müA getroffen wurden, können durch die Messungen bestätigt werden.

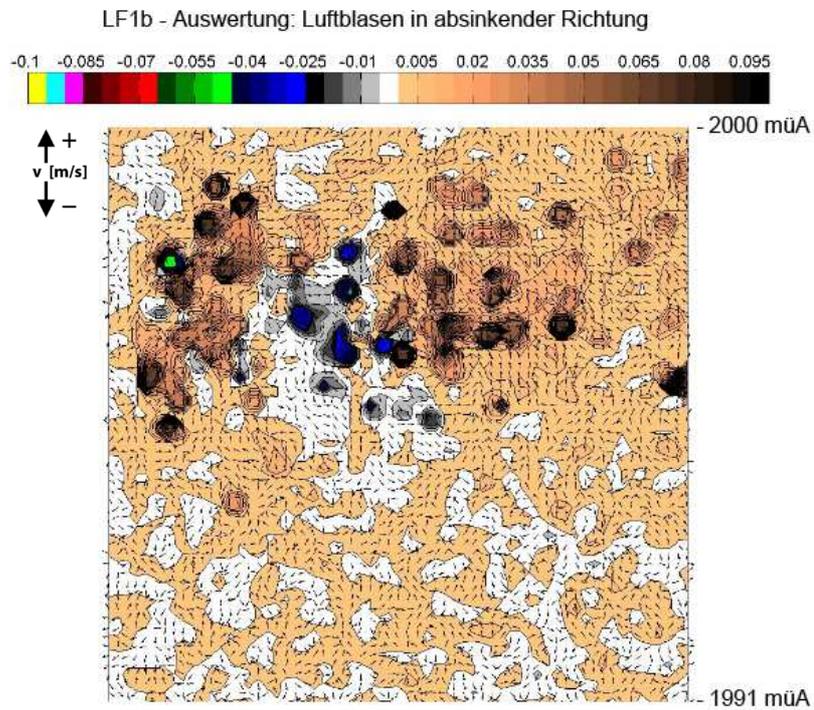


Abbildung 66: Vektorplot vertikaler Geschwindigkeitsverteilung - LF1b - 0331_133556#47

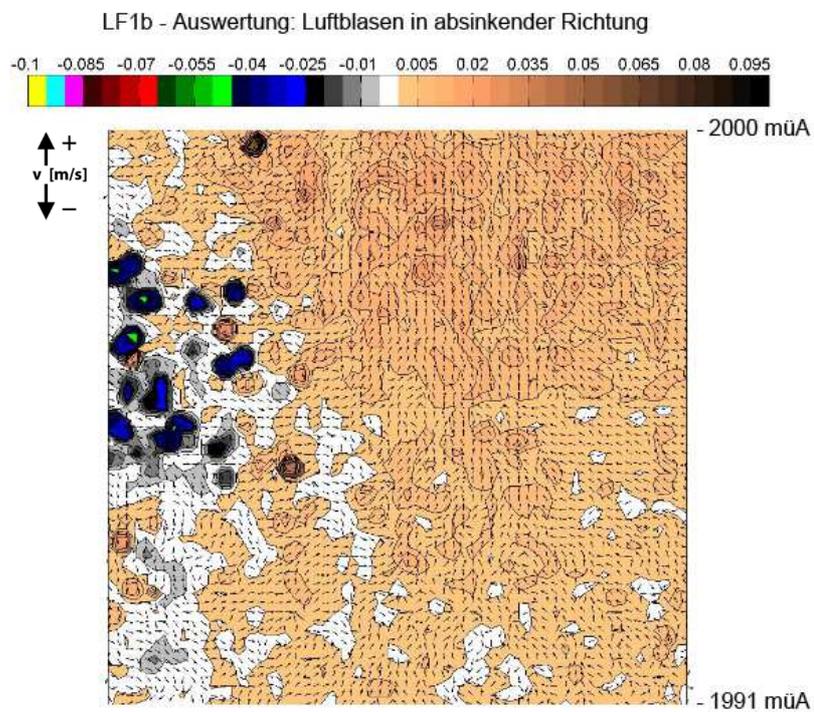


Abbildung 67: Vektorplot vertikaler Geschwindigkeitsverteilung - LF1b - 0427_093346#93

Die nachfolgende Darstellung (Abbildung 68) zeigt die Zusammenfassung der mit Matlab ausgewerteten Vektorplots bei konstantem Wasserspiegel auf 2023 müA. Der Fokus der Ansicht liegt auf der Endgeschwindigkeit bei etwa 0,0365 m/s (etwa 0,2 m/s im Prototyp). Auf Grund der geringen Geschwindigkeiten ist der Vektorplot auf ein die maximale Geschwindigkeit von 0,1 m/s in absinkender Richtung skaliert. Die farbliche Darstellung der maximalen Absinkgeschwindigkeit ist durch die blauen Bereiche im Plot erkennbar. Die Bereiche der aufsteigenden Vektoren, sowie zu geringe Geschwindigkeiten unter 0,03 m/s sind ausgeblendet. Die farblichen Bereiche im Bild sind Überlagerungen aller Vektorplots und symbolisieren die Absinkgeschwindigkeiten der Luftblasen, somit sind die maximal erreichten Tiefen der Blasen erkenntlich.

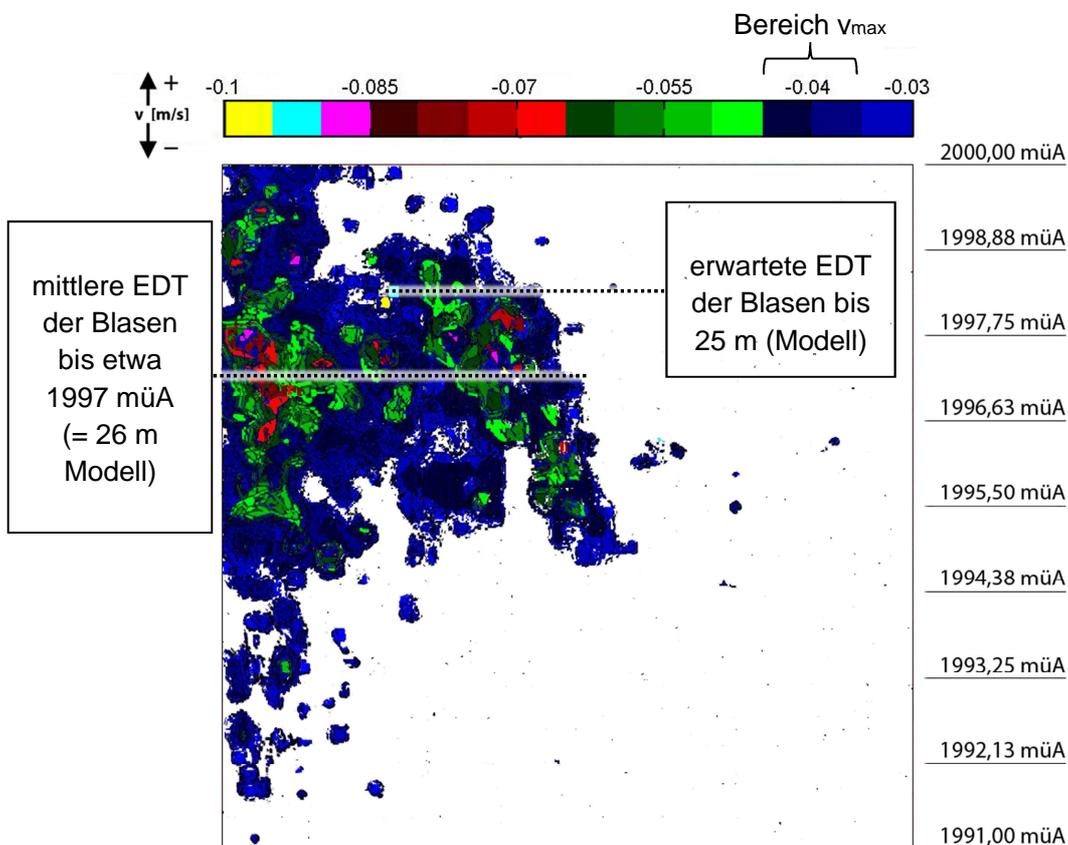


Abbildung 68: Zusammenfassung der Vektorplots für LF1b, vertikale Geschwindigkeiten, Fallhöhe des Wasserfalls 0,83 m (25 m Prototyp), Q 6,1 l/s (30 m³/s Prototyp), EDT Luftblasen im Mittel bei 1997 müA = 26 m (142 m Prototyp), EDT Ausreißer bis 1992 müA = 31m (170 m Prototyp)

In Lastfall 1a wurde anhand des Froude'schen Maßstab 1:30 die zu erwartende Eindringtiefe der großen Luftblasen in der Natur bis etwa 25 m am Modell ermittelt (entspricht einer Eindringtiefe bis etwa 4,5 m erweitert um den Faktor 5,48 [-]). Der aktuelle Lastfall dient der Ermittlung der maximalen Eindringtiefe der kleinen Luftblasen bei skaliertem Endgeschwindigkeit im verwendeten Maßstab. Die prognostizierte maximale Eindringtiefe der kleinen Blasen in dieser Tiefe kann in der Überlagerung aller Vektorplots erkannt werden. Die maximale Eindringtiefe der Blasen kann bei 25 m bis 27 m am Modell festgestellt werden, im Mittel dringen die Blasen bis auf das obere

Drittel des Messbereiches auf Höhe 1997 müA ab (entspricht 26 m am Modell). Ausreißer tauchen bis etwa 1992 müA ab (es ist auf Grund der geringen Geschwindigkeiten jedoch nicht auszuschließen, dass es sich hierbei um aufsteigende Luftblasen handelt welche nicht über die Oberkammer eingetragen wurden, sondern während der Messung aus dem Bereich unter dem Steigschacht des Modells aufsteigen und während dem Aufstieg kurzzeitig vom Unterwasserjet nach unten gedrückt worden sind). Die Situation des konstanten Wasserpegels erzeugt eine „walzenähnliche“ Einbringung der Blasen, welche im Bereich der Schachtwand (linke Seite der Messebene) absinken und im Bereich der Mitte des Schachts (rechte Seite der Messebene) wieder aufsteigen (es ist davon auszugehen, dass diese Situation im Betrieb durch einen ständig schwanken Wasserspiegel nicht eintritt).

5.5.5 Lastfall 2a (konstanter Wasserspiegel auf 2006 müA)

Für die folgenden Lastfälle wird das in den vorhergehenden Lastfällen eingebaute Dämpfungselement in der Kopfkaverne ausgebaut. Es wird am Übergang von Oberkammer zur Kopfkaverne eine Rinne eingebaut, welche sicherstellt, dass sich der Zufluss aus Oberkammer konzentriert in den Schacht entleert. Somit wird der Zustand ohne Kopfkaverne simuliert. Zur besseren Lenkung des Wasserfalls in die Beobachtungsebene wurde eine Prallwand angebracht die gewährleistet, dass der Wasserfall (Jet) im Bereich der Messebene auftrifft (Abbildung 69).

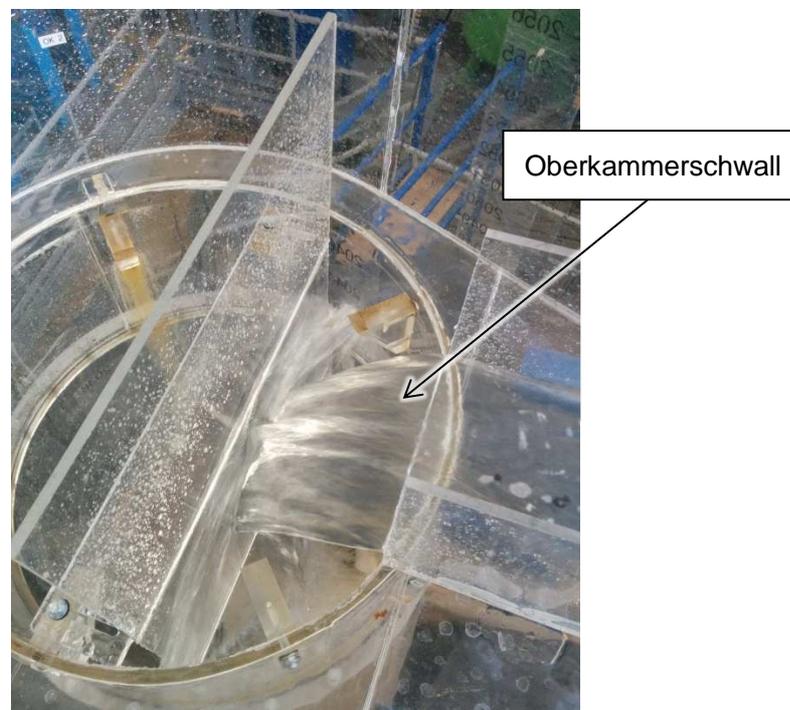


Abbildung 69: Lenkung des Zuflusses nach Ausbau des Dämpfungselements

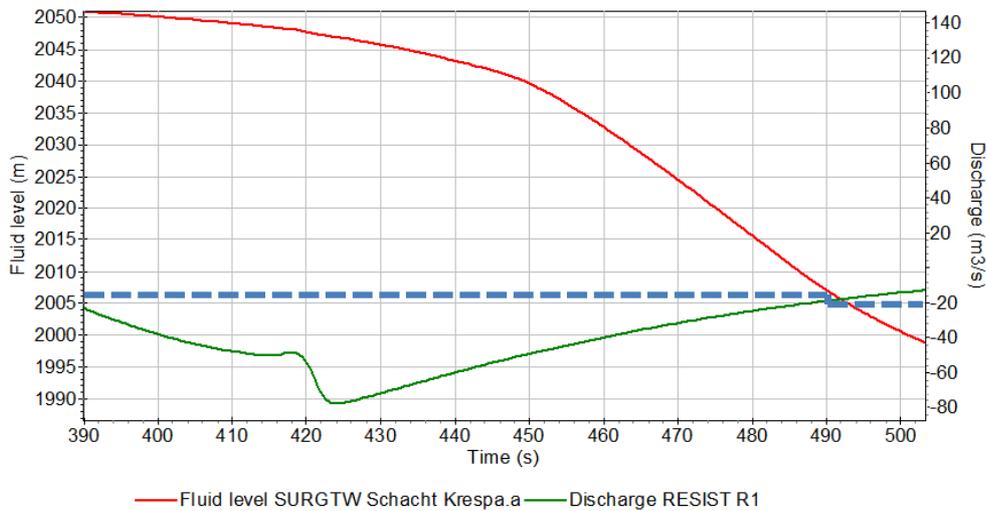


Abbildung 70: Durchfluss für Lastfall 2a (2006 müA)

Im aktuellen Lastfall wird die Eindringtiefe des großen Luftblasenpolsters bei konstantem Wasserspiegel von 2006 müA betrachtet. Zum Vergleich mit den vorhergehenden Lastfällen wird zuvor ein Wasserspiegel von 2000 müA eingestellt. Es kann sofort festgestellt werden, dass die Eindringtiefe der Luftblasen nicht wie bei vorigen Untersuchungen (mit eingebautem Dämpfungselement in der Kopfkaverne) bei etwa 4 m liegt, sondern unter den Betrachtungsbereich auf Höhe der Unterkammern gelangt (Abbildung 71). Durch die erhöhte Eindringtiefe der großen Blasen wird deshalb der Wasserspiegel auf Höhe von 2006 müA eingestellt, was gewährleistet, dass die maximale Eindringtiefe der Luftblasen im Beobachtungsbereich und Messbereich des PIV liegt.

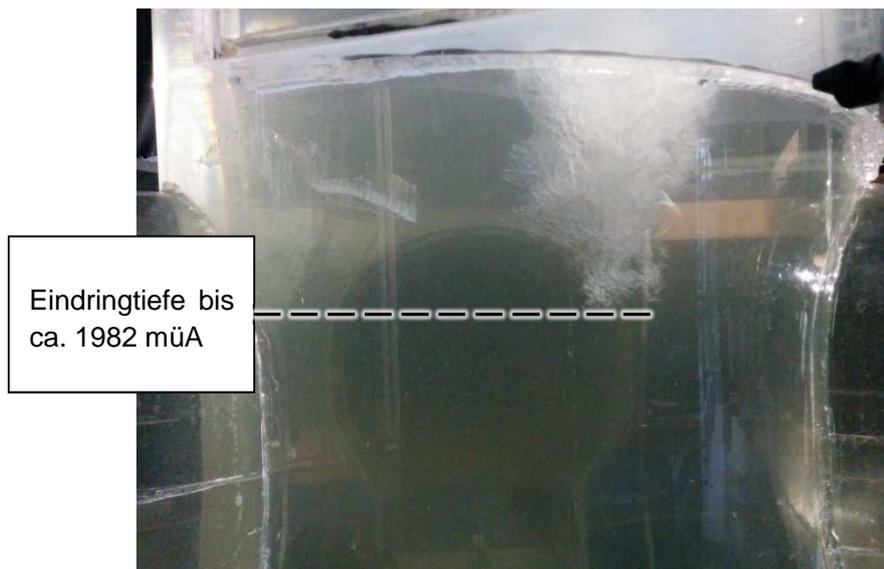


Abbildung 71: Luft eindringtiefe bei WSP 2000 müA ohne Dämpfungselement

Durch den kompakten Wasserfall ohne Dämpfungselement kann im Vergleich zu Lastfall 1a ein tieferes Eindringen des Luftblasenpakets beobachtet werden. Durch die

große Fallhöhe des Wasserfalls und die hohen Turbulenzen des Jets an der Atmosphäre reißt dieser jedoch vor Auftreffen auf die Wasseroberfläche ab und teilt den Wasserfall in einzelne nach unten stürzende Wasserpakete auf.

Die Eindringtiefe der Luftblasen wird durch den Jet selber begrenzt, da keine durchgehende Abwärtsbewegung sondern eine aneinander Folge von Jetstößen stattfindet. Durch diese Stöße werden Luftblasen teilweise stoßartig etwa 12 m bis 16 m (entspricht umgerechnet im Froude'schen Modellmaßstab einer Eindringtiefe von etwa 66 m – 88 m für den Prototyp) unter die Wasseroberfläche eingetragen. Nach Erreichen der maximalen Eindringtiefe durch die stoßartige Abwärtsbewegung tauchten die Blasen ruckartig auf und behinderten teilweise stark nachfolgende Stoßbewegungen, was einer gleichmäßige Abwärtsbewegung der Luftblasen durch den Jet gegensteuert.



EDT Modell:
ca. 12 m - 16 m

= EDT Natur:
ca. 66 m – 88 m

Abbildung 72: Luftblaseneindringtiefe LF2a mit WSP 2006 müA

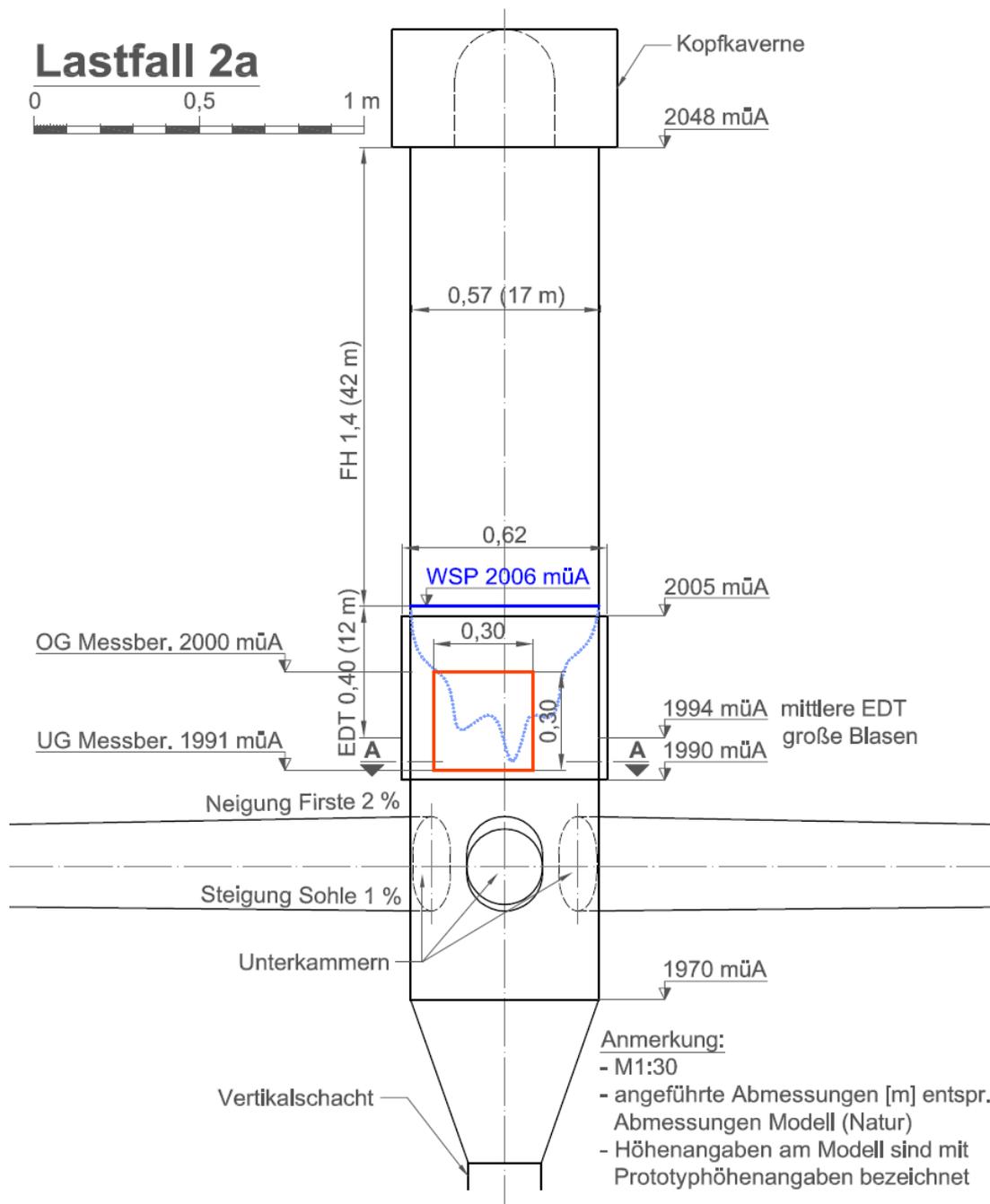


Abbildung 73: Schemaskizze Ergebnisse LF2a ohne Dämpfungselement, WSP 2006 müA, Fallhöhe des Wasserfalls 1,4 m (42 m Prototyp), Q 3 l/s (15 m³/s Prototyp), EDT Luftblasen stoßweise ca. 12 m – 16 m (66 m – 88 m Prototyp)

Ein Ausbau des Dämpfungselements bewirkt einen Anstieg der Eindringtiefe der Luftblasen unter die Wasseroberfläche um etwa das Dreifache (mit Dämpfungselement: Lastfall 1a = ca. 4 m, ohne Dämpfungselement: Lastfall 2a = ca. 12 m – 16 m).

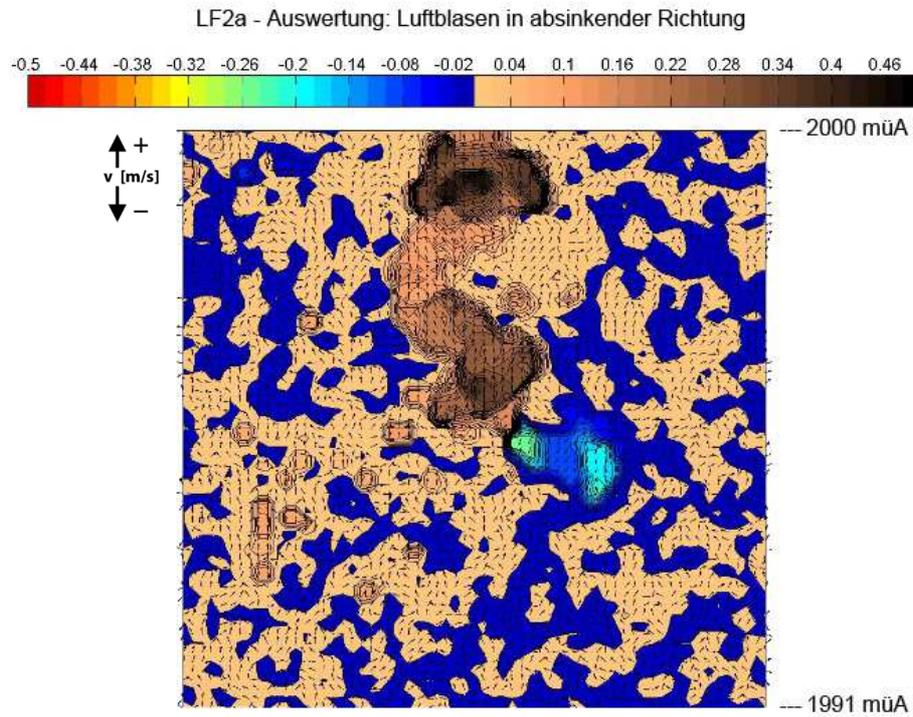


Abbildung 74: Vektorplot vertikaler Geschwindigkeitsverteilung - LF2a - 0609_151025#112

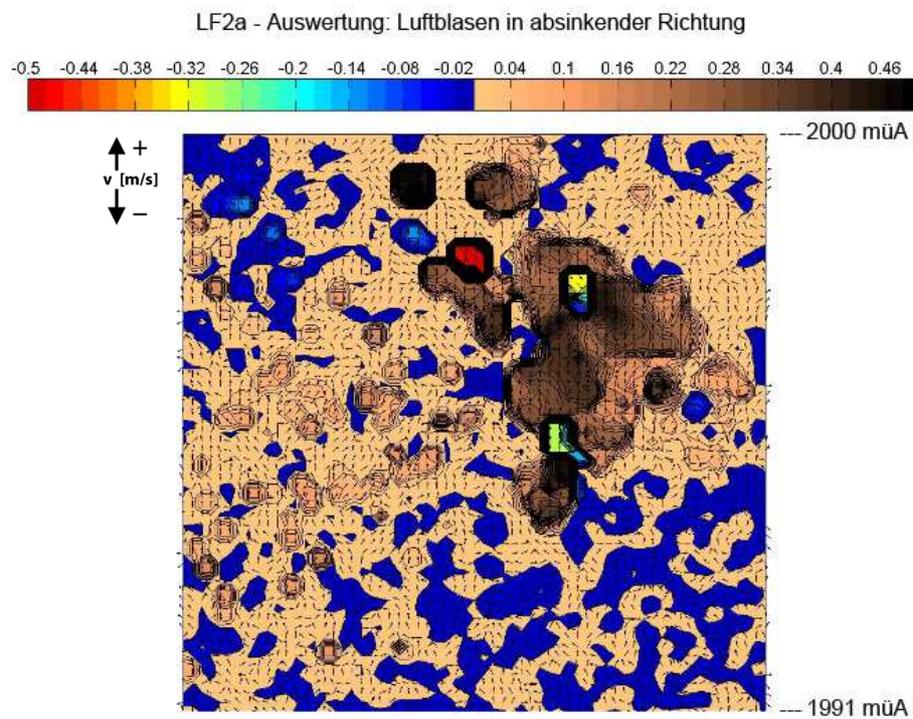


Abbildung 75: Vektorplot vertikaler Geschwindigkeitsverteilung - LF2a - 0609_155004#74

Nachfolgend ist eine Überlagerung aller mit Matlab ausgewerteten Vektorplots in absinkender Richtung dargestellt (Abbildung 76). Der Wasserspiegel für den Lastfall ist konstant auf 2006 müA eingestellt. Durch die Überlagerung der Messungen ist der Trend der eingedrungenen Luftblasen erkennbar, die maximale Eindringtiefe ist ersichtlich. Die im farblichen Bereiche im Bild sind eine Darstellung der jeweiligen Geschwindigkeiten der Vektoren mit Maximum von 0,5 m/s. Der Bereich der aufsteigenden Luftblasen ist ausgeblendet, was eine bessere Orientierung im Bild ermöglicht. Der Bereich der maximalen Absinkgeschwindigkeit der Luftblasen befindet sich bei etwa 0,2 m/s (türkiser Bereich der Farbskala). Die Zuordnung der angezeigten Farben zu den Geschwindigkeiten kann über die Skala ober dem Bild erfolgen, die Bestimmung der Eindringtiefe kann über die Skala rechts des Bildes gemacht werden.

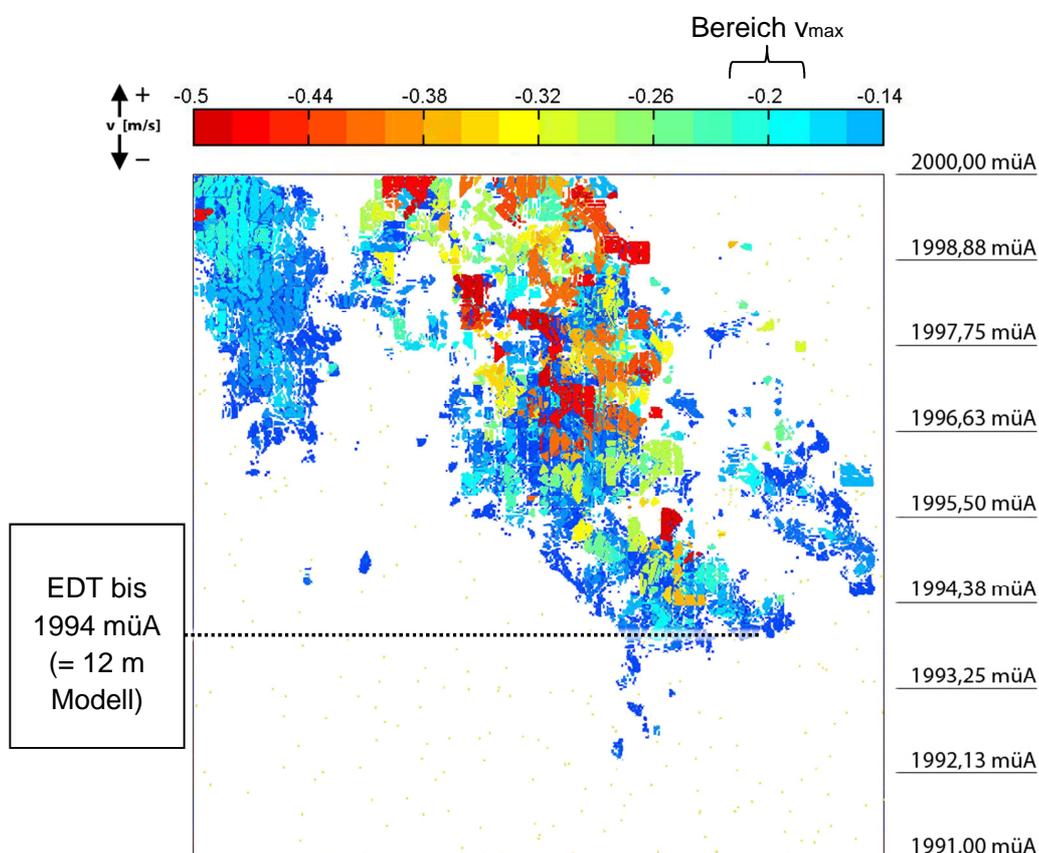


Abbildung 76: Zusammenfassung der Vektorplots für LF2a, vertikale Geschwindigkeiten, Fallhöhe des Wasserfalls 1,4 m (42 m Prototyp), Q 3 l/s (15 m³/s Prototyp), EDT Luftblasen im Mittel bei 1994 müA = 12 m (66 m Prototyp), EDT Ausreißer bis 16 m (88 m Prototyp)

Im Bild ist eine starke Ausbildung eines Unterwasserjets zu erkennen (Mitte des Bildes). Der Jet reicht in der Abbildung bis auf eine Tiefe von etwa 1992 müA (14 m im Modell entsprechen über den Froude'schen Faktor 5,48 [-] einer Tiefe von etwa 76 m in der Natur). Beobachtungen der Eindringtiefe haben gezeigt, dass Luftblasen durch den Jet bis zu 16 m im Modell eingetragen werden. Bedingt durch die große Fallhöhe reißt der Wasserfall im Schacht ab und teilt sich in einzelne Wasserpakete auf. Durch das Abreißen des Wasserfalls trifft dieser stoßweise auf die Wasseroberfläche auf und transportiert die Luftblasen stoßweise bis auf eine Tiefe von 12 m bis 16 m (bei

eingebautem Dämpfungselement in der Kopfkaverne erreichten die Luftblasen mit etwa 4 m nur ein Drittel der Tiefe)

Nach Betrachtung des Lastfalls 1a wird untersucht wie sich das Verhalten der Eindringtiefe der etwa 5 mm großen Luftblasen im Bereich des Schachtes zwischen Lastfall 2a und Lastfall 2b verhält. Zur Untersuchung werden konstante Pegel zwischen 2006 müA und 2023 müA eingestellt und das Verhalten der Eindringtiefe der Luftblasen beobachtet.

Es können keine gravierenden Unterschiede in diesem Bereich erkannt werden, da die noch immer große Fallhöhe des Wasserfalls ein Aufreißen des Jets an der Atmosphäre bewirkt. Wie in Lastfall 2a zuvor kann auch hier ein Aufteilen des Wasserfalls in Wasserpakete beobachtet werden. Das erneut sehr turbulente und instationäre Verhalten des Jets unter Wasser transportiert das Luftblasenpolster im Bereich des auftreffenden Wasserfalls in unregelmäßigen Abständen stoßweise 12 m – 16 m unter die Wasseroberfläche (Abbildung 77 und Abbildung 79).

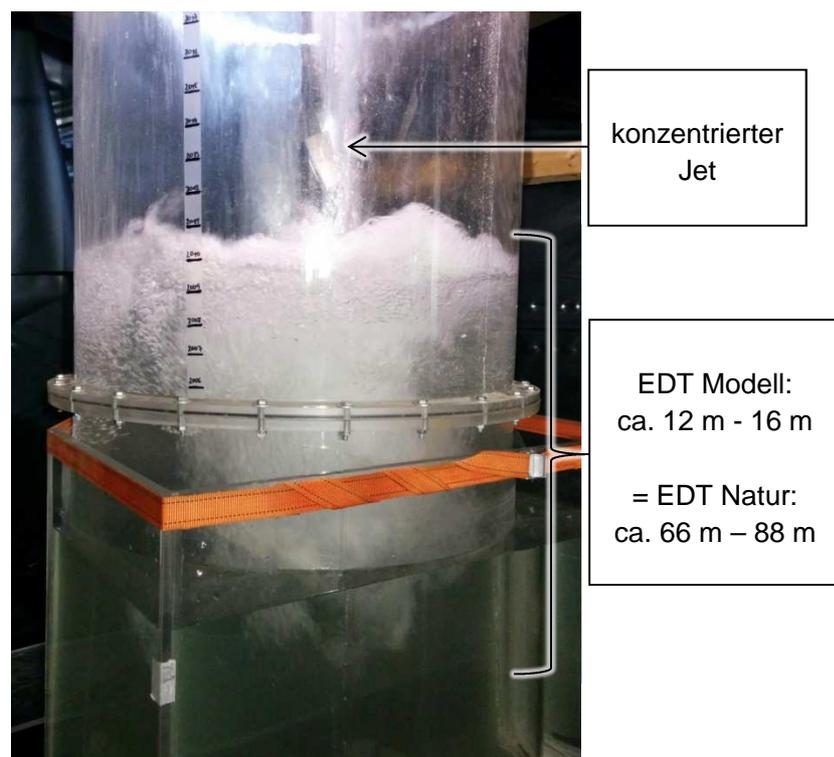


Abbildung 77: Luftblaseneindringtiefe bei WSP 2010 müA

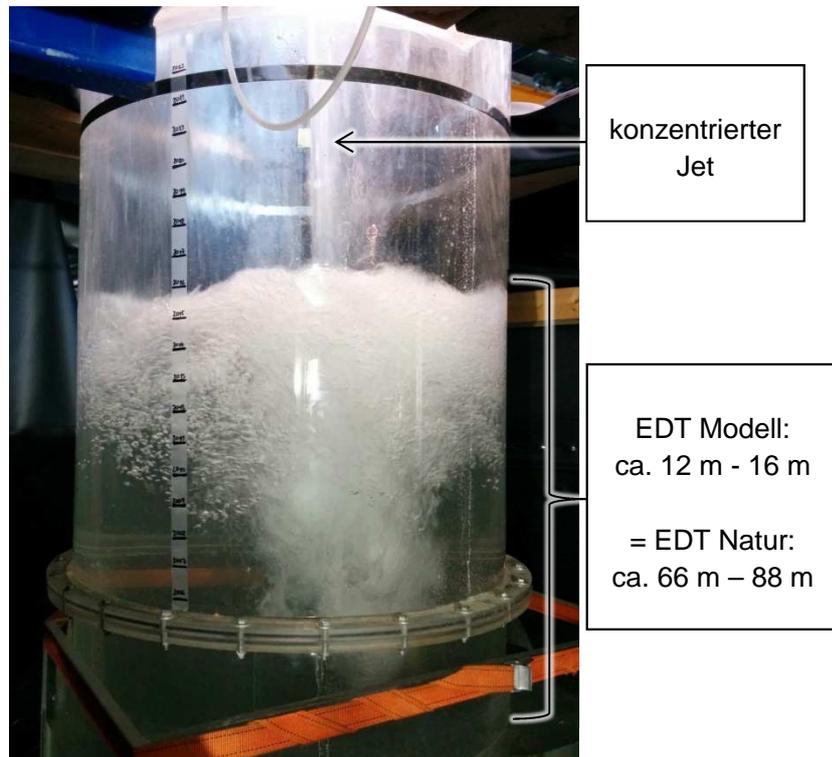


Abbildung 78: Luftblaseneindringtiefe bei WSP 2015 müA

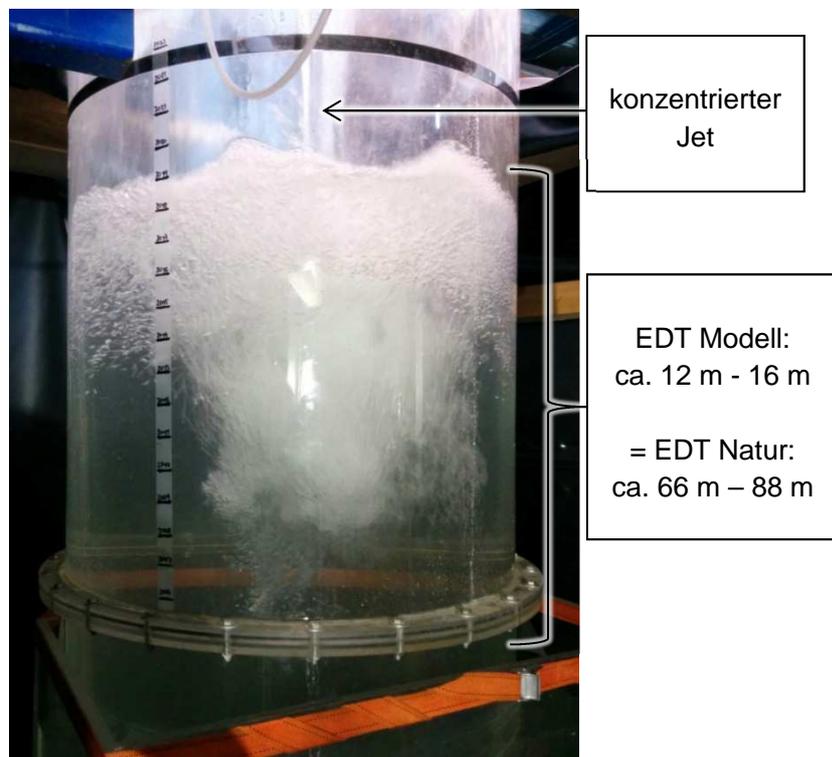


Abbildung 79: Luftblaseneindringtiefe bei WSP 2019 müA

5.5.6 Lastfall 2b (konstanter Wasserspiegel auf 2023 müA)

Durch den aktuellen Lastfall wird das Eindringen der kleinen Luftblasen der Größenordnung von etwa 1 mm bei ausgebautem Dämpfungselement in der Kopfkaverne und somit kompakterem Wasserfall auf Höhe 2023 müA im Beobachtungsbereich untersucht. Das bei Lastfall 1a vorherrschende Verhalten der stoßartigen Jetimpulse bei einem Wasserspiegel von 2006 müA stellt sich auch bei einem Wasserspiegel von 2023 müA ein. Durch die noch immer große Fallhöhe des Wasserfalles kann auch hier beobachtet werden wie sich der Wasserstrahl noch vor Auftreffen auf die Wasseroberfläche in einzelne Wasserpakete aufteilt.

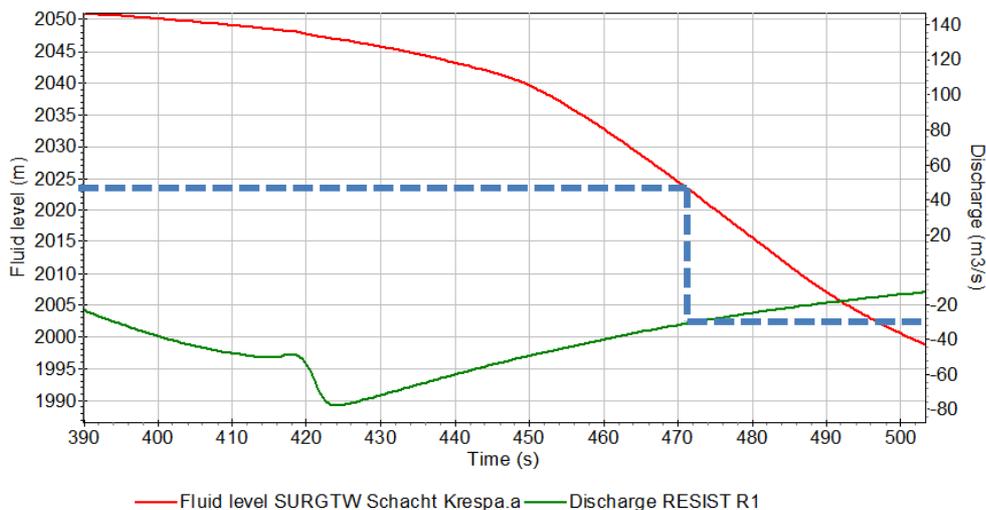


Abbildung 80: Durchfluss für Lastfall 2b (2023 müA)

Eine Kontrolle bringt das Ergebnis, dass die Luftblasen des Größenbereiches von etwa 5 mm wieder stoßartig 12 m bis 16 m tief unter die Wasseroberfläche eingetragen werden. Wie vorher angenommen war die Kraft des Jets ausreichend groß um kleinere Luftblasen im Größenbereich von etwa 1 mm tief unter die Wasseroberfläche bis unter den Messbereich des PIV einzutragen. Messungen mit Hilfe des PIV haben Geschwindigkeiten im Messbereich im Mittel von -0,06 m/s bis -0,1 m/s ergeben was im Froude'schen Maßstab umgerechnet Geschwindigkeiten von -0,33 m/s bis -0,55 m/s ergibt. Die gemessenen Geschwindigkeiten der absteigenden Luftblasen liegen somit noch über der Endgeschwindigkeit absinkender Luftblasen von 0,0365 m/s. Einzelne Luftblasen haben Geschwindigkeiten von bis zu 0,14 m/s bis 0,17 m/s erreicht, was umgerechnet etwa 0,77 m/s bis 0,93 m/s ergibt.

$$v_{N,Max} = v_{M,Max} * M_l = 0,17 \frac{m}{s} * \sqrt{30} = 0,931 \frac{m}{s} \quad (28)$$

Das stark turbulente Verhalten des unter die Wasseroberfläche eingedrungenen Jets, welches schon im Lastfall 2a beobachtet wird kann auch im aktuellen Lastfall tief unter dem oberen Luftblasenpolster erkannt werden. Luftblasen im Größenbereich von etwa 1 mm werden in unregelmäßigen Abständen stoßweise nach unten eingebracht. Der tief eindringende Jet kann durch das stark turbulente Verhalten örtlich im Querschnitt nicht eingegrenzt werden.

Auf Grund der hohen Geschwindigkeiten im Messbereich kann davon ausgegangen werden dass ein großer Anteil der absteigenden Luftblasen bis zum Erreichen der Endgeschwindigkeit von etwa 0,0365 m/s noch bis unter die PIV Box in den Bereich der Unterkammern abtauchen. Um gewährleisten zu können, dass der maximale Eindringhorizont über den Bereich der Unterkammern begrenzt wird ist der Einbau des Dämpfungselements in der Kopfkaverne notwendig.



EDT Modell:
ca. 12 m - 16 m

= EDT Natur:
ca. 66 m – 88 m

Abbildung 81: konstanter Pegel 2023 müA für Lastfall 2b

Da aus Beobachtungen der nach unten strömenden kleinen Luftblasen ausgegangen werden kann, dass die Eindringtiefe weiter unter der Eindringtiefe des Lastfalls 1b sein muss wird der Laser auf das untere Drittel des Messbereiches von Höhe 1992 müA bis in den Bereich 1997 müA fokussiert.

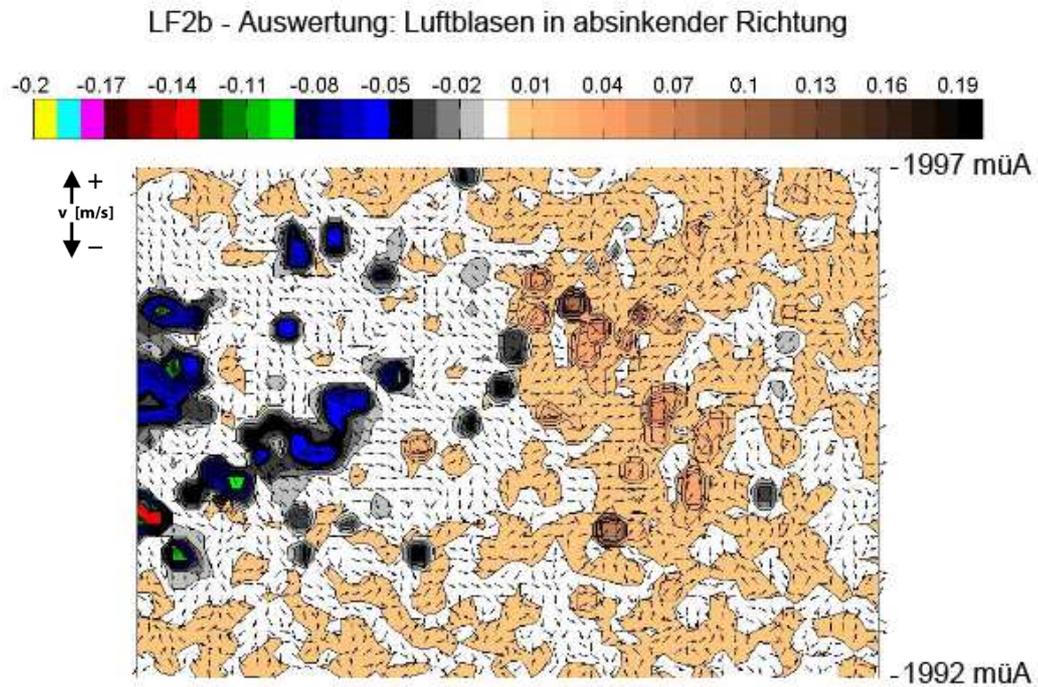


Abbildung 83: Vektorplot vertikaler Geschwindigkeitsverteilung - LF2b - 0615_090629#25

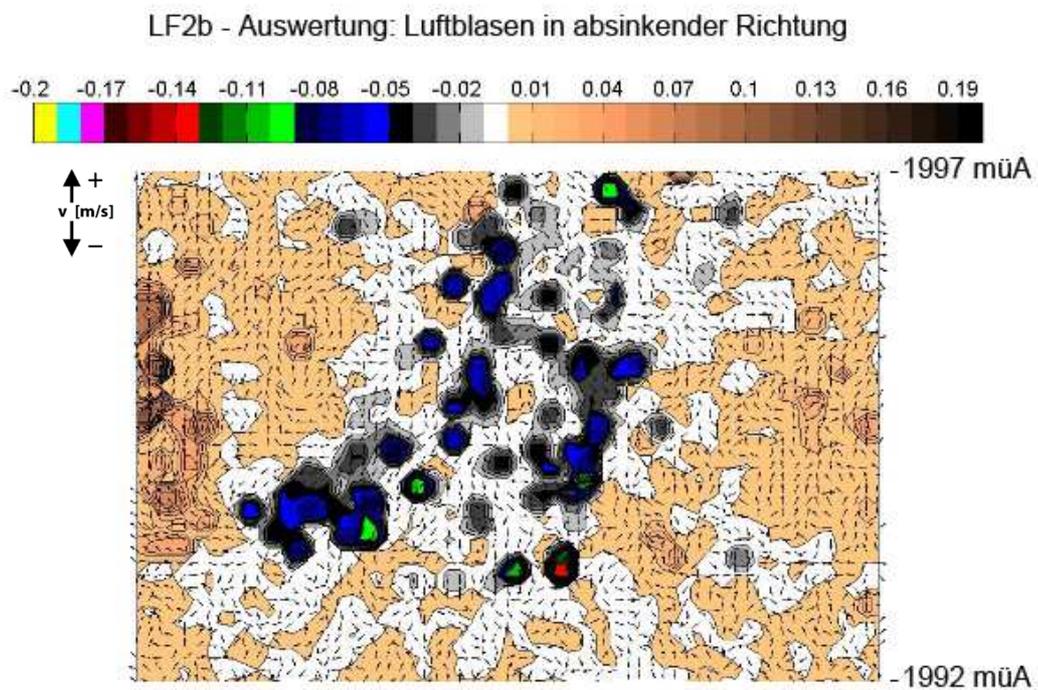


Abbildung 84: Vektorplot vertikaler Geschwindigkeitsverteilung - LF2b - 0615_092550#26

Die nachfolgende Darstellung (Abbildung 85) zeigt eine Überlagerung aller mit Matlab ausgewerteten Vektorplots. Es sind die absinkenden Plots übereinandergelegt, die Bereiche der aufsteigenden Vektoren wurden zur besseren Übersicht in der Darstellung ausgeblendet. Das Bild zeigt den Messbereich von etwa 1992 müA bis 1997 müA, da im Lastfall 2b hohe Geschwindigkeiten und große Eindringtiefen zu erwarten sind. Die farblich dargestellten Bereiche zeigen absinkende Luftblasen und dessen jeweilige Geschwindigkeit, welche zur Erhöhung der Details auf ein Maximum von 0,2 m/s skaliert ist. Die Tiefe der Eindringung der Blasen kann über die rechts dem Bild angebrachte Skala ermittelt werden.

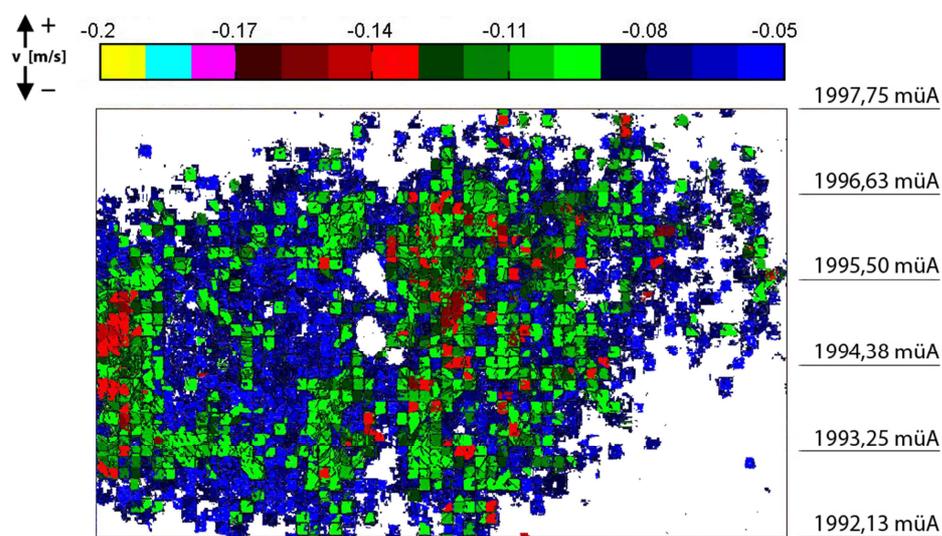


Abbildung 85: Zusammenfassung der Vektorplots für LF2b, vertikale Geschwindigkeiten, Fallhöhe des Wasserfalls 0,83 m (25 m Prototyp), Q 6,1 l/s (30 m³/s Prototyp), EDT Luftblasen bis unter den Messbereich unter 1992 müA = 31 m (170 m Prototyp)

Der Ausbau des Dämpfungselements aus der Kopfkaverne bedingt einen stark fluktuierenden Unterwasserjet, der Luftblasen stoßweise über den Querschnitt des Schachtes verteilt einträgt. Die es ist jedoch erkennbar, dass höhere Geschwindigkeiten im Bereich der Mitte des Messfeldes auftreten (grüne und rote Bereiche im Bild). Die übereinander liegenden weißen Bereiche mittig im Bild stellen Klebestellen des Schachtes am Modell dar und sind deshalb nicht aussagekräftig für die Messungen. Die roten Bereiche in der Mitte des Messbereiches zeigen Geschwindigkeiten bis zu etwa 0,17 m/s (etwa 0,93 m/s in der Natur). Diese liegen somit weit über der ermittelten Endgeschwindigkeit der kleinen Blasen von etwa 0,0365 m/s (etwa 0,2 m/s in der Natur). Der zusammenfassende Vektorplot zeigt ausschließlich Geschwindigkeiten, welche die zu erwartende maximale Endgeschwindigkeit überschreitet (Mindestabsinkgeschwindigkeit im Plot beträgt 0,05 m/s liegt bereits über der maximalen Absinkgeschwindigkeit von 0,0365 m/s). Es sind noch vermehrt schnelle Jets ausgebildet. Luftblasen erreichen selbst im unteren Bereich der Messebene noch nicht die maximale Absinkgeschwindigkeit, weshalb davon auszugehen ist, dass die Blasen vom Unterwasserjet noch mindestens bis auf Höhe der Unterkammern eingetragen werden.

5.5.7 Lastfall 2c (konstanter Wasserspiegel auf 2043 müA)

Im aktuellen Lastfall 2c wird ein konstanter Wasserspiegel von 2043 müA eingestellt. Der Wasserfall hat eine geringe Falltiefe, auf dieser Höhe erfolgt noch kein Abreißen des Jets.

Zum besseren Vergleich mit vorigen Messungen wird der Durchfluss zunächst nicht erhöht. Der konstante Wasserspiegel von 2043 m³/s wird bei einem Durchfluss von etwa 6 l/s eingestellt. Die geringe Fallhöhe in Kombination mit relativ geringem Durchfluss erzeugte ein konstantes Blasenpolster mit einer Tiefe von etwa 2024 müA (Abbildung 86).

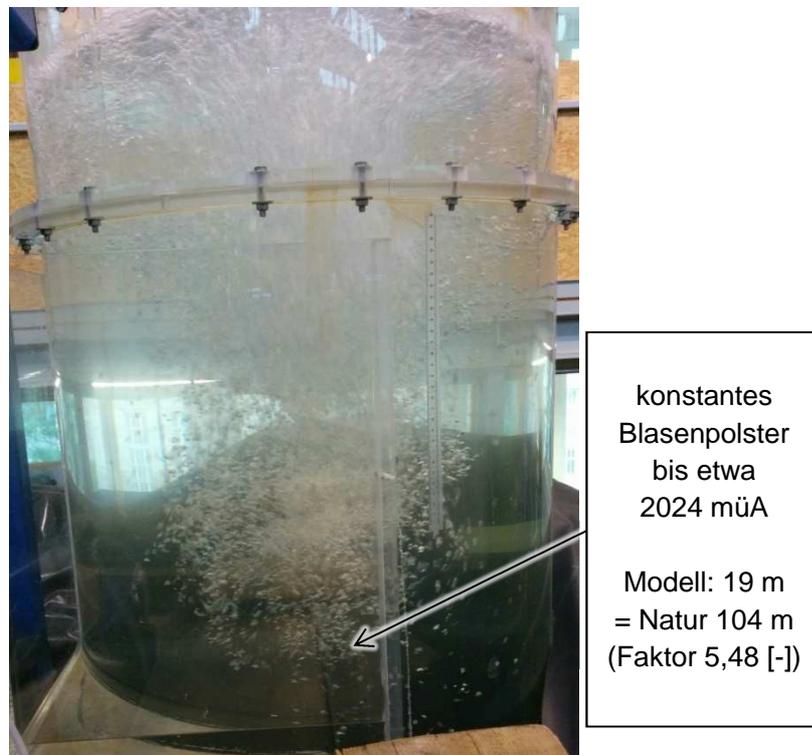


Abbildung 86: Lufteindringtiefe Blasenpolster bei Q 6 l/s und WSP 2043 müA (obere Ebene)

Der bei den vorhergehenden Lastfällen betrachtete stark turbulente Jet bildete sich nicht, stattdessen kann ein konstanter Jet beobachtet werden welcher vereinzelt Blasen der Größenordnung 5 mm im Bereich des auftreffenden Wasserfalls langsam bis in eine Tiefe von etwa 2013 müA transportierte. Dies gibt eine Eindringtiefe der großen Blasen von etwa 30 m im Modell (Abbildung 87), was einer Eindringtiefe im Prototyp von etwa 164 m entspricht (Faktor 5,48 [-]). Es kann erkannt werden, dass kleinere Luftblasen der Größenordnung von etwa 1 mm mindestens bis auf Höhe des Beobachtungsbereiches der PIV-Box transportiert werden. Dies ergäbe eine Eindringtiefe von etwa 40 m bis 50 m im Modell (entspricht etwa 220 m bis 270 m am Prototyp).

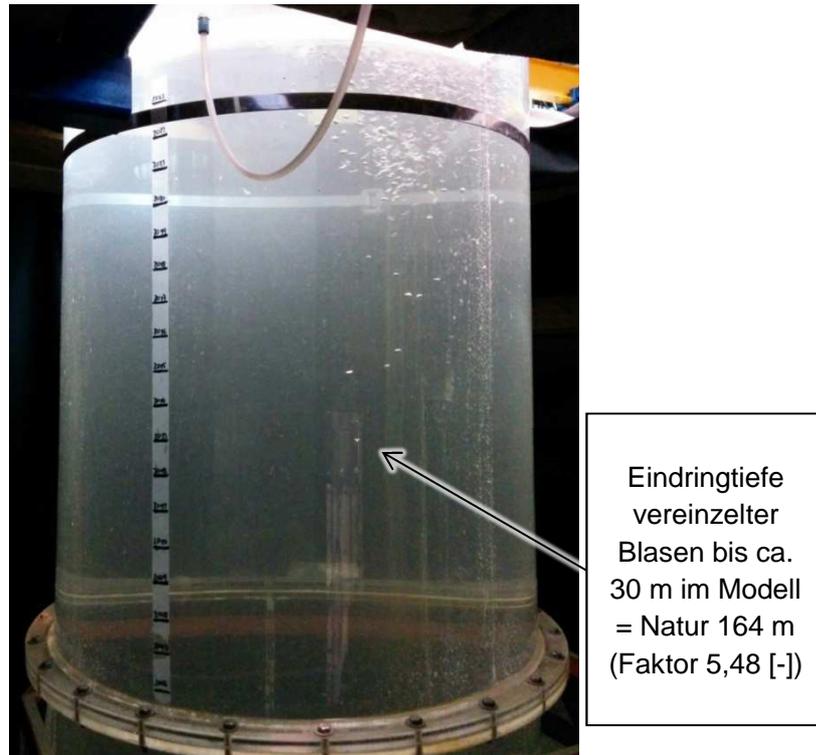


Abbildung 87: Lufteindringtiefe vereinzelter großer Blasen bei 6 l/s und WSP 2043 müA

Aus dem Grund, dass vorherige Messungen des Lastfall 1b im unteren Drittel des Messbereiches noch schnell absinkende Luftblasen festgestellt werden und aus Sichtkontrolle auch in diesem Lastfall noch schnell absinkende Luftblasen bis unter den Messbereich erkannt werden wird der Fokus der Messung wieder auf das untere Drittel des Messbereiches gelegt. Die Messungen erfolgen mit einem Durchfluss von 6 l/s, dies ergibt umgerechnet im Froude'schen Maßstab einen Durchfluss von etwa 30 m³/s im Prototyp.

Kleinere Luftblasen im Größenbereich von 1 mm werden wie bereits bei Lastfall 2b stoßweise sehr tief in den Schacht nach unten transportiert. Messungen mit Hilfe des PIV haben im Mittel Geschwindigkeiten von -0,04 m/s bis -0,05 m/s ergeben was darauf hindeutet, dass selbst im Messbereich des PIV die maximale Eindringtiefe der Luftblasen noch nicht erreicht wird und noch eine langsame Abwärtsbewegung herrscht. Vereinzelt Luftblasen können mit Abwärtsgeschwindigkeiten von -0,08 m/s bis -0,1 m/s gemessen werden was in die Natur umgerechnet im Froude'schen Maßstab Geschwindigkeiten von -0,44 bis -0,55 m/s ergibt und noch weit über der Endgeschwindigkeit von etwa 0,2 m/s liegt.

Selbst mit geringem Durchfluss werden hohe Geschwindigkeiten im Messbereich festgestellt, was noch höhere Geschwindigkeiten der absinkenden Luftblasen bei Bemessungsdurchfluss erwarten lässt und zeigt. Die Notwendigkeit des Einbaus des Dämpfungselements zur Vermeidung der hohen Absinkgeschwindigkeiten und Verminderung der Eindringtiefe der Luftblasen lässt sich daraus eindeutig ableiten.

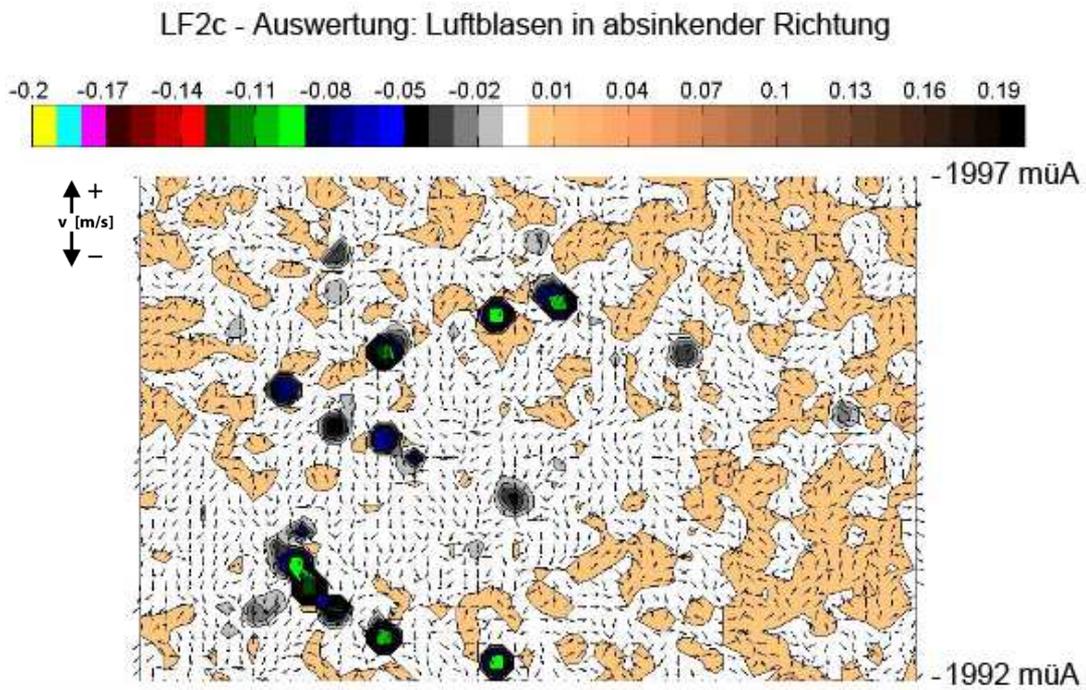


Abbildung 88: Vektorplot vertikaler Geschwindigkeitsverteilung – LF2c – Q 6 l/s - 0615_102027#22

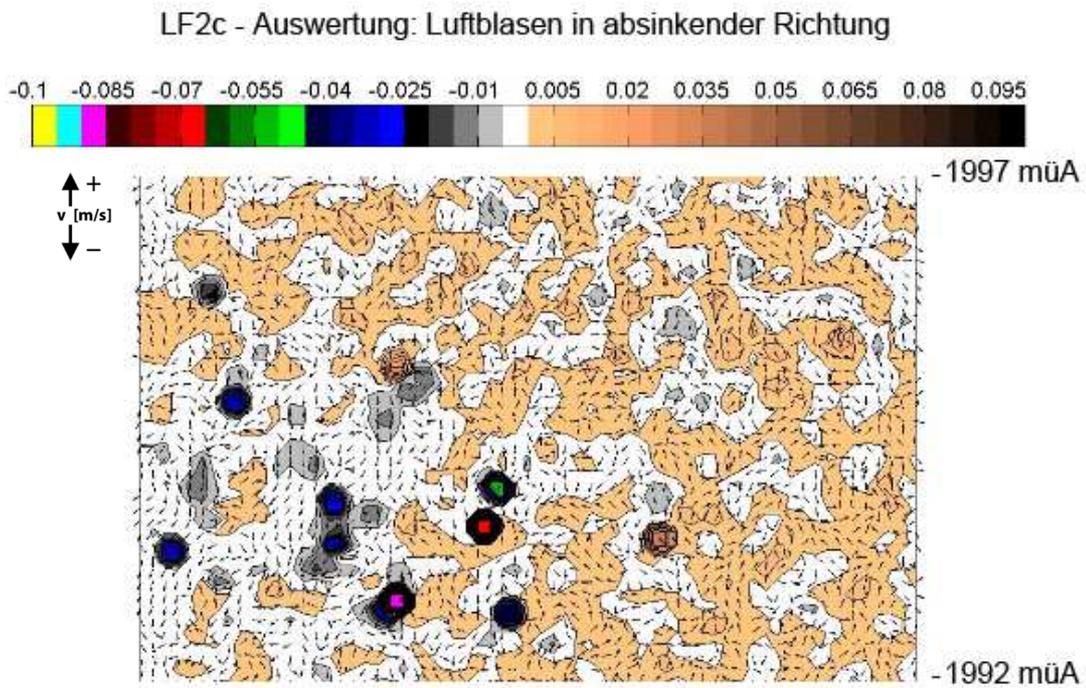


Abbildung 89: Vektorplot vertikaler Geschwindigkeitsverteilung – LF2c – Q 6 l/s - 0615_102738#23

Die nachfolgende Darstellung (Abbildung 90) zeigt die Überlagerung der mit Matlab ausgewerteten Vektorplots von Lastfall 2c mit einem Q von 6 l/s (etwa 30 m³/s in der Natur). Der Fokus der Messung liegt im unteren Bereich der PIV-Box (auf Höhe von etwa 1992 müA bis 1997 müA) da mit hohen Geschwindigkeiten und Luftblasen die bis unter die PIV-Box dringen zu rechnen ist. Die Darstellung beinhaltet ausschließlich Vektorplots die in absinkender Richtung ausgewertet wurden, Bereiche aufsteigender Blasen wurden zur besseren Übersicht ausgeblendet, somit ist es möglich die maximalen Eindringtiefen der Luftblasen zu erkennen. Die Geschwindigkeiten sind farblich erkennbar über die über dem Bild angezeigte Skala. Zur Erhöhung der Genauigkeit der Darstellung ist diese skaliert auf ein Maximum von 0,1 m/s.

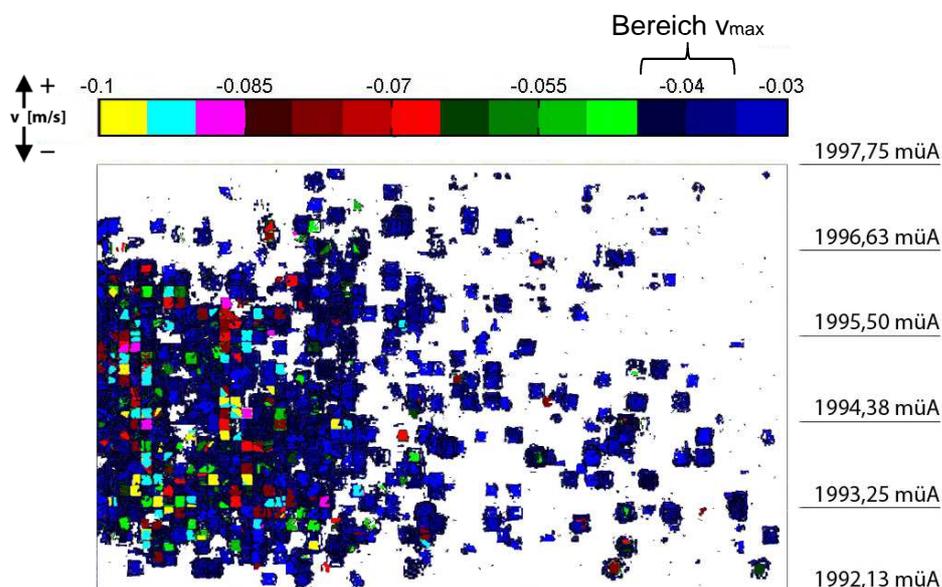


Abbildung 90: Zusammenfassung der Vektorplots für LF2c, vertikale Geschwindigkeiten bei Q 6,1 l/s (30 m³/s Prototyp), Fallhöhe des Wasserfalls 0,17 m (5 m Prototyp), EDT Luftblasen bis unter den Messbereich 1992 müA = 51 m (279 m Prototyp)

Durch den relativ niedrigen Wasserfall bei Lastfall 2c von etwa 5 m im Modell reißt der durch den Oberkammerschwall erzeugte Wasserfall an der Atmosphäre nicht ab. Es erfolgt kein Aufteilen in einzelne Wasserpakete. Dadurch werden Luftblasen konstant sehr tief unter die Wasseroberfläche eingetragen. Eine Ausbildung eines einzelnen Unterwasserjets ist nicht erkennbar, die Eintragung streut erneut über den gesamten Querschnitt des Schachtes. Kleine Luftblasen besitzen selbst im unteren Bereich der PIV-Box im dargestellten Messbereich vermehrt noch sehr hohe Eindringgeschwindigkeiten, die über der maximalen Geschwindigkeit der kleinen Luftblasen von etwa 0,0365 m/s (entspricht 0,2 m am Prototyp) liegen. Gemessene Geschwindigkeiten der absinkenden Luftblasen im betrachteten Bereich erreichen teilweise noch bei 0,085 m/s bis 0,1 m/s am Modell (entspricht 0,46 m/s bis 0,55 m/s im Prototyp). Die Eindringtiefe der Blasen ist teilweise bis unter die PIV-Box erkennbar und beträgt somit über 52 m im Modell (entspricht skaliert im Froude'schen Maßstab mit Faktor 5,48 [-] etwa 285 m in der Natur)

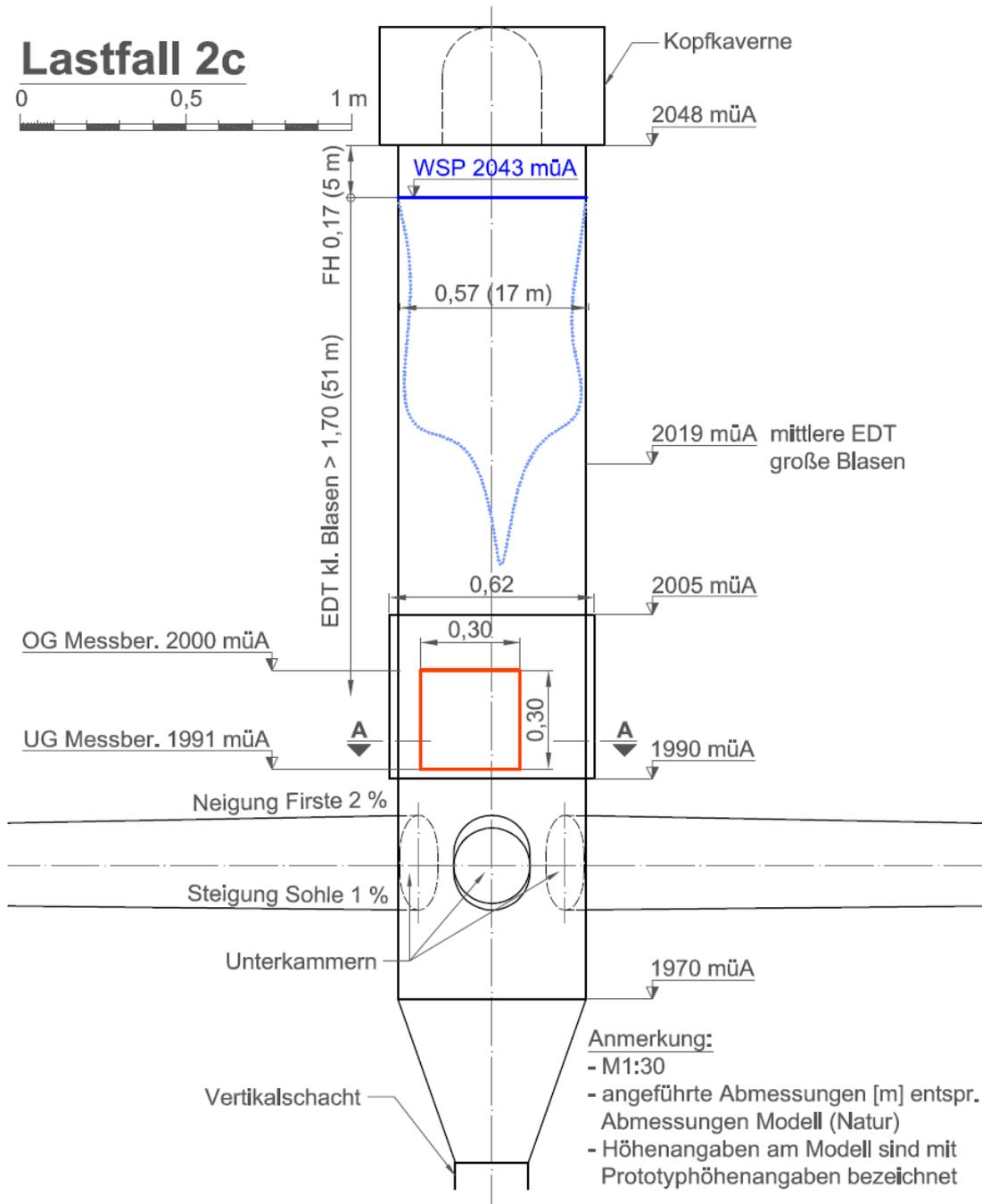


Abbildung 91: Schemaskizze Ergebnisse LF2c ohne Dämpfungselement, WSP 2043 müA, Fallhöhe des Wasserfalls 0,17 m (5 m Prototyp), Q 16,2 l/s (80 m³/s Prototyp), EDT großer Luftblasen bis 2019 müA = 24 m (131 m Prototyp), Ausreißer bis ca. 2008 müA = 35 m (192 m Prototyp), EDT kleiner Luftblasen bis unter den Messbereich

Nach Beobachtung des Lastfalls mit geringem Durchfluss wurde der Durchfluss auf etwa 16 l/s Durchfluss erhöht, was im Prototyp einen Durchfluss von etwa 80 m³/s darstellt. Dieser Durchfluss stellt auch den Bemessungsdurchfluss vorhergehender numerischer Berechnungen für die Auslegung des Wasserschloss dar (Abbildung 92).

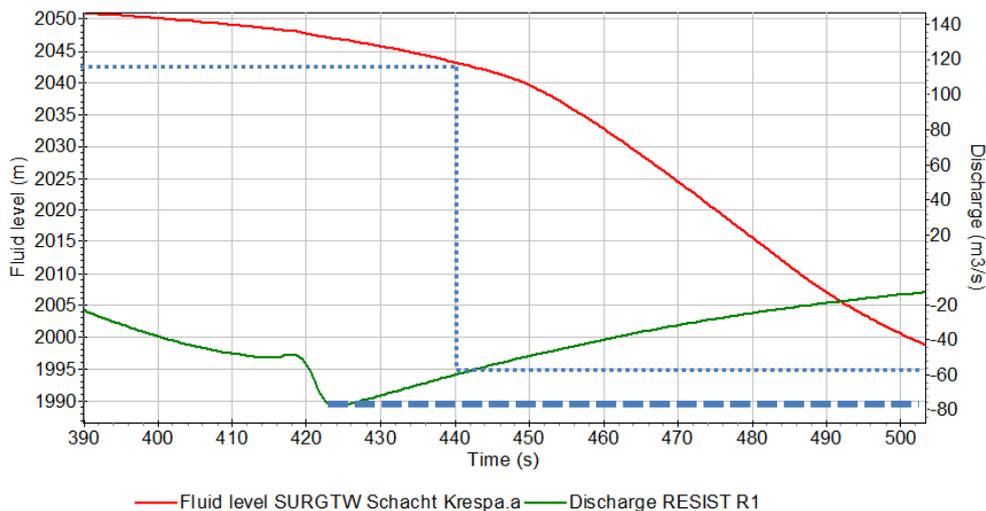


Abbildung 92: Durchfluss für Lastfall 2c (2043 müA)



Abbildung 93: Wasserfall bei Bemessungsdurchfluss

Bei einem Durchfluss von etwa 16 l/s (entspricht etwa 80 m³/s im Prototyp) kann im oberen Bereich des Wasserschloss ein sehr stark ausgeprägtes Luftblasenpolster festgestellt werden. Das Polster dringt wie erwartet tiefer als im vorhergehenden

Versuch mit etwa 6 l/s (entspricht etwa 30 m³/s im Prototyp) ein, die durchschnittliche Eindringtiefe kann bis etwa 2019 müA beobachtet werden (Abbildung 94).



Abbildung 94: oberer Luftblasenpolster bei 16 l/s und WSP 2043 müA

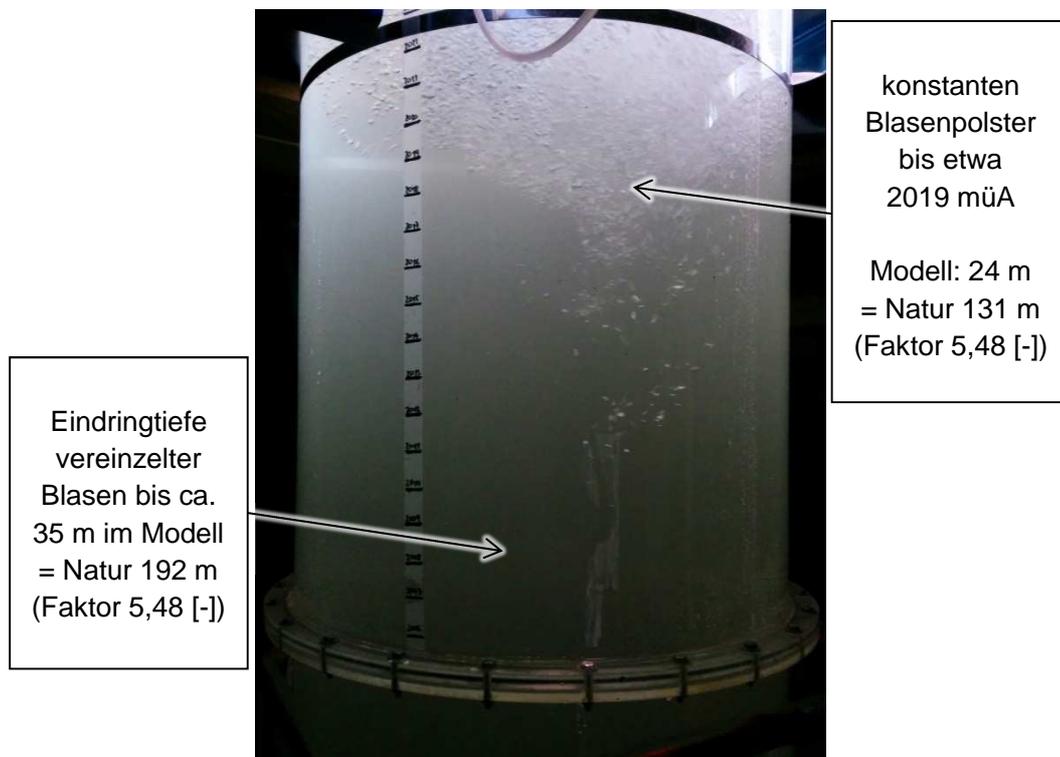


Abbildung 95: Lufteindringtiefe großer Blasen bei 16 l/s und WSP 2043 müA

Der sich im vorhergehenden Versuch bei gleichem Wasserspiegel und geringerem Durchfluss einstellende konstante Jet unter Wasser kann sich bei einem Durchfluss von etwa 16 l/s (entspricht etwa 80 m³/s im Prototyp) nicht ausbilden. Der stark turbulente

Jet transportiert das Luftblasenpolster im Bereich des Wasserfalls wie bereits im Lastfall 2a und Lastfall 2b beobachtet stoßweise stark nach unten. Die festgestellte mittlere Eindringtiefe der größeren Blasen bis etwa 2019 müA (= 24 m) entspricht umgerechnet im Froude'schen Modellmaßstab einer mittleren Eindringtiefe der Luftblasen von etwa 131 m. Vereinzelt Luftblasen dringen im Versuch bis auf eine Tiefe von etwa 2008 müA ein. Dies ergibt eine Eindringtiefe der großen Blasen von etwa 35 m im Modell und etwa 192 m für den Prototyp (Abbildung 95).

Nach Betrachtung des Lastfalles wird der Wasserspiegel auf 2047 müA angehoben. Das obere Luftblasenpolster wird tiefer eingetragen als bei vorigen Betrachtungen und reicht beinahe konstant bis auf eine Höhe von 2010 müA (Abbildung 96), einzelne große Luftblasen werden bis auf eine Höhe von 2004 müA nach unten transportiert (Eindringtiefe 43 m im Modell entspricht im Froude'schen Maßstab etwa 236 m für den Prototyp).

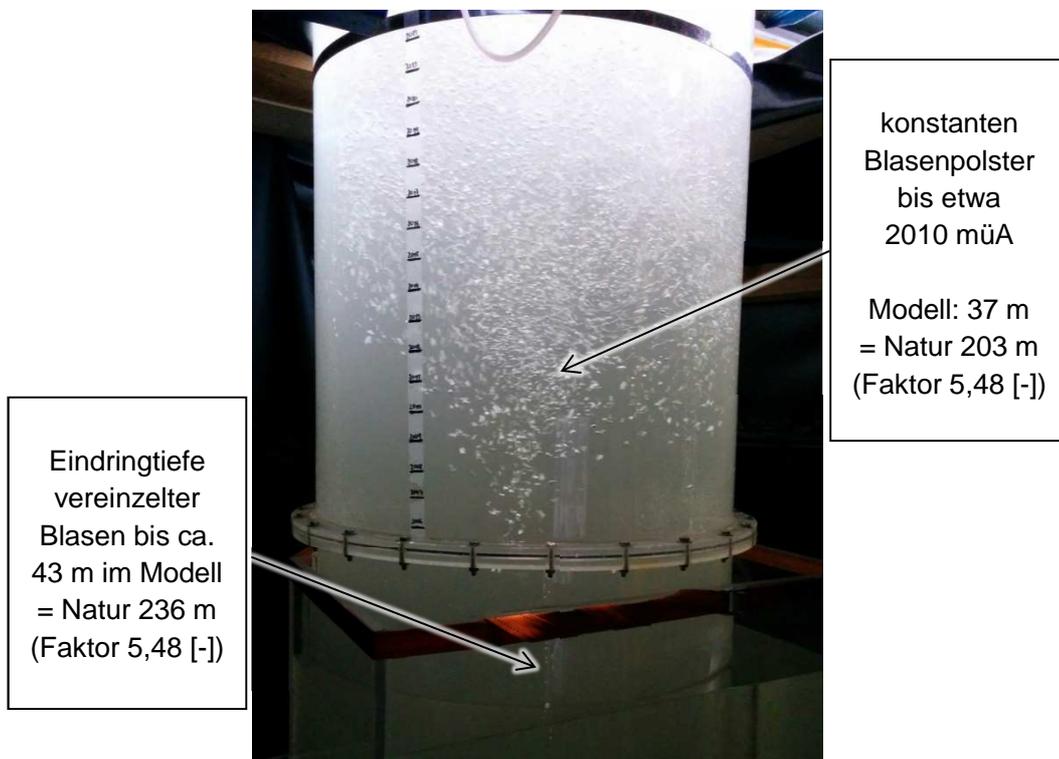


Abbildung 96: Lufteindringtiefe bei Q 16 l/s (Modell) & WSP 2047 müA – etwa 43 m (Prototyp)

6 Zusammenfassung und Fazit

Es wird am Modell des Wasserschloss Krespa das Luft eindring-Verhalten eines Wasserfalls untersucht. Dieser ergibt sich für den maximalen Bemessungsfall des Wasserschlosses Krespa aus einem reflektierten Schwall in der Oberkammer welcher in den Steigschacht fällt. Das Eindringen der Luftblasen in die Wasseroberfläche im Steigschacht wird anhand mehrerer definierter Lastfälle durch PIV - Messungen untersucht. Die Untersuchungen werden anhand stationärer Fließbedingungen durchgeführt.

6.1 Zusammenfassung der Ergebnisse der behandelten Lastfälle

6.1.1 LF1a: WSP 2000 müA, mit Dämpfungselement, Q 3 l/s (15 m³/s Prototyp), Fallhöhe des Wasserfalls 1,6 m (48 m Prototyp)

Das Dämpfungselement in der Kopfkaverne bewirkt einen geregelten Abfluss des Oberkammerschwalls in den Steigschacht. Durch das Leitbauwerk, eine ringförmige Prallwand am Dämpfungselement, wird der Schwall auf den Außenbereich der Kopfkaverne verteilt. Der einzelne große Schwall im Bemessungsfall wird durch die Öffnungen im Balkonboden und der Balkonbrüstung dazu gezwungen sich in einzelne kleine Jets gleicher Größe aufzuteilen. Damit wird die Energie des Wasserfalls beim Auftreffen auf die Wasseroberfläche gleichmäßig im Steigschacht verteilt. Aufgrund der Oberkammercharakteristik bildet sich bei jeder Entleerung ein Wasserfall, welcher ohne Dämpfungselement stets einen konzentrierten Fallstrahl bilden würde. Im Bereich der Schachtwand sind vermehrt Abwärtsbewegungen der Luftblasen zu erkennen, die Aufwärtsbewegung der Luftblasen findet vermehrt im Bereich der Schachtmitte statt.

Die Eindringtiefe der großen Luftblasen kann bei etwa 12 cm bis 15 cm am Schacht erkannt werden. Umgerechnet im Modell Maßstab ergibt das eine Eindringtiefe von etwa 4 m für den Prototyp. Da Fließgeschwindigkeiten des Wassers im Modell bei Anwendung der Froude'schen Modellgesetze um den Modellmaßstabsfaktor ($\sqrt{M_l}$) schneller dargestellt werden als in der Natur muss der erhaltene Wert noch umgerechnet werden. Luftblasen können nicht im Modellmaßstab verkleinert werden und haben im Modell und der Natur denselben Auftrieb. Zur Ermittlung der Eindringtiefe für den Prototyp in der Natur werden Messungen somit um den Maßstabsfaktor ($\sqrt{M_l}$) erweitert. Eine Eindringtiefe von 4 m im Modell ergibt umgerechnet im Froude'schen Modellmaßstab für die Fließgeschwindigkeit eine Eindringtiefe von etwa 22 m für den Prototyp in der Natur (Ruetz, 2014).

Es wird ein Umkehrhorizont erkennbar, die maximale Eindringgeschwindigkeit der Luftblasen beträgt etwa 0,2 m/s was mit vorhergehenden wissenschaftlichen

Veröffentlichungen (Clanet, et al., 1997), (Danciu, 2011) und (Ervine, et al., 1987)) im Bereich der Luftblaseneindringtiefe übereinstimmt. Die Grenzgeschwindigkeit der Luftblasen im Froude'schen Maßstab (1:30) wird durch die Erkenntnisse im Modell auf 0,0365 m/s festgelegt (Ruetz, 2014), die maximale Eindringtiefe der Luftblasen im Prototyp mit Hilfe des Froude'schen Maßstab auf etwa 22 m bis 24 m errechnet.

6.1.2 LF1b: WSP 2023 müA, mit Dämpfungselement, Q 6,1 l/s (30 m³/s Prototyp), Fallhöhe des Wasserfalls 0,8 m (25 m Prototyp)

Der Wasserspiegel im Steigschacht wird konstant auf 2023 müA eingestellt. Das Dämpfungselement in der Kopfkaverne bewirkt wie bei LF1a einen geregelten Abfluss des Oberkammerschwalls in den Steigschacht, der durch das Leitbauwerk am Dämpfungselement auf die Kopfkaverne verteilt wird. Die Öffnungen im Balkonboden und der Balkonbrüstung (Durchmesser DN 180) teilen den Schwall in einzelne kleine Jets gleicher Größe, wodurch dem Wasserfall die Gedrungenheit beim Auftreffen auf die Wasseroberfläche im Steigschacht genommen wird. Es stellt sich ein gleichmäßig über den Steigschacht verteilter Abfluss ein. Die Eindringtiefe der großen Luftblasen beträgt etwa 4 m im Prototyp (reine Maßstabsbetrachtung). Umgerechnet mit dem Froude'schen Modellmaßstab ergibt dies etwa 22 m Eindringtiefe für den Prototyp. Im Bereich der Schachtwand (Abbildung 68 links im Bild) sind vermehrt Abwärtsbewegungen der kleinen Luftblasen zu erkennen, die Aufwärtsbewegung der Luftblasen findet im Bereich der Schachtmitte (Abbildung 68 rechts im Bild) statt.

Die von LF1a ermittelten Werte der maximalen Eindringtiefe der Luftblasen ergeben, dass die kleinen Luftblasen im Mittel auf einer Höhe von etwa 1997 müA ihre maximale Absinkgeschwindigkeit von etwa 0,03 m/s bis 0,04 m/s besitzen, auf dieser Höhe umkehren und wieder aufsteigen. Das ergibt eine Eindringtiefe von etwa 26 m im Modell und entspricht somit den Erkenntnissen der Untersuchungen im vorigen Lastfall und Umrechnungen mit Hilfe des Froude'schen Maßstab.

6.1.3 LF2a: WSP 2006 müA, ohne Dämpfungselement, Q 3 l/s (15 m³/s Prototyp), Fallhöhe des Wasserfalls 1,4 m (62 m Prototyp)

Der Lastfall wird ohne Dämpfungselement durchgeführt. Der Wasserspiegel im Schacht wird auf 2000 müA eingestellt. Bei diesem Wasserspiegel dringen große Blasen jedoch sofort unter den Messbereich bis auf Höhe der Unterkammern (Eindringtiefe etwa 20 m bis auf 1980 müA im Prototyp – Umrechnung im Maßstabsfaktor 5,48 [-]) ein, weshalb der Wasserspiegel auf 2006 müA angehoben wird.

Durch den Ausbau des Dämpfungselements aus der Kopfkaverne erfolgt nun ein konzentrierter Abfluss des Oberkammerschwalls als Wasserfall in den Steigschacht. Der Abfluss aus der Oberkammer verursacht einen gedrungenen Jet, welcher sich über die große Fallhöhe von 42 m im Modell in einzelne Wasserpakete aufteilt und somit stoßartig unregelmäßig stark auf die Wasseroberfläche auftrifft und tief eindringt. In einer Eindringtiefe der großen Luftblasen von 12 m bis 16 m im Modell kann die maximale Absinkgeschwindigkeit von etwa 0,2 m/s gemessen werden, dies entspricht einer etwa dreifachen Eindringtiefe im Vergleich zur Verwendung mit dem Dämpfungselement (etwa 4 m im Modell). Mit dem Froude'schen Faktor von 5,48 [-] ergibt sich eine zu erwartende Eindringtiefe 66 m bis 88 m, wobei definitiv Lufteinträge bis in den Druckstollen zu erwarten wären. Der stark turbulente Wasserfall besitzt neben der stoßweisen Eindringung durch die Wasserpakete auch eine starke seitliche Fluktuation, die sich über den Querschnitt des Steigschachtes verteilt und die Messungen in der vordefinierten Ebene sehr erschwert.

Anschließend an die Untersuchung bei 2000 müA sind mehrere konstante Wasserspiegel im Bereich zwischen 2006 müA und 2023 müA betrachtet worden. Die Eindringtiefe der großen Luftblasen hat sich in diesem Bereich nicht verändert und beträgt 12 m bis 16 m.

6.1.4 LF2b: WSP 2023 müA, ohne Dämpfungselement, Q 6,1 l/s (30 m³/s Prototyp), Fallhöhe des Wasserfalls 0,8 m (25 m Prototyp)

Der Lastfall wird ohne Dämpfungselement durchgeführt. Der Wasserspiegel im Schacht wird auf 2023 müA eingestellt. Das stark turbulente Verhalten des Jets unter Wasser, welches bei LF2a festgestellt wird ist auch im aktuellen Lastfall zu erkennen. Es erfolgt kein verteilter Abfluss des Oberkammerschwalls in den Steigschacht. Der Wasserfall gelangt konzentriert in den Steigschacht. Die Wassermassen verursachen einen gedrungenen Jet, der sich über die große Fallhöhe von 25 m (0,8 m im Modell) in einzelne Wasserpakete aufteilt und somit stoßartig unregelmäßig stark auf die Wasseroberfläche auftrifft und tief eindringt. Die Eindringtiefe der großen Luftblasen beträgt wie bei LF2a 12 m bis 16 m Tiefe (Prototyp im Modellmaßstab) im Modell. Mit dem Froude'schen Faktor von 5,48 [-] ergibt sich eine zu erwartende Eindringtiefe von 66 m bis 88 m, wobei definitiv Lufteinträge bis in den Druckstollen zu erwarten wären. Dies entspricht einer dreifachen Eindringtiefe im Vergleich zur Verwendung mit dem Dämpfungselement (etwa 4 m Prototyp im Modell). Der stark turbulente Wasserfall besitzt auch bei Wasserspiegel 2023 müA eine stoßweise Eindringung durch die Wasserpakete und eine starke seitliche Fluktuation, die sich über den Querschnitt des Steigschachtes verteilt. Das Verhalten der kleinen Luftblasen gleicht dem Verhalten der großen Luftblasen im Bereich des Wasserspiegels, sie dringen schubweise durch die auftreffenden Wasserpakete des Jets in unregelmäßigen Abständen auf den Querschnitt verteilt ein, was die Messungen in der vordefinierten Ebene erschwert.

Messungen der turbulenten Jetimpulse im Messbereich ergeben im Mittel Geschwindigkeiten der absinkenden Luftblasen von 0,06 m/s bis 0,1 m/s, was umgerechnet im Froude'schen Maßstab Geschwindigkeiten von etwa 0,33 m/s bis 0,55 m/s ergibt und somit über der definierten Endgeschwindigkeit von etwa 0,0365 m/s (0,2 m/s im Prototyp) liegt. Einzelne Luftblasen im Messbereich erreichen eine Absinkgeschwindigkeit von bis zu 0,17 m/s, dies entspricht umgerechnet einer Geschwindigkeit von etwa 0,93 m/s im Prototyp. Da die Endgeschwindigkeit der absteigenden Luftblasen auf Höhe des Messbereiches noch nicht erreicht wurde wird davon ausgegangen, dass Luftblasen bis unter den Messbereich mindestens auf Höhe der Unterkammern absinken.

6.1.5 LF2c: WSP 2043 müA, ohne Dämpfungselement, Q 16,2 l/s (80 m³/s Prototyp), Fallhöhe des Wasserfalls 0,16 m (5 m Prototyp)

Der Lastfall wird ohne Dämpfungselement durchgeführt. Der Wasserspiegel im Schacht wird auf 2043 müA eingestellt. Dieser Pegel ist 5 m unter der Überfallkante aus der Oberkammer und entspricht dem Bemessungslastfall aus der Wasserschlossuntersuchung für die Auslegung des Dämpfungselements. Zunächst wird der Durchflussentsprechend LF2b von etwa 6 l/s (entspricht etwa 30 m³/s im Prototyp) eingestellt. Das stark turbulente Verhalten des Jets unter Wasser, welches bei LF2a und LF2b festgestellt wurde ist im aktuellen Lastfall nicht mehr vorhanden. Der Ausfluss aus der Oberkammer fällt ohne aufzureißen in einem kompakten Strahl in das Wasserpolster des Steigschachtes. Das stoßweise Eindringen wie bei LF2a und LF2b findet somit nicht statt. Der eintauchende Unterwasserjet erzeugt durch Verwirbelungen um den Eindringbereich des Jets ein annähernd konstantes Luftblasenpolster großen Blasen das bis auf eine Tiefe von etwa 2024 müA reicht (etwa 19 m im Prototyp). Durch die relativ konstante Eindringung des Jets werden große Luftblasen im Bereich des konzentrierten Jets langsam stetig nach unten in den Schacht transportiert, vereinzelt Blasen erreichen dadurch eine Tiefe von etwa 2013 müA (etwa 30 m im Modell, dies entspricht umgerechnet mit dem Froude'schen Faktor von 5,48 [-] etwa 164 m).

Da ein Absinken der kleinen Blasen bis in den Messbereich erkannt werden kann werden PIV - Messungen zur Untersuchung der vorliegenden Geschwindigkeitsverteilung im Querschnitt durchgeführt. Messungen ergeben, dass die Luftblasen im Mittel Geschwindigkeiten von etwa 0,05 m/s besitzen, was umgerechnet einer Geschwindigkeit von etwa 0,3 m/s. Vereinzelt Blasen besitzen Absinkgeschwindigkeiten von etwa 0,44 m/s bis 0,55 m/s, dies entspricht umgerechnet im Froude'schen Maßstab Geschwindigkeiten für den Prototyp von etwa 0,08 m/s bis 0,1 m/s und liegt noch über der maximalen Absinkgeschwindigkeit der Blasen von 0,2 m/s.

Nach Beobachtungen bei geringem Durchfluss wird dieser auf den vordefinierten Bemessungsdurchfluss erhöht, der Wasserspiegel bleibt wie zuvor konstant auf 2043 müA. Die Erhöhung auf etwa 16 l/s (entspricht umgerechnet etwa 80 l/s im

Prototyp) weist wie bei LF2a und LF2b ein sehr stark turbulentes Verhalten auf. Die Wucht des Unterwasserjets verursacht durch Verwirbelungen im Unterwasserjet ein Luftblasenpolster, das großen Blasen annähernd konstant bis etwa 2019 müA transportiert (etwa 24 m im Modell, entspricht etwa 131 m im Prototyp). Große Blasen werden im Bereich des konzentrierten Jets stoßweise in den Schacht nach unten bis auf eine Tiefe von etwa 2008 müA transportiert. Die Eindringtiefe entspricht etwa 35 m im Prototyp (entspricht etwa 192 m im Prototyp) und liegt somit mehr als 30 m über dem Wert bei Verwendung des Dämpfungselements (etwa 4 m im Modell). Die Eindringung kleiner Blasen bis mindestens auf Höhe der Unterkammer kann mit freiem Auge erkannt werden.

Im Anschluss an den Lastfall wird das Verhalten bei Anhebung des Wasserspiegels auf 2047 müA betrachtet, als Durchfluss wird weiter der Bemessungsdurchfluss von etwa 16 l/s herangezogen. Die Fallhöhe beträgt in der aktuellen Betrachtung nur mehr 1 m (für den Prototyp). Durch die geringe Fallhöhe kann sich kein turbulenter Jet an der Atmosphäre bilden, es entsteht keine Aufteilung in Wasserpakete. Die volle Wucht des Oberkammerschwall wird direkt in die Wasseroberfläche im Steigschacht eingebracht und verursacht so im Bereich unter der Wasseroberfläche einen annähernd konstanten Unterwasserjet. Es kann beobachtet werden, dass das Luftblasenpolster annähernd konstant bis auf eine Tiefe von etwa 2010 müA eindringt. Vereinzelt Luftblasen werden bis auf eine Tiefe von etwa 2004 müA transportiert, dies entspricht 43 m im Modell und umgerechnet im Froude'schen Maßstab etwa 236 m im Prototyp.

Diese Untersuchungen für stationäre Abflüsse zeigen, dass das nicht-Abreißen des Wasserfalls auf der Kote 2043 müA bzw. 2047 müA sehr große Eindringtiefen mit sich bringen. Aufgrund einer sich einstellenden Makroturbulenz wird dabei auch das ermittelte Umrechnungsverhältnis mittels dem Froude'schen Geschwindigkeitsfaktor überschritten. Die Untersuchungen bestätigen die definierten ungünstigen Randbedingungen für den Bemessungslastfall des Dämpfungselements – hohe Wassermenge bei geringer Fallhöhe des Wasserfalls.

6.2 Fazit

Ziel der Untersuchungen ist es die Dissipationseigenschaften eines auftretenden Wasserfalls im Wasserschloss Krespa zu untersuchen um sowohl spezifische als auch allgemeine Aussagen treffen zu können. Zur Vermeidung von großen Eindringtiefen eines Wasserfalls resp. von mitgerissenen Luftblasen wird ein Dämpfungselement in die Kopfkaverne eingebaut. Dieses hat den Zweck den Abfluss aus der Oberkammer im Bereich der Kopfkaverne zu verringern und einen einzelnen kompakten Jet (Wasserfall) auf viele kleine Jets aufzuteilen um die konzentrierte Energie bei Auftreffen der Jets auf die Wasseroberfläche im Steigschacht zu verteilen. Die Untersuchungen werden in mehreren konstant gehaltenen Lastfällen mit vordefinierten Durchflüssen und Wasserständen durchgeführt.

Die Endgeschwindigkeit der großen Luftblasen in absinkender Richtung kann mit etwa 0,2 m/s bestätigt werden. Dies definiert somit das Gleichgewicht der maximalen Luftpindringtiefe von eingebrachter Luft. Die Modelluntersuchung der Eindringtiefe der Luftblasen findet somit Übereinstimmung mit in vorhergehenden wissenschaftlichen Veröffentlichungen zur Thematik des Luftpintrags in Wasser.

Das in vorhergehenden wissenschaftlichen Untersuchungen erkannte Verhalten des Jets in Bezug auf Belüftung und Turbulenz an der Atmosphäre kann bestätigt werden. Bei großen Fallhöhen tendiert der kompakte Oberkammerschwall im Steigschacht dazu sich in einzelne Wasserpakete aufzuteilen, was im Bereich des auftreffenden Jets in ein stoßartiges Einbringen der Luftblasen unter die Wasseroberfläche und einer starken Fluktuation des Unterwasserjets über den gesamten Querschnitt des Steigschachtes resultiert.

Umrechnung der Endgeschwindigkeit und maximalen Eindringtiefe der kleinen Luftblasen durch den Froude'schen Modellmaßstab finden durch Messungen an mehreren vordefinierten Lastfällen am Modell ihre Bestätigung.

Die Untersuchungen ohne Dämpfungselement zeigt sehr hohe Luftpindringtiefen auf welche zu verhindern sind. Zur Vermeidung der Einbringung der Luftblasen in den Bereich der Unterkammern bei spezifischen Resonanzschaltungen im Betrieb des Pumpspeicherkraftwerks Obervermuntwerk II und einen regulierten Unterwasser-Jet wird der Einbau des Dämpfungselements in der Kopfkaverne des Wasserschloss Krespa notwendig.

Aufgrund der Blasengrößenbetrachtung bei steigendem Umgebungsdruck (Eindringtiefe) wird davon ausgegangen dass bis in sehr große Tiefen die definierten mindest-Einzelblasen-Aufstiegsgeschwindigkeiten von 0,2 m/s nicht wesentlich unterschritten werden.

Die ungünstige Randbedingung bezüglich der Eindringtiefe eines Wasserfalls bzw. von Luftblasen stellt eine geringe Fallhöhe mit großer Wassermenge dar. Dies bestätigt die Annahme des Bemessungslastfalls für die Dimensionierung des Dämpfungselements.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Prinzipskizze PSKW, Pump- und Turbinenbetrieb (Strobl, et al., 2006)	1
Abbildung 2: Wirkungsgrad Wasserkraft (Giesecke, et al., 2009)	6
Abbildung 3: Brutto- und Nettofallhöhe (Patt, et al., 2011)	8
Abbildung 4: Auswahl der Turbinenart (Strobl, et al., 2006)	9
Abbildung 5: PSKW – Schema (Seeber, 1999)	10
Abbildung 6: Aufbau unterschiedlicher Maschinenkonzepte (Voith-Hydro, 2012)	12
Abbildung 7: Einsatzgrenzen unterschiedlicher Maschinenkonzepte (Voith-Hydro, 2012).....	12
Abbildung 8: Hydraulischer Kurzschluss (Illwerke VWK Magazin, 2010)	14
Abbildung 9: Druckstoß und Massenschwingung (Richter, et al., 2014)	18
Abbildung 10: Einfluss der Schließzeit auf den Joukowski-Stoß (Giesecke, et al., 2009)	20
Abbildung 11: Anordnung von Druckausgleichsbauwerken (Giesecke, et al., 2009)	24
Abbildung 12: Bauweisen von Wasserschlossern (Strobl, et al., 2006).....	24
Abbildung 13: Differentialwasserschloss (Giesecke, et al., 2009)	26
Abbildung 14: Systemskizze des OVW II (Vorarlberger Illwerke AG, 2012).....	27
Abbildung 15: Kraftwerksgruppe Obere III – Lünensee (Illwerke VWK Magazin, 2010)	28
Abbildung 16: Längsschnitt OVW II (Zenz, et al., 2014)	30
Abbildung 17: 3D-Darstellung des Wasserschloss Krespa.....	31
Abbildung 18: Längsschnitt Entwurf Wasserschloss Krespa (Zenz, et al., 2014)	32
Abbildung 19: Kriterien mechanischer Ähnlichkeit.....	34
Abbildung 20: Lufteinschluss bei Auftreffen des Jets auf die Wasseroberfläche (Danciu, 2011)	37
Abbildung 21: Lufteintrag eines Jets (Danciu, 2011)	38
Abbildung 22: Maximale Eindringtiefe von Luftblasen (Clanet, et al., 1997).....	39
Abbildung 23: Eindringtiefe der Luftblasen (Ervine, et al., 1987).....	41
Abbildung 24: Grundaufbau und Hauptbestandteile des PIV (Strobl, et al., 2006)	44

Abbildung 25: Wellenlänge des Lasers (Trotec Leipzig).....	45
Abbildung 26: Gefahren beim Umgang mit Lasern (AUVA, 2014).....	46
Abbildung 27: Aufweitung des Lasers (Nitsche, et al., 2006)	46
Abbildung 28: PIV Messung (Dantec Dynamics, 2013).....	47
Abbildung 29: Interrogation Areas (Choi, et al., 2011).....	48
Abbildung 30: Modell des Wasserschloss Krespa (Zenz, et al., 2014).....	50
Abbildung 31: 3D-CFD Wasserfallsimulation im Wasserschloss (Richter, et al., 2014)	51
Abbildung 32: Dämpfungselement in der Kopfkaverne (Zenz, et al., 2014)	52
Abbildung 33: Schnitt A-A des Dämpfungselements (Zenz, et al., 2014).....	52
Abbildung 34: Oberkammeranschluss – alt (Ruetz, 2014)	53
Abbildung 35: Oberkammeranschluss - neu.....	53
Abbildung 36: Eingehauster Messbereich mit Warnleuchte	54
Abbildung 37: Modell Krespa - Messbereich mit PIV-Box und Unterkammern... 55	55
Abbildung 38: Schemaskizze Schnitt A-A (Höhe der PIV-Box)	56
Abbildung 39: Laser mit Teleskoparm	56
Abbildung 40: Laser geöffnet.....	57
Abbildung 41: Grobpositionierung der Base mit Hilfe der Deckplatte.....	58
Abbildung 42: Base mit oberer Deckplatte.....	58
Abbildung 43: Justierung der Base mit Hilfe der oberen Deckplatte.....	59
Abbildung 44: Laser, Schutzabdeckung, Base und Kalibrierrohr.....	59
Abbildung 45: Fokussierung der Messebene im Schacht.....	60
Abbildung 46: Befüllen des Schachtes für Kalibriervorgang mit Messlatte.....	61
Abbildung 47: Calibration - File.....	61
Abbildung 48: Kalibrieren der Software	61
Abbildung 49: Kopfkaverne mit Dämpfungselement und Messlatte (Zenz, et al., 2014)	62
Abbildung 50: Umbau der Kopfkaverne - Führungsrinne und Prallwand.....	62
Abbildung 51: Schemaskizze der betrachteten Lastfälle (LF1a - 2000 müA, LF1b - 2023 müA, LF2a – 2006 müA, LF2b – 2023 müA, LF2c – 2043 müA)	64

Abbildung 52: Wasserstände und Durchflüsse am Wasserschloss.....	65
Abbildung 53: Beobachtungsfeld für die PIV – Messungen in der PIV - Box.....	66
Abbildung 54:LF1a - 0326_142131#02 - Vergleich eines Vektorplots vertikaler Geschwindigkeit in aufsteigender und absinkender Richtung ausgewertet.....	67
Abbildung 55: Durchfluss für Lastfall 1a (2000 müA)	68
Abbildung 56: Luftblaseneindringtiefe LF1a.....	68
Abbildung 57: PIV-Messung von LF1a (von linker Seite eindringendes Laserlicht).....	69
Abbildung 58: Schemaskizze Ergebnisse LF1a mit Dämpfungselement, WSP 2000 müA, Fallhöhe des Wasserfalls 1,6 m (48 m Prototyp), Q 3 l/s (15 m ³ /s Prototyp), EDT der Luftblasen ca. 4 m bis 4,5 m (22 m bis 25 m Prototyp)	70
Abbildung 59: Vektorplot vertikaler Geschwindigkeitsverteilung - LF1a_0326_140759#27	71
Abbildung 60: Vektorplot vertikaler Geschwindigkeitsverteilung - LF1a - 0326_142131#32	71
Abbildung 61: Zusammenfassung der Vektorplots für LF1a, vertikale Geschwindigkeiten, Fallhöhe Wasserfall 1,6 m (48 m Prototyp), Q 3 l/s (15 m ³ /s Prototyp), EDT Luftblasen im Mittel 4 m (22 m Prototyp) EDT Ausreißer bis ca. 5,5 m (30 m Prototyp).....	72
Abbildung 62: Durchfluss für Lastfall 1b (2023 müA)	73
Abbildung 63: konstanter Pegel 2023 müA für Lastfall 1b.....	74
Abbildung 64: PIV-Messbereich bei Pegel 2023 müA	74
Abbildung 65: Schemaskizze Ergebnisse LF1b mit Dämpfungselement, WSP 2023 müA, Fallhöhe des Wasserfalls 0,83 m (25 m Prototyp), Q 6,1 l/s (30m ³ /s Prototyp), EDT kleiner Luftblasen ca.26 m (142m Prototyp).....	75
Abbildung 66: Vektorplot vertikaler Geschwindigkeitsverteilung - LF1b - 0331_133556#47	76
Abbildung 67: Vektorplot vertikaler Geschwindigkeitsverteilung - LF1b - 0427_093346#93	76
Abbildung 68: Zusammenfassung der Vektorplots für LF1b, vertikale Geschwindigkeiten, Fallhöhe des Wasserfalls 0,83 m (25 m Prototyp), Q 6,1 l/s (30 m ³ /s Prototyp), EDT Luftblasen im Mittel bei 1997 müA = 26 m (142 m Prototyp), EDT Ausreißer bis 1992 müA = 31m (170 m Prototyp)	77
Abbildung 69: Lenkung des Zuflusses nach Ausbau des Dämpfungselements .	78
Abbildung 70: Durchfluss für Lastfall 2a (2006 müA)	79

Abbildung 71: Lufteindringtiefe bei WSP 2000 müA ohne Dämpfungselement..	79
Abbildung 72: Luftblaseneindringtiefe LF2a mit WSP 2006 müA	80
Abbildung 73: Schemaskizze Ergebnisse LF2a ohne Dämpfungselement, WSP 2006 müA, Fallhöhe des Wasserfalls 1,4 m (42 m Prototyp), Q 3 l/s (15 m ³ /s Prototyp), EDT Luftblasen stoßweise ca.12 m – 16 m (66 m – 88 m Prototyp).....	81
Abbildung 74: Vektorplot vertikaler Geschwindigkeitsverteilung - LF2a - 0609_151025#112	82
Abbildung 75: Vektorplot vertikaler Geschwindigkeitsverteilung - LF2a - 0609_155004#74	82
Abbildung 76: Zusammenfassung der Vektorplots für LF2a, vertikale Geschwindigkeiten, Fallhöhe des Wasserfalls 1,4 m (42 m Prototyp), Q 3 l/s (15 m ³ /s Prototyp), EDT Luftblasen im Mittel bei 1994 müA = 12 m (66 m Prototyp), EDT Ausreißer bis 16 m (88 m Prototyp).....	83
Abbildung 77: Luftblaseneindringtiefe bei WSP 2010 müA	84
Abbildung 78: Luftblaseneindringtiefe bei WSP 2015 müA	85
Abbildung 79: Luftblaseneindringtiefe bei WSP 2019 müA	85
Abbildung 80: Durchfluss für Lastfall 2b (2023 müA)	86
Abbildung 81: konstanter Pegel 2023 müA für Lastfall 2b.....	87
Abbildung 82: Schemaskizze Ergebnisse LF2b ohne Dämpfungselement, WSP 2023 müA, Fallhöhe des Wasserfalls 0,83 m (25 m Prototyp), Q 6,1 l/s (30m ³ /s Prototyp), EDT kleiner Luftblasen bis unter den Messbereich	88
Abbildung 83: Vektorplot vertikaler Geschwindigkeitsverteilung - LF2b - 0615_090629#25	89
Abbildung 84: Vektorplot vertikaler Geschwindigkeitsverteilung - LF2b - 0615_092550#26	89
Abbildung 85: Zusammenfassung der Vektorplots für LF2b, vertikale Geschwindigkeiten, Fallhöhe des Wasserfalls 0,83 m (25 m Prototyp), Q 6,1 l/s (30 m ³ /s Prototyp), EDT Luftblasen bis unter den Messbereich unter 1992 müA = 31 m (170 m Prototyp).....	90
Abbildung 86: Lufteindringtiefe Blasenpolster bei Q 6 l/s und WSP 2043 müA (obere Ebene)	91
Abbildung 87: Lufteindringtiefe vereinzelter großer Blasen bei 6 l/s und WSP 2043 müA	92
Abbildung 88: Vektorplot vertikaler Geschwindigkeitsverteilung – LF2c – Q 6 l/s - 0615_102027#22	93
Abbildung 89: Vektorplot vertikaler Geschwindigkeitsverteilung – LF2c – Q 6 l/s - 0615_102738#23	93

Abbildung 90: Zusammenfassung der Vektorplots für LF2c, vertikale Geschwindigkeiten bei Q 6,1 l/s (30 m ³ /s Prototyp), Fallhöhe des Wasserfalls 0,17 m (5 m Prototyp), EDT Luftblasen bis unter den Messbereich 1992 müA = 51 m (279 m Prototyp).....	94
Abbildung 91: Schemaskizze Ergebnisse LF2c ohne Dämpfungselement, WSP 2043 müA, Fallhöhe des Wasserfalls 0,17 m (5 m Prototyp), Q 16,2 l/s (80 m ³ /s Prototyp), EDT großer Luftblasen bis 2019 müA = 24 m (131 m Prototyp), Ausreißer bis ca. 2008 müA = 35 m (192 m Prototyp), EDT kleiner Luftblasen bis unter den Messbereich.....	95
Abbildung 92: Durchfluss für Lastfall 2c (2043 müA).....	96
Abbildung 93: Wasserfall bei Bemessungsdurchfluss.....	96
Abbildung 94: oberer Luftblasenpolster bei 16 l/s und WSP 2043 müA.....	97
Abbildung 95: Lufteindringtiefe großer Blasen bei 16 l/s und WSP 2043 müA... ..	97
Abbildung 96: Lufteindringtiefe bei Q 16 l/s (Modell) & WSP 2047 müA – etwa 43 m (Prototyp).....	98
Abbildung 97: LF1a_0326_140759#11.....	122
Abbildung 98: LF1a_0326_142131#166.....	122
Abbildung 99: LF1b_0331_133556#28.....	122
Abbildung 100: LF1b_0331_133556#186.....	122
Abbildung 101: LF2a_0609_151025#108.....	123
Abbildung 102: LF2a_0609_155004#36.....	123
Abbildung 103: LF2b_0615_090629#147.....	123
Abbildung 104: LF2b_0615_092550_44.....	123
Abbildung 105: LF2c_Q6l/s_0615_102027#77.....	123
Abbildung 106: LF2c_Q6l/s_0615_102738#53.....	123
Abbildung 107: Stellschrauben für Umlenkspiegel der Base.....	124
Abbildung 108: Output Mirror Laser 2 (Justierung von Laser 2).....	124
Abbildung 109: Sicherheitsabdeckung zwischen Laser und Base.....	124
Abbildung 110: Kalibrierung des Lasers mit Hilfe des Kalibrierrohrs.....	124
Abbildung 111: Terminal mit Auswertesoftware DynamicStudio©.....	125
Abbildung 112: verwendete CCD-Kamera.....	125
Abbildung 113: Laser - Kühlaggregat.....	125

Abbildung 114: Laserschutzbrille	125
Abbildung 115: horizontal- und vertikale Aufteilung des Oberkammerschwalls	126
Abbildung 116: EDT der Luftblasen bei LF1a	126
Abbildung 117: Messung von LF1b	126
Abbildung 118: Laserebene bei LF1b	126
Abbildung 119: Bemessungsdurchfluss ohne Dämpfungselement in der Oberkammer	127
Abbildung 120: EDT des gedrunghenen Jets bei WSP 2000 müA bis Höhe UK	127
Abbildung 121: Messaufbau für LF2b	127
Abbildung 122: EDT Luftblasen bei LF2c	127

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vergleich unterschiedlicher Kraftwerkstypen (Giesecke, et al., 2009) .	7
Tabelle 2: Vergleich ternärer MS und Pumpturbine (Jansen, et al., 2011)	15
Tabelle 3: Technische Daten des OVW II.....	27
Tabelle 4: Ähnlichkeit von Modell und Natur (Strobl, et al., 2006)	34
Tabelle 5: Umrechnungsfaktoren für das Froude'sche Ähnlichkeitsgesetz (Bollrich, 1989)	36
Tabelle 6: Änderung des Luftblasenvolumens pro Eindringtiefe	42
Tabelle 7: Einzelkomponenten für die Messung.....	49
Tabelle 8: Durchflüsse der betrachteten Lastfälle.....	65

Literaturverzeichnis

Adventures in Loom-Science [Online] // Adventures in Loom-Science. - 31. Juli 2015. - <https://loomsci.wordpress.com/>.

AUVA Grundlagen der Lasersicherheit [Bericht]. - Wien : Allgemeine Unfallsversicherungsanstalt, 2014.

Bollrich Gerhard Technische Hydromechanik Band 2 [Buch]. - [s.l.] : Verlag für Bauwesen, 1989. - Bd. 1.

Bollrich Gerhard und Preißler Günter Technische Hydromechanik Band 1 [Buch]. - Berlin : Verlag für Bauwesen GmbH, 1993. - 3.

Choi Sung Min [et al.] Blood cell assisted in vivo Particle Image Velocimetry using the confocal laser scanning microscope [Bericht]. - [s.l.] : Optical Society of America, 2011.

Clanet Christoper und Lasheras Juan C. Depth of penetration of bubbles entrained by a plunging water jet [Bericht]. - 1997.

Danciu Dana V. Experimental Investigations on Air Entrainment under Impinging Jets [Bericht]. - Dresden : [s.n.], 2011.

Dantec Dynamics Dantec Dynamics [Online]. - 2013. - 11. Februar 2015. - <http://www.dantecdynamics.com/measurement-principles-of-piv>.

Dobler Wolfgang HYdraulic Investigations of a Y-bifurcator [Buch]. - Graz : Technische Universität Graz, 2012.

Ervine D. A. und Falvey H. T. Behaviur of turbulent water jets in the atmosphere and in plunge pools [Bericht]. - [s.l.] : Water Engineering Group, 1987.

Giesecke Jürgen und Monsonyi Emil Wasserkraftanlagen: Planung, Bau und Betrieb [Buch]. - [s.l.] : Springer Verlag, 2009. - 5.

Heimerl Stephan Wasserkraftprojekte [Buch]. - Wiesbaden : Springer Verlag, 2013.

Illwerke Illwerke.at [Online] // Illwerke.at. - 9. März 2015. - <http://www.illwerke.at/inhalt/at/182.htm>.

Illwerke VWK Magazin Nachhaltigkeit [Artikel] // Wie Illwerke VKW für Nachfolgende Generationen die Zukunft mitgestaltet. - Juni 2010. - S. 32.

Jansen Oliver und Schöner Tobias Pumpspeicherkraftwerke - Vergleich unterschiedlicher Konzepte den Regelbedarf der Zukunft sichern [Bericht]. - Heidenheim : Voith Hydro Holding GmbH, 2011.

Landolt-Börnstein Renewable Energy: Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology - New Series / Advanced Materials and Technologies [Buch]. - [s.l.] : Springer Verlag, 2006.

Litfin Gerd Technische Optik in der Praxis [Buch]. - [s.l.] : Springer Verlag, 2005. - 3.

Nitsche Wolfgang und Brunn Andre Strömungsmesstechnik [Buch]. - [s.l.] : Springer Verlag, 2006. - 2.

Patt Heinz und Gonsowski Peter Wasserbau: Grundlagen, Gestaltung von wasserbaulichen Bauwerken und Anlagen [Buch]. - [s.l.] : Springer Verlag, 2011. - Bd. 7.

Richter Wolfgang [et al.] Hybrid Modelling and Development of a long Upper Chamber in a Surge Tank [Bericht]. - Graz : [s.n.], 2014.

Ruetz Matthias Particle Image Velocimetry (PIV) Messungen am Modellversuch Wasserschloss Krespa [Bericht]. - [s.l.] : TU Graz, 2014.

Schröder Wolfgang [et al.] Grundlagen des Wasserbaus: Hydrologie - Hydraulik - Wasserrecht [Buch]. - [s.l.] : Werner Verlag, 1999. - 4.

Schwab Adolf J. Elektroenergiesysteme: Erzeugung, Transport, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie [Buch]. - 2009. - 2.

Seeber Gerhard Druckstollen und Druckschächte [Buch]. - Stuttgart - New York : ENKE, 1999.

Strobl Theodor und Zunic Franz Wasserbau: Aktuelle Grundlagen - Neue Entwicklungen [Buch]. - [s.l.] : Springer Verlag, 2006.

Thoma D. Theorie des Wasserschlosses bei selbsttätig geregelten Turbinenanlagen [Buch]. - Dissertation, Kgl. Technische Hochschule zu Mnchen : R. Oldenbourg, 1910.

Trotec Leipzig Trotec Leipzig: Laser - Marking - Cutting - Engraving [Online]. - 03. März 2015. - <http://trotec-leipzig.de/nd-yag-wissen.html>.

Voith-Hydro Dialogforum Pumpspeicher [Konferenz]. - Berlin : Voith-Hydro, 2012.

Vorarlberger Illwerke AG Obervermuntwerk II - Projektzeitschrift [Bericht]. - 2012.

Zenz Gerald [et al.] Endbericht Wasserschloss Krespa OVW II [Bericht]. - Graz : TU Graz, 2014.

Zenz Gerald [et al.] Modellbericht Wasserschloss Krespa - PSKW Obervermuntwerk II [Bericht]. - Graz : TU Graz, 2014.

7 Anhang

7.1 Matlab Code

Vorbereitung der Daten aus Dynamic - Studio für die Auswertung mit Matlab und Darstellung über Vektorplots:

```
%Löschen von nicht numerischen Spalten in Text-Files
%source: https://www.mathworks.com/matlabcentral/newsreader/view\_thread/173648

clear all
close all
clc

cd('C:\DATEN\UNI\MASTER\MA\Messungen\Auswertungen\0420_100055_adaptive\data')
n=input('Bitte Anzahl der dat-Dateien eingeben: ');
for k=0:n
    if k<10
        fid=fopen(sprintf('0417_100055_adaptive_central.45c5afzu.00000%d.dat',k)) ; %
the original file
        fidd=fopen(sprintf('DD%d.dat',k),'w') ; % the new file
        while ~feof(fid) ; % reads the original till last line
            tline=fgets(fid) ; %
                if isletter(tline(1))==1 ;
                    else
                        fwrite(fidd,tline) ;
                    end
                end
            elseif k<100
                fid=fopen(sprintf('0417_100055_adaptive_central.45c5afzu.0000%d.dat',k)) ; %
the original file
                fidd=fopen(sprintf('DD%d.dat',k),'w') ; % the new file
                while ~feof(fid) ; % reads the original till last line
                    tline=fgets(fid) ; %
                        if isletter(tline(1))==1 ;
                            else
                                fwrite(fidd,tline) ;
                            end
                        end
                    end
                else
                    fid=fopen(sprintf('0417_100055_adaptive_central.45c5afzu.0000%d.dat',k)) ; %
the original file
                    fidd=fopen(sprintf('DD%d.dat',k),'w') ; % the new file
                    while ~feof(fid) ; % reads the original till last line
                        tline=fgets(fid) ; %
                            if isletter(tline(1))==1 ;
                                else
                                    fwrite(fidd,tline) ;
                                end
                            end
                        end
                    end
                fclose all ;
            end
        end
    end
end
```

Darstellung der Vektorplots in den Grenzen $\pm 0,5$ m/s in absinkender Richtung:

```
%Skript zum Darstellen der Vektorfelder (0505_002_abwaerts)
%n=Zahl der Datensätze, die dat-Dateien müssen DD1.dat...DDn.dat heißen
%Grundlage dieses Skriptes sind die Matlab-Skripte von (Dobler 2012) und (Link 2006)

clear all
close all
```

```
clc

%VARIABLES= "x" "y" "x (pix)" "y (pix)" "x (mm)" "y (mm)" "U pix" "V pix" "U" "V"
"Length" "Status"
cd('C:\DATEN\UNI\MASTER\MA\Messungen\Auswertungen\0326_140759_adaptive\data')
n=input('Bitte Anzahl der dat-Dateien eingeben: ');

for k=0:n %Schleife zum Plotten und Speichern der Vektorfelder aus den PIV Messungen
    data = load (sprintf('DD%d.dat',k)); %Laden der dat Files

    matrix = data;
    MATRIX_UI(:,1)=data(:,9).*1.0;
    MATRIX_VI(:,1)=data(:,10).*1.0;

    XI= data(:,3);
    Dx = max(XI(2:end,1)-XI(1:end-1,1));

    YI= data(:,4);
    Dy =max(YI(2:end,1)-YI(1:end-1,1));

    UI=nanmean(MATRIX_UI,2);
    VI=nanmean(MATRIX_VI,2);
    VELI = sqrt(UI.^2+VI.^2);
    Xrange = [nanmin(XI(:)):Dx:nanmax(XI(:))];
    Yrange = [nanmin(YI(:)):Dy:nanmax(YI(:))];
    [X,Y] = meshgrid(Xrange,Yrange);
    U = griddata(XI,YI,UI,X,Y);
    V = griddata(XI,YI,VI,X,Y);
    Vel = griddata(XI,YI,VELI,X,Y);

    close all
    MIN_ = -0.50;
    MAX_ = 0.50;
    STEP_CONT = 0.02;
    COLOR_BAR_MIN_ = abs(MIN_/STEP_CONT);
    COLOR_BAR_MAX_ = abs(MAX_/STEP_CONT);

    close all
    figure('Visible','on')
    axes('position',[0.02 0 0.96 1])
    [C,h,CF] =contourf(X,Y,V,[MIN_:STEP_CONT:MAX_]);

    hold on
    quiver(X,Y,U./Vel,V./Vel,0.5,'Color','Black')
    axis equal

    axis off
    %Contourbalken erst.: Color_bar_min gibt die Anzahl der Farbbalken an
    COLORMAP_TUGRAZ_ =[flipud(jet(COLOR_BAR_MIN_));flipud(copper(COLOR_BAR_MAX_))];
    colormap(COLORMAP_TUGRAZ_);

    %Contourbalken: Auf MIN MAX skalieren
    set(gca,'Clim',[MIN_ MAX_])

    %Contourbalken erstellen
    colorbar('location','northoutside','XTick',str2num(sprintf('%0.3f',MIN_)):...
str2num(sprintf('%0.3f',STEP_CONT))*3:str2num(sprintf('%0.3f',MAX_)));

    axis equal

    speichern=sprintf('down_0505_002_%d',k); %Erstellt Bezeichnung des entspr.
Geschw.-Felds

    print('-djpeg',speichern); %speichert Bild in .jpeg-File
end
clear Ui Vi VELI Xrange Yrange X Y U V Vel MATRIX_UI MATRIX_VI
close all
clc
```

Darstellung der Vektorplots in den Grenzen $\pm 0,5$ m/s in aufsteigender Richtung:

```
%Skript zum Darstellen der Vektorfelder(0505_002_aufwaerts)
%n=Zahl der Datensätze, die dat-Dateien müssen DD1.dat...DDn.dat heißen
%Grundlage dieses Skriptes sind die Matlab-Skripte von (Dobler 2012) und (Link 2006)

clear all
close all
clc

%VARIABLES= "x" "y" "x (pix)" "y (pix)" "x (mm)" "y (mm)" "U pix" "V pix" "U" "V"
"Length" "Status"
cd('C:\DATEN\UNI\MASTER\MA\Messungen\Auswertungen\0429_110326_adaptive\data')
n=input('Bitte Anzahl der dat-Dateien eingeben: ');

for k=0:n %Schleife zum Plotten und Speichern der Vektorfelder aus den PIV Messungen
    data = load (sprintf('DD%d.dat',k)); %Laden der dat Files

    matrix = data;
    MATRIX_UI(:,1)=data(:,9).*1.0;
    MATRIX_VI(:,1)=data(:,10).*1.0;

    XI= data(:,3);
    Dx = max(XI(2:end,1)-XI(1:end-1,1));

    YI= data(:,4);
    Dy =max(YI(2:end,1)-YI(1:end-1,1));

    UI=nanmean(MATRIX_UI,2);
    VI=nanmean(MATRIX_VI,2);
    VELI = sqrt(UI.^2+VI.^2);
    Xrange = [nanmin(XI(:)):Dx:nanmax(XI(:))];
    Yrange = [nanmin(YI(:)):Dy:nanmax(YI(:))];
    [X,Y] = meshgrid(Xrange,Yrange);
    U = griddata(XI,YI,UI,X,Y);
    V = griddata(XI,YI,VI,X,Y);
    Vel = griddata(XI,YI,VELI,X,Y);

    close all
    MIN_ = -0.50;
    MAX_ = 0.50;
    STEP_CONT = 0.02;
    COLOR_BAR_MIN_ = abs(MIN_/STEP_CONT);
    COLOR_BAR_MAX_ = abs(MAX_/STEP_CONT);

    close all
    figure('Visible','on')
    axes('position',[0.02 0 0.96 1])
    [C,h,CF] =contourf(X,Y,V,[MIN_:STEP_CONT:MAX_]);

    hold on
    quiver(X,Y,U./Vel,V./Vel,0.5,'Color','Black')
    axis equal

    axis off
    %Contourbalken erst.: Color_bar_min gibt die Anzahl der Farbbalken an
    COLORMAP_TUGRAZ_ =[copper(COLOR_BAR_MIN_);jet(COLOR_BAR_MAX_)];
    colormap(COLORMAP_TUGRAZ_);

    %Contourbalken: Auf MIN MAX skalieren
    set(gca,'Clim',[MIN_ MAX_])

    %Contourbalken erstellen
    colorbar('location','northoutside','XTick',str2num(sprintf('%0.3f',MIN_)):...
    str2num(sprintf('%0.3f',STEP_CONT))*3:str2num(sprintf('%0.3f',MAX_)));

    axis equal

    speichern=sprintf('up_0505_002_%d',k); %Erstellt Bezeichnung des entspr. Geschw.-
    Felds
```

```

    print('-djpeg',speichern); %speichert Bild in .jpeg-File
end
clear Ui Vi VELI Xrange Yrange X Y U V Vel MATRIX_UI MATRIX_VI
close all
clc

```

Darstellung der Vektorplots in den Grenzen $\pm 0,2$ m/s in absinkender Richtung:

```

%Skript zum Darstellen der Vektorfelder (0202_001_abwaerts)
%Die dat-Dateien müssen als DD1.dat bis DDn.dat vorhanden sein
%VARIABLEN der dat-Files:
%"x" "y" "x (pix)" "y (pix)" "x (mm)" "y (mm)" "U pix" "V pix" "U" "V" "Length"
>Status"
%Grundlage dieses Skriptes sind die Matlab-Skripte von (Dobler 2012) und (Link 2006)

clear all
close all
clc

cd('C:\DATEN\UNI\MASTER\MA\Messungen\Auswertungen\0331_133556_adaptive\data')
n=input('Bitte Anzahl der dat-Dateien eingeben: ');

for k=0:n %Schleife zum Plotten und Speichern der Vektorfelder aus den PIV Messungen
    data = load (sprintf('DD%d.dat',k)); %Laden der dat Files

    MATRIX_UI(:,1)=data(:,9).*1.0;
    MATRIX_VI(:,1)=data(:,10).*1.0;

    XI= data(:,3);
    Dx = max(XI(2:end,1)-XI(1:end-1,1));

    YI= data(:,4);
    Dy =max(YI(2:end,1)-YI(1:end-1,1));

    UI=nanmean(MATRIX_UI,2);
    VI=nanmean(MATRIX_VI,2);
    VELI = sqrt(UI.^2+VI.^2);
    Xrange = [nanmin(XI(:)):Dx:nanmax(XI(:))];
    Yrange = [nanmin(YI(:)):Dy:nanmax(YI(:))];
    [X,Y] = meshgrid(Xrange,Yrange);
    U = griddata(XI,YI,UI,X,Y);
    V = griddata(XI,YI,VI,X,Y);
    Vel = griddata(XI,YI,VELI,X,Y);

    %Contourbalken-Skalierung-Daten
    close all
    MIN_ = -0.2;
    MAX_ = 0.2;
    STEP_CONT = 0.01;
    COLOR_BAR_MIN_ = abs(MIN_/STEP_CONT);
    COLOR_BAR_MAX_ = abs(MAX_/STEP_CONT);

    close all
    figure('Visible','on')
    axes('position',[0.02 0 0.96 1])
    [C,h,CF] =contourf(X,Y,V,[MIN_:STEP_CONT:MAX_]);

    %VECTORPLOT-Einstellung
    hold on
    quiver(X,Y,U./Vel,V./Vel,0.5,'Color','Black')
    axis equal

    axis off

    %Contourbalken-Farbskalar für Min & Max einstellen
    COLORMAP_TUGRAZ_ =[colorcube(COLOR_BAR_MIN_);flipud(copper(COLOR_BAR_MAX_))];
    colormap(COLORMAP_TUGRAZ_);

```

```

%Contourbalken-Skalieren auf MIN & MAX Wert
set(gca,'Clim',[MIN_ MAX_])

%Contourbalken-erstellen
colorbar('location','northoutside','XTick',str2num(sprintf('%0.3f',MIN_)):...
str2num(sprintf('%0.3f',STEP_CONT))*3:str2num(sprintf('%0.3f',MAX_)));

%Bezeichnung für jeweiliges Vektorfeld erstellen
speichern = sprintf('down_0202_001_%d',k);

%Speichern des Vektorfeldes als JPG Datei
print('-djpeg',speichern);
end
clear Ui Vi VELI Xrange Yrange X Y U V Vel MATRIX_UI MATRIX_VI
close all
clc

```

Darstellung der Vektorplots in den Grenzen $\pm 0,1$ m/s in absinkender Richtung:

```

%Skript zum Darstellen der Vektorfelder (0101_005_abwaerts)
%Die dat-Dateien müssen als DD1.dat bis DDn.dat vorhanden sein
%VARIABLEN der dat-Files:
%"x" "y" "x (pix)" "y (pix)" "x (mm)" "y (mm)" "U pix" "V pix" "U" "V" "Length"
"Status"
%Grundlage dieses Skriptes sind die Matlab-Skripte von (Dobler 2012) und (Link 2006)

clear all
close all
clc

cd('C:\DATEN\UNI\MASTER\MA\Messungen\Auswertungen\0420_100055_adaptive\data')
n=input('Bitte Anzahl der dat-Dateien eingeben: ');

for k=0:n %Schleife zum Plotten und Speichern der Vektorfelder aus den PIV Messungen
    data = load (sprintf('DD%d.dat',k)); %Laden der dat Files

    MATRIX_UI(:,1)=data(:,9).*1.0;
    MATRIX_VI(:,1)=data(:,10).*1.0;

    XI= data(:,3);
    Dx = max(XI(2:end,1)-XI(1:end-1,1));

    YI= data(:,4);
    Dy =max(YI(2:end,1)-YI(1:end-1,1));

    UI=nanmean(MATRIX_UI,2);
    VI=nanmean(MATRIX_VI,2);
    VELI = sqrt(UI.^2+VI.^2);
    Xrange = [nanmin(XI(:)):Dx:nanmax(XI(:))];
    Yrange = [nanmin(YI(:)):Dy:nanmax(YI(:))];
    [X,Y] = meshgrid(Xrange,Yrange);
    U = griddata(XI,YI,UI,X,Y);
    V = griddata(XI,YI,VI,X,Y);
    Vel = griddata(XI,YI,VELI,X,Y);

    %Contourbalken-Skalierung-Daten
    close all
    MIN_ = -0.1;
    MAX_ = 0.1;
    STEP_CONT = 0.005;
    COLOR_BAR_MIN_ = abs(MIN_/STEP_CONT);
    COLOR_BAR_MAX_ = abs(MAX_/STEP_CONT);

    close all
    figure('Visible','on')

```

```
axes('position',[0.02 0 0.96 1])
[C,h,CF] =contourf(X,Y,V,[MIN_:STEP_CONT:MAX_]);

%VECTORPLOT-Einstellung
hold on
quiver(X,Y,U./Vel,V./Vel,0.5,'Color','Black')
axis equal

axis off

%Contourbalken-Farbskalar für Min & Max einstellen
COLORMAP_TUGRAZ_ =[colorcube(COLOR_BAR_MIN_);flipud(copper(COLOR_BAR_MAX_))];
colormap(COLORMAP_TUGRAZ_);

%Contourbalken-Skalieren auf MIN & MAX Wert
set(gca,'Clim',[MIN_ MAX_])

%Contourbalken-erstellen
colorbar('location','northoutside','XTick',str2num(sprintf('%0.3f',MIN_)):...
str2num(sprintf('%0.3f',STEP_CONT))*3:str2num(sprintf('%0.3f',MAX_)));

%Bezeichnung für jeweiliges Vektorfeld erstellen
speichern = sprintf('down_0101_0005_%d',k);

%Speichern des Vektorfeldes als JPG Datei
print('-djpeg',speichern);
end
clear Ui Vi VELI Xrange Yrange X Y U V Vel MATRIX_UI MATRIX_VI
close all
clc
```

Erstellung eines zusammenfassenden Vektorplots in den Grenzen $\pm 0,5$ m/s:

```
%MA Urach Thomas 2015
%=====
%Skript zum Darstellen eines Zusammenfassenden Vektorfeldes für
einen LF
%n = Anzahl der Datensätze
%Die dat-Dateien müssen als DD1.dat bis DDn.dat vorhanden sein
%VARIABLEN der dat-Files:
%"x" "y" "x (pix)" "y (pix)" "x (mm)" "y (mm)" "U pix" "V pix" "U"
"V" "Length" "Status"
%Neunte und Zehnte Stelle der dat-files (U&V) sind wichtig für plots
%Gr Grundlage dieses Skriptes sind die Matlab-Skripte von (Dobler 2012)
und (Link 2006)

clear all
close all
clc

%VARIABLES= "x" "y" "x (pix)" "y (pix)" "x (mm)" "y (mm)" "U pix" "V
pix" "U" "V" "Length" "Status"
cd('C:\DATEN\UNI\MASTER\MA\Messungen\Auswertungen\V02\LF2a\alle\data
')
n=input('Bitte Anzahl der dat-Dateien eingeben: ');

for k=0:n %Anzahl der dat files
    grenzwert = -0.5;
```

```
if k==0 %beim ersten dat file soll alles in die matrix
geschrieben werden
    data = load (sprintf('DD%d.dat',k)); %Laden der dat Files
    matrix(:,1)=data(:,9); %U
    matrix(:,2)=data(:,10); %V
    matrix(:,3)=data(:,3); %X pix
    matrix(:,4)=data(:,4); %Y pix
else
    data = load (sprintf('DD%d.dat',k)); %Laden der dat Files
    for i=1:3969
        if (data(i,10)<matrix(i,2) && data(i,10)>grenzwert)
%wenn das neue V aus data kleiner als das alte V in der matrix ist
            matrix(i,1)=data(i,9);
            matrix(i,2)=data(i,10);
            matrix(i,3)=data(i,3);
            matrix(i,4)=data(i,4);
        end
    end
end

if k>(0.9*n)

    MATRIX_UI(:,1)=matrix(:,1).*1.0;
    MATRIX_VI(:,1)=matrix(:,2).*1.0;

    XI= matrix(:,3);
    Dx = max(XI(2:end,1)-XI(1:end-1,1));

    YI= matrix(:,4);
    Dy =max(YI(2:end,1)-YI(1:end-1,1));

    UI=nanmean(MATRIX_UI,2);
    VI=nanmean(MATRIX_VI,2);
    VELI = sqrt(UI.^2+VI.^2);
    Xrange = [nanmin(XI(:)):Dx:nanmax(XI(:))];
    Yrange = [nanmin(YI(:)):Dy:nanmax(YI(:))];
    [X,Y] = meshgrid(Xrange,Yrange);
    U = griddata(XI,YI,UI,X,Y);
    V = griddata(XI,YI,VI,X,Y);
    Vel = griddata(XI,YI,VELI,X,Y);

    close all
    MIN_ = -0.50;
    MAX_ = 0.50;
    STEP_CONT = 0.02;
    COLOR_BAR_MIN_ = abs(MIN_/STEP_CONT);
    COLOR_BAR_MAX_ = abs(MAX_/STEP_CONT);

    close all
    figure('Visible','on')
    axes('position',[0.02 0 0.96 1])
    [C,h,CF] =contourf(X,Y,V,[MIN_:STEP_CONT:MAX_]);

    hold on
    quiver(X,Y,U./Vel,V./Vel,0.5,'Color','Black')
    axis equal
```

```
axis off
%Contourbalken erst.: Color_bar_min gibt die Anzahl der
Farbbalken an
COLORMAP_TUGRAZ_
=[flipud(jet(COLOR_BAR_MIN_));flipud(copper(COLOR_BAR_MAX_))];
colormap(COLORMAP_TUGRAZ_);

%Contourbalken: Auf MIN MAX skalieren
set(gca,'Clim',[MIN_ MAX_])

%Contourbalken erstellen

colorbar('location','northoutside','XTick',str2num(sprintf('%0.3f',M
IN_)):...

str2num(sprintf('%0.3f',STEP_CONT))*3:str2num(sprintf('%0.3f',MAX_))
);

axis equal

speichern=sprintf('ZUS_down_0505_002_%d',k); %Erstellt
Bezeichnung des entspr. Geschw.-Felds

print('-djpeg',speichern); %speichert Bild in .jpeg-File

end

end
clear Ui Vi VELI Xrange Yrange X Y U V Vel MATRIX_UI MATRIX_VI
matrix
close all
clc
```

7.2 Vektorplots

Lastfall 1a:

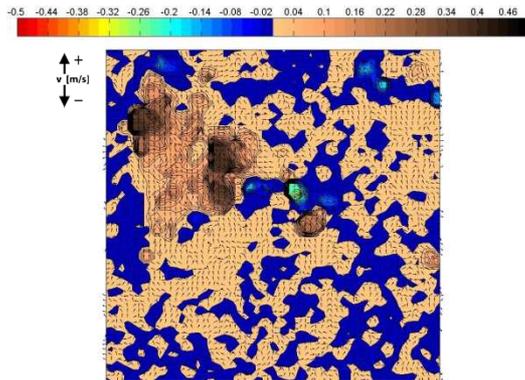


Abbildung 97: LF1a_0326_140759#11

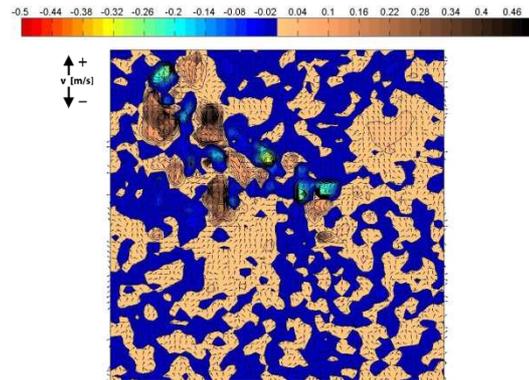


Abbildung 98: LF1a_0326_142131#166

Lastfall 1b:

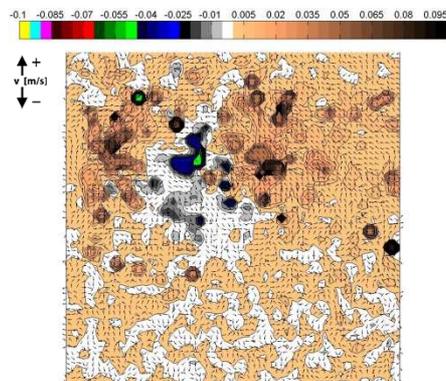


Abbildung 99: LF1b_0331_133556#28

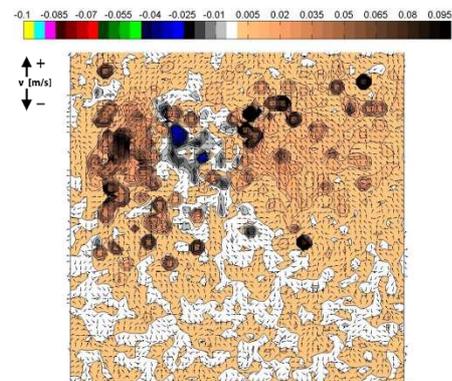


Abbildung 100: LF1b_0331_133556#186

Lastfall 2a:

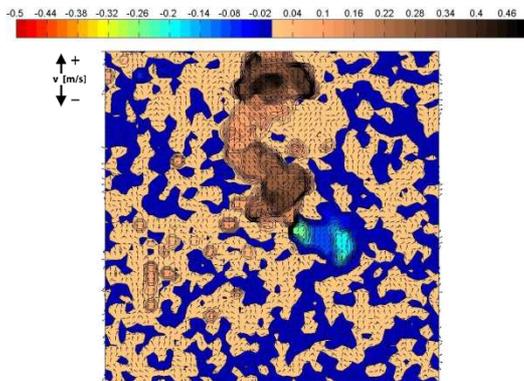


Abbildung 101: LF2a_0609_151025#108

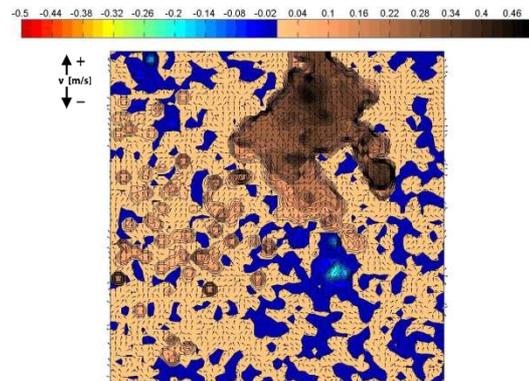


Abbildung 102: LF2a_0609_155004#36

Lastfall 2b:

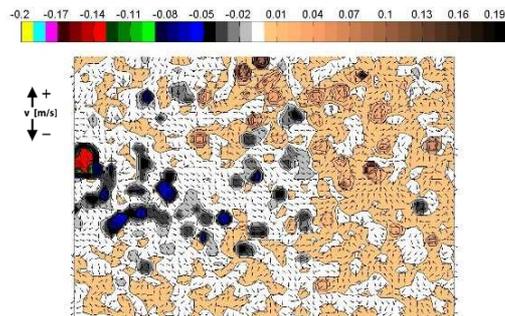


Abbildung 103: LF2b_0615_090629#147

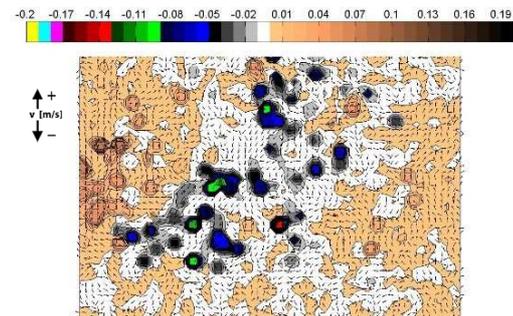


Abbildung 104: LF2b_0615_092550_44

Lastfall 2c:

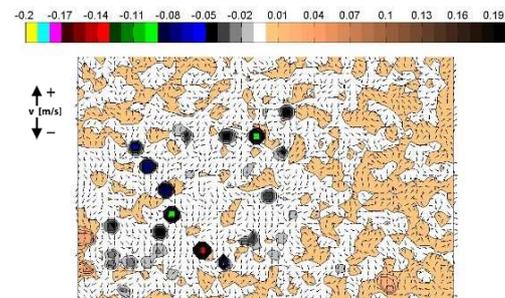


Abbildung 105: LF2c_Q6I/s_0615_102027#77

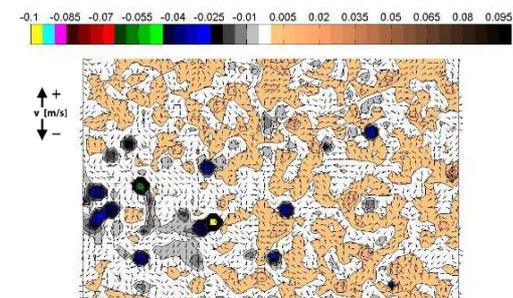


Abbildung 106: LF2c_Q6I/s_0615_102738#53

7.3 Bilder

Kalibriervorgang und Laserelemente:

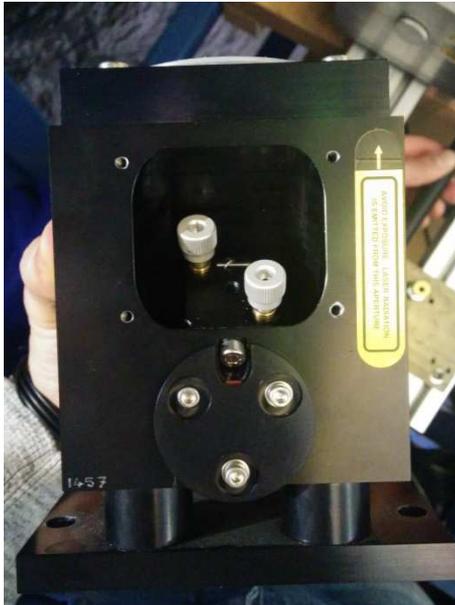


Abbildung 107: Stellschrauben für Umlenkspiegel der Base



Abbildung 108: Output Mirror Laser 2 (Justierung von Laser 2)

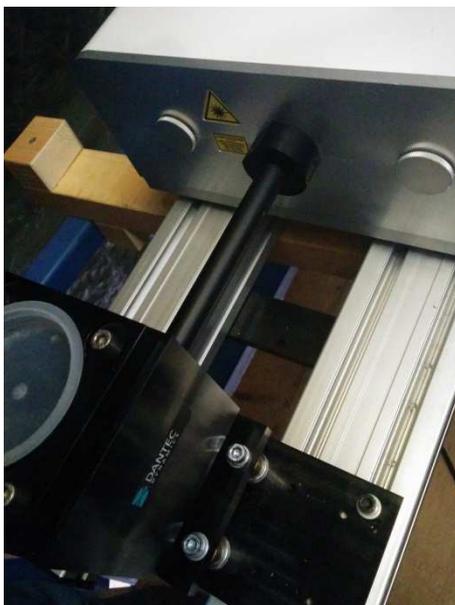


Abbildung 109: Sicherheitsabdeckung zwischen Laser und Base



Abbildung 110: Kalibrierung des Lasers mit Hilfe des Kalibrierrohrs

Bilder zur Vorbereitung vor den Messungen:



Abbildung 111: Terminal mit Auswertesoftware DynamicStudio©



Abbildung 112: verwendete CCD-Kamera



Abbildung 113: Laser - Kühlaggregat



Abbildung 114: Laserschutzbrille

Bilder zur Messung mit eingebautem Dämpfungselement in der Kopfkaverne:



Abbildung 115: horizontal- und vertikale Aufteilung des Oberkammerschwalls



Abbildung 116: EDT der Luftblasen bei LF1a



Abbildung 117: Messung von LF1b

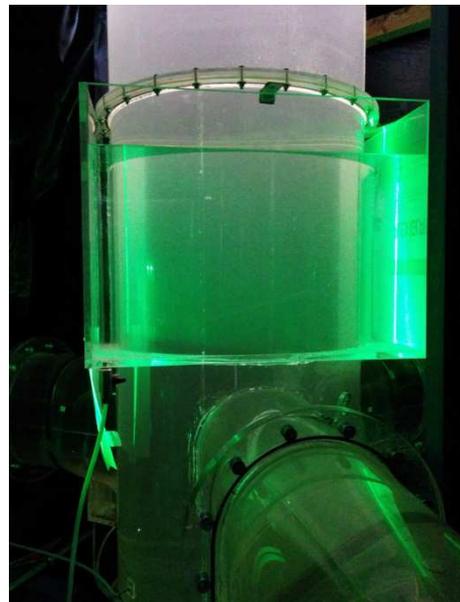


Abbildung 118: Laserebene bei LF1b

Bilder zur Messung ohne eingebautem Dämpfungselement in der Kopfkaverne:



Abbildung 119: Bemessungsdurchfluss ohne Dämpfungselement in der Oberkammer

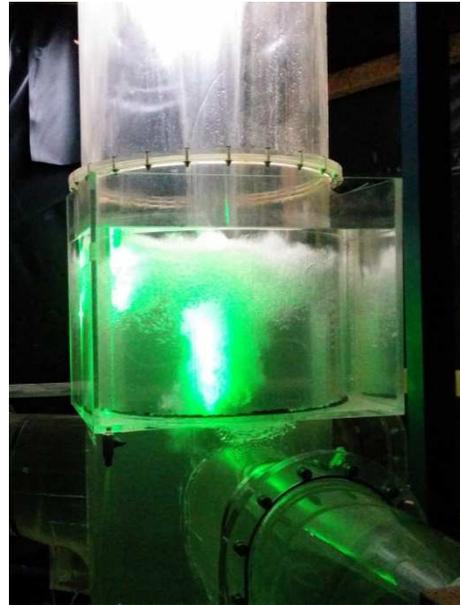


Abbildung 120: EDT des gedrunenen Jets bei WSP 2000 müA bis Höhe UK



Abbildung 121: Messaufbau für LF2b



Abbildung 122: EDT Luftblasen bei LF2c

